



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



# СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

настоящее и будущее

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

III Всероссийской научной конференции,  
посвящённой девяностолетию кафедры  
строительного материаловедения  
15 - 16 ноября 2023 года, НИУ МГСУ



УДК 691  
ББК 38.3  
С86

С86 **Строительное материаловедение: настоящее и будущее** [Электронный ресурс] : сборник материалов III Всероссийской научной конференции, посвящённой девяностолетию кафедры строительного материаловедения (г. Москва, 15–16 ноября 2023 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, институт промышленного и гражданского строительства — Электрон. дан. и прогр. (12,5 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2023. — URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7264-3347-9

В сборнике представлены результаты научных исследований, направленных на разработку новых технологических решений, обеспечивающих как повышение эксплуатационных свойств строительных материалов, традиционно применяемых в строительной практике, так и создание новых композитов, обладающих уникальным комплексом свойств, а также фундаментальных исследований в области строительного материаловедения.

Для научных сотрудников, аспирантов и обучающихся высших учебных заведений.

*Научное электронное издание*

*Материалы публикуются в авторской редакции.  
Авторы опубликованных тезисов докладов несут ответственность  
за достоверность приведенных в них сведений.*

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2023

Подбор материала и ответственные за выпуск:  
*С.И. Баженова, А.С. Пилипенко*

Кафедра строительного материаловедения,  
институт промышленного и гражданского строительства (ИПГС НИУ МГСУ)  
Тел . +7 (499) 183-32-29  
E-mail: isa-confero@mgsu.ru , PilipenkoAS@mgsu.ru, BazhenovaSI@mgsu.ru  
Сайт: [https://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/Str\\_materialov/index.php](https://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/Str_materialov/index.php)

Компьютерная верстка *А.С. Пилипенко*

Для создания электронного издания использовано:  
Microsoft Word 2010, ПО Adobe Acrobat

Подписано к использованию 22.11.2023. Объем данных 12,5 Мб.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет»  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

Издательство МИСИ–МГСУ.  
Тел.: (495) 287-4914, вн. 1423, (499) 183-91-90, (499) 183-97-95.  
E-mail: rio@mgsu.ru



### **Уважаемые коллеги!**

Перед вами сборник материалов участников III Всероссийской научной конференции «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», посвящённой девяностолетию кафедры строительных материалов.

Вот уже почти целый век наша кафедра занимается подготовкой кадров строительной отрасли и исследованиями в области строительного материаловедения. За это время на кафедре успело поработать множество ведущих учёных-материаловедов и технологов, внёсших значительный вклад в строительные науки России. Но ещё больше мы гордимся нашими коллегами со всех концов нашей необъятной страны и из-за её пределов, которые рады поддерживать дружеские отношения и совместно работать с нами!

Данный сборник – результат продуктивного сотрудничества, целью которого является апробация результатов научных исследований, направленных на разработку новых технологических решений, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств строительных материалов, как традиционно применяемых в строительной практике, так и создание новых композитов, обладающих уникальным комплексом свойств.

Мы, организаторы конференции, уверены, что представленные в сборнике тезисы докладов станут для всех нас прекрасным источником новых идей развития строительного материаловедения.

Надеемся на дальнейшее сотрудничество.

Желаем успехов и новых достижений в вашей профессиональной деятельности!

## Содержание

Алексеев В.А., Баженова С.И., Попов А.П., Алексеев А.А. Проблематика определения удельных расходов инъекционных смесей при ликвидации водопроявлений.....	10
Альобаиди Дия Абдулкадим Насер, Ларсен О.А. Исследование свойств доломитового микронаполнителя для бетонов сухого жаркого климата .....	15
Аниканова Л.А., Саркисов Ю.С., Первушина Д.М., Горленко Н.П., Волкова О.В. Процессы гидратации ангидритового вяжущего из вторичного сырья .....	22
Артамонова О.В. Особенности формирования модифицированных цементных композитов с эффектом самовосстановления структуры .....	28
Арчаков Р.М., Котляр В.Д. Технология свойства кирпича компрессионного формования на основе известняков Алкунского месторождения республики Ингушетия .....	32
Арчаков А.М., Лапунова К.А. Технология производства ригельного керамического кирпича на основе аржиллитов Алкунского месторождения республики Ингушетия .....	38
Аскадский А.А., Мацеевич Т.А. Градиентные материалы на основе полиуретанов.....	44
Баженова С.И., Ву Ким Зиен Модификации доменного шлака с помощью низкотемпературной неравновесной плазмы .....	48
Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Биленко Г.Р., Тюнюков И.А. Разработка вяжущего вещества на основе фосфогипса твердеющего по смешанному типу .....	53
Белов В.В., Горлов А.В. Неавтоклавный теплоизоляционный газобетон со стеклянным микронаполнителем из несортированного боя технического стекла .....	59
Брызгалов М.А. Химическое «программирование» реакций бетона .....	65
Бруяко М.Г., Ергенян А.М., Швецова В.А. Строительный композит на основе гипсового вяжущего и гидрофобизированного борщевика Сосновского .....	66

Бутенко К.А., Марков Ю.И., Ларсен О.А. Изучение состава и применение бетона на шлакощелочном вяжущем с заполнителем из стекольного боя.....	69
Бурлов И.Ю., Кривобородов Ю.Р. Синтез и свойства сульфоалюминатного клинкера на основе техногенных материалов .....	75
Валиев А.И., Сулейманов А.М. Гибридные полимерные композиционные материалы конструкционного назначения.....	80
Вишторский Е.М., Белов И.В., Парфенова М.О. Определение эксплуатационных свойств пенобетонов неавтоклавного твердения.....	84
Гарафиев А.М., Мухаметрахимов Р.Х. Структура и свойства модифицированного шунгитсодержащего бетона при электродном прогреве.....	89
Глазков Р.А., Коломыцева А.И. Влияние состава шлакощелочных вяжущих на условия твердения .....	95
Гордина А.Ф., Полянских И.С., Украинцева В.М. Газобетон неавтоклавного твердения на основе техногенного вяжущего.....	100
Горохов С.И., Назарчук А.П., Ковалев Н.С. Влияние повышенных температур на структуру и физико-механические характеристики ДВП.....	104
Доржиева Е.В., Шестаков Н.И., Аюрова О.Ж., Цыденова А.Б. Разработка биоразлагаемых композиционных материалов.....	110
Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Технологические свойства легких бетонов с повышенной подвижностью.....	113
Жуков А.Д., Ефимов Б.А., Демиссе Бекеле Арега, Маторин А.А. Оптимизация состава гидравлического вяжущего .....	119
Задорин А.А., Мишнев М.В., Королев А.С., Гусев Д.Д. Структурная многоэлементная модель полимерного материала с эффектом памяти о термомеханических воздействиях.....	124
Золотарева С.В., Ключев С.В., Аюбов Н.А. Цементобетоны для промышленности.....	128
Золотарева С.В., Ключев С.В. Анализ материалов аэродромных покрытий для их упрочнения.....	132
Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Активация вяжущих в высокоэнергетических устройствах.....	135

Калмакова П.С., Веселов В.К., Ларсен О.А. Исследование состава вулканического шлака дальнего востока для использования в конструкционном самоуплотняющемся бетоне .....	139
Клюев С.В., Лобов Д.М. Усиление деревянных конструкций композитным материалом на основе углеволокна .....	143
Ковалев Н.С., Назарчук А.П., Горохов С.И. Влияние попеременного замораживания-оттаивания на структуру и механические свойства ДВП. ....	148
Коваль Ю.Н. Об использовании побочного фосфогипса в строительных целях .....	154
Козлова В.К., Вольф А.В., Завадская Л.В., Божок Е.В., Саркисов Ю.С., Афанасьев Д.А. Углекислотная коррозия гипсоцементнозольного камня .....	156
Королев А.С., Мишнев М.В., Гусев Д.Д. Прогнозирование и регулирование модуля упругости цементных бетонов как метод повышения эффективности армированных пролетных конструкций ....	160
Куликов В.Г., Белоусов Г.Г. Оценка капиллярно-порового пространства пенобетонов.....	166
Лапунова К.А., Шарифова М.И. Эстетика и технология полимерного покрытия клинкерного кирпича .....	171
Лукутцова Н.П., Головин С.Н. Роль наноразмерных частиц в формировании структуры цементных композиционных материалов.....	175
Лхасаранов С.А., Урханова Л.А., Иванов А.А., Культиков С.С. Применение перлитовых пород для гидротехнического бетона.....	180
Макеев А.И. Проблемы идентификации и формализации структуры в задачах информационного моделирования строительных композитов .....	184
Мархиев А.Х., Орлова М.Е. Технология производства клинкерной керамической черепицы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения Республики Ингушетия.....	189
Мелихов Д.О., Марков Ю.И., Ларсен О.А. Изучение свойств пеностекольного щебня для легкого самоуплотняющегося бетона.....	196

Нгуен Зоан Тунг Лам, Сизяков И.Д., Самченко С.В. Моделирование морской среды для исследования процессов коррозии бетонов в лабораторных условиях .....	200
Небежко Ю.И., Лапунова К.А. Особенности лицевой поверхности керамического кирпича мягкого формования .....	204
Неверов А.С., Малашков Д.В. Бесцементные композиционные гипсовые вяжущие повышенной водостойкости с применением мела строительного и извести гашеной .....	211
Орлова М.Е., Дмитриев О.И. Песчаники Восточного Донбасса как перспективное сырье для производства клинкерной черепицы .....	215
Орлова М.Е., Хасабова Е.В. Дизайн и технология экстерьерной клинкерной мозаики.....	220
Петрик И.Ю., Зайченко Н.М., Губарь В.Н. Ресурсосберегающая технология бетона с обогащенной золой ТЭС.....	226
Петропавловская В.Б., Ефимов К.В., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Данякин В.А. Безобжиговые материалы на основе отходов фосфогипса .....	231
Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., Петропавловская В.Б., Микаэлян Х.А., Коровицын Д.А. Применение зольных компонентов в цементных композициях.....	237
Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., Петропавловская В.Б., Аль-свейти М. Углеродгипсовые композиты.....	241
Попов А.Л., Фёдоров А.В., Григорьев Н.А. Энергоэффективные решения в ограждающих конструкциях малоэтажных зданий с применением легкобетонных изделий в условиях Якутии .....	244
Репина Е.А., Закревская Л.В. Композиционный материал для реставрации на основе органического сырья природного происхождения .....	250
Русанов В.Е., Алексеев В.А., Маркин М.В., Мильчевский П.С. Использование фибробетона при проектировании высокоточных обделок в транспортном строительстве.....	254
Самченко С.В., Тоболев П.Д. Исследование влияния добавок на основе высокомолекулярных соединений на свойства цементного вяжущего .....	260



Соколова А.Г. Применение масла каучукового дерева и его производных для модификации полимерных материалов .....	263
Соколова Ю.А., Кондращенко В.И., Ван Чжуан, Чан Тхи Монг Тху Интегрированный подход к оптимизации составов материалов строительных изделий .....	267
Соловьев В.Г., Матюшин Е.В. Влияние объемного содержания и вида стальной фибры на прочность сверхвысокопрочного сталефибробетона при сжатии .....	273
Соловьев В.Г., Сизяков И.Д. Физико-механические свойства бетонов со стеклопластиковой фиброй .....	278
Соловьев В.Г., Швецова В.А. Влияние пластифицирующих добавок на свойства глиноземистого цемента .	284
Солодов А.А., Ларсен О.А. Влияние тонкодисперсного наполнителя на усадку смешанного вяжущего....	288
Стенина Н.Г. Природный ресурс инновационного развития строительного материаловедения.....	293
Титаев В.А., Соколов Б.С., Черный И.А. Вопросы актуализации стандартов на железобетонные изделия для дорожного строительства.....	300
Ужахов К.М., Котляр А.В. Клинкерные крупноформатные керамические камни сотовой структуры на основе аргиллитов .....	306
Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С. Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой .....	310
Федосов С.В., Лазарев А.А., Цветков Д.Е., Котлов В.Г., Комлёв А.Ю. Об оценке качества пропитки древесины неорганическими антипиренами при актоклаивировании.....	315
Харченко А.И., Харченко И.Я., Панченко А.И., Хозин В.Г. Инъекционные технологии для устранения карстово-суффозионной опасности и просадочности грунтов в основании зданий и сооружений .....	319
Шестаков Н.И., Хохлова Н.В. Изменение группового состава битума при его рекуперации.....	328
Яценко Е.А., Изварин И.А., Курдашов В.М., Вильбицкая Н.А., Яценко В.С. Получение пористых геополимеров для теплоизоляции зданий .....	332

# ПРОБЛЕМАТИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ИНЪЕКЦИОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ

**В.А. Алексеев**<sup>1</sup>

**С.И. Баженова**<sup>1</sup>, канд техн. наук

**А.П. Попов**<sup>2</sup>

**А.А. Алексеев**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

<sup>2</sup>*ООО «Дезои»*

<sup>3</sup>*ООО «Геоинпро»*

**Аннотация.** Рост темпов жилищного строительства и обновление жилого фонда в мегаполисах Российской Федерации, наблюдаемое в последние годы, сопровождается также типовыми факторами, оттягивающими вводы в эксплуатацию новых жилых площадей, таких как нарушение гидроизоляционных систем зданий и водопроявления в подземных частях, обычно представленных парковками под личный транспорт жильцов. Оперативное восстановление гидроизоляционных свойств конструкций является одним из важнейших факторов, позволяющее, не нарушая сроков строительства, вводить в эксплуатацию здания, в соответствии с согласованными планами-графиками. Многообразие свойств полимерных и минеральных материалов тем не менее позволяет сформировать общие требования к свойствам, позволяющие использовать их для включения в работу нарушенных гидроизоляционных систем конструкций. Сформированные критерии, такие как правильно подобранная программа обследования, анализ данных опытных работ и контрольного гидроопробывания позволяют в один этап подобрать оптимальные технологии и материалы для восстановления гидроизоляционных свойств конструкций.

**Ключевые слова:** Жилищное строительство, подземное строительство, ликвидация водопроявлений, ликвидация течей, восстановление гидроизоляционных свойств конструкций, инъекционная гидроизоляция.

Инвестиционная недвижимость в мегаполисах является высокоэффективной формой вложения средств, которая характеризуется приемлемым уровнем риска, высокой доходностью и стабильностью даже в периоды пандемии и условиях финансовой неопределённости [1]. Основным преимуществом данной формы инвестиций является общий спрос на недвижимость неудовлетворённый достаточно особенно в крупных городах – центрах притяжения внешней и внутренней трудовой миграции и экономических форм деятельности. Данные обстоятельства обеспечивают как ликвидность инвестиций в сферу недвижимости, так и высокий рентный доход при низких вложениях для наиболее востребованных типов недвижимости.

Также с учетом особенностей функционирования российской экономики при покупке недвижимости инвестор получает права собственности на объект и недвижимость, которая имеет положительную динамику роста стоимости во

времени, доходности актива, зачастую превышающего увеличение уровня инфляции.

Поэтому в настоящий момент наблюдается значительный рост строительства жилых комплексов в т.ч с использованием новейших технологий и современных материалов, уникальной архитектурой, обустроенной придомовой территорией и большим количеством объектов внутренней инфраструктуры.

Основные этапы строительства жилого комплекса включают в себя:

- обустройство строительной площадки и земляные работ;
- устройство фундаментов и подземной части зданий;
- возведение несущих конструкций;
- монтаж перегородок внутри здания;
- запуска лифтов;
- монтаж кровли;
- установка окон и дверей;
- подводка коммуникации: электроразводка, канализация, газоснабжение;
- в некоторых случаях производится отделка квартир и мест общего пользования;
- очистка от строительного мусора и обустройство территории и площадки во дворе дома, озеленение и клумбы на территории, установка детских площадок и скамеек, уличного освещения;
- обеспечение паркинга и подъездов к дому;
- ввод домов в эксплуатацию.

Причем на каждом этапе требуется зачастую не просто выполнение сроков строительства, но и зачастую опережающие темпы, т.к. любой инвестиционный проект при снижении сроков строительства повышает свою рентабельность [2].

Однако ввиду того, что устройство фундаментов и подземной части здания («нулевой цикл») производится на первых этапах строительства, а далее идет нагрузка при возведении несущих конструкций (зачастую неравномерная), часто осложняющаяся наличием непроектной геологии (линз грунтовых слоев, незафиксированных при бурении геологических скважин, изменением или неправильным определением физико-механических свойств грунта), особенностями строительных работ, большим количеством осадков, неблагоприятными погодными условиями. Наблюдаемая при этом осадка представляет собой труднопрогнозируемый, многовекторный процесс, который может развиваться длительный период времени с разной степенью интенсивности.

При этом очень трудно прогнозировать техногенные воздействия и гидрогеологическую ситуацию особенно в условиях крупных городов, где подземная толща представлена как транспортными сооружениями, коммуникациями, подземной частью окружающей застройки так и водными артериями, подземными водами в.т.ч. с изменяющимся уровнем, постоянными и переменными градиентами фильтрации водных масс. Совокупность всех факторов часто дает такие неблагоприятные ситуации как осадки здания (в.т.ч. неравномерные), крен, сложную работу карт бетонирования с раскрытием

холодных и деформационных швов, а неблагоприятная гидрогеологическая ситуация способствует водопроявлениям и активным течам через конструкции (Рисунки 1 и 2), расположенных ниже уровня земли [3, 4].

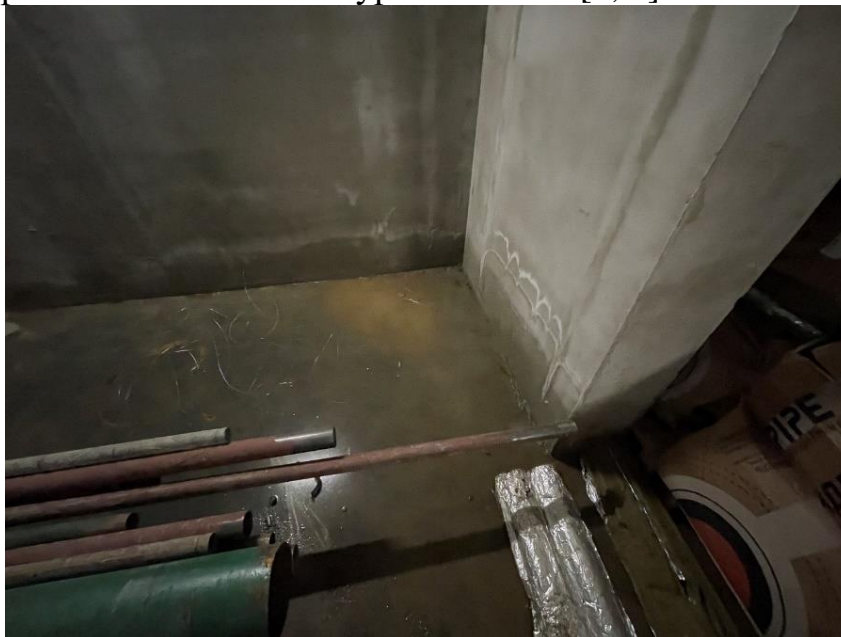


Рисунок 1. Водопроявления через зону стыка горизонтальных и вертикальных конструкций

При этом наблюдаемое снижение гидроизоляционных свойств конструкций может способствовать как снижению прочностных показателей железобетона, так и эксплуатационных показателей, расширяя область водопроявлений далее от мест появления первичного дефекта.



Рисунок 2. Активные течи через зону деформационного шва

Игнорирование проблем нарушения герметичности свойств конструкций введет к издержкам и более долгим срокам ввода объектов в эксплуатацию, что для коммерческих объектов резко снижает маржинальность проекта и ожидаемую прибыль [5, 6].

Одним из наиболее эффективных способов ликвидации водопроявлений является инъектирование гелей на акрилатной основе, иногда называемых гидрогелями, которые при реакции обеспечивают желатиноподобные продукты, купирующими водопритоки и восстанавливающими гидроизоляционные свойства конструкции. Особенно высокий результат наблюдается при их использовании для гидроизоляции холодных и деформационных швов за счет ряда особенностей материала [6, 7]:

- *реакционная способность* – особенность управления структурообразованием геля, позволяющая отверждать композицию в течение коротко периода времени или растянуть процессы схватывания на более длительные сроки, исключая зависимость от внешних условий

- *упругость* – возможность деформирования схватившегося тела мягкоупругого гидрогеля без нарушения его сплошности и падения гидроизоляционных свойств;

- *адгезия* – наличие хорошего сцепления с поверхностями материала конструкций;

- *особенности поведения при контакте с водой* – продукт реакции, реагирует независимо от влажности водной среды. Некоторые модификации гидрогеля могут отверждаться даже полностью находясь в водной среде;

- *изотропная безусадочность* – после процесса твердения гидрогель заполняет объем, в который его вводили, причем большая часть типов гидрогелей, дает некоторый гидрофильный эффект, при котором продукт набухает, увеличиваясь незначительно в объемах. Образующаяся при этом боковые цепи свободная вода делает процесс набухания обратимым. Если же произведены инъекция в швы, полости, трещины бетонных конструкций, то развивается некоторое давление обжатия которая способствует их герметичному заполнению

- *долговечность* – гидрогели в течение длительного времени устойчивы к воздействию обычных строительных материалов и грунтов не выше средней степени агрессивности;

- *экологичность* – допускается контакт гидрогелей с грунтовыми водами и питьевыми водами, в ряде случаев их рекомендуют для герметизации водоемов, резервуаров для пищевых продуктов и т.д.

Однако работы по восстановлению гидроизоляционных способностей конструкций инъекционными методами должны производиться с учетом результатов контрольного гидроопробывания существующих инъекционных отверстий (и при необходимости пробуриваемых шпуров) в конструкциях, проводимого по авторской методике, с анализом параметров контрольного гидроопробывания, дающих представление о:

- а) карте дефектов (места и зоны водопроявлений, намоканий, капиллярного подсоса);

- б) расходах и давлении при нагнетании существующих отверстий;

- в) указания мест выхода на соседних участках относительно точки инъекции;

- г) выводы о состоянии работы гидроизоляционной системы;

д) возможные рекомендации к инъекционным работам.

На основании вышеуказанных сведений только и возможно производить выбор параметров технологии инъекционных работ на стадии проектной документации и при необходимости корректировки инъекционных составов. Однако в ряде случаев программа обследования не предполагает подобных работ и зачастую основные удельные расходы определяются после разработки рабочей документации и апробации на опытных участках, в том числе бывают и случаи что необходимо изменить технологию работ, подбор требуемых материалов и объемов работ, что требует корректировку проектной и рабочей документации, пересогласование различных этапов и оттягивает процесс ввода зданий и сооружений в эксплуатацию, что в свою очередь ведет к большим издержкам. При правильно подобранной программе обследования, проведении опытных работ и гидропробывания определяется как оптимальная технология, так и наиболее эффективные материалы с учетом удельного расхода, что позволяет проводить работы по ликвидации водопроявлений с учетом оптимизации сроков работ и наиболее полной работы гидроизоляционных материалов в конструкциях.

#### **Библиографический список:**

1. Утегенов Т.К., Хамитова Л.А., Пачкова О.В. Снижение затрат для повышения финансовой привлекательности инвестиционного проекта на примере строительства жилого комплекса // Сборник: Облачные и инновационные технологии в сервисе и образовании. Сборник научных трудов. Под редакцией И.Т. Насретдинова. 2017. С. 192-196.
2. Марченкова С.В. Формирование методики оценки социально-экономической эффективности строительства многофункциональных жилых комплексов // Муниципальная экономика. 2013. № 1 (53). С. 86-97.
3. Чернышев С.Н., Мартынов А.М. Осадка - многофакторный инженерно-геологический процесс // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 81-86.
4. Земсков А.И. Анализ гидрогеологических условий в подземном пространстве Санкт-Петербурга как фактора безопасного строительства и длительной устойчивости подземных сооружений // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 20 (102). С. 92-98.
5. Цыбенко А.В. Исследование водонепроницаемости герметичных секций гидроизоляции из полимерных мембран и гидрошпонок // Фундаменты. 2021. № 1 (3). С. 72-75.
6. Савич А.В. Краткий обзор истории развития отечественных технологий смолоинъекции для гидроизоляции заглубленных железобетонных конструкций зданий // Сборник: Направления развития российской науки: теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Под редакцией Т.Б. Новиченковой. Тверь, 2021. С. 96-101.
7. Тимохин Д.К., Страхов А.В., Асафьева С.С. Восстановление железобетонных конструкций гидротехнических сооружений специальными составами // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 6 (39). С. 330-333.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ДОЛОМИТОВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ БЕТОНОВ СУХОГО ЖАРКОГО КЛИМАТА

Альобаиди Дия Абдулкадим Насер<sup>1</sup>, аспирант

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В данном исследовании приводится актуальность применения микронаполнителя в составе композиционного вяжущего, полученного из отсевов дробления карбонатных пород для бетона, работающего в условиях сухого жаркого климата. В последние десятилетия использование смешанных портландцементов, содержащих карбонатный компонент, получило широкое распространение ввиду экономических преимуществ. Отходы на основе доломита в качестве микронаполнителя обычно не применяются в составе портландцемента. Получение тонкодисперсного и химически активного микронаполнителя для бетона, работающего в условиях сухого жаркого климата и повышающего степень гидратации цемента из-за иммобилизации свободной воды в бетонной смеси, достигается применением механической активации. В данной работе представлены свойства смешанного вяжущего на основе портландцемента и доломитового наполнителя. Приведены данные о времени помолы и полученных характеристиках тонкодисперсного доломитового микронаполнителя. Установлено, что исходная удельная поверхность пылевидной составляющей доломитового отсева находилась в пределах  $S_{уд} = 206,5 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Доломитовый наполнитель был получен из пылевидных фракций путем механической активации в лабораторной шаровой мельнице для увеличения удельной поверхности и его химической активности. Показано, что воздействие механической активации позволяет получить доломитовый наполнитель со средним размером частиц 1,4 мкм и удельной поверхностью 639,9  $\text{м}^2/\text{кг}$ . Содержание доломитового наполнителя в портландцементе составляло 10, 30 и 50%. Основные свойства смешанного вяжущего, то есть стандартная консистенция, время схватывания, прочность на сжатие, определены на тесте нормальной густоты. Установлено, что присутствие доломитового микронаполнителя в количестве более 10% снижает прочность смешанного вяжущего на сжатие.

**Ключевые слова:** отсев дробления доломита, микронаполнитель, бетон, сухой жаркий климат, доломит, прочность

Сухой жаркий климат оказывает значительное влияние на твердение цементных бетонов, работающих в условиях высоких температур окружающей среды, пониженной относительной влажности, а также интенсивной солнечной радиации [1]. Увеличение скорости ветра усиливает влияние вышеперечисленных факторов еще в большей мере. В бетонах, твердеющих в сухом жарком климате, возникают температурно-усадочные деформации во внутренних и поверхностных слоях цементных бетонов, приводящих к образованию дефектов в виде сети микротрещин. Перепады температур и относительной влажности, а также сильный циклический нагрев открытых поверхностей отрицательно влияют на физико-механические свойства и долговечность бетонов [2, 3, 4]. Поэтому повышение долговечности бетонов в сухом жарком климате является актуальной задачей. При обработке

доломитовых пород образуется огромное количество отходов, некоторая часть из них используется в дальнейшем, а оставшаяся направляется в отвалы, занимающие значительные территории. Например, в настоящее время только в одном карьере образуется более 400-450 тысяч тонн побочных продуктов при производстве доломита, причем ежегодно это количество увеличивается на 50 000 тонн [5].

Применение карбонатных бетонов позволяет снизить стоимость строительства за счет использования отходов производства на основе побочных продуктов при получении заполнителей из местных известняков и доломитов. применение карбонатных заполнителей наиболее целесообразно в районах со значительными запасами карбонатных пород, производящих заполнители. При производстве которых образуется значительное количество отходов.

Отмечается активная структурообразующая роль карбонатных компонентов в составе бетона, проявляющаяся у заполнителей в упрочении контактной зоны между цементным камнем и карбонатным заполнителем, происходящее за счет высокого адгезионного сцепления. Карбонатный заполнитель обладает повышенной пористостью и химической активностью. Отмечается, что бетоны на карбонатных заполнителях по сравнению с равнопрочными обычными бетонами, характеризуются пониженным расходом цемента на 10-20%. Однако в карбонатные заполнители имеют повышенную водопотребность, при приготовлении которых необходимо введение поверхностно-активных веществ [6].

Отходы производства щебня из карбонатных пород в виде отсеков могут служить источником для получения не только в виде дробленых песков и выступать укрупняющей добавкой для природных песков мелких фракций, но и использоваться в качестве микрозаполнителя в бетонах [7]. Для рационального использования природных невозобновляемых источников и снижения количества вяжущего, наиболее целесообразным будет применение при разработке состава бетона, работающего в условиях сухого жаркого климата, микрозаполнителя, полученного из отсеков дробления карбонатных пород. Однако отсеки дробления не всегда могут соответствовать требованиям ГОСТ по содержанию крупных фракций и пылевидной составляющей.

Разработка эффективных суперпластификаторов позволила увеличить количество наполнителя в смеси, что открывает новые возможности и области их применения. Микрозаполнители применяются для уменьшения количества цемента, увеличения связности бетонной смеси и предотвращения ее расслоения.

В качестве микрозаполнителей применяются различные техногенные отходы [9], но для расширения сырьевой базы возможно использование отсеков дробления при получении карбонатных заполнителей, образуемых в большом количестве при получении заполнителей и составляющих около 30% от общей массы заполнителя. Положительным фактором использования в составе цементных композиций тонкодисперсных микрозаполнителей является не только повышение реологической эффективности суперпластификаторов и уплотнение структуры, но и возможность кристаллизации гидратных фаз на



частицах микронаполнителя, что способствует формированию кристаллизационных оболочек и срастанию частиц и, в целом, повышению прочности наполненных цементных систем [10, 11, 12].

Бетоны, работающие в сухом жарком климате, подвержены раннему растрескиванию. Чтобы уменьшить усадочные деформации, необходимо стремиться к уменьшению водоцементного отношения и содержанию цементного теста. Эта проблема может быть решена путем уменьшения количества цементного теста с частичной заменой в смешанном вяжущем доломитового наполнителя, получаемого путем активации отсева дробления. Целью данного исследования является изучение влияния доломитового наполнителя на прочностные свойства в соответствии со стандартными требованиями, а также сравнение его показателей с чистым портландцементом.

Материалы и методы.

В данном исследовании применялись следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5Н «Хайдельбергцемент», соответствующий ГОСТ 31108-2020 с удельной поверхностью 377,3 м<sup>2</sup>/кг, минералогическим и химическим составом, представленными в таблице 1 и 2, нормальной густотой 30,2%; сроками схватывания: началом схватывания 195 мин, конец 235 мин; прочность на сжатие в возрасте 2 суток 29,9 МПа, в возрасте 28 суток 62,6 МПа.

Таблица 1. Минералогический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдельбергцемент Рус»

Минералогический состав, %			
C3S	C2S	C3A	C4AF
64	14	7	11

Таблица 2. Химический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдельбергцемент Рус»

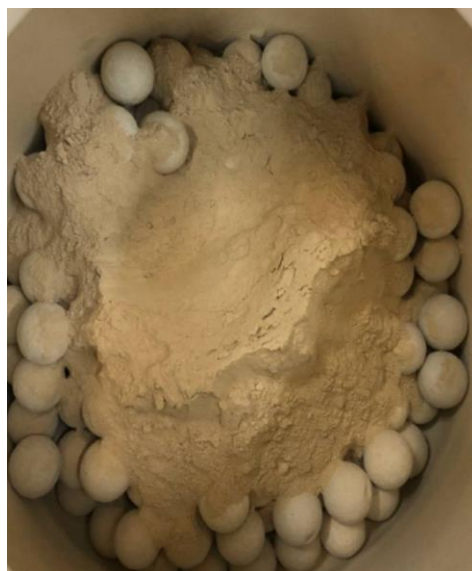
Химический состав, %											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ппп
21,23	4,78	3,31	62,95	1,65	3,22	0,66	0,12	0,08	0,28	0,06	1,60

- отсев дробления, полученный при производстве крупного заполнителя из доломита с истинной плотностью 2,65 г/см<sup>3</sup>.

Для получения микронаполнителя применялась лабораторная шаровая мельница ШЛМ-5, представленная на рисунке 1. Наполнитель был получен путем помола пылевидной составляющей отсева дробления в мельнице, которая имела размеры 680×580×550 мм. Пылевидная составляющая отсева дробления измельчалась до трех различных заданных значений удельной поверхности: 474,2; 557,4 и 639,9 м<sup>2</sup>/кг. Требуемое время измельчения составляло 90, 120 и 360 мин. Далее наполнитель вводился в состав чистого цемента.



а



б

Рисунок 1. Оборудование, применяемое для получения микронаполнителя: а - лабораторная шаровая мельница ШЛМ-5; б – мелющие тела и микронаполнитель.

Для определения удельной поверхности микронаполнителя по методу Блейна применялся прибор ToniPerm Standart (рисунок 2). Перед измерением испытуемые порошки сушили при температуре 60°C в течение 1 часа.



Рисунок 2. Прибор Toniperm Standart для определения удельной поверхности доломитового микронаполнителя

### Результаты

Измельчение в шаровой мельнице обязательно сопровождается флокуляцией частиц. Чем мельче становится продукт, тем крупнее получаются хлопья. Установлено, что после того, как плотность наполнителя достигает 639,9 м<sup>2</sup>/кг, удельная площадь поверхности уменьшается со временем измельчения. Это свидетельствует о появлении и развитии процессов агломерации мелких частиц. Дальнейшая механическая активация и затраты энергии технически и экономически нецелесообразны.

Анализ гранулометрического состава портландцемента, наполнителя из отходов доломитового карьера перед активацией, а также доломитового наполнителя после активации в шаровой мельнице были изучены с помощью лазерного дифракционного гранулометра HELOS Sympatec GmbH. Гранулометрический анализ дисперсных компонентов показывает содержание основных фракций цемента и доломитового наполнителя. Соотношение трех основных фракций и наличие плато на кривой распределения влияют на скорость гидратации портландцемента и формирование его прочности.

Результаты определения гранулометрического состава портландцемента, наполнителя из отходов доломитового карьера до активации и доломитового наполнителя с удельными поверхностями 474,2, 557,4 и 639,9 м<sup>2</sup>/кг представлены в табл. 3. Гранулометрические кривые распределения частиц по размерам доломитового наполнителя с удельной поверхностью 639,9 м<sup>2</sup>/кг показывают наличие мелких частиц размером до 5 мкм. Было определено, какой размер частиц преобладает в образце мелкодисперсных компонентов.

Таблица 3. Гранулометрический состав цемента и доломитового микронаполнителя

Компоненты	Наибольшее содержание частиц размером в мкм	Суд, м <sup>2</sup> /кг
ЦЕМ I 52,5 Н	22,91 мкм	377,3
Пылевидная часть отсева	55,78 мкм	206,5
Наполнитель, полученный при измельчении 120 мин	32,86 мкм	474,2
Наполнитель, полученный при измельчении 180 мин	27,39 мкм	557,4
Наполнитель, полученный при измельчении 360 мин	1,4 мкм	639,9

В таблице 4 представлены данные о влиянии содержания и удельной поверхности микронаполнителя в композиционном вяжущем на прочностные показатели. Установлено, что введение наполнителя в количестве 10% с удельной поверхностью 639,9 м<sup>2</sup>/кг увеличивает прочность смешанного вяжущего в возрасте 2, 7 и 28 дней твердения.

Таблица 4. Исследование прочностных свойств смешанного вяжущего в присутствии доломитового микронаполнителя

Прочность на сжатие, Мпа					
Наименование	Процент содержания карбонатных наполнителя				
	контрольный	10 %	30%	50%	возраст
S=639.9 м <sup>2</sup> /кг	15.8	16.6	14.2	11.9	2 сут
S=557.4 м <sup>2</sup> /кг	15.8	16.3	13.3	11.0	
S=474.2 м <sup>2</sup> /кг	15.8	16.0	12.7	10.4	

S=639.9 м <sup>2</sup> /кг	44.4	46.6	39.8	33.5	7 сут
S=557.4 м <sup>2</sup> /кг	44.4	45.8	37.2	31.0	
S=474.2 м <sup>2</sup> /кг	44.4	45.1	35.6	29.2	
S=639.9 м <sup>2</sup> /кг	69.4	73.0	62.2	52.5	21 сут
S=557.4 м <sup>2</sup> /кг	69.4	71.7	58.2	48.4	
S=474.2 м <sup>2</sup> /кг	69.4	70.5	55.7	45.7	
S=639.9 м <sup>2</sup> /кг	76,0	79.9	68.1	57.4	28 сут
S=557.4 м <sup>2</sup> /кг	76,0	78.5	63.7	53.0	
S=474.2 м <sup>2</sup> /кг	76,0	77.2	61.0	50.0	

Введение 10% наполнителя не оказывает влияние на снижение прочности на сжатие, хотя содержание клинкера в смешанном вяжущем уменьшается. При содержании доломитового наполнителя в количестве 30 и 50% прочность на сжатие снижается. Такие же прочностные свойства наблюдаются у доломитового наполнителя с удельной поверхностью 557,4 и 474,2 м<sup>2</sup>/кг. Увеличение прочности смешанного вяжущего объясняется проявлением химической активности доломитового наполнителя. Это связано с присутствием карбоната кальция в доломите. Некоторые исследования показывают, что карбонат кальция в небольших дозировках может вступать в реакцию с алюминатами клинкера с образованием гидрокарбонатов [13], которые, в свою очередь, повышают стойкость этtringита [14].

#### Выводы

1. Отсевы щебня из доломита часто не соответствуют требованиям стандартов для использования в бетоне из-за содержания зерен размером более 5 мм и пылевидных фракций. Отходы переработки заполнителя могут быть использованы в качестве сырья для производства бетона на основе смесового вяжущего с доломитовым наполнителем для жаркого сухого климата.

2. Активацию пылевых фракций для увеличения удельной поверхности и получения химически активного доломитового наполнителя проводилась в лабораторной шаровой мельнице. После активации в течение 120, 180 и 360 мин был получен доломитовый наполнитель с удельной поверхностью 474,2, 557,4 и 639,9 м<sup>2</sup>/кг.

3. Установлено, что смешанные цементы с доломитовым наполнителем обладают более низкими прочностными свойствами, чем портландцемент в любом возрасте. Было установлено, что наиболее высокие прочностные свойства в возрасте 28 дней достигаются при использовании 10% наполнителя с удельной поверхностью 639,9 м<sup>2</sup>/кг (79,9 МПа) по сравнению с чистым портландцементом (76,0 МПа). Увеличение удельной поверхности заполнителя с 474,2 до 639,9 м<sup>2</sup>/кг повышает прочность с 53,0 до 57,4 МПа, что на 25% ниже прочности чистого портландцемента.

### Библиографический список:

1. Пунагин. В. Н. Бетон и бетонные работы в условиях сухого и жаркого климата Ташкент: Фан, 1974. - 244 с.: ил.; 22 см.
2. Самченко С. В., Ларсен О. А., Альобайди Д. А. Н., Наруть В. В., Бахрах А. М., Солодов А. А. Бетоны на карбонатном сырье для сухого жаркого климата // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 74-79. doi: 10.33622/0869-7019.2022.09.74-79.
3. О. А. Ларсен, Д. А. Н. Алобайди, В.В. Наруть, Е.В. Матюшин, К. А. Бутенко, В.К. Веселов. Получение доломитового заполнителя для бетонов, эксплуатируемых в условиях сухого жаркого климата // Техника и технология силикатов 30, 1 (2023) 56 – 65.
4. Samchenko, S.V.; Larsen, O.A.; Kozlova, I.V.; Alpackiy, D.G.; Alobaidi, D.A.N. Concrete Modification for Hot Weather Using Crushed Dolomite Stone. Buildings 2023,13,2462. [https://doi.org/ 10.3390/buildings13102462](https://doi.org/10.3390/buildings13102462)
5. Market Study: Fillers. 2018. Available online: [www.ceresana.com/en](http://www.ceresana.com/en) (accessed on 14 May 2020).
6. Е.С. Темкин, Технология производства бетона для сухого жаркого климата с использованием солнечной энергии, Москва, АСВ. (2006) 68.
7. Р.Л. Маилян, Бетон на карбонатных заполнителях, Издательство Ростова-на-Дону (1967) 272.
8. Courard, L.; Degeimbre, R.; Darimont, A.; Michel, F.; Willem, X.; Flamant, S. Some effects of limestone aggregates as a partial replacement of cement in solutions of the composition. In Proceedings of the ConMat'05 Third International Conference on Building Materials: Performance, Innovation and Design Implications, Vancouver, BC, Canada, 22–24 August 2005.
9. Moosberg-Bustnes, H.; Lagerblad, B.; Forssberg, E. The function of fillers in concrete. Mater. Struct. 2004, 37, 74–81.
10. Дворкин Л.И.; Соломатов В.И.; Выровой В.Н.; Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями; Будивельник: Киев, Украина, 1991; с. 136.
11. Басин В.Е. Адгезионная прочность; Химия: Москва, Россия, 1981; с. 208.
12. Тараканов О.В. Калашников В.И. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения Известия КГАСУ, 2017, No 1 (39).
13. Stark, J.; Moser, B.; Bellmann, F. Nucleation and growth of C-S-H phases on mineral admixtures. In Advances in Construction. Materials; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2007; pp. 531–538.
14. Kouznetsova, T.V.; Samchenko, S.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation. Cem. Wapno Beton 2014, 5, 317–322.

## ПРОЦЕССЫ ГИДРАТАЦИИ АНГИДРИТОВОГО ВЯЖУЩЕГО ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Л.А. Аниканова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

Ю.С. Саркисов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

Д.М. Первушина<sup>1</sup>, аспирант

Н.П. Горленко<sup>1</sup>, д-р хим. наук, профессор

О.В. Волкова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Аннотация.** Раациональное использование вторичного ангидритового сырья в производстве строительных материалов вносит существенный вклад в решение проблемы ресурсо- и энергосбережения строительной отрасли России. В работе изучены вопросы рационального использования ангидритового вяжущего из вторичного сырья по кинетике тепловыделения композиции: ангидрит- вода в ранние сроки твердения. Исследования проведены с применением метода дифференциальной микрокалориметрии и нашли подтверждение в расчетном методе по программе Wolfram Mathematica. Показано, что процессы структурообразования вяжущего носят циклический характер. Длительность и интенсивность процессов может зависеть от вида вторичного сырья, его вещественного состава, количества вводимых добавок активаторов. Использование данных методов исследования позволит решить проблему рациональной утилизации ангидритового сырья в строительстве, с учетом его вещественного состава и позволяет прогнозировать процесс структурообразования вяжущего.

**Ключевые слова:** ангидритовое вяжущее из вторичного сырья, микрокалориметрия, циклический характер структурообразования, утилизация сырья, прогнозирование процесса структурообразования

Разработка инновационных технологических процессов производства строительных материалов с применением вторичного ангидритового сырья, образующегося на химических предприятиях, вносит заметный вклад в решение проблемы ресурсо- и энергосбережения в строительной отрасли России.

В настоящее время мало внимания уделяется изучению свойств вторичного ангидритового сырья (промышленных отходов), в том числе фторангидрита. Причиной этому является прежде всего большой разброс в химическом составе вторичного сырья, неоднозначность научных результатов по процессам гидратации и твердения, низкой активностью затвердевшего камня [1–6]. Поэтому, вопросы производства эффективных строительных материалов на основе такого вяжущего с высокими эксплуатационными характеристиками и малой энергоемкостью являются актуальными [1–3].

В ранее представленных работах авторов [5,6] представлены результаты исследований по вопросам модифицирования вторичного сырья с целью производства ангидритовых вяжущих и строительных материалов на их основе. Для интенсификации процессов гидратации и твердения ангидритовых вяжущих необходимо ускорить процесс формирования первичных (нанодисперсных) продуктов гидратации путем внешних энергетических воздействий. Для

обоснованного выбора внешнего энергетического воздействия на ранней стадии развития процессов гидратации ангидритового вяжущего из вторичного сырья (ангидритовое вяжущее) необходимо установить изменения энергетических параметров в системе фторангидритовое вяжущее - вода используя известные законы и инструменты. Для анализа и выбора способов воздействий на фторангидритовое вяжущее рекомендуется использовать уравнение Гиббса, объединенного уравнения первого и второго законов термодинамики [4]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = P\Delta V + \sigma\Delta s + \mu\Delta n + \varphi\Delta q - T\Delta S,$$

По результатам анализа энергетических составляющих энтальпийного и энтропийного факторов появляется возможность предварительного выбора возможных воздействий на систему ангидрит – вода при управлении сложными физико-химическими процессами гидратации и структурообразования ангидритовых композиций. В данной работе приведены результаты исследований энергетических изменений во ангидритовой композиции нормальной консистенции при введении различных химических добавок ( $\mu\Delta n$ ). Оценку этого воздействия проводили по изменению температуры в системе вяжущее-вода. Гидратация и структурообразование фторангидритовых композиционных вяжущих происходит с выделением тепла, при количественном определении которого в кинетике можно получить дополнительные научные данные для объяснения механизма этого процесса. При проведении исследований инструментальное определение тепловыделения при раннем структурообразовании ангидритовых вяжущих осуществлялось с использованием дифференциального микрокалориметра (ДМК) [4], разработанного профессором кафедры СМиТ ТГАСУ В.А. Лотовым по разнице температур между сухим порошком (эталон) и ангидритовой композицией с заданным содержанием воды, находящихся в двух теплоизолированных калориметрических ячейках (КЯ). При проведении исследований использовалось ангидритовое вяжущее нормальной густоты, с удельной поверхностью 400 м<sup>2</sup>/кг, следующего компонентного состава: CaO - 5,91 %, CaF<sub>2</sub> – 6,86 %, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O – 18,67 %, CaSO<sub>4</sub>(p) – 40,0%, CaSO<sub>4</sub>(н) - 28,56 % . Результаты исследования кинетики тепловыделения при раннем структурообразовании ангидритового вяжущего представлены на рисунке 1 Первый интенсивный максимум тепловыделения обусловлен уменьшением поверхностной энергии твердой фазы и выделением теплоты смачивания. Движущая сила взаимодействия вяжущего с водой предопределяется величиной суммарного теплового эффекта двух составляющих: теплового эффекта гидратации  $Q_{г}$  и теплового эффекта разрушения и диспергирования кристаллической решётки  $Q_{д}$  частиц вяжущего:

$$\Delta Q = Q_{г} + (-Q_{д})$$

Теплота гидратации является положительной, т.к. образование связи между двумя ионами всегда сопровождается уменьшением энтальпии. Процесс разрушения кристаллической решётки, сопровождающийся разрывом связей в

кристалле, происходит всегда с поглощением тепла и величина  $Q_d$  будет всегда отрицательной.

Длительность тепловыделения зависит от активности вяжущего и массы навески. Кроме того, интенсивность реакций взаимодействия вяжущего с водой определяются величиной суммарного теплового эффекта гидратации и теплового эффекта диспергирования кристаллической решетки минералов. При смачивании вяжущего водой выделяемая теплота смачивания, которая тратится на повышение температуры системы и при последующем диспергировании резко снижается в результате поглощения этого тепла ( $Q_d > Q_r$ ). Таким образом, о процессе и механизме взаимодействия ангидритового вяжущего с водой можно судить по изменению разности температур сухого и влажного материалов во времени. После контакта вяжущего без добавок с водой температура смачивания существенно составляет  $1,7^\circ\text{C}$ , небольшие всплески диспергирования и кристаллизации связаны по видимому, с присутствием растворимой формы сульфата кальция. При этом происходит цикличное повторение процессов растворения и кристаллизации накопившихся продуктов через 1 сутки в течение 3 суток 1).

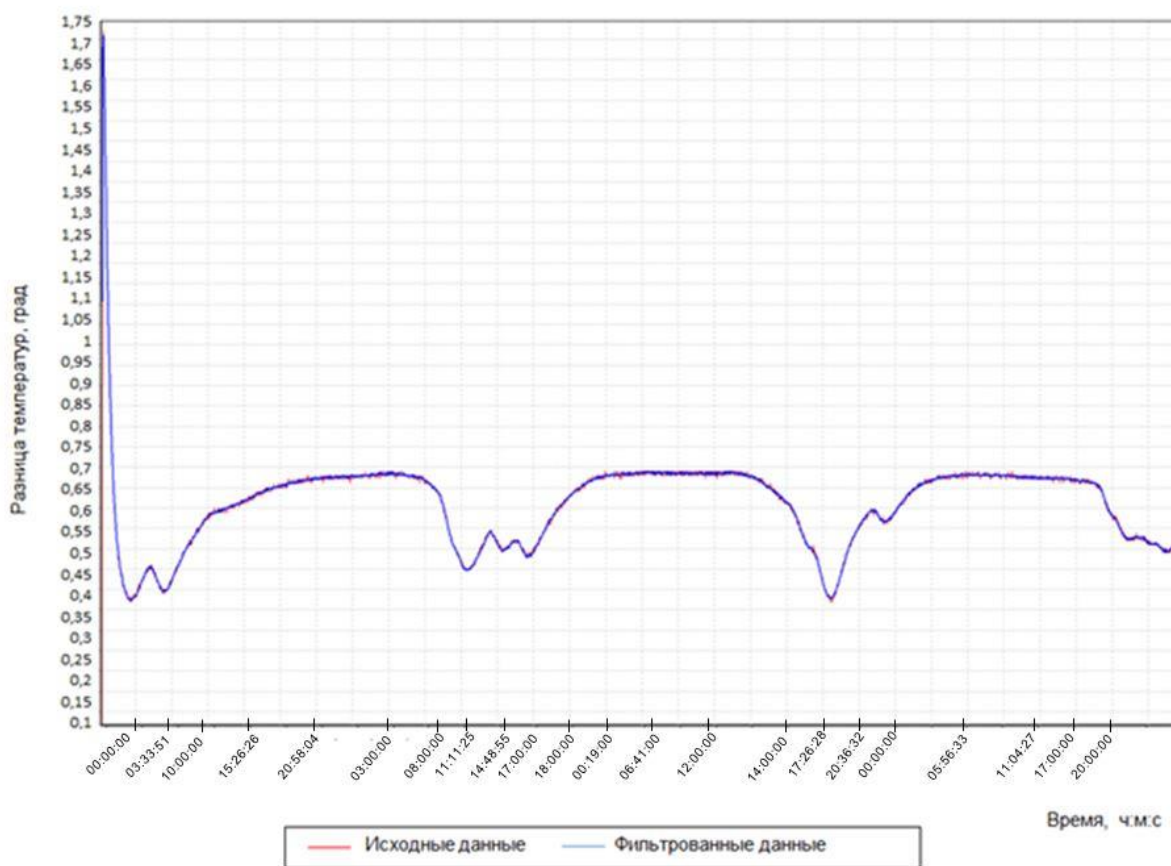


Рисунок 1. Кинетика тепловыделения композиции: ангидритовое вяжущее-вода в течение 3-х суток

Таким образом, цикличность гидратации ангидритового вяжущего без добавок является основным признаком, отличающим его от строительного гипса, при гидратации которого происходит сначала полное диспергирование



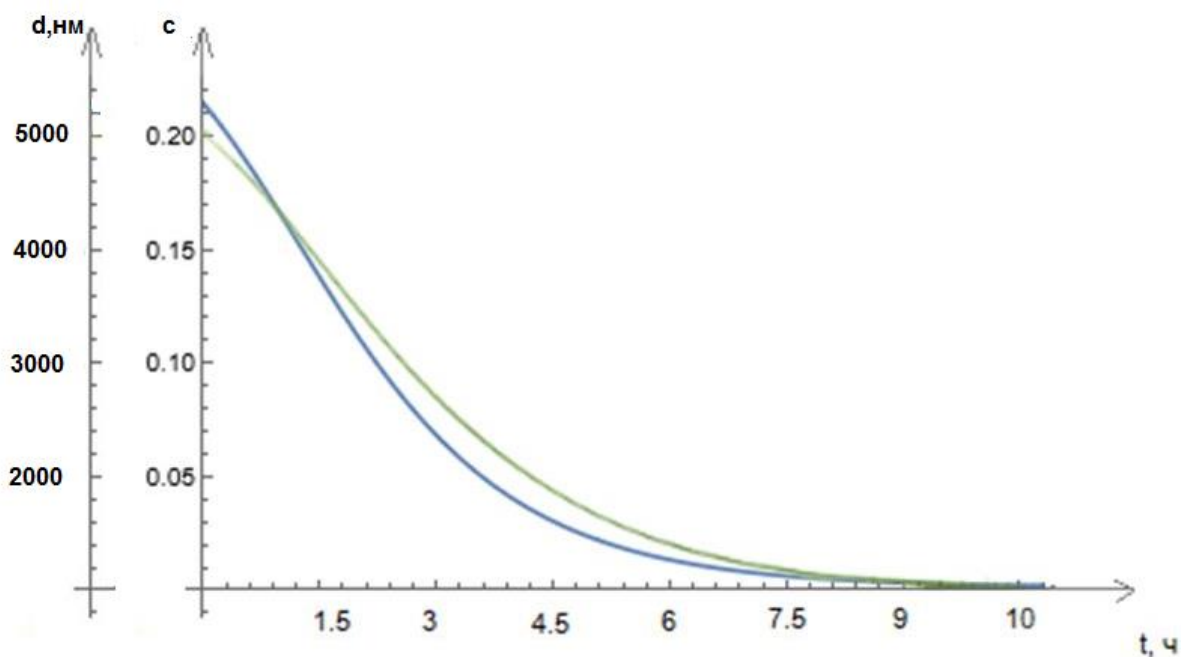
вяжущего и связывание практически всей воды затворения, а затем развиваются процессы перекристаллизации с участием первичных продуктов гидратации.

Для прогнозирования процесса структурообразования ангидритового вяжущего использовалась программа Wolfram Mathematica. Для реализации программы по прогнозированию процессов структурообразования ангидритовых вяжущих из вторичного сырья использованы исходные величины, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Состав вяжущего и исходные параметры для математического моделирования

Компонент	Кол.мас.%	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Диаметр (d), мкм	Моляр. массы в-в, г/моль	Растворимость, моль/л
H <sub>2</sub> O	47	1,00		18,053	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	1,84		98,0785	
CaO	10	3,34	5	56,0774	
CaSO <sub>4</sub> (растворимый ангидрит)	40	2,96	5	136,1406	
CaSO <sub>4</sub> (нерастворимый ангидрит в обычных условиях не гидратируется и не твердеет)	60		-		
CaSO <sub>4</sub> (2H <sub>2</sub> O)	-	2,32		172,1712	0,056
CaSO <sub>4</sub> (0,5H <sub>2</sub> O)	-	2,65		145,1482	0,012

По результатам математического планирования установлено что процесс нейтрализации остаточной серной кислоты зависит от вида нейтрализации компонента и содержания остаточной серной кислоты. При заданных условиях экспериментально установлено, что практически полная нейтрализация серной кислоты оксидом кальция происходит максимально за 5 часов. При этом процесс гидратации растворимого ангидрита происходит очень медленно и носит циклический характер. Так начальный процесс гидратации завершается в возрасте 10 часов, что соответствует данным микрокалометрических исследований, при этом меняется концентрация растворимого CaSO<sub>4</sub> и диаметр его частиц (Рисунок 2).



- – кривая изменения концентрации растворимого ангидрита с течением времени
- – кривая зависимости изменения диаметра частиц ангидрита с течением времени

Рисунок 2. Зависимости изменения ангидрита с течением времени

Анализ механизмов гидратации и твердения ангидритовых вяжущих по данным кинетики тепловыделения и результатам физико – химических методов исследований подтверждает, что процессы гидратации и структурообразования, происходящие в системе ангидритовое вяжущее-вода, сопровождаются изменением температуры, которую можно измерять с помощью дифференциальной микрокалориметрии, при этом процессы гидратации и твердения сопровождаются возникновением чередующихся экзо – и эндотермических эффектов в течение всего периода взаимодействия вяжущего с водой, что свидетельствует о цикличности процессов гидратации ангидритового вяжущего. Использование программы Wolfram Mathematica подтверждает результаты дифференциальной микрокалориметрии по длительности начального периода гидратации ангидритового вяжущего из вторичного сырья, составляющего порядка 10 часов. Длительность и интенсивность процессов может зависеть от вида вторичного сырья, его вещественного состава, количества вводимых добавок активаторов. Использование данных методов исследования процессов структурообразования метода позволит решить проблему рациональной утилизации ангидритового сырья в строительстве, с учетом его вещественного состава и позволяет прогнозировать процесс структурообразования вяжущего.

#### Библиографический список:

1. Чернышов Е.М., Потамошнева Н.Д., Монастырев П.В., Ярцев В.П. Строительно-технологическая утилизация техногенных отходов как комплексная системная эколого-экономическая проблема развития территорий и градостроительства.// Университет им. В.И. Вернадского. Вопросы современной науки и практики. № 4 (62).2016. С 67-86.

2. Белов В.В. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция / В.В. Белов, А.Ф. Бурьянов, Г.И. Яковлев, В.Б. Петропавловская, Фишер Х.-Б., И.С. Маева, Т.Б. Новиченкова // Москва: Изд-во «Де Нова». – 2012. – 196 с.
3. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьева А.П., Худовскова Е.А., Бурьянов А.Ф, Фишер Х.-Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей.// Строительные материалы.2018. №8. С.14–17
4. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента. //Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - № 2018. Т.329. №1. С.99-110
5. Аниканова Л.А. Сухие строительные смеси с фторангидритовым вяжущим: монография / Л.А.Аниканова, О.В.Волкова, А.И.Кудяков. – Томск: Изд-во Том.гос.архит.-строит.ун-та. -144с.
6. Аниканова Л.А. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее/Л.А.Аниканова, О.В.Волкова, А.И.Кудяков, А.И. Курмангалиева / Строительные материалы. 2019.№1-2.С.36-42

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ С ЭФФЕКТОМ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ

О.В. Артамонова<sup>1</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>*Воронежский государственный технический университет*

**Аннотация.** В работе кратко рассмотрена концепция искусственных материалов с эффектом самовосстановления и основные механизмы самовосстановления цементных композитов. Выделены три основных типа механизма самовосстановления: автогенное (за счет реакции гидратации и карбонизации), биооснованное (связанное с введением биологических объектов, например, бактерий, в результате метаболической деятельности которых формируется карбонат кальция) и активационное (самовосстановление с использованием различных химических добавок: зольной пыли, наночастиц, расширяющихся реагентов и т.д.). Очевидно, что цементные композиты, способные к «самозалечиванию» и последующему устранению возникших повреждений, обладают большими возможностями их использования, в особых труднодоступных зонах строительства, когда необходимо обеспечить и надежность материалов, и максимально длительный срок их эксплуатации.

**Ключевые слова:** цементные композиты, наномодифицирование, механизмы структурообразования, самовосстановление структуры.

Искусственные материалы с эффектом самовосстановления структуры стали предметом изучения совсем недавно (несколько десятилетий назад) [1 – 4]. Такие материалы также называют «самовосстанавливающимися материалами». Под этим термином понимают созданные искусственным путем многокомпонентные системы, способные без какого-либо воздействия извне (самостоятельно) частично или полностью восстанавливать свою исходную структуру и свойства после возникших в них повреждений. «Самовосстанавливающиеся материалы» можно классифицировать в зависимости от механизма самовосстановления на два типа: автономные и неавтономные [2].

Для первого типа материалов характерно частичное или полное восстановление возникающих повреждений в структуре без какого-либо дополнительного воздействия извне, что в итоге приводит и к восстановлению исходных свойств и характеристик данного материала. Для второго типа материалов с неавтономным механизмом самовосстановления нужно внешнее иницирование процесса, например, повышение или понижение температуры, увеличение освещенности, изменение влажности и т.д.

По способу организации процесса самовосстановления материалов их можно разделить на «внешние» (в этом случае в матрицу основного материала вводят химические добавки с «залечивающими» свойствами, например, микро- и нанокapsулы) и «внутренние» (в этом случае не требуется наличия каких-либо дополнительных химических веществ введенных извне).

Особое место среди искусственных материалов с эффектом самовосстановления структуры занимают цементные композиты. Ранее было установлено [3, 4], что строительные материалы, которые имеют в своём составе

минеральные компоненты, обладают врожденной способностью к самовосстановлению структуры и к «самозалечиванию» мелких трещин в естественных условиях их эксплуатации.

Для цементных композитов можно выделить три основных типа механизмов самовосстановления структуры: автогенное, биооснованное [5] и активационное [6, 7].

Автогенное самовосстановление структуры цементного композита основано на способности «самозалечивания» трещин при самопроизвольном протекании реакций гидратации и карбонизации внутри системы. При таком типе самовосстановления, в исходную цементную смесь необходимо ввести минеральные компоненты, способные активировать не прогидратировавшие цементные частицы, а также взаимодействие угольной кислоты с гидроксидом кальция при раскрытии (образовании) трещины. Если цементные композиты, модифицированные активными минеральными компонентами, будут подвержены искусственному поливу или природному дождю, то неизбежно начнут ускоряться процессы регенерации при взаимодействии частиц цемента с внешней средой. При этом частицы цемента будут активно взаимодействовать с водой (реакция гидратации) и углекислым газом (реакция карбонизации), заполняя трещины новообразованиями гидросиликатов и карбонатов кальция. При этом формируется новая структура цементного камня, прочность которой не уступает прочности цементного композита до повреждения (рисунок 1). В работе [4] показано, что цементные композиты в водоемах с пресной водой могут «залечивать» трещины шириной до 0,2 мм за время 7 недель, именно используя автогенный механизм самовосстановления структуры материала.

Наиболее динамично в настоящее время развивается биооснованный механизм самовосстановления структуры цементных композитов [5, 6]. Он основан на введении в цементную матрицу композита микрокапсул с бактериями, которые за счет своей жизнедеятельности способны вырабатывать карбонат кальция. Формирующиеся новообразования быстро увеличиваются и способствуют эффективному «залечиванию» трещины и устранению дефекта. Например, в работе [5] представлено исследование по использованию алкалофильных видов бактерий. Изготавливались микрокапсулы, состоящие из спор бактерий *Bacilli megaterium* в среде молочнокислого кальция (питательное вещество) и вносились в цементную матрицу композита. Данный штамм бактерий выбирался опытным путем, они являются крайне живучими и могут годами находиться в цементном композите в «спящем» состоянии. Однако, в случае образования трещины, капсула разрушается под воздействием воды или молекул кислорода, бактерии «оживают» и начинают свою активную жизнедеятельность. Согласно экспериментальным данным, продукт жизнедеятельности бактерий (кальцит) способен заполнять как микротрещины (размером 0,2 мм), так и относительно крупные дефекты.

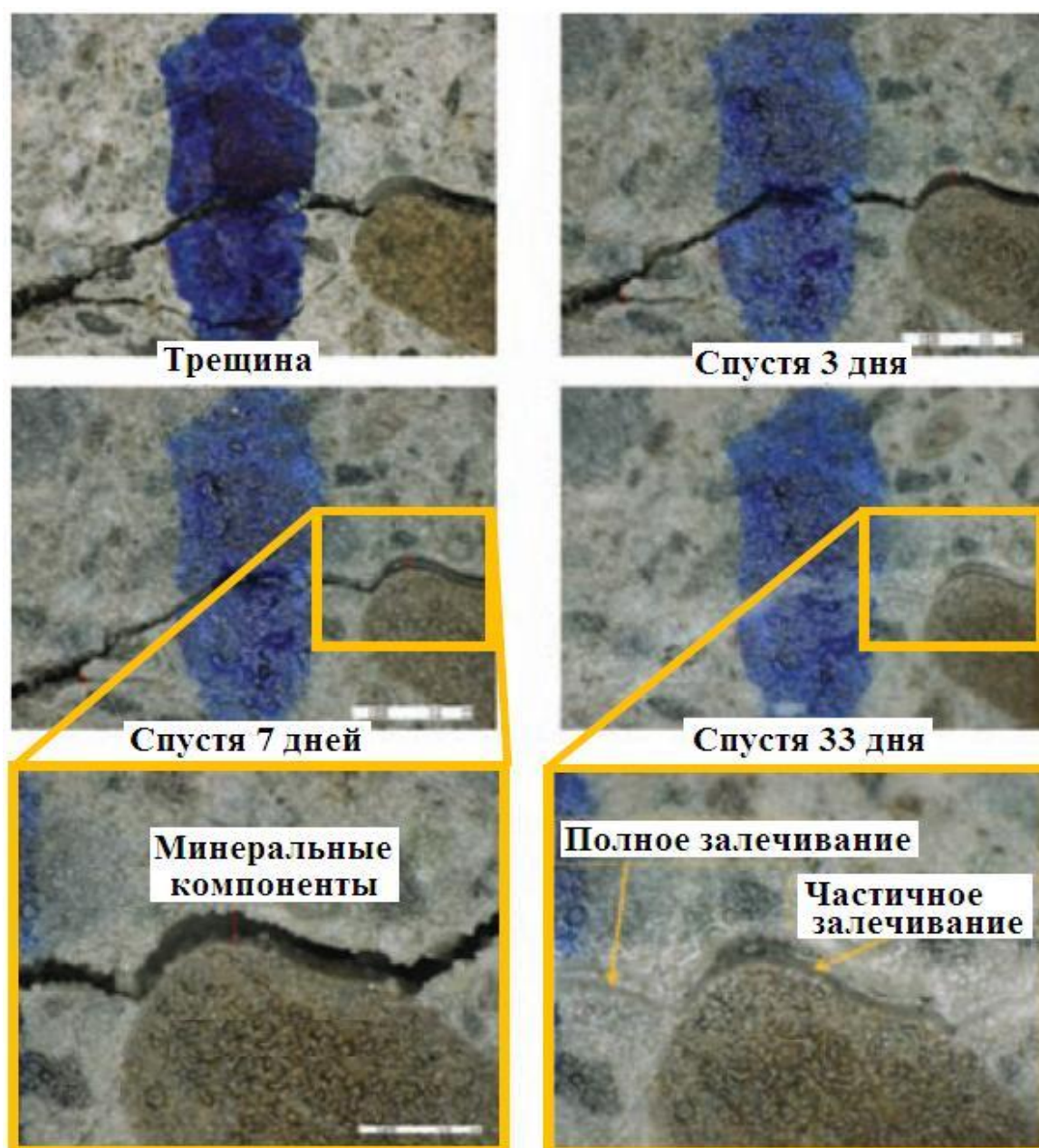


Рисунок 1. Микрофотографии, модифицированного цементного композита при автогенном самовосстановлении трещины [4].

Активационный механизм самовосстановления структуры цементных композитов основан на введении специальных реакционных агентов (различные кремнийсодержащие вещества – силикаты щелочных металлов, различные формы оксида кремния, зольная пыль, расширяющиеся реагенты, GEO материалы) в цементную матрицу [6, 7]. Модифицирование цементных композитов в этом случае, также подразумевает предварительное изготовление специальных структурных элементов (капсул, полых трубок и волокон, капилляров и др.) в которые размещаются указанные добавки. При раскрытии трещины капсулы или трубки повреждаются, высвобождается активный реагент, который запускает реакции «залечивания» дефектов.

Таким образом, цементные композиты с эффектом самовосстановления структуры имеют большой потенциал их применения. В настоящее время,

разработка «самозалечивающихся» цементных композитов находится на начальной стадии развития, но очевидно, что с развитием и удешевлением современных технологий создания «самовосстанавливающихся» цементных композитов они будут внедряться в производство с целью улучшения свойств и продления сроков эксплуатации строительных материалов и конструкций.

#### **Библиографический список:**

1. Singh, N.B. Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials / N.B. Singh // Properties, Modelling and Applications. Micro and Nano Technologies. 2020. P. 9-39.
2. Bekas, D. G. Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques / D.G. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis et al. // Composites Part B. 2016. V. 87. P. 92-119.
3. Zhao, Q. Factors effecting the recovery process of self-repairing concrete / Q. Zhao, P. Cheng, Y. Wei, J. Wang // Magazine of Civil Engineering. 2019. 88(4). Pp. 52–59.
4. Ahn, T.H. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various miner admixtures / T.H. Ahn, T. Kishi // Journal of Advanced Concrete Technology. 2010. 8 (2). Pp. 171-186.
5. Ерофеев, В.Т. Интеллектуальные композиты и их использование для получения самовосстанавливающихся бетонов / В.Т. Ерофеев, В.М. Круглов, Н.И. Ватин, Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2019. № 4. С. 419.
6. Артамонова, О. В. Микро- и нанокапсулирование активных добавок для самовосстанавливающихся цементных композитов / О.В. Артамонова, А.Б. Закатов // Химия, физика и механика материалов. 2023. Вып. № 2 (37). С. 49 – 59.
7. Артамонова, О. В. Современные добавки для самовосстанавливающихся цементных бетонов / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева, М.А. Шведова // Современные проблемы материаловедения: сборник научных трудов [Электронный ресурс] – Липецк : Издательство Липецкого государственного технического университета. 2023. С. 30 – 35.

## ТЕХНОЛОГИЯ СВОЙСТВА КИРПИЧА КОМПРЕССИОННОГО ФОРМОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТНЯКОВ АЛКУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ИНГУШЕТИЯ

Р.М. Арчаков<sup>1</sup>, магистр

В.Д. Котляр<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет

**Аннотация.** В последние годы весьма популярным на юге России стал безобжиговый лицевой кирпич компрессионного формования, получаемый преимущественно на основе различных видов известняков. Обусловлено это несколькими факторами. Для организации производства кирпича не требуется больших капитальных вложений, кирпич имеет привлекательный внешний вид и может иметь различную форму и окраску. Сырьевая база юга России позволяет организовывать производство во многих субъектах южного федерального округа. Проведённые нами исследования показали, что на основе известняков Алкунского месторождения Республики Ингушетия вполне возможно организовать производство такого кирпича. Известняки имеют светло-бежевый и светло-розовый цвет, имеют подходящий химико-минеральный состав и физико-механические свойства. Кирпич, получаемый на их основе, при расходе цемента от 6 до 12 % имеет марку от М100 до М250, а горнотехнические условия месторождения благоприятны для разработки.

**Ключевые слова:** кирпич, известняки, технология, компрессионное формование, прочность.

В последние два десятилетия весьма популярным на юге России стал безобжиговый лицевой кирпич компрессионного формования, получаемый преимущественно на основе различных видов известняков. Обусловлено это несколькими факторами. Для организации производства кирпича не требуется больших капитальных вложений, появились пресса отечественного производства с необходимыми техническими характеристиками и доступной стоимостью, кирпич имеет привлекательный внешний вид и может иметь различную форму и окраску, а сырьевая база юга России позволяет организовывать производство почти на всей территории Южного федерального округа [1,2]. Проведённые нами исследования показали, что на основе известняков Алкунского месторождения Республики Ингушетия вполне возможно организовать производство такого кирпича с широкой цветовой палитрой, отвечающего всем необходимым требованиям.

Алкунское месторождение известняков верхнемелового возраста находится на левом берегу р. Асса, к югу от селения Алкун. Известняки белые, светло-бежевые, светло-розовые, плитчатые, пелитомофные, фарфоровидные морского генезиса. В известняках встречаются органогенные остатки, сложенные раковинами фораминифер и кокколитофорид. Алевроитовый материал представлен угловато-окатанными зёрнами кварца, реже полевых шпатов и редкими тонкими пластинками гидромусковита. Порода бурно реагирует с соляной кислотой.



Запасы по категории С1 составляют 8070,7 тыс. м<sup>3</sup>, а прогнозные запасы существенно больше. Мощность полезного ископаемого составляет до 125 м., а мощность вскрыши от 0,5 до 6,6 м. Физико-механические свойства: плотность 2,67-2,7- т/м<sup>3</sup>, пористость 1,8-5,1 %, водопоглощение 0,1-2,1 %, марка по прочности М700-1000, по морозостойкости F25-35. Горнотехнические условия месторождения благоприятны для разработки. Плитчатая текстура известняков не требует проведения буровзрывных работ при разработке, а само месторождение находится около дороги вдоль реки Асса, соединяющей северную и южную части республики, к тому же месторождение уже разрабатывалось для дорожного строительства (Рисунок 1).



Рисунок 1. Алкунское месторождение известняков Республики Ингушетия

По цвету выделяется два вида известняков, которые залегают отдельными слоями мощностью от 0,4 до 1,0 метра:

- белые, светло-бежевые, бежевые;
- светло-розовые, розовые, до тёмно-розовых.

Усреднённый химический состав данных разновидностей известняков представлен в таблице 1. Как видно, принципиального отличия по химическому

составу между бежевыми и розовыми известняками нет. В последних наблюдается большее содержание оксидов железа, за счёт чего они и приобретают розовый цвет. Минеральный состав бежевых и розовых известняков идентичен. На рисунке 2 приведена рентгенограмма известняка бежевого цвета. Основным минералом является кальцит с небольшой до 4 % примесью кварца и слюдистых минералов (до 1 %).

Таблица 1. Усреднённый химический состав известняков Алкунского месторождения

Разновидности известняков	ппп	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Белые, бежевые	41,32	4,56	0,40	0,60	51,27	0,80	0,03	0,18	0,02	0,03
Розовые	41,44	4,00	0,55	0,77	52,63	0,24	0,03	0,22	0,01	0,005

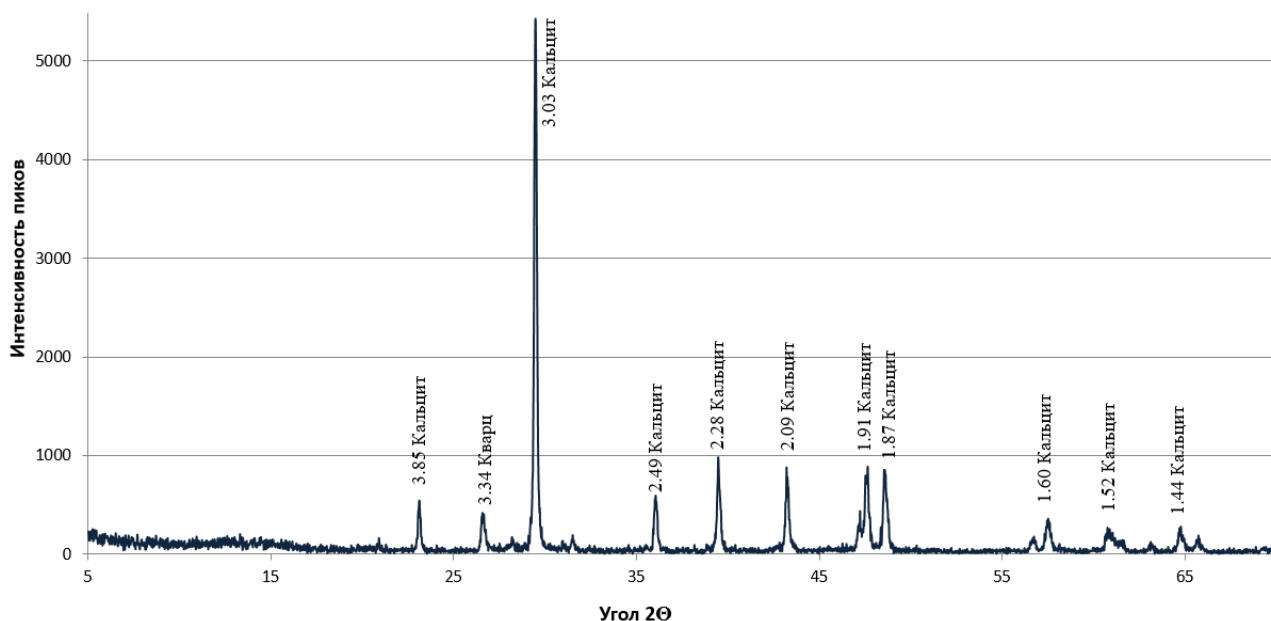


Рисунок 2. Рентгенограмма известняков Алкунского месторождения

Исходя из потребностей рынка нами была определена номенклатура выпускаемой продукции. Изделия подразделяются по форме, размерам и внешнему виду на следующие виды:

- прямоугольные кирпичи обыкновенные и угловые с размерами 250×120×65 мм;
- угловые кирпичи с фасонным узором с размерами 250×120×65 мм;
- заготовки 2-х полукирпичей с размерами после раскалывания 250×60×65 мм;
- заготовки угловых полукирпичей с формой после раскалывания в виде буквы «Г»;
- заготовки под плитку с размерами 250×140×65 мм с формой после раскалывания в виде плитки (4 плитки) с фасками под «дикий камень» с размерами 250×35×65 мм;
- двухкирпичные облицовочные полублоки с размерами 250×135×60 мм.

Разработанная нами технология производства кирпича на основе известняков Алкунского месторождения заключается в следующем. Доставка известняка непосредственно на производство осуществляется из карьера автотранспортом. Подготовка известняка производится путём его измельчения на последовательно установленных щековой (к примеру, модель СМД 108А) и молотковой дробилках (к примеру, СМД-112, СМД-500) и грохочения до фракции 0-2,5 мм. Зёрна известняка крупнее 2,5 мм по возвратному конвейеру снова подаются на молотковую дробилку. Зерновой состав известняка после дробления представлен в таблице 2.

Таблица 2. Зерновой состав известняков после измельчения

Полные остатки на ситах, мм, % по массе					
2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менее 0,16
0	10,4	18,6	19,1	32,2	19,7

Доставка белого и обычного серого бездобавочного цемента с классом по прочности ЦЕМ 0 42,5Н осуществляется автотранспортом, а его хранение осуществляется в силосах. Хранение известняка осуществляется под навесами, которые могут оборудованы кран-балками с грейферным захватом или в бункерных складах для транспортировки погрузчиками.

При подаче измельчённого известняка в бункер, оборудованный питателем, производится определение его влажности для последующей корректировки ввода воды в сырьевую смесь. При производстве объёмно окрашенного декоративного кирпича применяются минеральные химически стойкие пигменты, хранение которых может организовано в зависимости от объёма потребления различными способами.

В состав массоподготовительного отделения входят бункера для исходных компонентов, оборудованные указателями уровня материалов и виброобрушителями сводов, оборудование для пылеулавливания с возможно максимальной очисткой воздуха, весовые дозаторы для измельчённого известняка, цемента и пигментов, транспортёры, скоростные смесители и бункеры по приему готовой сырьевой смеси. Желательно, чтобы, что запас измельчённого известняка в расходных бункерах обеспечивал автономную работу отделения формовки изделий не менее 4-8 часов. Погрешность дозирования материалов по воде и цементу должна быть не более 1 %; по известняку – не более 2 %, по пигментам – не более 0,5 %.

Отдозированные материалы поступают в смеситель, обеспечивающий необходимую производительность, в следующем порядке: в начале загружается известняк необходимой фракции, затем обычный или белый цемент. Смешивание материалов в первый этап осуществляется в сухую в течение 1-2 минут. Затем в работающий смеситель через форсунки в течение не более 2-х минут распыляется вода в необходимом количестве. После подачи воды перемешивание массы в смесителе продолжается еще в течение 2-3 минут. Вода может поступать из водопроводной сети или от собственного источника. Продолжительность перемешивания сырьевой смеси не должна превышать 6 минут.

При производстве цветного кирпича ввод пигментов в смеситель осуществляется после ввода цемента, при сохранении других этапов и общей продолжительности перемешивания. При необходимости производства больших партий цветного кирпича желательно подготовить в отдельных смесителях цементно-пигментную смесь. Данная операция позволяет получать равномерно окрашенный кирпич всей партии. Подготовка смеси может осуществляться в различных лопастных скоростных смесителях. Влажность формовочных смесей может изменяться от 7 до 9 % по массе. Подготовленная смесь должна быть сыпучей и не прилипать к деталям смесителя. Налипание может происходить при повышенной влажности сырьевой смеси.

Формовка кирпича производится на прессах компрессионного формования различной производительности с удельным давлением до 40 МПа. Пресс может комплектоваться оснастками для производства полнотелого кирпича, пустотного кирпича (пустотность до 50 %), фасонного кирпича. Пресса могут работать как с подпрессовкой, так и без неё. Изменение технологических параметров работы прессы производится с клавиатуры блока управления и занимает минимум времени. Выбор типа прессы (2-х или 8-гнездовой) по производительности осуществляется в зависимости от вида выпускаемой продукции, количества смен и рабочих дней в году. Дозирование смеси, степень её уплотнения, настройка давления, стадийности и скорости прессования производятся по размерам, плотности материала кирпича и его структурной прочности. Предел прочности при сжатии свежесформованного кирпича должен быть не менее 0,8 МПа для его сохранности при транспортировке и перекладке.

Отформованный кирпич укладывается рядами в пакеты на прочные деревянные поддоны. Количество кирпича на поддоне должно быть не более 400 штук. Укладка кирпича на поддоны может производиться вручную или роботом-автосадчиком. Количество рядов кирпича по высоте в пакете должно быть не более семи. Набор прочности кирпича может производиться при тепловлажностной обработке или в естественных условиях в пакетах с достаточно плотной обвязкой плёнкой во избежание испарения влаги. Твердение в естественных условиях должно осуществляться при температуре в помещении или на открытом складе не ниже + 10 °С, а площадь помещений для выдержки кирпича должна быть соизмерима для его хранения в течение 2-х недель.

Для ускорения набора прочности кирпича можно организовать тепловлажностную обработку по режиму: подъём температуры 2 часа; выдержка при температуре 80-85 °С 6-8 часов; охлаждение – 2 часа. Температура кирпича на выходе из камеры тепловлажностной обработки не должна быть выше + 50 °С. В зимнее время, изделия, выгружаемые из камеры тепловлажностной обработки, для добора отпускной прочности надо выдерживать в помещении не менее суток с температурой не ниже +10 °С. Для выпуска плитки и колотого кирпича – «дикий камень», могут использоваться небольшие гильотины и специальные раскалывающие установки.

Прочность кирпича зависит от расхода цемента, влажности сырьевой смеси и удельного давления прессования. Для известняков Алкунского

месторождения оптимальными параметрами являются влажность сырьевой смеси 8,5 % и давление прессования 30 МПа. В таблице 3 приведены характеристики лабораторных образцов полнотелого кирпича при различном содержании цемента в сырьевой смеси. Как видно из результатов экспериментов, при содержании цемента в количестве 9 % кирпич обладает вполне достаточной прочностью и морозостойкостью. Расход цемента в процессе производства может быть скорректирован.

Таблица 3. Характеристики лабораторных образцов кирпича при различном содержании цемента сырьевой смеси

Расход цемента	Плотность образцов во влажном состоянии	Плотность в сух. состоянии	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии затвердевших образцов, МПа	Прочность водонасыщенных образцов	Морозостойкость, циклы
6%	2,21	1,86	8,04	15,9	14,6	F35
9%	2,26	1,90	7,05	24,2	23,9	F50
12%	2,29	1,94	6,96	30,8	27,6	F75

Цвет кирпича на белом цементе имеет чистые белые и розовые цвета с небольшим оттенком. На сером цементе цвета приобретают закономерно сероватый оттенок, но вполне светлый и приятный для потребителя. При вводе пигментов получаются чистые насыщенные цвета без потери прочности (рисунок 3).



Рисунок 3. Цвета образцов при вводе пигментов в количестве до 1-3 %

Проведённые нами эксперименты позволят организовать производство кирпича компрессионного формования на основе известняков Алкунского месторождения широкой гаммы по форме и цветовой палитре, что существенно расширит ассортимент стеновых изделий в Республике Ингушетия и прилегающих регионах.

#### Библиографический список:

1. Курилова, С.Н. Безобжиговые стеновые изделия компрессионного формования на основе опок / С.Н. Курилова, В.Д. Котляр // Евразийский союз учёных. 2015. № 4(13). С. 116-118.
2. Талпа, Б.В. Безобжиговый кирпич из техногенного карбонатного сырья Юга России / Б.В. Талпа // Строительные материалы. 2003. №11. С. 50-51.

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА РИГЕЛЬНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА НА ОСНОВЕ АРГИЛЛИТОВ АЛКУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ИНГУШЕТИЯ

А.М. Арчаков<sup>1</sup>, магистрант

К.А. Лапунова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет

**Аннотация.** Ригельный кирпич, особенностью которого является достаточно большая длина – до 700 мм, при небольшой ширине – 100-120 мм и малой высоте – до 40 мм, становится всё более популярным у архитекторов, потребителей и строителей. Этому способствуют его необычная форма, которая открывает совершенно новые возможности для оформления интерьеров и фасадов зданий. Несмотря на кажущуюся простоту ригельного кирпича, за счёт его необычной формы и размеров, организация производства является непростым делом. Инициативные поисковые работы позволили выделить в Республике Ингушетия оптимальное сырьё промышленного изготовления ригельного кирпича – аржиллиты. Их особенностью является тонкое переслаивание с аржиллитоподобными глинами. Технологическая схема производства ригельного кирпича на основе аржиллитов Республики Ингушетия, предлагаемая нами, позволит организовать производство с минимальной себестоимостью изделий и минимальными затратами.

**Ключевые слова:** ригельный кирпич, аржиллиты, аржиллитоподобные глины, технология, прочность, водопоглощение.

В последние годы всё большую популярность у архитекторов и строителей приобретает ригельный кирпич (Рисунок 1). Такой кирпич является настоящим источником вдохновения для архитекторов и дизайнеров, так как открывает совершенно новые возможности для оформления интерьеров и фасадов зданий, особенно в сочетании различных цветов кирпича и толщиной кладочного шва.



Рисунок 1. Ригельный кирпич различного цвета

Сама по себе форма и размеры ригельного кирпича не являются чем-то новым. Ещё в древности в строительстве использовали плинфу, которая в перевязке имеет вид длинного и узкого кирпича – ригеля. Такая кладка придавала зданиям прочность и сейсмическую устойчивость (рисунок 2) [1].

Несмотря на кажущуюся простоту ригельного кирпича, организация его производства является непростым делом. Большая длина кирпича резко увеличивает риски появления дефектов при сушке кирпича, поэтому глинистое

сырьё для его производства должно быть малочувствительным к сушке, иметь небольшую воздушную усадку (до 5 %), а также иметь достаточную структурную прочность и связность. Кроме того, форма кирпича предопределяет необходимость иметь достаточно высокий предел прочности при изгибе. Такие глины, а обычно это каолинит-гидрослюдистые глины, встречаются достаточно редко и в основном они применяются для изделий из тонкой керамики. В любом случае в керамические массы на их основе необходим ввод достаточно большого количества шамота.



а



б

Рисунок 2. Виды плинфообразной кладки в древних постройках, г. Стамбул, Турция: а – фрагмент скругленной конструкции стены; б – смешанная кладка

Инициативные поисковые работы и геологический анализ минерально-сырьевой базы Республики Ингушетия показал, что аргиллитоподобные глины и аргиллиты, по возрасту относящиеся к нижнему отделу мелового периода, могут стать весьма перспективным сырьём для производства ригельного кирпича [2]. Мощность толщ аргиллитов, которая выходит на поверхность южнее селения Алкун, на левом берегу реки Асса, составляет 100 и более метров. обнажения аргиллитов наблюдаются вдоль дороги на Джейрах (рисунок 3).



Рисунок 3. Выходы аргиллитов в Республике Ингушетия вдоль дороги от селения Алкун до селения Гули

Изучение аргиллитов нижнего мела Республики Ингушетия позволило нам выявить одну важную особенность. Толща аргиллитов представляет собой на самом деле тонкое переслаивание примерно в равном соотношении собственно аргиллитов, которые не размокают в воде, и аргиллитоподобных глин, которые размокают в воде, хотя и медленно. Таким образом, аргиллиты в составе керамической массы выполняют роль отощителя, а аргиллитоподобные глины – роль связующего компонента.

Проведённые лабораторно-технологические испытания показали, что по химическому составу смешанная толща аргиллитов и аргиллитоподобных глин относится к полукислому сырью с содержанием кремнезёма от 60 до 65 % и  $Al_2O_3$  от 14 до 18 % и высоким содержанием красящих оксидов (таблица 1).

Таблица 1. Усреднённый химический состав аргиллитов и аргиллитоподобных глин, % по массе

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$ общ.	CaO	MgO	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$	$P_2O_5$	$TiO_2$	ППП
60,50 - 65,35	14,28 - 18,57	3,15 - 5,21	2,55- 4,81	1,16 - 2,40	0,09 - 0,15	2,69 - 3,76	1,55 - 1,98	0,14 - 0,18	0,09 - 0,11	5,51 - 8,14

По минеральному составу данное глинистое сырьё можно отнести к полиминеральному. Преобладающими являются гидрослюды, однако присутствуют и смешаннослойные минералы, каолинит, монтмориллонит, а также кварц, полевые шпаты и слюды (Рисунок 4).

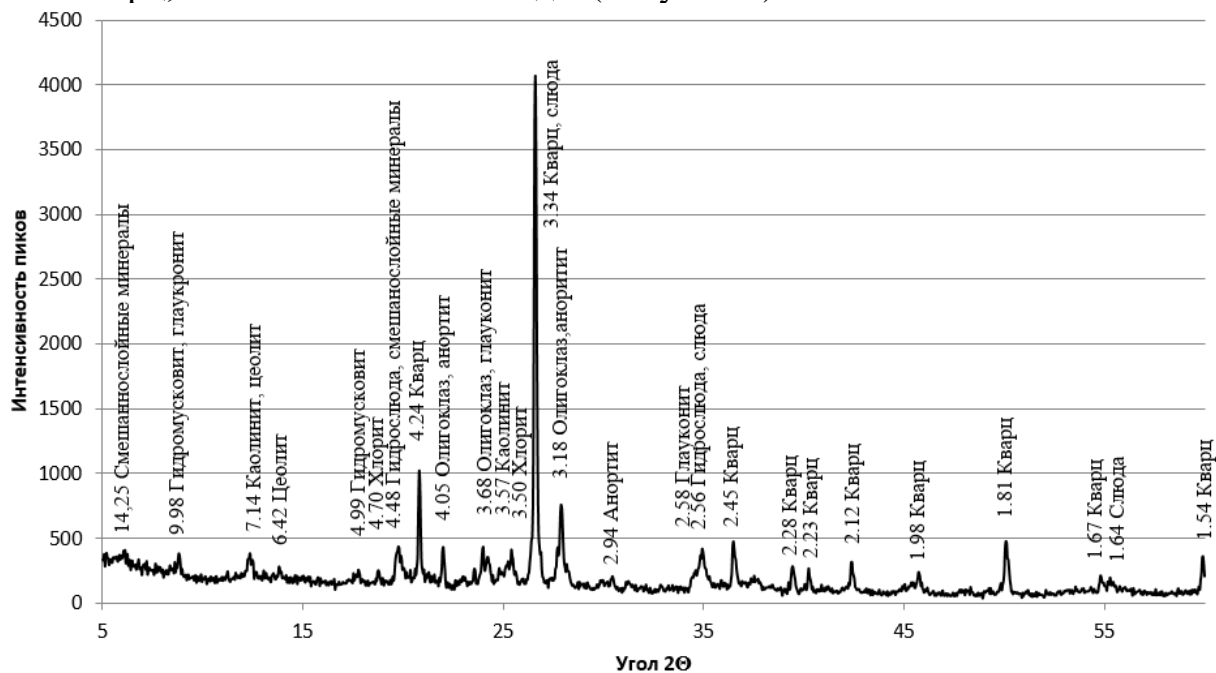


Рисунок 4. Рентгенограмма тонкопереслаивающихся аргиллитов и аргиллитоподобных глин

Структура данных пород может быть охарактеризована как пелито-алевритистая скрытокристаллическая, текстура как слоистая, слабослоистая ориентированная.

Дообжиговые керамические свойства аргиллитов и аргиллитоподобных глин характеризуются в зависимости от степени измельчения и переработки



пластичностью в интервале 9-12 единиц. Воздушная усадка колеблется в интервале 2-4 %. Керамические массы на основе аргиллитов являются малочувствительными к сушке с умеренной механической прочностью образцов на изгиб в сухом состоянии (до 3,4 МПа).

Аргиллиты и аргиллитоподобные глины по обжиговым керамическим свойствам относятся к легкоплавкому сильноспекающемуся сырью низкотемпературного спекания. К примеру, на рисунках 5 и 6 показаны зависимости водопоглощения и предела прочности при сжатии образцов от температуры обжига при измельчении сырьевой смеси до фракции менее 0,5 мм [3].

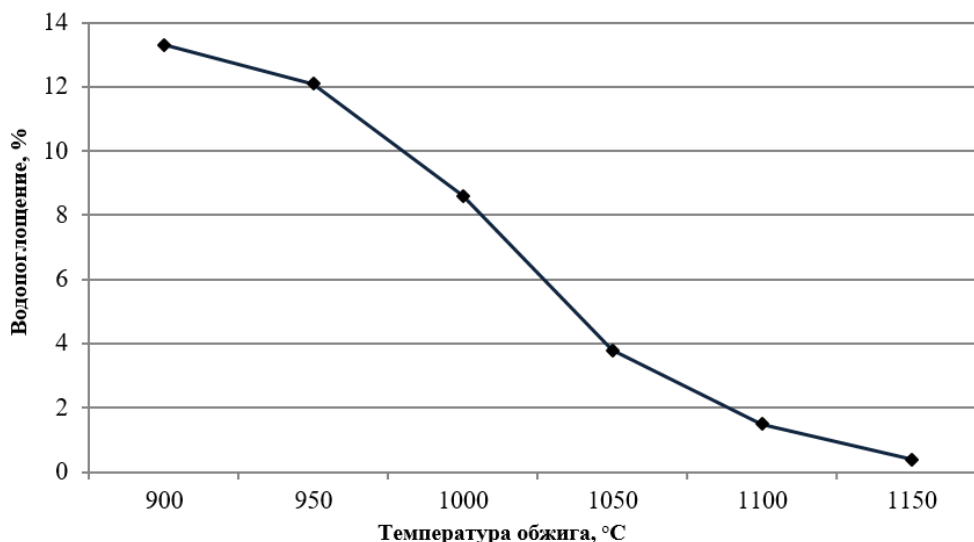


Рисунок 5. Зависимость водопоглощения от температуры обжига

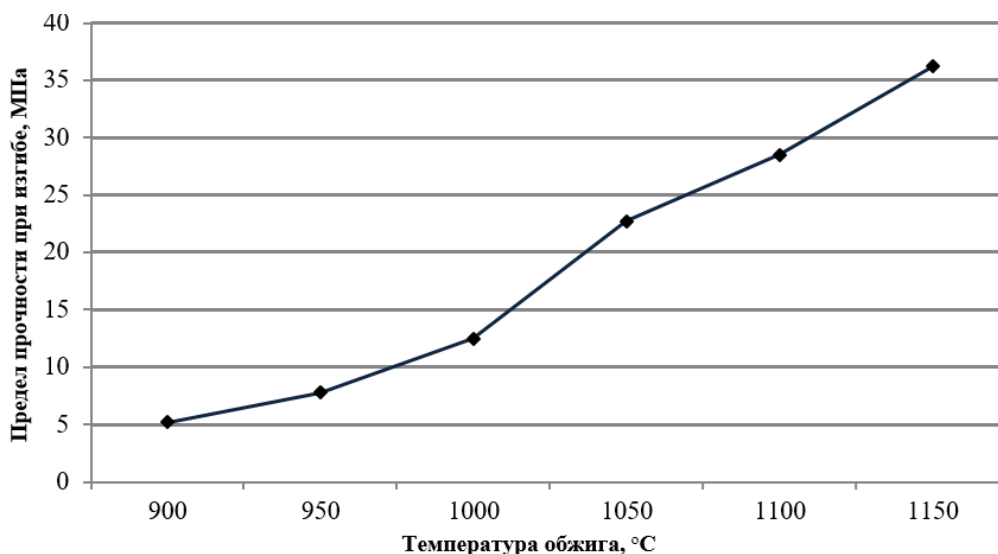


Рисунок 6. Зависимость прочности от температуры обжига

Уже при температуре обжига 1000-1050 °C керамические образцы в виде натурального кирпича обладают достаточно высокой прочностью – более 20 МПа и низким водопоглощением. Результаты наших исследований позволили разработать простую и эффективную технологическую схему производства ригельного кирпича на основе аргиллитов, схематично изображённую на рисунке 7 [4].

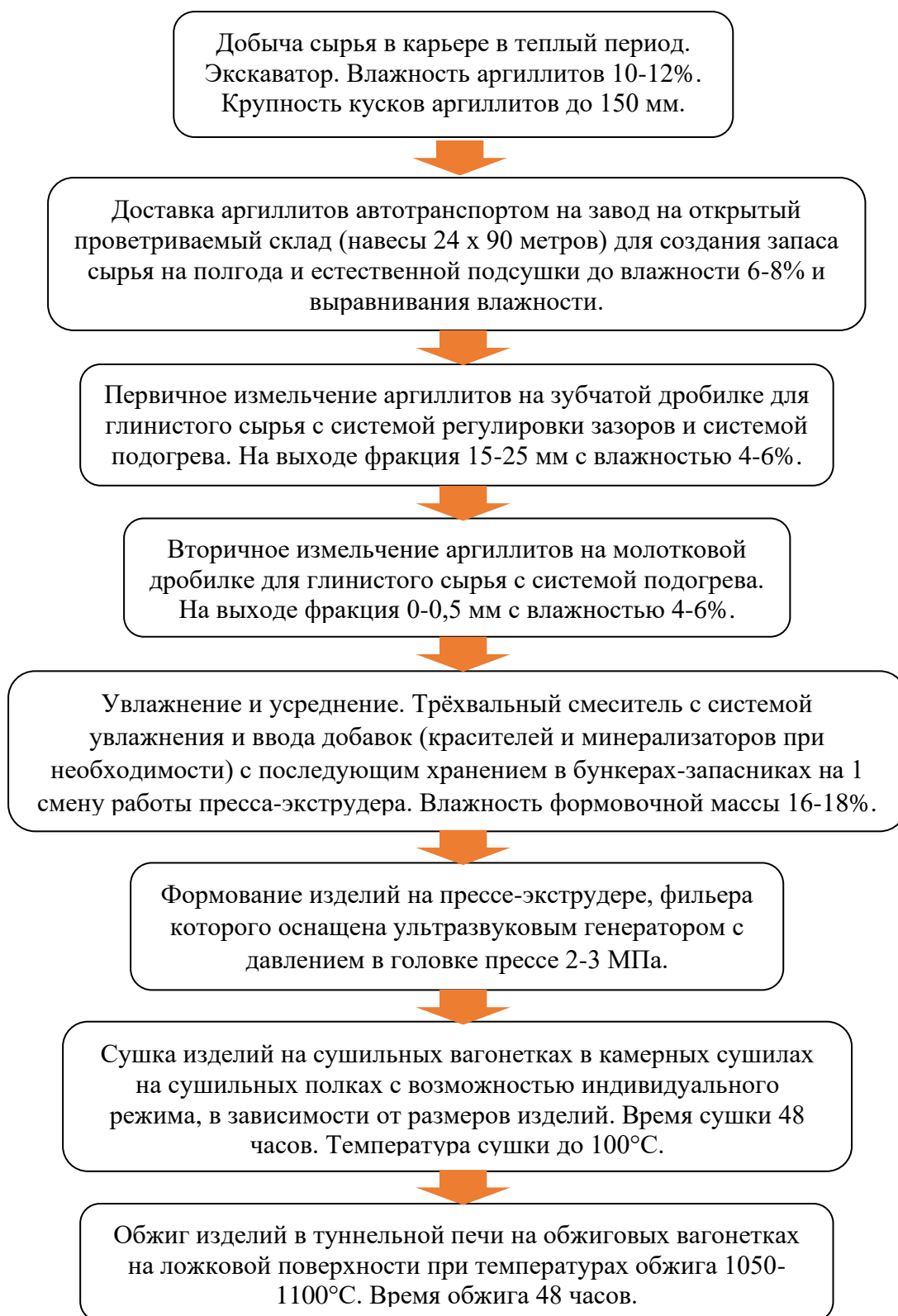


Рисунок 7. Технологическая схема производства ригельного кирпича

Камнеподобное глинистое сырьё (смесь аргиллитов и аргиллитоподобных глин) подвергается дроблению на зубчатой дробилке до крупности частиц менее 15-25 мм, после чего по системе конвейеров транспортируется для вторичного измельчения на молотковой дробилке специальной модификации для глинистого сырья, на которой происходит тонкое измельчение массы до зернового состава

0-0,5 мм. После чего измельчённый материал по системе конвейеров попадает в накопительные бункеры, оснащённые питателями. Далее масса попадает по системе конвейеров в трёхвальный смеситель, где происходит увлажнение сырьевой массы с вводом добавок при необходимости – пластификаторы, минерализаторы, плавни, красители. Подготовленная масса вылёживается в бункерах накопителях. Они обеспечивают на какое-то время автономную работу формовочного отделения и позволяют выровнять формовочную влажность.

Формовка изделий производится на экструдере, фильера которого оснащена ультразвуковым генератором для ультразвукового воздействия на формовочную массу, что позволяет сформировать особую структуру керамики и повысить прочность изделий. На сушку отформованные изделия поступают в камерные или туннельные сушила. После чего следует обжиг, который может проводиться в различных традиционных для керамики видах печей – туннельных или камерных. В настоящее время более эффективными являются туннельные печи, которые могут отличаться вариациями размеров и, соответственно, производительностью [5].

Предлагаемая нами технологическая схема производства ригельного кирпича на основе аргиллитов Республики Ингушетия позволит организовать производство с минимальными затратами и минимальной себестоимостью изделий.

#### **Библиографический список:**

1. Лапунова К.А., Мычка И.Ю. Керамический кирпич в архитектурном декоре, скульптуре и ландшафтном дизайне / К.А. Лапунова, И.Ю. Мычка // Молодой исследователь Дона, ДГТУ. 2017. № 5 (8). С. 78-83.
2. Ужахов, К.М. Сырьевая база Республики Ингушетия для производства клинкерного кирпича / К.М. Ужахов, А.В. Котляр // Труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России». Новокузнецк, СГИУ-АСИ. 2022. С. 225-228.
3. Котляр, А.В. Технологические свойства аргиллитоподобных глин при производстве клинкерного кирпича / А.В. Котляр // Вестник ТГАСУ. 2016. № 2 (55). С. 164–175.
4. Котляр, В.Д. Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение / В.Д. Котляр, К.М. Ужахов, А.В. Котляр, Ю.В. Терёхина // «Строительные материалы». 2023. № 5. С. 4-8.
5. Котляр, А.В. Характеристика камнеподобных глинистых пород как сырья для производства строительной керамики / А.В. Котляр // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 31-37.

## ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНОВ

А.А. Аскадский<sup>1,2</sup>, д-р хим. наук

Т.А. Мацевич<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской Академии Наук

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** Впервые получены градиентные полимерные материалы на основе смесей полиизоциануратов и полиуретанов. Такие материалы обладают квазиупругими свойствами в любой точке градиента. Градиентные материалы представляют собой сетчатые полимеры, содержащие объемистые узлы сшивки и короткие гибкие полимерные цепочки, соединяющие эти узлы. Полученные материалы обладают модулем упругости в интервале от ~4 до 1190 МПа, прочностью на изгиб от ~11 до 770 кг/см<sup>2</sup>. Удельная ударная вязкость находится в интервале от ~1,0 до 12 кг·см/см<sup>2</sup>. Ряд композиционных материалов вообще не разрушаются при ударном воздействии. Градиентные материалы могут найти применение в строительной отрасли.

**Ключевые слова:** Градиентные полимерные материалы, полиизоцианураты, полиуретаны, модуль упругости, прочность при изгибе, удельная ударная вязкость.

Получены градиентные полимерные материалы переменного химического строения с помощью перехода от полиизоциануратов (ПИЦ) к полиуретанам (ПУ). Ранее такие материалы получали только на основе полиизоциануратов [1-3].

Для получения градиентных материалов необходимо синтезировать сетчатые полимеры с объемистыми узлами сшивки и короткими гибкими цепями, соединяющими эти узлы. Тогда равновесный модуль упругости  $E_\infty$  будет определяться следующими соотношениями:

$$E_\infty = E_0 \frac{2(m + \beta)}{\Phi m^2} \quad (1)$$

где

$$E_0 = \frac{3\rho R\Phi T}{2M_0}$$

$m$  – количество повторяющихся звеньев в линейных цепях, соединяющих узлы сшивки;

$\rho$  – плотность,

$R$  – универсальная газовая постоянная,

$\Phi$  – функциональность сетчатого полимера (количество линейных цепей, выходящих из одного узла сетки),

$T$  – абсолютная температура,

$M_0$  – молекулярная масса линейных цепей, соединяющих узлы сетки.

Величина  $\beta$  представляет собой отношение ван-дер-ваальсова объема узла сетки к ван-дер-ваальсову объему повторяющегося звена линейных цепей, соединяющих эти узлы.

Сущность градиентных полимерных материалов заключается в том, что материал в любой точке градиента обладает квазиупругими свойствами, а не вязкоупругими, которыми обладают все материалы, полученные на основе смесей стеклообразных полимеров и эластомеров. Поэтому кривые растяжения градиентных материалов таковы, как это изображено на рисунке 1.

Напряжение, МПа

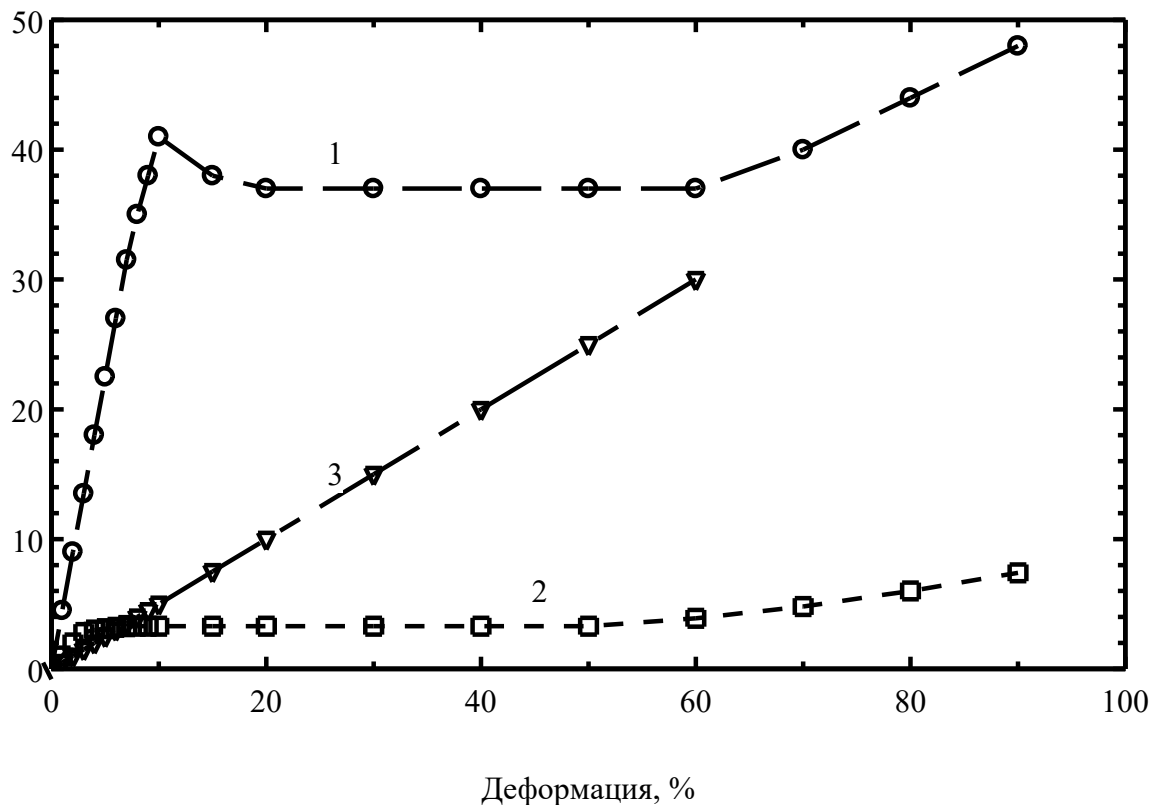
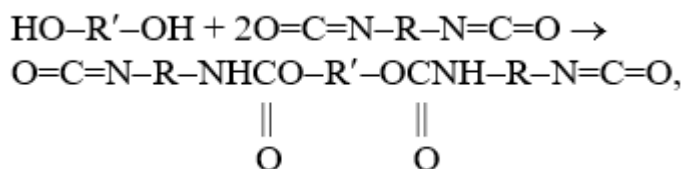
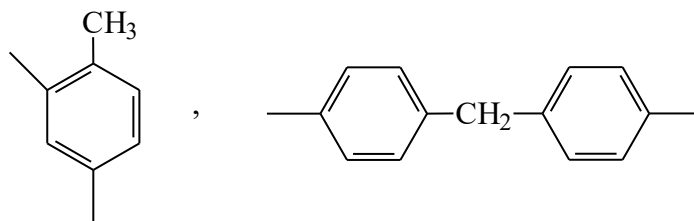


Рисунок 1. Кривые растяжения полимерных материалов: 1 – стеклообразный полимер, 2 – резиноподобный материал, 3 – градиентный полимер.

Материалы синтезированы по реакции полициклотримеризации олигоэфирдиизоцианата на основе олигопропиленоксида, и миграционной полимеризацией макродиизоцианата и диамина. В качестве ароматического диизоцианата использовался 2,4-толуилендиизоцианат, а в качестве диамина – ди-(3-хлор-4-аминофенил)-метан, а также ряд других соединений. Схема реакции показана ниже:

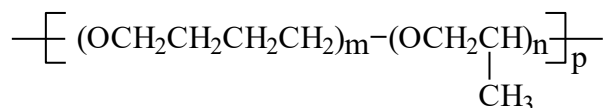


где R обозначает следующие продукты:

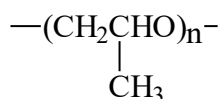


2,4-толуилендиизоцианат (ТДИ) 4,4'-дифенилметанодиизоцианат (МДИ)

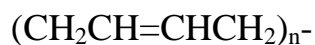
R' означает следующие продукты:



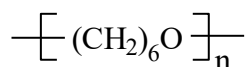
PF-OP-15 (сополимер пропиленоксида и тетрагидрофурана)



ППГ (полипропиленгликоль)



БК (бутадиеновый каучук)



ПГМО (полигексаметиленоксид)

В качестве полимерной матрицы выбрали вспененный полиуретан, а в качестве наполнителя использовали углеткань или углеленту. Вспененный полиуретан очень широко используется как в строительстве, так и в других технических изделиях, например, в производстве мебели. Кроме этого, пенополиуретан является распространенным средством ликвидации пустот в элементах строительной индустрии. Углеткани и углеленты широко используются в качестве усиливающих наполнителей при получении армированных композитов на основе полимеров. Они также интенсивно выпускаются промышленностью. Все отмеченное выше делает перспективным использование полиуретана и углеродных усиливающих наполнителей для получения композитов, в том числе и градиентных материалов на их основе.

В данной работе получены градиентные армированные полимерные материалы. Такие материалы обладают высокой прочностью и модулем упругости. При использовании их для получения градиентных материалов они обладают постепенным переходом от твердого пластика к резиноподобному материалу. В данной работе уделено внимание исследованию твердости по Бринеллю градиентных материалов, которая измерена в разных точках градиента. Это позволило рассчитать на основе твердости также модуль упругости и продемонстрировать, как он изменяется по длине одного и того же образца материала. Также измерены коэффициенты трения и величины износа

материалов. Физико-механические свойства полиуретанизоциануратных полимерных материалов показаны в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства полиуретанизоциануратных полимерных материалов

ПИЦ:ПУ, мас. %	Модуль упругости E, МПа	Содержание ТДИ в его смеси с ОЭЦ в ПИЦ композиции, мас. %	Удельная ударная вязкость, кг·см/см <sup>2</sup>	Прочность на изгиб, кг/см <sup>2</sup>
ПИЦ (без наполнителя)	1185	60,0	1,04	771
ПИЦ (с TiO <sub>2</sub> )	1250	50,0	5,6	718
ПИЦ (с техн. углеродом)	1314	60,0	2,0	240
80:20	517	48,0	3,9	232
60:40	293	36,0	8,9	183
50:50	127	30,0	12,0	30,0
40:60	21,7	24,0	Не разрушается	27,8
20:80	14,4	12,0	Не разрушается	12,8
ПУ	3,9	0	Не разрушается	10,8

Градиентные материалы готовы к практическому использованию, так как разработана технология получения композиционных градиентных материалов на основе полиизоциануратных и полиуретановых полимеров.

#### Библиографический список:

1. Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т.1. Атомно-молекулярный уровень / А.А. Аскадский, В.И. Кондращенко. – М.: Научный Мир, 1999. 544 с.
2. Аскадский А.А., Мацевич Т.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т.2. Нано-супрамолекулярный уровень / А.А. Аскадский, Т.А. Мацевич, В.И. Кондращенко. – М.: Спутник, 2022. 489 с.
3. Askadskii A.A. Computational Materials Science of Polymers. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2003. 695 p.p.

# МОДИФИКАЦИИ ДОМЕННОГО ШЛАКА С ПОМОЩЬЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

С.И. Баженова<sup>1</sup>

Ву Ким Зиен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>2</sup>Колледж промышленности и строительства, Вьетнам

**Аннотация.** Доменный шлак представляет собой продукт, получаемый методом расплава чугуна в домене. Захоронение доменного шлака обходится дорого и вызывает ряд экологических проблем, таких как загрязнение почвы органическими соединениями, выщелачивание тяжелых металлов и вторичное пылеобразование. Низкотемпературный неравновесный плазменный метод обработки доменного шлака позволяет получить модифицированный доменный шлак с лучшими свойствами, чем исходный доменный шлак. В статье представлены результаты обработки доменного шлака методом низкотемпературной неравновесной плазмы. Процесс обработки доменного шлака осуществляется в лаборатории МГСУ. Генератор переменного тока с напряжением до 8000 В и частотой до 40 кГц между электродами создает область низкотемпературной неравновесной плазмы. Результаты исследований показывают, что после обработки доменного шлака методом низкотемпературной неравновесной плазмы на поверхности доменного шлака появляются трещины. Исследование методом комбинационного рассеяния света (КР) выявило наличие явных изменений положения и интенсивности полос в спектрах комбинационного рассеяния модифицированных образцов. Это приводит к уменьшению размера зерна, увеличению удельной поверхности и увеличению поглотительной способности доменного шлака. Результаты исследований также показали, что метод низкотемпературной неравновесной плазмы является эффективным методом обработки доменных шлаков.

**Ключевые слова:** низкотемпературная неравновесная плазма, доменный шлак, удельная поверхности, поверхностная активность, поглощение.

Устранение негативного воздействия на окружающую среду может быть достигнуто за счет таких процессов и методов переработки, которые не только уменьшают объем перерабатываемых отходов производства, но и обеспечивают их утилизацию с минимальными затратами. Это применимо и к отходам доменного шлака [1-3].

Доменный шлак представляет собой неметаллический остаток, обычно получаемый на сталелитейных заводах или в результате выплавки руды в доменной печи. Доменный шлак имеет высокое содержание гидратов силиката кальция (CSH), которые представляют собой соединение, повышающее прочность, улучшающее прочность, долговечность и внешний вид бетона [4-6]. Для переработки и утилизации доменного шлака разработано множество методов. Например, механическое измельчение. Этот метод позволяет получить тонкоизмельченный доменный шлак для использования его в качестве заполнителя или добавки в технологии бетона [7].

Еще одним перспективным методом обработки доменного шлака является обработка его низкотемпературной плазмой. Температура внутри плазменного



потока колеблется между 4000 и 20000 К. При этой температуре все существующие вещества будут оплавляться, уменьшая массу продукта и превращаясь в стекловидный шлак [8, 9]. Кроме того, плазменная технология использовалась для обработки наиболее опасных отходов, таких как радиоактивные отходы, загрязненные медицинские отходы и органические отходы [10-12].

В связи с тем, что способ механохимической активации при измельчении, доменного шлака имеет ограниченные возможности, так как активировать материал мы можем только до определенного момента – размера частицы [13-16]. Для увеличения эффективности дальнейшего процесса механохимической активации, необходимо было бы изменить помольное оборудование с его характеристиками: размер и количество размольных тел, время и интенсивность помола и т.п.

Поэтому в данной работе представлено влияние метода низкотемпературной неравновесной плазмы на свойства доменного шлака.

При проведении исследований использовался доменный шлак (ДШ) завода «Ноа Phat» (Вьетнам), использованный в исследовании  $\rho = 2,63 \text{ г/см}^3$ .

Источник переменного тока напряжением не более 8000 В и частотой до 40 кГц используется в лабораторных установках для генерации низкотемпературной неравновесной плазмы. Между электродами плазмотрона образуется область низкотемпературной неравновесной плазмы с параметром  $E/N$ , равным  $15 \times 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ .

Эксперименты по рамановской спектроскопии проводились в Институте кристаллографии ФГБУН. А.В. Шубникова РАН. Рентгенофлуоресцентный анализ доменных шлаков до и после низкотемпературной плазменной обработки проведен в РГУ им. Д.И. Менделеева. Методом оптической регистрации исследованы изменения макро- и микроструктуры контрольных доменных шлаков и доменных шлаков, переработанных в барьерном разряде. Количественные характеристики изменения шероховатости определялись с помощью анализатора удельной поверхности в лаборатории МГСУ.

Результаты анализа методом КР данных, полученных по изменению характера поверхности плазменно-модифицированного доменного шлака, позволяют сделать вывод о переходе от кристаллической к более активной аморфной структуре. Длина волны возбуждения 671 нм (красный спектр с люминесценцией), мощность возбуждения 20 мВт, апертура 50 мкм, время накопления 1 мин., разрешение  $3 \text{ см}^{-1}$ .

Изучение результатов метода КР выявило наличие отчетливых изменений положения и интенсивности спектров КР модифицированных образцов, полученных в результате плазменной обработки минералов, что свидетельствует о наличии фазовых переходов первого и второго рода. Хотя точно идентифицировать комбинационно-активные фазы образцов шлака в процессе измерения сложно, полученные данные показывают, что уровни управляющих переменных (апертура, длина волны и поляризация источника возбуждения) не приводят к качественному изменению реакции по сравнению с контролем. Сравнение кривых для контрольного и модифицированного образцов при

плазменном воздействии показывает, что одним из эффектов плазмохимической обработки является увеличение интенсивности люминесценции (непрерывная составляющая отклика, по-видимому, не обусловлена однофотонными процессами). В результате поверхностная концентрация функциональных групп возрастает по мере увеличения времени выхода из метастабильного состояния. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что увеличение сорбционной способности минерального носителя не пропорционально времени воздействия низкотемпературной неравновесной плазмы.

Проведя РФА анализ обработанного в плазме шлака в сравнении с контрольным образцом выявлено, что у обоих образцов наблюдается очень высокий «фон» и в середине графика на спектре находится «гало». Это характеризует стекловидную и незакристаллизованную аморфную твёрдую фазу образцов. Результаты РФА и КР-спектрографии косвенно подтверждают, что образец после плазменной обработки имеет изменения только на поверхностных и приповерхностных слоях, но не по всему объёму.

Основные технические характеристики прибора - минимальная удельная поверхность: от 0,01 м<sup>2</sup>/г. Экспериментальные результаты представлены в таблице ниже.

Таблица 1. Удельная поверхность доменного шлака до и после плазменной обработки

П/п	Образец	Удельная поверхности, см <sup>2</sup> /г
1	Необработанный	4565
2	Обработанный	4783

Согласно сводной таблице результатов, наблюдается значительное увеличение удельной поверхности и, как следствие, шероховатости. Позволяет сделать предположение о возможном повышении активности материала была получена серия изображений, некоторые из которых показаны ниже.

Образец закрепляется на предметное стекло, а изображения выводятся на экран компьютера с помощью программы Image Range, позволяющей наблюдать характерные изменения поверхности зерна доменного шлака, которые затем фиксируются в виде фотографии.

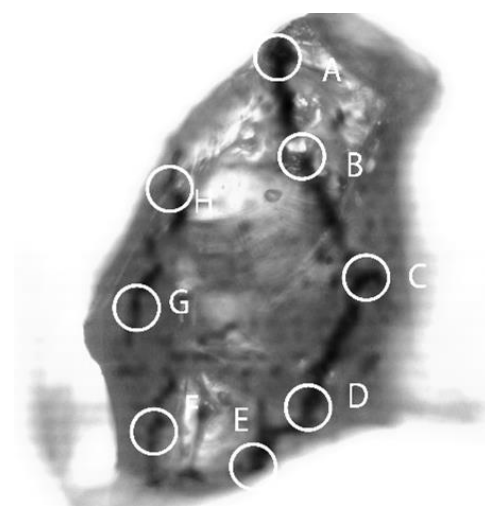
Из рисунка 1 видно, что контрольный образец доменного шлака не имеет ярковыраженных дефектов, но которые образуются по мере увеличения времени воздействия низкотемпературной плазмы, траектория движения развития дефектов поверхности идут по линиям А, В, С, D, Е, F, G, H.

Степень развитости поверхности увеличивается при воздействии низкотемпературной плазмы, что в конечном итоге приводит к необратимым повреждениям. В результате увеличивается дисперсия и уменьшается размер частиц.

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:



Зерно доменного шлака до обработки в плазме (контроль)



Зерно доменного шлака после обработки в плазме

Рисунок 1. Изображение поверхности плазменного доменного шлака и исходного доменного шлака

Степень дефектности доменного шлака увеличивается при воздействии на него низкотемпературной неравновесной плазмы, что приводит к увеличению сорбционной способности и площади поверхности частиц доменного шлака.

Использование низкотемпературной неравновесной плазмы для обработки доменных шлаков делает их расширяемыми по функциям и непохожими на другие методы преобразования. Таким образом, можно сделать вывод, что метод низкотемпературной неравновесной плазмы является эффективным методом обработки доменных шлаков.

#### Библиографический список:

1. Kourti I., Amutha R.D., Voccaccini A. R., Cheeseman C. R. Geopolymers from DC Plasma-Treated Air Pollution Control Residues, Metakaolin, and Granulated Blast Furnace Slag // *Journal of materials in civil engineering*. 2011. Vol 23: Pages 735-740. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000170](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000170).
2. Guanrun Chu, Chun Li, Weizao Liu, Guoquan Zhang, Hairong Yue, Bin Liang, Ye Wang, Dongmei Luo. Facile and cost-efficient indirect carbonation of blast furnace slag with multiple high value-added products through a completely wet process // *Energy*. 2019. Vol 166. 1314e1322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.128>.
3. Paul K. C., Xin P.Lu. *Low Temperature Plasma Technology* // UK: Publishing House of Taylor & Francis Group. 2014. 488 p.
4. Ву К.З., Баженова С.И. Применение доменного шлака в растворах и бетоне // В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. Сборник Материалы VII-ой Международной научно-практической конференции. 2020. С. 279-283.
5. Öner M. Study of intergrinding and separate grinding of blast furnace slag cement // *Cement and Concrete Research*. 2000. vol. 30. no. 3. P. 473-480. doi:10.1016/S0008-8846(00)00197-6.
6. Ву К.З., Танг В.Л., Баженова С.И., Нгуиен З.Ф. Возможность использования доменных шлаков в производстве бетонов и растворов во Вьетнаме // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. Номер. 11. P. 17-24.

7. Vu K.D., Bazhenova S.I., Nguyen T.C., Tang V.L., Do M.C., Van L.L., Nguyen V.D., Nguyen C.L., Minh T.H. Blast furnace slag properties at different grinding times and its effect on foam concrete properties // *Civil Engineering Journal*. 2022. vol. 3. no. 2. Pages 32-44. DOI 10.14311/CEJ.2022.01.0003.
8. Paul K. C., Xin P.Lu. *Low Temperature Plasma Technology* // UK: Publishing House of Taylor & Francis Group. 2014. 488 p.
9. Бруяко М.Г., Кравцова Д.В., Юрченко В.В., Соловьев В.Г., Ушков В.А. Влияние обработки сырьевых материалов низкотемпературной неравновесной плазмой на свойства строительных растворов // *Строительные Материалы*. 2014. Номер. 12 С. 68-71.
10. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Kondratyuk A.A., Vitske R.E. Fly ash particles spheroidization using low temperature plasma energy // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 156 (2016) 012043. p. 6. doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012043.
11. Cheng T.W., Chu J.P., Tzeng C.C., Chen Y.S. Treatment and recycling of incinerated ash using thermal plasma technology // *Waste Management*. 2002. vol. 22. no. 5. Pages 485-490. doi: 10.1016/S0956-053X(01)00043-5.
12. Бруяко М.Г., Григорьева Л.С., Григорьева А.И. Плазмомодифицированные сорбенты на основе цеолитсодержащих горных пород хотынецкого месторождения // *Строительство: наука и образование*. 2015. Том. 7. Номер. 4. С. 38-50. doi: 10.22227/2305-5502.2017.4.3.
13. Öner M. A study of intergrinding and separate grinding of blast furnace slag cement // *Cement and Concrete Research*. Volume 30, Issue 3, March 2000, Pages 473-480. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00197-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00197-6).
14. Sanjay Kumar, Rakesh Kumar, A. Bandopadhyay, T.C. Alex, B. Ravi Kumar, S.K. Das, S.P. Mehrotra. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement // *Cement & Concrete Composites*. 30 (2008) Pages 679–685. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.05.005.
15. Hongbo Tan, Xiufeng Deng, Xingyang He, Junjie Zhang, Xun Zhang, Ying Su, Jin Yang. Compressive strength and hydration process of wet-grinded granulated blast-furnace slag activated by sodium sulfate and sodium carbonate // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Volume 97. Pages 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.012>.
16. Naraindas Bheel., Montasir Osman Ahmed Ali., Yue Liu., T. Tafsirojjaman., Paul Awoyera., Nadhim Hamah Sor., Lenin Miguel Bendezu Romero. Utilization of Corn Cob Ash as Fine Aggregate and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Cementitious Material in Concrete // *Buildings*. 2021. Vol 11. 422 Pages 1-22. <https://doi.org/10.3390/buildings11090422>.

## РАЗРАБОТКА ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ФОСФОГИПСА ТВЕРДЕЮЩЕГО ПО СМЕШАННОМУ ТИПУ

Т.А. Бахтина<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

Н.В. Любомирский<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, профессор

А.С. Бахтин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

Г.Р. Биленко<sup>1</sup>, аспирант

И.А. Тюнюков<sup>1</sup>, аспирант

*<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»*

**Аннотация.** Создание безотходных технологий производства малоэнергоемких строительных материалов и изделий является одним из приоритетных направлений развития экономики большинства стран. В связи с этим актуальной является задача разработки вяжущих веществ на основе фосфогипса с добавлением гидратной извести твердеющих по смешанному типу. В качестве вторичного сульфатсодержащего сырья использовали отвальный фосфогипс предприятия ООО «Титановые инвестиции», г. Армянск и гидратную известь производства АО «Крымский содовый завод», г. Красноперекоск. Результаты разработки составов на основе фосфогипсо-известковых композиций показали, что после принудительной карбонизации данных составов в течение 180 мин в воздушно-газовой среде с 50 %-й концентрацией CO<sub>2</sub> можно получить водостойкий каменный материал (Кр 0,78-0,8) с прочностью при сжатии 28-32 МПа, средней плотностью 1750-1780 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощением по массе и объему 11-15 и 19-26 % соответственно.

**Ключевые слова:** фосфогипс, гидратная известь, принудительная карбонизация, прочность, водостойкость.

Проблемы разработки и внедрения мало- и безотходных технологий производства строительных материалов приобретают все большую актуальность в связи с масштабностью и темпами роста современного производства. Создание малоэнергоемких строительных композитов и утилизация отходов промышленности является одним из приоритетных направлений развития экономики большинства стран. В частности, использование фосфогипса для создания строительных материалов и изделий на его основе станет одним из решений данной проблемы. Применение фосфогипса, позволит заменить часть традиционных материалов вторичными ресурсами, поспособствует созданию безотходных технологий производства и внедрению мероприятий по охране окружающей среды. Фосфогипс является твердым промышленным отходом, образующемся при мокром производстве фосфорной кислоты из апатитового концентрата [1]. В среднем из каждой тонны произведенной фосфорной кислоты образуется около 5 тонн фосфогипса [2]. По данным российских источников за последние 80 лет освоения Хибинского месторождения Кольского полуострова извлечено 1,55 млрд. тонн апатито-нефелиновой руды (примерно половина промышленных запасов) и выработано 620 млн. т. апатитового концентрата [3].

В РФ ежегодно образуется 15 млн. т фосфогипса и масса отходов в накопителях промышленных предприятий превышает 400 млн. т [4]. Тем не менее, ежегодный комплексный коэффициент использования фосфогипса составляет всего около 10 %, а используемые технологии и процессы не развиты полноценно [5, 6]. Накопленный фосфогипс преимущественно хранится на открытом воздухе. Помимо того, что отвалы занимают много земли, вредные примеси фосфогипса, которые включают растворимый фосфор, растворимый фтор, эвтектический фосфор, а также следовые количества тяжелых металлов и радионуклиды, вызывают экологические проблемы, такие как загрязнение воздуха, воды и почвы [7].

В настоящее время сельское хозяйство, химическая промышленность и производство строительных материалов и изделий являются тремя основными направлениями использования фосфогипса. Среди них промышленность строительных материалов стала центром исследований использования фосфогипса из-за большого объема потребления гипсовых материалов. Некоторые исследования показали, что растворимый фосфор и растворимый фтор, присутствующие в фосфогипсе, реагируют с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образующимся при гидратации цемента, и, в свою очередь, образуют осадки фосфата кальция и фторида кальция. Эти осадки покрывают поверхность частиц цемента, тем самым ограничивая гидратацию цемента и приводя к ухудшению характеристик цемента, таким как увеличение времени схватывания и низкая начальная прочность [8-10]. Поэтому необходима предварительная обработка фосфогипса перед его использованием в качестве замедлителя схватывания цемента. Обычно используемые методы предварительной обработки фосфогипса включают промывку водой, флотацию, шаровую мельницу и прокаливание. Однако эти методы имеют недостатки, что снижает эффективность технологий переработки фосфогипса в целом.

В связи с этим актуальной является задача разработки конкурентоспособного вяжущего вещества на основе фосфогипса твердеющего по смешанному типу. Идея подразумевает разработку состава сырьевой смеси на основе полугидрата фосфогипса и гидратной извести, твердеющего по гидратационному и карбонатному механизмам для  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  соответственно.

В качестве исходного сырья использовали отвальный фосфогипс предприятия ООО «Титановые инвестиции», г. Армянск, получаемый в процессе производства фосфорной кислоты при переработке апатитового сырья Кольского полуострова. Гипсовое вяжущее из отвального фосфогипса получали путём его термической обработки в разработанном авторами лабораторном вращающемся сушильном барабане при температуре 120...140°C и атмосферном давлении в течение 60 минут (Рисунок 1). После завершения термической обработки фосфогипс выгружался в герметичную емкость, в которой выдерживался в течение 24 часов. Гидратную известь получали путем гашения комовой извести, производимой в известковом цехе АО «Крымский содовый завод», г. Красноперекоск. Полученную гидратную известь сушили до постоянной массы в сушильном шкафу.

Для определения зависимостей изменения свойств разрабатываемого вяжущего вещества на основе фосфогипса использовался ортогональный центральный композиционный план второго порядка. В качестве варьируемых факторов принимались – количество вводимой гидратной извести, ( $X_1$ ) и водосодержание сырьевой смеси ( $X_2$ ). Количество вводимой гидратной извести варьировалось в пределах 10-50 %, а водосодержание смеси – 18-28 %. Из увлажненной и перемешанной сырьевой смеси методом полусухого прессования (удельное давление прессования 30 МПа) изготавливали образцы-цилиндры диаметром и высотой 30 мм.

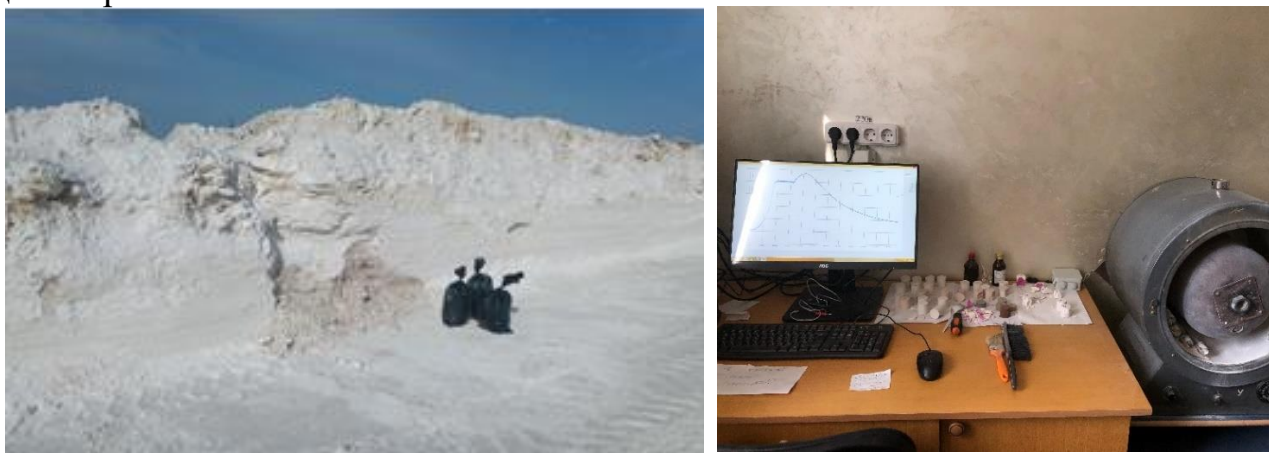


Рисунок 1. Общий вид мест отбора отвального фосфогипса и лабораторного вращающегося сушильного барабана

В каждой точке плана образцы делили на две группы – 1-я группа естественного твердения и 2-я группа – принудительно карбонизированные. Образцы 1-й группы сразу после формования помещались в эксикатор и выдерживались в нем в течение 24 часов, после чего их помещали в сушильный шкаф и высушивали при температуре 43°C до постоянной массы, а далее эти образцы подвергались испытаниям в соответствии с планом. Образцы 2-й группы сразу после формования помещали в эксикатор на 90 мин для прохождения реакции гидратации полуводного фосфогипса. По истечении этого времени данные образцы помещались в камеру принудительной карбонизации, где их выдерживали в течение 180 мин. при 50 %-й концентрации  $CO_2$ . Далее образцы высушивали до постоянной массы по методике аналогичной для 1-й группы и также испытывали в соответствии с планом.

Для установления эффективности одновременного протекания в системе двух типов твердения – гидратационного и карбонатного для сульфатсодержащего и известкового компонентов сырьевой смеси соответственно определяли физико-механические показатели опытных образцов цилиндров до и после карбонизации. В табл. 1 представлены данные по определению физико-механических свойств фосфогипсо-известковых образцов в зависимости от водосодержания сырьевой смеси и количества вводимой гидратной извести.

Таблица 1. Матрица планирования и экспериментальные данные фосфогипсо-известковых образцов-цилиндров

№ g	Натуральные величины факторов		Анализируемые параметры в зависимости от исследуемых факторов					
			не карбонизированные образцы			карбонизированные образцы		
	Количество вводимой извести, $X_1$	Водосодержание сырьевой смеси, $X_2$	$R_{сж.}$ , МПа	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$K_p$	$R_{сж.}$ , МПа	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$K_p$
1 сут			1 сут	1 сут	1 сут	1 сут	1 сут	
1	10	18	21,4	1683	0,61	26,4	1748	0,8
2	50	18	13,8	1458	0,56	22	1658	0,72
3	10	28	21,1	1703	0,55	28,2	1750	0,78
4	50	28	20,2	1509	0,41	16,6	1568	0,75
5	10	23	29	1713	0,59	31,7	1782	0,71
6	50	23	20,3	1496	0,49	17,9	1606	0,59
7	30	18	17,3	1582	0,61	31,1	1759	0,7
8	30	28	24,5	1686	0,52	19	1700	0,81
9	30	23	23,7	1619	0,55	23,5	1714	0,62

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что прочность при сжатии и водостойкость у карбонизированных образцов выше, чем у образцов, не подвергавшихся принудительной карбонизации. Прочность при сжатии карбонизированных фосфогипсо-известковых образцов выше на 4-10 МПа в зависимости от условий получения. Средняя плотность карбонизированных образцов также повышается (до 11 %) за счет связывания гидроксидом кальция углекислого газа и образования в системе карбоната кальция. Благодаря увеличению средней плотности, снижаются водопоглощение по массе и объему карбонизированных образцов по сравнению с не карбонизированными. Исключение составляют только те точки, в составе сырьевой смеси которых присутствует максимальное количество гидратной извести – 50 %. Связано это скорее всего с недостаточной степенью прохождения реакции карбонизации для таких составов смеси, поскольку увеличение количества гидратной извести с более мелкими частицами способствует получению после прессования плотной структуры образца. В результате доступ  $CO_2$  к внутреннему объему системы ограничивается и эффективность карбонатного твердения также снижается.

Анализ экспериментально-статистической модели основных свойств опытных образцов показал, что наибольшее влияние на формирование свойств карбонизированных фосфогипсо-известковых композиций оказывает количество вводимой гидратной извести ( $X_1$ ). Увеличение содержания извести в составах формовочных смесей (коэффициент  $b_1=-9,9$ ) приводит к снижению прочностных показателей и уменьшению средней плотности материала, повышению водопоглощения по массе и уменьшает толщину карбонизированного слоя образцов, снижая их водостойкость.

В значительной степени формирование карбонатной структуры материала опытных образцов, зависит от фактора начального водосодержания формовочных



смесей, ( $X_2$ ) (коэффициент  $b_2=-5,2$ ). С увеличением водосодержания в системе у фосфогипсо-известковых образцов уменьшается карбонизированный слой и снижается прочность на сжатие.

Коэффициент совместного влияния ( $b_{12}=-3,6$ ) также показывает, что одновременное увеличение содержания извести и водосодержания формовочной смеси приводит к снижению прочности и водостойкости опытных образцов.

Результаты разработки составов на основе фосфогипсо-известковых композиций показали, что после принудительной карбонизации данных составов в течение 180 мин в воздушно-газовой среде с 50 %-й концентрацией  $CO_2$  можно получить водостойкий каменный материал ( $K_p$  0,78-0,8) с прочностью при сжатии 28-32 МПа и водопоглощением по массе и объему 11-15 и 19-26 % соответственно. В соответствии с указанной величиной коэффициента размягчения данный материал можно классифицировать как – повышено водостойкий ( $0,6 < K_p < 0,8$ ). При этом, для получения обозначенных физико-механических характеристик оптимальное содержание гидратной извести  $Ca(OH)_2$  в составах сырьевых смесей составляет 10-30 %.

Вероятно, что дополнительная оптимизация условий получения образцов (давление прессования, водосодержание смеси, введение заполнителя), режима принудительного карбонатного твердения (время твердения, концентрация  $CO_2$ ) позволит еще повысить исследуемые свойства получаемого каменного материала. Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что на основе предлагаемого вяжущего смешанного типа твердения возможно производство определенной номенклатуры мелкоштучных стеновых изделий, с учетом проведения дополнительных научных исследований в этой области.

#### **Библиографический список:**

1. Beixing Li, Long Li, Xiao Chen, Yu Ma, Mingkai Zhou. Modification of phosphogypsum using circulating fluidized bed fly ash and carbide slag for use as cement retarder // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 338. 127630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127630>.
2. Tayibi H., Choura M., L'opez F.A., Alguacil F.J., L'opez-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90 (8). Pp. 2377–2386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007>
3. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. «Промышленная переработка фосфогипса». – Стройиздат: СПб. – 2007. – 105 с.
4. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Комплексная промышленная переработка хибинского апатитового концентрата // *Материалы IX международной научно - практической конференции «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»*. – Изд-во «Де Нова» Минск. – 2018. – С. 124-127.
5. Macías F., C´anovas C.R., Cruz-Hern´andez P., Carrero S., Asta M.P., Nieto J.M., P´erez-L´opez R. An anomalous metal-rich phosphogypsum: Characterization and classification according to international regulations // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 331. Pp. 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.015>.
6. Tian T., Yan Y., Hu Z., Xu Y., Chen Y., Shi J. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 115. Pp. 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028>.

7. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar // Journal of cleaner production. 2016. Vol. 127. Pp. 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>.
8. Altun I.A., Sert Y. Utilization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. Pp. 677–680. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.017>.
9. Singh M. Role of phosphogypsum impurities on strength and microstructure of selenite plaster // Construction and Building Materials. 2005. Vol. 19. Pp. 480–486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.010>.
10. Liu S., Fang P., Ren J., Li S. Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement // Journal of cleaner production. 2020. Vol. 272. 122660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122660>.

# НЕАВТОКЛАВНЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ГАЗОБЕТОН СО СТЕКЛЯННЫМ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ НЕСОРТИРОВАННОГО БОЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

**В.В. Белов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук

**А.В. Горлов**<sup>1</sup>, магистрант

<sup>1</sup>*Тверской государственной технической университет*

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований влияния несортированного боя технического стекла (НБТС), вводимого как заменитель песка и частичной замены цемента, на характеристики прочности и плотности газобетона. Определено эффективное соотношение между размерами частиц НБТС, позволяющее получить газобетон с необходимыми показателями прочности, плотности и прогнозно теплоизоляции.

**Ключевые слова:** газобетон, отходы стекла, замена цемента, замена песка, прочность, теплопроводность, долговечность.

Газобетон является разновидностью ячеистого бетона, изготавливаемый с применением газообразователей. Такой бетон применяется в основном как теплоизоляционный или конструкционно-теплоизоляционный материал.

Как правило, газобетон, не прошедший термобарическую обработку, уступает автоклавному газобетону по прочностным характеристикам. Однако на производство неавтоклавного газобетона требуется значительно меньше энергозатрат, что в свою очередь уменьшает себестоимость готовой продукции. Также себестоимость продукции возможно уменьшить, включив в состав газобетона компоненты, не уступающие по свойствам исходным, но стоящие гораздо дешевле. Применимо к неавтоклавному газобетону таким компонентом может выступать отход стекла, который может быть использован как частичная замена цемента, так и замена песка.

По данным Росстата, в 2021 году в России образовалось порядка 50 млн. тонн твердых бытовых отходов (ТБО), и 17 % из них составляет стекло. На сегодняшний день в России перерабатывается лишь 15 % всех стеклоотходов.

Возврат отходов стекла в первоначальное производство осложнено необходимостью тщательной сортировки его по цвету и химическому составу, поскольку даже минимальное включение примесей может неблагоприятно повлиять на свойства всей готовой продукции. Одним из решений по вторичному использованию стекла может служить цементная и бетонная промышленность.

Согласно [1,2] стекло, в зависимости от дисперсного состояния и свойств при повышенных температурах, может применяться как вяжущее, крупный и мелкий заполнитель и добавка в клинкер до и после обжига. В работе [3] показано, что наиболее перспективными вариантами считаются включения отходов стекла в вяжущее вещество и в мелкий заполнитель, при этом полная замена цементного вяжущего на тонкоизмельченное стекло в композиционных бетонах [4].

Однако, при замене цемента 5-20 % по массе на тонкоизмельченный стеклобой бетон способен показывать аналогичные результаты в ходе испытаний, а по некоторым критериям даже превзойти бетон с традиционным составом. Так в работах [2, 5-9] авторы исследовали возможность частичной замены цемента на НБТС. Большинство из них пришло к выводу, что введение 10-20 % тонкоизмельченного стекла способно улучшить физико-механические свойства бетона и газобетона. На ранних этапах набора прочности большинство образцов показывали прочность меньше, чем прочность эталонных образцов. Однако на 90, 180 и 365 сутки была выявлена тенденция к увеличению прочности до 10-15 % по сравнению с эталоном.

Помимо своих вяжущих свойств, стекло способно выступать и как мелкий заполнитель. В работах [10, 11] стеклобой эффективно себя показывает при 100 % замене песка на измельченное стекло. Также как и в случае частичной замены цемента на стекло, образцы показывают прирост прочности в более поздний период. В обоих случаях рост прочности связан с более поздним развитием пуццолановой реакции, в ходе которой образуется гель гидрата силиката кальция (CSH), заполняющий поры и укрепляющий цементную матрицу. В свою очередь это способствует значительному повышению стойкости газобетона к хлоридам, сульфатам и другим кислотам [7, 12, 13].

Кроме прочностных характеристик, вводимое стекло оказывает влияние и на термические свойства газобетона. В целях понижения теплопроводности бетона в работах [14, 15] сравнивались образцы с содержанием стекла и песка. Установлено, что образцы, имеющие в своем составе стекло, имеют повышенные термические свойства. Применение боя стекла для снижения теплопроводности объясняется наличием в нем аморфной фазы, которая труднее проводит тепло, чем кристаллическая фаза – песок.

Целью данной работы является разработка рецептуры и составов неавтоклавных газобетонов для стеновых теплоизоляционных блоков D600-D800 с прочностью на сжатие 1,5-2,5 МПа и с повышенными теплоизоляционными свойствами.

При проведении исследований был использован портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (Евроцемент 500 Экстра) по ГОСТ 31108-2020 производства Воронежского филиала АО «Евроцемент групп» (пгт. Подгоренский). В качестве газообразователя использовалась алюминиевая пудра по ГОСТ 5494-2022 «Пудра алюминиевая. Технические условия» марки ПАГ-1 с кроющей способностью на воде более или равно  $6000 \text{ см}^2 / \text{г}$ ; остаток на сите +008 – не более 1,5 %; с активным алюминием не менее 90 % и массовой долей жировых добавок не более 2,4 %. В качестве мелкого заполнителя использовался измельченный бой стекла. На основании предыдущих исследований был установлен максимальный размер зерна стеклобоя, равный 0,63 мм, позволяющий добиться наилучших прочностных и термических свойств газобетона. Гранулометрический состав заполнителя представлен в таблице 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав стеклобоя

Остатки на ситах, %	Диаметр сит, мм							Модуль крупности, M <sub>кр</sub>
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,08	<0,08	
Частные	0	0	0	20,77	40,08	24,87	14,28	1,68
Полные	0	0	0	20,77	60,85	85,72	100	

Насыпная плотность стеклобоя, высушенного до постоянной массы, составила 1337 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность стеклобоя - 2420 кг/м<sup>3</sup>; удельная поверхность стеклобоя - 48,9 м<sup>2</sup>/кг.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы использовались стандартные методы испытаний и исследований сырьевых материалов и изделий на их основе.

По результатам испытаний прочности образцов размером 20×20×20 мм из бетонной матрицы газобетона в зависимости от стеклоцементного отношения С/Ц по массе в возрасте 7 суток нормального твердения установлено оптимальное С/Ц = 1,00, соответствующее наибольшей прочности на сжатие. После определения оптимального отношения С/Ц на втором этапе исследования изучали совместное влияние водотвердого отношения В/Т и количества алюминиевой пудры по массе от цемента на прочность при сжатии и среднюю плотность газобетонных образцов с помощью планированного эксперимента.

В таблице 2 приведены составы исследуемых газобетонных образцов.

Таблица 2. Состав сырьевой смеси газобетона на 1 форму 70×70×70

№ состава	Цемент, г	Стекло, г	Алюм. пудра, г	Вода, г	В/Т
1	400	400	4	280	0,35
2	400	400	8	280	0,35
3	400	400	12	280	0,35
4	400	400	4	360	0,45
5	400	400	8	360	0,45
6	400	400	12	360	0,45
7	400	400	4	440	0,55
8	400	400	8	440	0,55
9	400	400	12	440	0,55

Результаты испытаний газобетонных образцов 70×70×70 мм на 14 сутки и соответствующие зависимости приведены на рисунках 1 и 2.

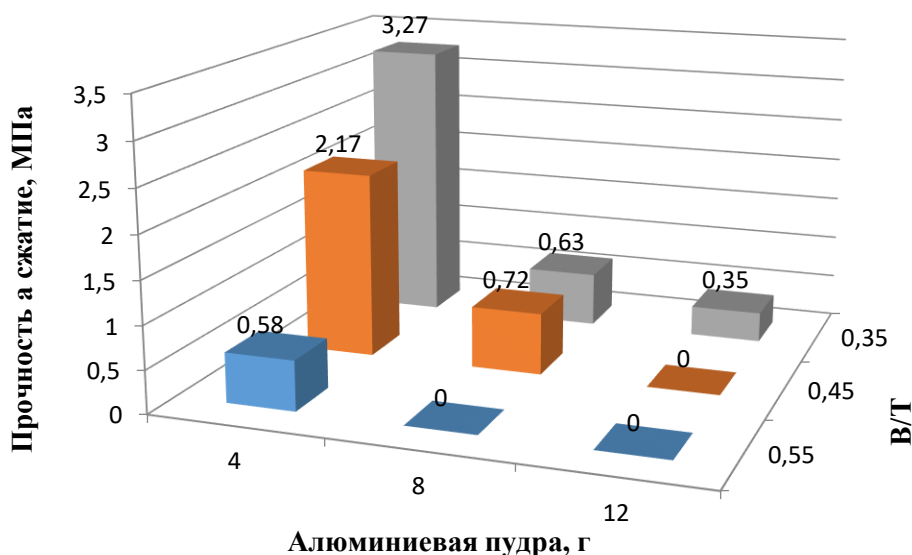


Рисунок 1. Зависимости прочности на сжатие газобетона от В/Т и количества вводимой алюминиевой пудры

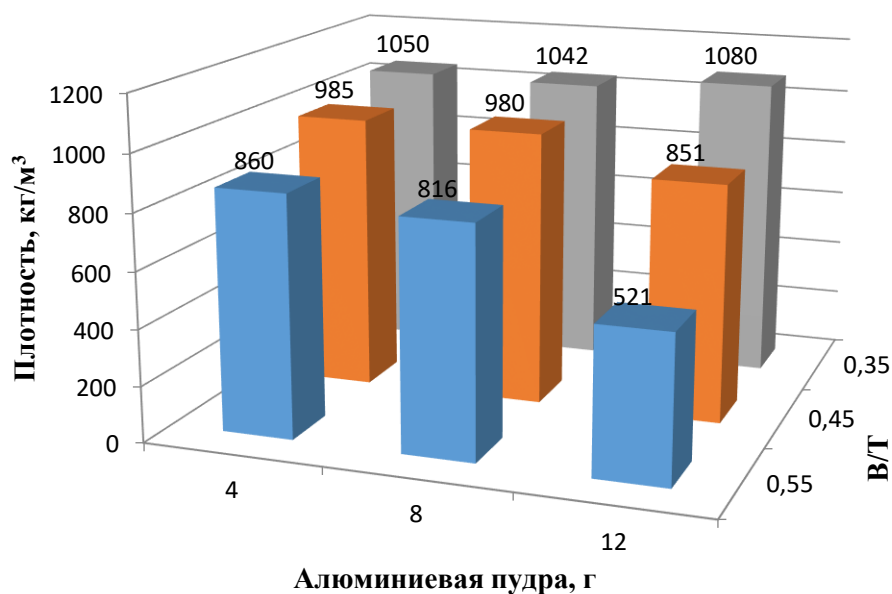


Рисунок 2. Зависимости плотности газобетона от В/Т и количества вводимой алюминиевой пудры

Наибольшее значение предела прочности на сжатие показали газобетонные образцы состава № 1. Это объясняется небольшим количеством вводимого газообразователя и относительно низким В/Т. Такой бетон имеет в своей структуре низкое значение химически несвязанной воды, создающей капиллярные поры в структуре цементной матрицы. Однако такой состав смеси имеет одни из наибольших показателей плотности.

Состав № 4 имеет второй наибольший показатель по прочности. К тому же образцы имеют плотность на 6 % ниже относительно состава №1.

Составы № 2, № 3, № 5 и № 7 показали сравнительно небольшие показатели по прочности. У составов № 6, № 8 и № 9 прочность практически отсутствовала. Но стоит отметить, что состав № 9 имел наименьшее значение плотности.

Можно отметить, что оптимальными являются составы № 1 и состав № 4. Такие составы обладают относительно лучшими прочностными показателями и показателями плотности.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Замена песка на измельченные несортированные отходы стекла является перспективным способом улучшения свойств газобетона. Такой газобетон способен обладать повышенными прочностными характеристиками, а также в прогнозе улучшенными характеристиками по теплопроводности готовых изделий.

В ходе исследования определено, что наиболее эффективным следует считать составы, содержащие 4 % алюминиевой пудры от массы цемента и обладающие водотвердым отношением от 0,35 до 0,45. Такие составы показали относительно схожие показатели по плотности. Однако, с увеличением воды затворения и газообразователя наблюдается тенденция снижения прочности на сжатие.

В целом газобетон, изготовленный с полной заменой песка на измельченный стеклобой, способен соответствовать требованиям ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые» по прочностным показателям и показателям плотности.

#### **Библиографический список:**

1. Кетов П.А. Минимизация негативного воздействия на окружающую среду отходов стекла путем использования в строительстве: дис. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 25.00.36 – геоэкология. Пермь, 2019. 154 с.
2. Roz-Ud-Din Nassar, Parviz Soroushian, Muhammad Sufyan-Ud-Din. Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 15. e00745.
3. Hussein Hamada, Alyaa Alattar, Bassam Tayeh, Fadzil Yahaya, Blessen Thomas. Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: A critical review // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01149.
4. Бондаренко Н.И., Басов В.О., Даценко А.О. Разработка составов вяжущих с использованием стеклоотходов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 1. С. 83-89.
5. G.M. Sadiqul Islam, M. H. Rahman, Nayem Kazi. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice // *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2017. Vol. 6. Pp. 37-44.
6. Messaouda Belouadah, Zine El Abidine Rahmouni, Nadia Tebbal. Influence of the addition of glass powder and marble powder on the physical and mechanical behavior of composite cement // *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 158. Pp. 153-162.
7. Rui Xiao, Baoshan Huang, Hongyu Zhou, Yuetan Ma, Xi Jiang. A state-of-the-art review of crushed urban waste glass used in OPC and AAMs (geopolymer): Progress and challenges // *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 4.
8. Sevar Dilkhaz Salahaddin, James H. Haido, George Wardeh. The behavior of UHPC containing recycled glass waste in place of cementitious materials: A comprehensive review // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01494.

9. Lim Sheau Hooi, Phang Jia Min. Potential of substitution waste glass in aerated light weight concrete // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 171. Pp. 633-639.
10. Ahmed M. Tahwia, Ahmed Essam, Bassam A. Tayeh, Mohamed Abd Elrahman. Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01648.
11. Eslam El-Seidy, Mehdi Chougan, Matteo Sambucci, Mazen J. Al-Kheetan, Ilario Biblioteca, Marco Valente, Seyed Hamidreza Ghaffar. Lightweight alkali-activated materials and ordinary Portland cement composites using recycled polyvinyl chloride and waste glass aggregates to fully replace natural sand // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368.
12. K.I.M. Ibrahim. Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 15. e00630.
13. Ahmed M. Tahwia, Ashraf M. Heniegal, Mohamed Abdellatif, Bassam A. Tayeh, Mohamed Abd Elrahman. Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating recycled waste glass // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01393.
14. Федосов С.В., Акулова М.В., Потемкина О.В., Емелин В.Ю., Белякова Н.А. Исследование изменения фазового состава пенобетона с добавлением жидкого стекла и стеклобоя термическим методом // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 5. С. 173-180.
15. Бондаренко Н.И. Исследование термических свойств стеклобетона // *Научные технологии функциональных материалов. Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции*. 2019. С. 77-78.



## ХИМИЧЕСКОЕ «ПРОГРАММИРОВАНИЕ» РЕАКЦИЙ БЕТОНА

М.А. Брызгалов<sup>1</sup>, руководитель направления

<sup>1</sup>АО «Кузбасский технопарк»

Актуальность: строительная деятельность человека является самой материалоемкой сферой, требующей добычи миллиардов тонн природных ресурсов. Бетон представляет собой камень, созданный искусственным способом, и является вторым, наиболее потребляемым материалом в мире после воды. Рассматривается возможность наделить бетонный камень требуемым комплексом качеств и реакций на раздражители, путем добавки присадок при приготовлении.

Цель: исследовать влияния химических добавок в материалы, на «поведение» самих материалов. «Запрограммировать» на определенные реакции бетонный строительный материал, с помощью введения в состав широкого спектра добавок химических элементов. Одной из возможных целей является формирование способности строительного бетона к самоорганизации, с возможностью в будущем «обучению» «интеллектуальному поведению» при взаимодействии с окружающей средой.

Методы: Введение в жидкий бетон химических добавок. Всем известны реакции бетона на применение определенных видов присадок. Современные технологии производства бетона позволяют изготавливать бетонный камень с заданными свойствами, прогнозировать и управлять качественными характеристиками бетонных изделий.

Технический результат - формирование способности строительного бетона к самоорганизации при взаимодействии с окружающей средой, применение в бетонном камне интеллектуального устройства с возможностями искусственного интеллекта.

Сделаем вывод, что в контексте химического подхода к решению вопросов материаловедения строительной отрасли возникает предположение о наличии механизмов формирования способности строительного бетона к самоорганизации, с гипотетической возможностью в дальнейшем «обучению» «интеллектуальному поведению» при взаимодействии с окружающей средой.

### Библиографический список:

1. Калашников, В.И. Новые геополимерные материалы из горных пород, активизированные малыми добавками шлака и щелочей / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, А.А. Карташов, М.Н. Мороз // Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения: Восьмые академические чтения РААСН. - Самара: СамГАСУ, 2004. -С. 205-209.
2. Калашников, В.И. Использование дисперсных гравелитовых пород в качестве основного структурообразующего компонента минеральношлаковых вяжущих / В.И. Калашников // Композиционные строительные материалы: Сборник научных трудов Междунар. научно-технической конференции. – Пенза: ПДНТ, 2004. - с. 121-125.
3. Brooks J., Megat J. and Mazloom M. Effect of admixtures on the setting times of highstrength concrete // Cement and Concrete Composites, 2000. Vol. 22(4). Pp. 293-301. DOI:10.1016/S0958-9465(00)00025-1

# СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО И ГИДРОФОБИЗИРОВАННОГО БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО

**М.Г. Бруяко**<sup>1</sup>, доц., к.т.н., доцент кафедры Строительное материаловедение

**А.М. Ергенян**<sup>1</sup>, соискатель кафедры Строительное материаловедение

**В.А. Швецова**<sup>1</sup>, преподаватель кафедры Строительное материаловедение

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация.** Исследовано влияние различных гидрофобизаторов на коэффициент размягчения гипсового камня, дисперсно армированного растительным наполнителем. В качестве растительного наполнителя использовался измельченный стебель борщевика Сосновского. Растительный наполнитель был предварительно высушен, обработан гидрофобизатором воздушно-капельным путем и опудрен гипсовым вяжущим. Из полученной массы были изготовлены образцы с размерами 4×4×16 см. Плотность образцов варьировалась от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup>. Количество гидрофобизатора варьировалось от 0 до 4%. Для полученных образцов были определены коэффициенты размягчения и построены зависимости коэффициента размягчения гипсового композита от количества и вида гидрофобизатора. Гидрофобизация измельченного борщевика позволила повысить водостойкость гипсового композита в 1,3-2,3 раза.

**Ключевые слова:** возобновляемое сырье, арболитовые блоки, малоэтажное строительство, борщевик Сосновского, ресурсосберегающие технологии

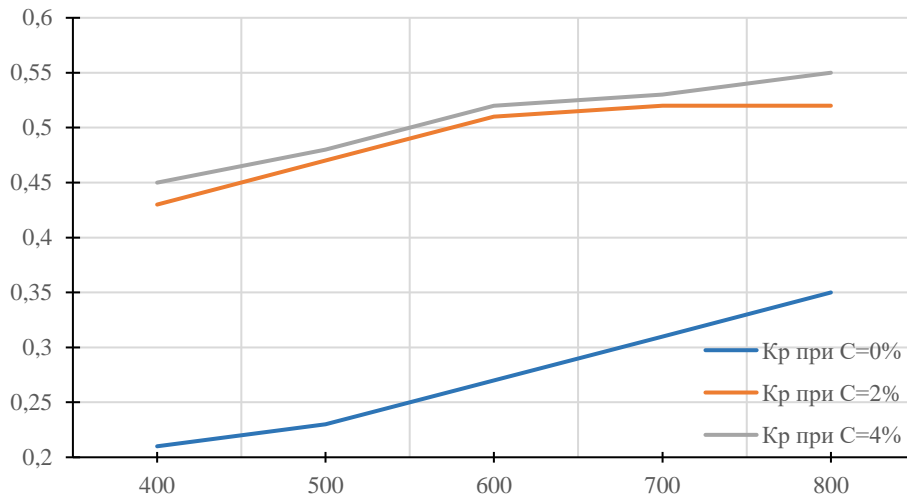
В странах с жарким климатом широкое распространение получили известковые блоки, дисперсно-армированные кестрой технической конопли. Твердение известковых композитов является длительным, т.к. в ходе химической реакции свободная известь поглощает углекислый газ из воздуха и приобретает требуемую прочность. По сравнению с известью гипсовое вяжущее обладает быстрыми сроками схватывания и твердения, однако его существенным недостатком является не высокая водостойкость [1].

Для повышения коэффициента размягчения гипсового камня могут быть использованы различные гидрофобизаторы [2]. Наиболее эффективным является придание водоотталкивающих свойств всему объему изделия, а не только его поверхностным слоям. Хорошими гидрофобизаторами являются кремнийорганические жидкости [3-5]. Они могут быть представлены в виде водорастворимых жидкостей или водонерастворимых эмульсий. Механизм действия кремнийорганических гидрофобизаторов заключается в адсорбции силоксановых групп на гидрофильных капиллярах материала и их ориентация органическим радикалом наружу. Водоотталкивающая пленка при этом не препятствует парообмену материала с окружающей средой.

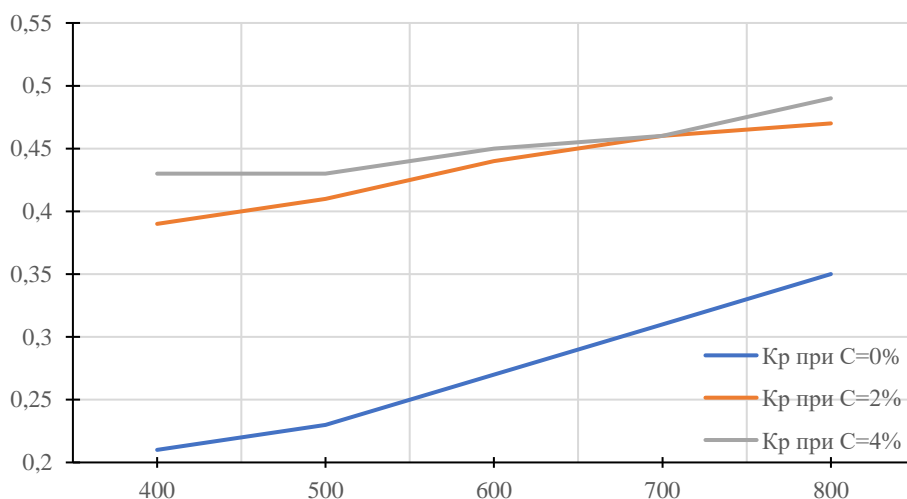
В данной работе исследовано влияние гидрофобизированного растительного наполнителя на свойства гипсового композита.

В качестве вяжущего использовался строительный гипс Г-10 Б II ГОСТ 125-2018. Стебли борщевика были измельчены в роторной дробилке, максимальный размер частиц равен 2,5 мм. Измельченный борщевик был

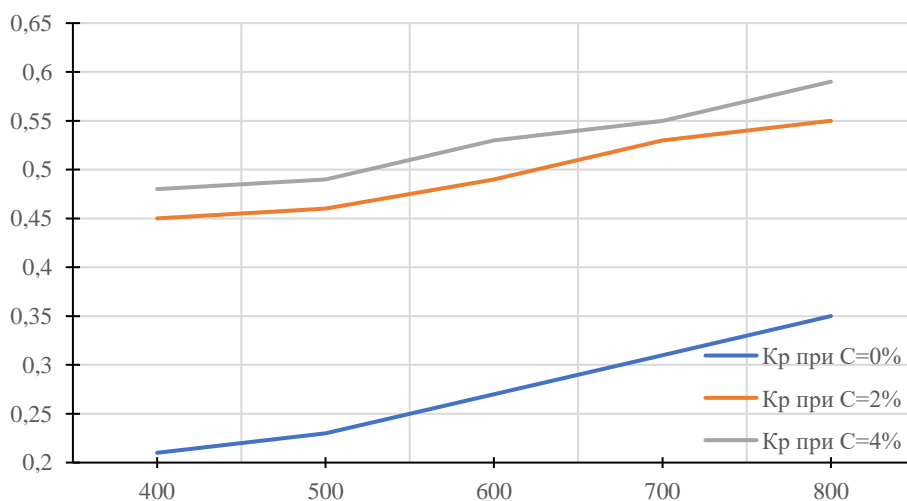
высушен, затем гидрофобизирован. Опудренный гипсовым вяжущим растительный наполнитель уплотнялся в формах посредством пригруза. Для оценки эффективности гидрофобизирующих добавок для изготовленных образцов-балочек  $4 \times 4 \times 16$  см был определен коэффициент размягчения. Полученные результаты приведены на рисунках 1 а)-г).

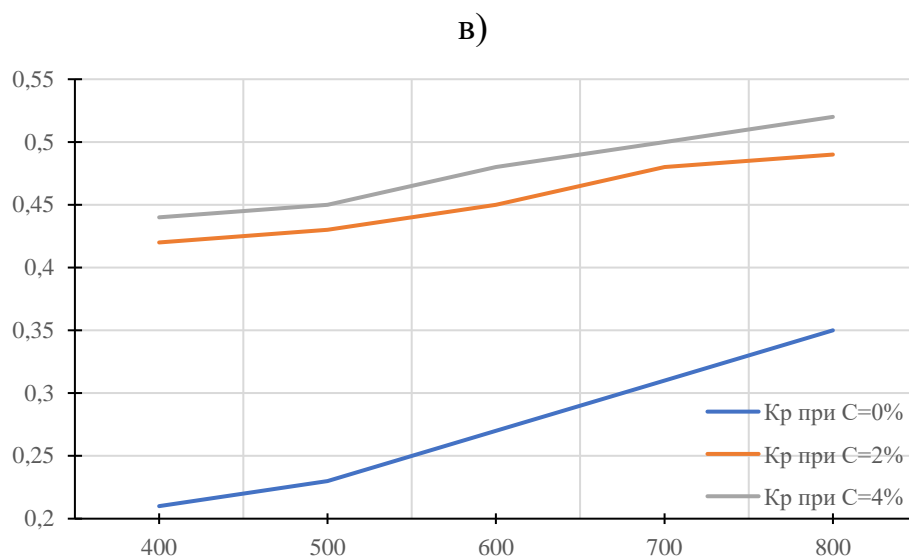


а)



б)





г)

Рисунок 1. Зависимость коэффициента размягчения от содержания гидрофобизатора: а) Пента-811; б) Пента-814; в) Аквасил; г) Sika-1

При введении 2% гидрофобизатора Пента-811 коэффициент размягчения гипсового композита увеличился в 1,5-2,0 раза, Пента-814 – в 1,3-1,9 раза, Аквасил – в 1,6-2,1 раза, Sika-1 – в 1,4-2,0 раза в зависимости от давления прессования. При введении 4% гидрофобизатора Пента-811 коэффициент размягчения гипсового композита увеличился в 1,6-2,1 раза, Пента-814 – в 1,4-2 раза, Аквасил – в 1,7-2,3 раза, Sika-1 – в 1,5-2,1 раза в зависимости от давления прессования.

Объемная модификация наполнителя кремнийорганическими жидкостями позволяет получать гипсовый композит повышенной водостойкости, изделия из которого могут быть использованы не только внутри, но и снаружи зданий.

#### Библиографический список:

1. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества / М.: Стройиздат, 1979. 476 с.
2. Морозова Н.Н., Майсурадзе Н.В., Клоков В.В. Исследование гидрофобизации гипсовых и композиционно-гипсовых материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т. 20. - № 16. – С. 34-37.
3. Козлов Н.В., Панченко А.И., Бурьянов А.Ф., Соловьев В.Г. Микроструктура гипсового вяжущего повышенной водостойкости // Строительные материалы. – 2014. - С. 72-74.
4. Потапова Е.Н., Исаева И.В. Повышение водостойкости гипсового вяжущего // Строительные материалы. – 2014. - С. 20-22.
5. Никитина О.В., Анканова Л.А., Кудряков А.И., Дизендорф Т.Е., Т. Садык Кызы. Эффективные пропитки для гипсосодержащих строительных материалов // Вестник Томского государственного строительного-технологического университета. – 2014. - № 3. - С. 154-160.

# ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНА НА ШЛАКОЩЕЛОЧНОМ ВЯЖУЩЕМ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ СТЕКОЛЬНОГО БОЯ

К.А. Бутенко<sup>1</sup>, магистрант

Ю.И. Марков<sup>1</sup>, студент

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В настоящее время в строительстве наблюдается тенденция к снижению материал- и энергоемкости изделий, расширению минерально-сырьевой базы, созданию принципиально новых строительных материалов. Производство портландцемента, который на данный момент является основным гидравлическим вяжущим, связано с высоким потреблением природных минеральных и энергетических ресурсов, а также сопровождается высокими объемами выбросов углекислого газа в окружающую среду. В связи с этим внимание на строительном рынке все большее внимание привлекают бесклинкерные гидравлические вяжущие, которые могут полностью или частично заменить портландцемент. В 1978 году В.Д. Глуховский в методическом пособии «Шлакощелочные цементы и бетоны» описал возможность применения шлака в качестве основного гидравлического вяжущего для бетонных изделий [1]. В тоже время современное общество активно старается использовать различные отходы в новых сферах, тем самым выходя на уровень безотходного потребления. В сфере производства строительных материалов и изделий уже с середины 20-го века активно применяют отходы промышленного производства и бытового потребления. Примером такого материала является отходы шинной крошки или стекольного боя. Однако, тонко перемолотое стекло в бетоне вызывает щелочесиликатную коррозию, которая ведет к снижению прочности и образованию трещин в бетоне.

**Ключевые слова:** доменный гранулированный шлак, отходы производств, шлакощелочное вяжущее, гидратация шлака, стекло, стекольный бой

## Введение

Сырьевые материалы, применяемые для производства бетона, добываются из полезных ископаемых, являющихся невозобновляемыми сырьевыми источниками [1]. Широкое применение бетона привело к повышению уровня мирового потребления его компонентов.

Шлак – побочный продукт или отход производства металла после очистки от остатков цветных компонентов, отправляемый в отвал. Стекло, по данным сайта РБК.ру, за 2022 год произвели в РФ от 15 до 20 млн. тонн, из которых только 5-7 млн. поступило на переработку [2]. Шлакощелочной цемент – гидравлическое вяжущее вещество, в котором алюмосиликатный компонент представлен гранулированными шлаками, а щелочной – соединениями щелочных металлов, дающими щелочную реакцию. Получение бетона на основе шлакощелочного вяжущего с заполнителем из стекольного боя достигается путем затворения смеси, состоящей из молотого доменного гранулированного шлака и фракционированного заполнителя из стекольного боя, со слабыми

растворами щелочей. Щелочная среда, создаваемая соединениями щелочных и щелочноземельных металлов, является определяющим условием процессов синтеза минеральных веществ щелочного и щелочноземельного состава, которые играют роль структурообразующих элементов [3, 4, 5]. В результате гидратации раствор взаимодействует со шлаком в следствие катионного обмена между растворенной солью и окисью кальция, содержащейся в шлаке. Щелочи, содержащиеся в шлакощелочном вяжущем, из катализатора превращаются в компонент вяжущего, в результате чего в составе гидратных новообразований, наряду с гидросиликатами кальция в значительных количествах, кристаллизуются щелочные гидроалюмосиликаты, участвующие в синтезе прочности бетона [1].

#### Материалы и методы

Метод изготовления образцов из шлакощелочного вяжущего с заполнителем из стекольного боя, применяемый в данной работе – затворение смеси щелочными растворами с маркировками «1», «2», «3».

В данной работе использовали гранулированный молотый шлак со следующими характеристиками:

Цвет: белый;

Истинная плотность: 2,87 г/см<sup>3</sup>;

Удельная поверхность: 5100 г/см<sup>2</sup>;

Модуль основности: 1,02;

Гранулометрический состав:

Менее 10 мкм - ~ 50 %;

Менее 20 мкм - ~ 80 %;

Менее 50 мкм - ~ 100 %;

Химический состав исследуемого вяжущего представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемого вяжущего

CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Na <sub>2</sub> O, %	K <sub>2</sub> O, %
36,7	36,1	12,48	12,14	0,36	0,50

В основе исследования было важно подобрать правильный щелочной компонент. Перед началом испытаний бетонной смеси, были заформованы образцы призм 160×50 мм с использованием вяжущего и щелочных компонентов с маркировками «1», «2», «3», для определения активности шлакощелочного вяжущего. Определена прочность серии образцов (табл. 2), а также выполнен анализ микроструктуры методом растровой сканирующей электронной микроскопии (рисунки 1-3) и установлен оксидный состав цементной матрицы (табл. 3-5).

Таблица 2. Активность вяжущего с разными щелочными затворителями

Маркировка затворителя	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Активность, МПа
1	1,96	30
2	1,90	33
3	2,21	44

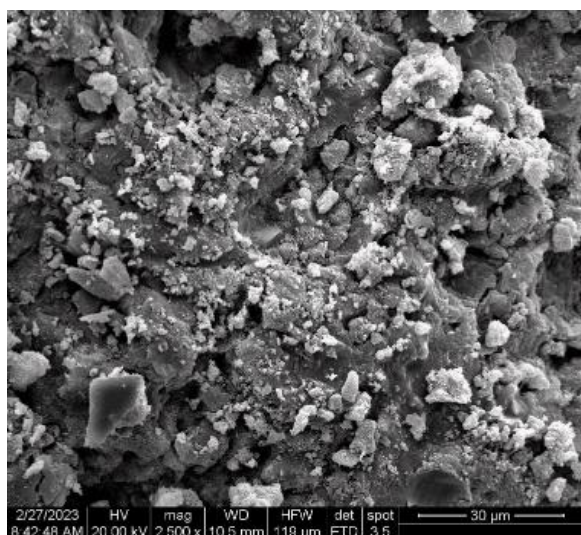


Рисунок 1. Микроструктура цементного камня на щелочном компоненте с маркировкой «1»

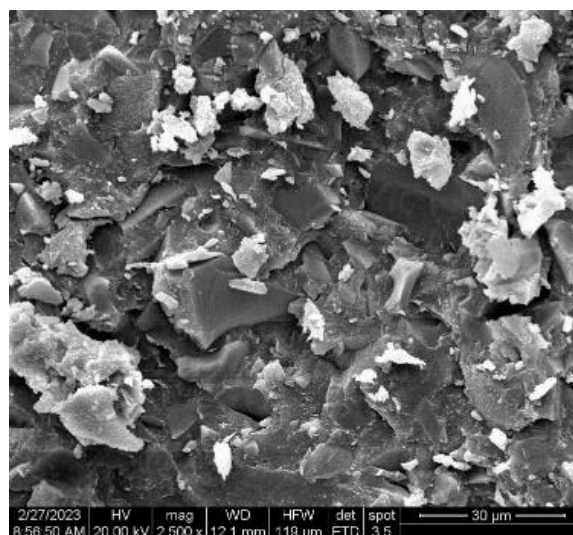


Рисунок 2. Микроструктура цементного камня на щелочном компоненте с маркировкой «2»

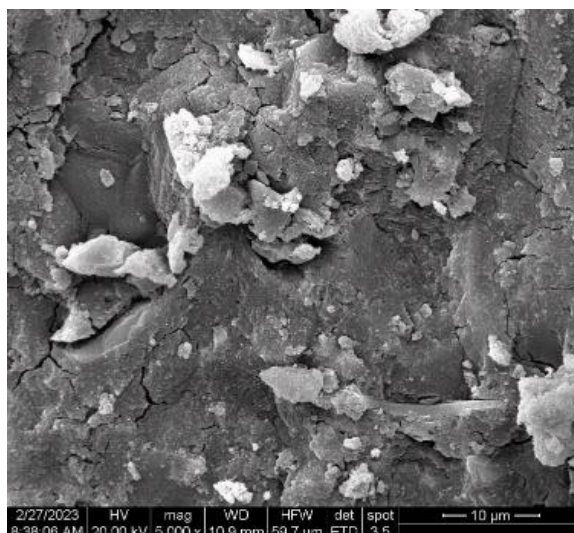


Рисунок 3. Микроструктура цементного камня на щелочном компоненте с маркировкой «3»

Таблица 3. Химический состав цементного камня на щелочном компоненте с маркировкой «1»

CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Na <sub>2</sub> O, %
41,94	39,07	5,52	5,14	2,49

Таблица 4. Химический состав цементного камня на щелочном компоненте с маркировкой «2»

CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Na <sub>2</sub> O, %	K <sub>2</sub> O, %
37,90	39,61	8,61	10,23	0,80	1,88

Таблица 5. Химический состав цементного камня на щелочном компоненте с маркировкой «З»

CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Na <sub>2</sub> O, %
44,17	32,02	6,78	11,43	1,50

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

- активность и средняя плотность цементного камня выше у образца с маркировкой «З».

- в качестве подтверждения о повышенной плотности и активности, служат снимки микроструктуры. У образца с маркировкой «З» самая плотная структура и равномерная микроструктура. У образца с маркировкой «1» микроструктура рыхлая и неоднородная.

- химический анализ дает возможность понять, что во всех образцах в процессе гидратации образуются кристаллы щелочных алюмосиликатов кальция, но в зависимости от типа щелочного компонента, степень новообразований кристаллов, обуславливающие прочность цементного камня, разная.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод что щелочной компонент с маркировкой «З» лучше всего подходит для замешивания бетонной смеси.

В качестве заполнителя использовали битое бутылочное стекло. Основные характеристики заполнителя: цвет: прозрачный, коричневый, зеленый; фракция: 0-10 мм. Состав бетона на шлакощелочном вяжущем и заполнителе из стекольного боя приведен в таблице 6.

Таблица 6. Состав бетона на шлакощелочном вяжущем и заполнителе из стекольного боя

В/Ц	Ц, кг	Щелочной компонент, %	Стекло фр. 0-10, кг
0,4	371	7	530

Условия выдержки: 28 суток в камере нормального твердения.

Результаты исследования

Таблица 7. Призменная прочность образцов бетона

№ Образца	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на изгиб, МПа	Прочность на сжатие, МПа
1	1,74	2,48	22,61
2	1,71	2,54	22,52
3	1,79	2,63	22,96



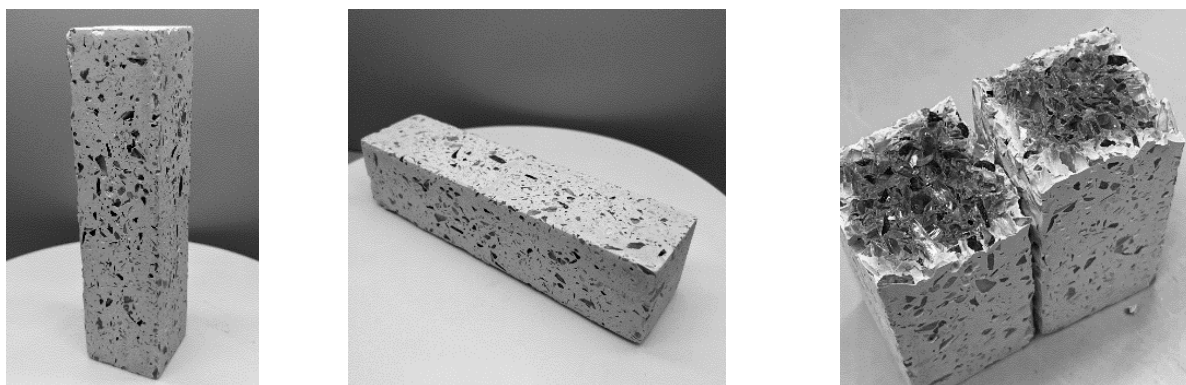


Рисунок 4. Внешний вид образца бетона из шлакощелочного вяжущего и стекольного боя

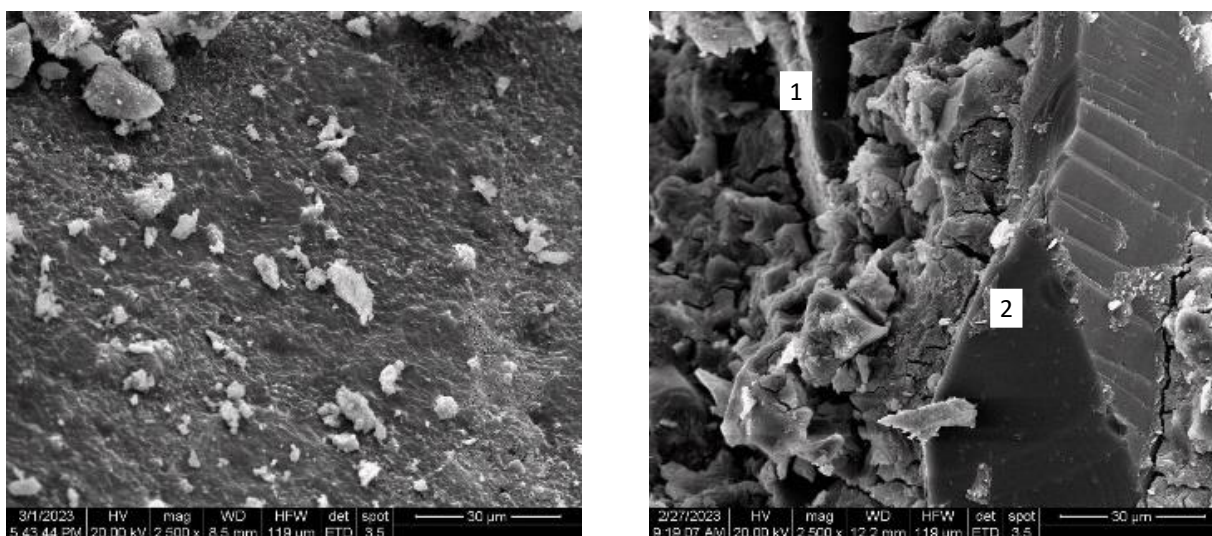


Рисунок 5. Микроструктура цементного камня

Рисунок 6. Микроструктура контактной зоны (1 - цементный камень, 2 – заполнитель из стекольного боя)

Таблица 8. Оксидный состав цементного камня

CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Na <sub>2</sub> O, %	K <sub>2</sub> O, %
34,51	32,93	8,02	12,99	8,82	0,88

Таблица 9. Оксидный состав контактной зоны

CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	MgO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Na <sub>2</sub> O, %	K <sub>2</sub> O, %
31,11	43,82	5,78	9,46	7,15	0,73

### Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Обоснована возможность получения бетона на шлакощелочном вяжущем и заполнителе из фракционированного стекольного боя;

Исследованы основные свойства компонентов шлакощелочного вяжущего;

Установлена оптимальная крупность заполнителя, соответствующая технологическим и эстетическим требованиям к готовому продукту.

Подобран щелочной компонент, соответствующий необходимым требованиям для обеспечения процесса гидратации;

Изучены основные свойства бетонных смесей и бетонов;

Получен бетон со средней прочностью на изгиб 2,6 МПа и на сжатие 22,6 МПа.

#### **Библиографический список:**

1. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны - 1978. 185 с.
2. Официальный сайт РБК - <https://www.rbc.ru/> - 2022.
3. Samchenko, S.V.; Larsen, O.A.; Kozlova, I.V.; Alpackiy, D.G.; Alobaidi, D.A.N. Concrete Modification for Hot Weather Using Crushed Dolomite Stone. Buildings 2023,13,2462. <https://doi.org/10.3390/buildings13102462>
4. V. K. Kozlova,<sup>1</sup> Y. S. Sarkisov,<sup>2</sup> N. P. Gorlenko,<sup>2</sup> S. V. Samchenko,<sup>3</sup> and O. A. Larsen<sup>3</sup> Physicochemical aspects of natural and forced carbonization of cement systems // Russian Physics Journal, Vol. 66, No. 4, August, 2023. DOI 10.1007/s11182-023-02958-5
5. Samchenko, S.V.; Larsen, O.A. Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures. Buildings 2023, 13,897. <https://doi.org/10.3390/buildings13040897>

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО КЛИНКЕРА НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.Ю. Бурлов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, зав. кафедрой

Ю.Р. Кривобородов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

**Аннотация.** Важнейшим источником расширения сырьевой базы в производстве различных строительных материалов является использование вторичных ресурсов и отходов. В настоящее время к техногенным промышленным отходам, содержащим оксид алюминия и сульфаты, проявляется повышенный интерес, поскольку эти материалы потенциально могут быть использованы в технологии сульфоалюминатных клинкеров. Цель работы заключалась в разработке оптимальных составов и параметров синтеза сульфоалюминатного клинкера из техногенного сырья на основе отхода вторичной переплавки алюминиевого лома и фосфогипса, а также в получении цемента с регулируемыми свойствами. Исследования показали принципиальную возможность получения качественного сульфоалюминатного клинкера. При синтезе клинкеров установлено, что образование основного минерала сульфоалюмината кальция происходит при температуре 1300 °С, при этом повышенного содержания оксидов серы или фосфора в отходящих газах не фиксировалось. Сульфоалюминатный цемент на основе клинкера из техногенных материалов имеет высокие строительно-технические свойства и характеризуется высокой гидратационной активностью в ранние сроки твердения, а прочность на сжатие у цементов из техногенных материалов в марочном возрасте (28 суток) на 25-27% выше, чем у контрольного в эти сроки твердения.

**Ключевые слова:** сульфоалюминатный клинкер, техногенные материалы, цемент, гидратация, прочность

### Введение

Интерес к сульфоалюминатному цементу связан с его высокой гидратационной активностью и быстрым набором прочности; отсутствием усадки цементного камня при твердении; сокращенным временем схватывания; высокой морозостойкостью и коррозионной стойкостью [1-5]. Все это предопределяет эффективность использования сульфоалюминатных цементов в различных областях строительства и возможность создания на их основе различных типов строительных материалов [6].

Производство сульфоалюминатного клинкера осуществляется при более низкой температуре по сравнению с портландцементным клинкером, что сопровождается значительным снижением выбросов углекислого газа в атмосферу [7].

Главным препятствием масштабного производства сульфоалюминатных цементов является дефицитность качественного сырья. В связи с этим в настоящее время наблюдается повышенный интерес к техногенным промышленным отходам, содержащим оксид алюминия, поскольку их использование в сочетании с техногенными материалами, содержащими сульфаты, позволяет получать сульфоалюминатные цементы [8-11].

Целью работы было разработать оптимальный состав и параметры синтеза сульфоалюминатного клинкера на основе техногенных материалов.

### Материалы и методы исследования.

В работе использовали традиционное натуральное сырье (известняк, боксит, гипсовый камень) и техногенные материалы (шлак вторичной переплавки алюминиевого лома и фосфогипс). Химические характеристики материалов, используемых в работе, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сырьевых компонентов (%)

Сырьевой компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Потери при прокаливании	Влажность
Известняк	2,40	1,11	0,60	54,62	0,32	0,12	40,8	7,3
Боксит	15,80	55,45	8,90	0,96	-	0,67	15,74	24,4
Гипсовый камень	5,49	0,70	0,61	31,52	3,40	35,40	19,96	4,1
Фосфогипс	0,61	2,400	0,15	39,50	0,06	57,00	0,03	19,5
Шлак вторичной переплавки алюминия	14,87	60,22	4,42	2,44	5,83	11,53	7,88	15,0

Расчеты сырых смесей на основе природных и техногенных материалов в различных комбинациях проводили по известной методике [12] с использованием программы электронных таблиц (Excel) методом поиска решения для выходного параметра – максимального содержания сульфоалюмината кальция в клинкере.

По результатам расчетов были выбраны смеси с содержанием 80 и 100% алюминиевого шлака в качестве глиноземсодержащего компонента сырьевой смеси (смеси №2–№4). Для сравнения также была подготовлена смесь на основе природного сырья: известняк, боксит и гипс (смесь №1). Состав смесей представлен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав сырьевых смесей, %

Сырьевые смеси	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Потери при прокаливании
№1	7,526	20,570	3,585	32,460	0,635	4,752	30,473
№2	7,288	21,675	3,686	32,916	0,184	5,022	29,230
№3	7,446	23,110	2,046	32,735	2,85	5,668	26,145
№4	7,170	24,523	2,739	33,273	2,469	6,032	24,465

Из приготовленных смесей были отформованы прессованием образцы-цилиндры диаметром 5 и высотой 3 см. Образцы обжигали в лабораторной высокотемпературной печи с силитовыми нагревателями при температурах 1000, 1100, 1300 и 1350 °С. Степень полноты процессов минералообразования оценивали по содержанию неусвоенного оксида кальция. Минералогический состав образцов определяли рентгенофазовым анализом.

Из полученных спеков путем измельчения в лабораторной мельнице совместно с природным гипсом были приготовлены сульфоалюминатные цементы. Содержание гипса в цементах составляло 15%. Испытаниями было определено, что цементы имеют нормальную водопотребность и время схватывания. Были подготовлены образцы из цементов размером 40×40×160 мм

и проведены физико-механические испытания цементов проводили на образцах размером  $40 \times 40 \times 160$  мм в соответствии с действующим стандартом (ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка).

#### Результаты и обсуждение

Для определения оптимальной температуры синтеза сульфоалюминатного клинкера изучали спекаемость сырых смесей при разных температурах. Сырые смеси № 1-4 были термообработаны при температурах 1000, 1100, 1300 и 1350°C с изотермической выдержкой в течение 1 часа.

Установлено, что усвоение оксида кальция в клинкерах, полученных из сырых смесей на основе фосфогипса, происходит более интенсивно, чем в клинкерах на основе натурального гипса. Вместе с тем, если боксит заменен техногенным материалом - алюминиевым шлаком, содержание свободного оксида кальция в клинкерах несколько выше в температурном диапазоне 1050-1250°C. Это объясняется большей реакционной способностью боксита, содержащего гидроксид алюминия. С увеличением температуры синтеза до 1300°C разница в степени усвоения CaO в клинкерах незначительна. Рентгенофазовый анализ показал, что сульфоалюминат кальция в клинкерах появляется при температуре 1100 °C и увеличивается с увеличением температуры синтеза. Минералогический состав клинкеров представлен основными минералами: сульфоалюминатом кальция ( $C_3A_3CS$ ) и двухкальциевым силикатом ( $\beta\text{-}C_2S$ ). В качестве примесного минерала в клинкерах присутствуют алюмоферриты кальция и алюминат кальция состава  $C_{12}A_7$ , свободного сульфата кальция в образцах не наблюдается (рисунок 1, 2).

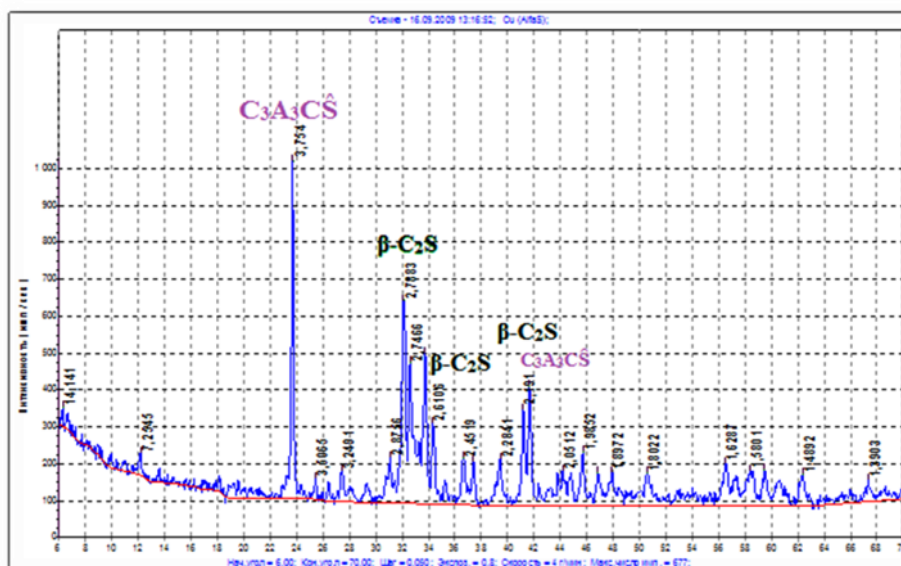


Рисунок 1. Дифрактограмма сульфоалюминатного клинкера №1

Интенсивность дифракционных линий основного минерала, сульфоалюмината кальция, в клинкере, полученном на основе техногенного сырья, выше, чем в клинкере на основе природных компонентов. Это указывает на большую реакционную способность смесей с фосфогипсом и шлаком вторичной переплавки алюминия. Наибольшее содержание сульфоалюмината

кальция наблюдается в образцах на основе исходной смеси №4, синтезированной при температуре 1300 °С. При этом наблюдается образование активного белита, что с разложением метастабильного промежуточного соединения - сульфосиликата кальция.

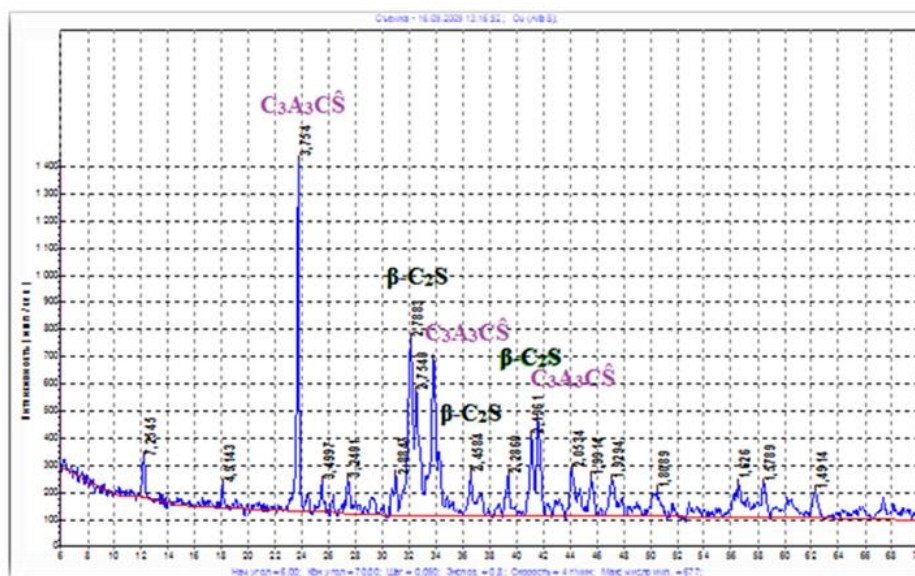


Рисунок 2. Дифрактограмма сульфоалюминатного клинкера №4

Таким образом, выполненные исследования показали принципиальную возможность получения качественного сульфоалюминатного клинкера с использованием отходов промышленности.

Физико-механические испытания цементов подтвердили данное положение. Свойства сульфоалюминатных цементов зависят от содержания основного минерала в клинкере сульфоалюмината кальция и поскольку в клинкерах на основе техногенных материалов его больше, то и прочностные свойства цементов выше, чем у контрольного состава (табл. 3).

Таблица 3. Прочность при сжатии сульфоалюминатных цементов, МПа

Время твердения	Цемент на основе клинкера №1	Цемент на основе клинкера №2	Цемент на основе клинкера №3	Цемент на основе клинкера №4
3 сут	29.9	30.2	30.7	31.2
7 сут	34.5	36.5	38.3	39.1
14 сут	39.4	42.7	46.5	48.7
28 сут	39.8	43.4	48.2	50.1

#### Заключение

1. Выполненные исследования показывают принципиальную возможность получения качественного сульфоалюминатного клинкера с использованием техногенных материалов – шлака вторичной переплавки алюминия и фосфогипса.

2. При синтезе клинкеров полная усвоение оксида кальция происходит при температуре 1300°С с образованием основного минерала сульфоалюмината кальция. В клинкерах на основе техногенных материалов сульфоалюминат

кальция (йелемит) образуется в большем количестве, чем в клинкерах из природных сырьевых компонентов.

3. Сульфоалюминатный цемент на основе клинкера из техногенных материалов, полученного при оптимальном режиме обжига, имеет высокие конструкционные и технические свойства. Цемент имеет быстрое время схватывания - начало 25-30 минут, что типично для высококачественного сульфоалюминатного цемента; характеризуется высокой гидратационной активностью и быстрым набором прочности в ранние сроки твердения, прочность на сжатие цементов из техногенных материалов значительно выше, чем у контрольного во все сроки твердения.

#### **Библиографический список:**

1. Кузнецова, Т.В. Глиноземистый цемент / Т.В. Кузнецова, И. Талабер – М.: Стройиздат, 1988. 272 с.
2. Кузнецова, Т.В. Аллюминатные и сульфоаллюминатные цементы / Т.В. Кузнецова – М.: Стройиздат, 1986. 208 с.
3. Kouznetsova, T.V. Special cements on base sulphoaluminate clinker / T.V. Kouznetsova, Y.R. Krivoborodov, S.V. Samchenko, I.Y. Burlov // 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). 2011. Madrid, Spain, Pp. 198.1-198.6.
4. Mehta, P.K. Mechanism of expansion associated with ettringite formation / P.K. Mehta // Cement and Concrete Research. 1973. Vol. 3, Pp. 1-6.
5. Osokin, A.P. Expansive and non-shrinkage sulphomineral cements / A.P. Osokin, Y.R. Krivoborodov, S.V. Samchenko // 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). 2003. Durban, South Africa, pp. 2083-2088.
6. Aranda, M.A.G. Sulfoaluminate cement. Eco-Efficient Concrete / M.A.G. Aranda, A.G. De la Torre // A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2013, Pp. 488–522.
7. Bizzozero, J. Limestone reaction in calcium aluminate cement–calcium sulfate systems / J. Bizzozero, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 76, October, Pp. 159-169.
8. Burlov, Y.A. Synthesis of special cements using different waste / Y.A. Burlov, I.Y. Burlov, Y.R. Krivoborodov // 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). 2011. Madrid, Spain, Pp. 59.1-59.4.
9. Mladenović, A. Calcium aluminate rich secondary stainless steel slag as a supplementary cementitious material / A. Mladenović, B. Mirtič, A. Meden, V.Z. Serjun // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 116, 30 July, Pp. 216-225.
10. Кривобородов, Ю.Р. Применение вторичных ресурсов для получения цементов / Ю.Р. Кривобородов, А.Ю. Бурлов, И.Ю. Бурлов // Строительные материалы. 2009. №2. С. 44-45.
11. Yongbo Huang. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: Influence of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and F on the clinker formation and cement performances / Yongbo Huang, Jueshi Qian, Xiaojuan Kang, Jincheng Yu, Yingru Fan, Yudong Dang, Wensheng Zhang, Shoude Wang // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 203, 10 April, Pp. 432-442.
12. Кривобородов, Ю.Р. Состав и свойства расширяющихся цементов: учеб. пособие / Ю.Р. Кривобородов, С.В. Самченко. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2004. 54 с.

## ГИБРИДНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.И. Валиев<sup>1</sup>, аспирант

А.М. Сулейманов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Аннотация.** Произведен обзор литературы по рынку потребления полимерных композиционных материалов, представлены ключевые проблемы, сдерживающие их внедрение в сфере строительства, на примере мостовых сооружений рассмотрены примеры гибридных полимерных композиционных конструкций.

**Ключевые слова:** полимер, композиционный материал, гибрид, стекловолокно, углеволокно.

Разработка эффективных материалов в области строительства предполагает внедрение новых конструкционных материалов с высокими упруго-механическими характеристиками. Волокнистый полимерный композиционный материал (ПКМ) является одним из таких материалов, в котором за прочность отвечает субстрат в виде волокон, за диссипацию напряжений полимерное связующее, поверхность раздела фаз предполагает передачу напряжений от субстрата к связующему [1-3].

По данным, представленным в работах [4] и [5], потребление ПКМ в период с 2017-2023 гг. выросло на 17,1% в объемном выражении, объем рынка ПКМ продолжает увеличиваться с каждым годом и ожидается, что в период 2023-2029 гг. будет расти в среднем на 3,67%. Гистограмма роста потребления ПКМ представлена на рисунке 1.

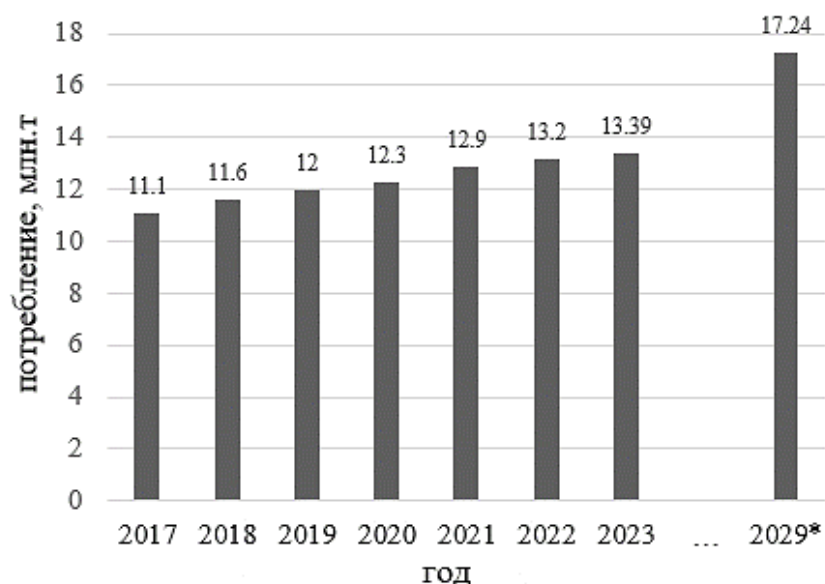


Рисунок 1. Гистограмма роста потребления ПКМ

Одним из самых распространенных ПКМ по типу армирующего наполнителя является ПКМ из стекловолокна за счет оптимального соотношения цены, характеристик и занимает 87% объема рынка, с наиболее высокими



показателями удельной прочности и жесткости выделяют ПКМ из углеволокна, который занимает 11% объема рынка, по 1% составляют ПКМ из арамидных и других типов волокон. По типу полимерной матрицы объем рынка терморезактивных композитов составляет 67% (42-47% — полиэфирные, 10-15% — эпоксидные, 6% — винилэфирные, 2% — фенольные, 2% — остальные реактопласты) и 33% термопластичных [5].

Выделяют ряд методов производства ПКМ конструкционного назначения: формование, намотка, инфузия, пултрузия и другие, применение которых в основном определяются назначением [6-8].

С ростом объемов рынка, методов производства, повышается и область применения ПКМ конструкционного назначения, а значит, повышаются и требования к ним. Ключевыми проблемами применения конструкционных ПКМ ортотропной структуры в строительной практике можно выделить:

- выполнение определяющего условия прочности (второго предельного состояния по ГОСТ 27751-2014), по результатам которого подбираются элементы конструкций различных методов производства, которые предпочтительно выполнять без дублирования форм профилей металлических аналогов с изотропными механическими свойствами;

- недостаточность информации по адгезионному взаимодействию фаз в ПКМ;

- недостаточность информации о долговечности ПКМ конструкционного назначения. Нормативная документация предполагает использование завышенных значений коэффициентов условий работы, в связи с недостаточностью изученных свойств ПКМ, большого разброса физико-механических характеристик;

- проблемы, связанные с импортозамещением компонентов ПКМ.

Решение изложенных проблем достигается за счет оптимизации ПКМ путем разработки долговечных, гибридных ПКМ строительного назначения с оптимальным содержанием слоев волокон различной природы в едином полимерном связующем при оптимальном адгезионном взаимодействии на межфазной границе, с использованием отечественной продукции.

Гибридными называют ПКМ, которые содержат в субстрате более одного вида армирующего компонента различной природы в единой полимерной матрице. Разработка гибридного ПКМ осуществляется с целью получения изделия с заданными, оптимальными физико-механическими свойствами [9].

В строительной практике гибридные ПКМ впервые использованы в мостовых сооружениях в основном с целью обеспечения условий прочности и устойчивости при оптимальных поперечных сечениях, малой массе, высокой коррозионной устойчивости, однотипности элементов конструкций, так как для несущих элементов в виде главных балок больших пролетов из ПКМ (например, для стеклопластиков) не всегда удается выполнение условия прочности по второму предельному состоянию, что приводит к выполнению несущих элементов конструкций гибридными (с гетерофазным наполнением) либо гибридными по материалу конструкции (ПКМ (например, стеклопластик — ж/б либо сталь)).

Согласно [10] первый мост с гибридным по материалу конструкции возведен в Европе (мост Friedberg Bridge в Германии), также в строительной практике известны мостовые сооружения с гибридными элементами (на основе сочетания стеклянных/углеродных волокон и полимерного связующего) — первый мост с прозрачным пролетом, соединяющий зону для пикника «Clear Creek Furnace» с трассой «Sheltower Trase» в округе Бат, штат Кентукки и другие. В отечественной практике известны попытки строительства пешеходных мостовых сооружений из ПКМ, возведен гибридный по материалу конструкции мост через реку Пашенка [11], гибридных (гетероволоконистых по наполнению) мостовых сооружений не наблюдается.

Таким образом, развитие рынка ПКМ развивается с каждым годом, отечественная практика строительства уступает мировому, что является актуальным для внедрения в производственные линии предприятий новых гибридных конструкционных материалов с заданными физико-механическими характеристиками при достижении оптимума.

#### **Библиографический список:**

1. Цыгвинцев, И.В. Применение композитных материалов в строительстве / И.В. Цыгвинцев, П.И. Постникова, И.В. Сенцов // *Инновационное развитие*. — 2017. — № 7(12). — С. 26–29.
2. Храмова, Т.А. Исследование технологии применения композитных материалов для строительства и реконструкции объектов инфраструктуры / Т.А. Храмова // *Аллея науки*. — 2017. — Т. 1. — № 8. — С. 201–211.
3. Сапунов, В.Т. Прочность, надежность и долговечность композитов как конструкционных материалов / В.Т. Сапунов // *Композиты и наноструктуры*. — 2016. — Т. 8. — № 2(30). — С. 110–119.
4. Composites Market – Global Industry Analysis and Forecast (2022–2029) // MAXIMIZE MARKET RESEARCH: сайт. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com> (дата обращения: 08.09.2023).
5. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. №6-7 (89). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rossiyskiy-i-mirovoy-rynok-polimernyh-kompozitov-obzor> (дата обращения: 08.09.2023).
6. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
7. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Фахрутдинов А.Э. Разработка и экспериментальные исследования конструкций навеса над трибунами из пултрузионных стеклопластиковых профилей // *Известия вузов. Строительство*. 2019, №3. С. 96-108.
8. Хрульков А.В., Донецкий К.И., Усачева М.Н., Горянский А.Н. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 2 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62.
9. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 192 с.
10. Potyrała, P. B. Use of fibre-reinforced polymers in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures. [Электронный ресурс] / P. B. Potyrała. – Режим доступа: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12353>.

11. А.С. Бейвель, С.Ю. Ветохин, А.В. Гералтовский, В.П. Полиновский. Полимерные композиты в транспортном строительстве и мостостроении. Compositebook (электронная версия). – 2018. – №1.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЕНОБЕТОНОВ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

**Е.М. Вишторский**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**И.В. Белов**<sup>1</sup>, ассистент

**М.О. Парфенова**<sup>1</sup>, студентка гр. ДВ-304

<sup>1</sup>*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева*

**Аннотация.** Общим недостатком ячеистых бетонов является высокое водотвердое отношение (В/Т), что снижает прочность и трещиностойкость бетонов, особенно неавтоклавных, за счет высокой усадки. В работе рассмотрены эксплуатационные свойства неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким водотвердым отношением. В качестве сырьевых компонентов использован цемент ЦЕМ I 42,5Н «Осколцемент» (Ц), зола-уноса Зуевской ТЭС (ЗУ), белковый пенообразователь «Эталон» (ПО), а также химическая добавка водоредуцирующего действия «Хемикс Art-2» и ускоритель схватывания бетона сульфат натрия (СН). Разработанные составы неавтоклавного пенобетона из смесей с низким водотвердым отношением позволяют получить теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные изделия с маркой по плотности от D400 до D600, классами по прочности В0,5 – В1,5, значениями коэффициента теплопроводности 0,093 – 0,133 Вт/(м·°С) и усадкой 2,4 – 0,82 мм/м соответственно.

**Ключевые слова:** неавтоклавный пенобетон, плотность, прочность, теплопроводность, усадка.

Современные неавтоклавные пенобетоны по основным эксплуатационным показателям не только не уступают, но и превосходят ряд других теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов [1-3]. При получении пенобетонных композитов процесс формирования структуры трудно поддается управлению и регулированию, что в свою очередь может привести к дефектности конечного материала, а именно деформациям и объединению пор, трещинообразованию и колебанию свойств, снижающих эксплуатационные характеристики [4,5]. Для определения эксплуатационных характеристик неавтоклавных пенобетонов рассмотрены составы со средней маркой по плотности от D600 до D400, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Составы неавтоклавных пенобетонов на 1 м<sup>3</sup>

№п/п	Характеристика состава	В/Т	Ц, кг	ЗУ, кг	Хемикс Art-2, кг	СН, кг	ПО, кг	Марка по средней плотности
1	Контрольный, 100%Ц	0,42	522	-	-	-	1,0	D600
2	50%Ц+50%ЗУ+1,1% Хемикс+1%СН	0,35	261	261	2,87	2,61	1,0	D600
3	67%Ц+33%ЗУ+1,1% Хемикс+1%СН	0,40	300	150	3,3	3,0	1,2	D500
4	86%Ц+14%ЗУ+1,1% Хемикс+1%СН	0,48	310	50	3,41	3,10	1,3	D400

Прочностные показатели представленных выше составов при различных способах твердения показаны на рисунке 1.

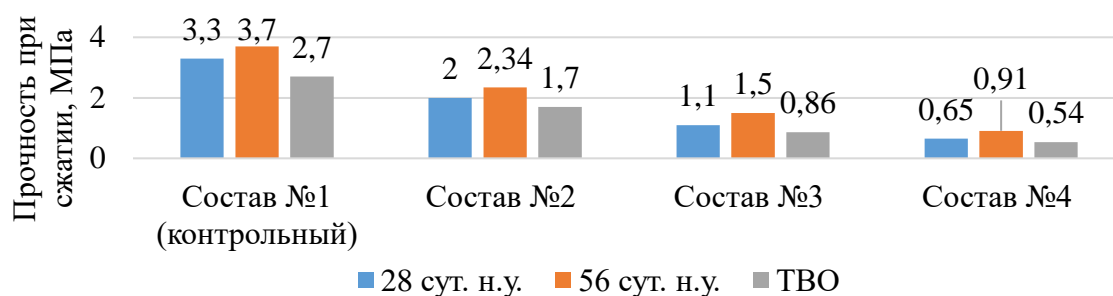


Рисунок 1. Прочностные показатели пенобетона при сжатии

Одним из существенных недостатков пенобетона является наличие больших усадочных деформаций, вызывающих появление трещин в изделиях. Отсутствие крупных заполнителей приводит к усадке пенобетона в 4–10 раз по сравнению с обычным тяжелым бетоном [6 - 8]. На усадку при высыхании влияет множество факторов, таких как плотность пенобетона, пенообразователь, заполнитель, наличие химических добавок, а также условия твердения. Результаты исследований естественной усадки приведенные в табл. 2 показывают, что влажностные деформации пенобетона зависят, прежде всего, от средней плотности, наличия кремнеземистого компонента и условий твердения.

Таблица 2. Усадочные деформации неавтоклавных пенобетонов

Влажность, %	Относительные усадочные деформации, мм/м*, составы по табл. 1.			
	Состав №1	Состав №2	Состав №3	Состав №4
5	<u>3,30</u>	<u>1,50</u>	<u>2,80</u>	<u>3,70</u>
	2,31	1,17	2,10	3,07
10	<u>2,82</u>	<u>1,37</u>	<u>2,54</u>	<u>3,40</u>
	1,97	1,05	1,87	2,82
15	<u>2,62</u>	<u>1,18</u>	<u>2,21</u>	<u>2,90</u>
	1,83	0,88	1,65	2,40
20	<u>2,20</u>	<u>1,06</u>	<u>1,92</u>	<u>2,69</u>
	1,54	0,82	1,42	2,15
25	<u>2,00</u>	<u>0,93</u>	<u>1,71</u>	<u>2,03</u>
	1,42	0,73	1,28	1,66
30	<u>1,75</u>	<u>0,82</u>	<u>1,64</u>	<u>1,77</u>
	1,22	0,65	1,23	1,41
35	<u>1,62</u>	<u>0,68</u>	<u>1,40</u>	<u>1,31</u>
	1,13	0,51	1,05	1,24
40	<u>1,25</u>	<u>0,43</u>	<u>1,10</u>	<u>1,10</u>
	0,87	0,32	0,82	0,91
45	<u>1,06</u>	<u>0,37</u>	<u>1,10</u>	<u>1,04</u>
	0,74	0,29	0,82	0,83
50	<u>0,75</u>	<u>0,31</u>	<u>1,00</u>	<u>0,73</u>
	0,52	0,25	0,75	0,58
55	<u>0,64</u>	<u>0,31</u>	<u>0,60</u>	<u>0,55</u>
	0,48	0,24	0,45	0,45
60	<u>0,64</u>	<u>0,12</u>	<u>0,54</u>	<u>0,52</u>
	0,44	0,09	0,40	0,41
65	<u>0,64</u>	<u>0,12</u>	<u>0,54</u>	<u>0,52</u>
	0,44	0,09	0,40	0,41

\*Примечание: значения в числителе при твердении в нормальных условиях, в знаменателе – при TBO.

На рисунках 2 и 3 представлены показатели усадки при твердении в нормальных условиях и после ТВО.

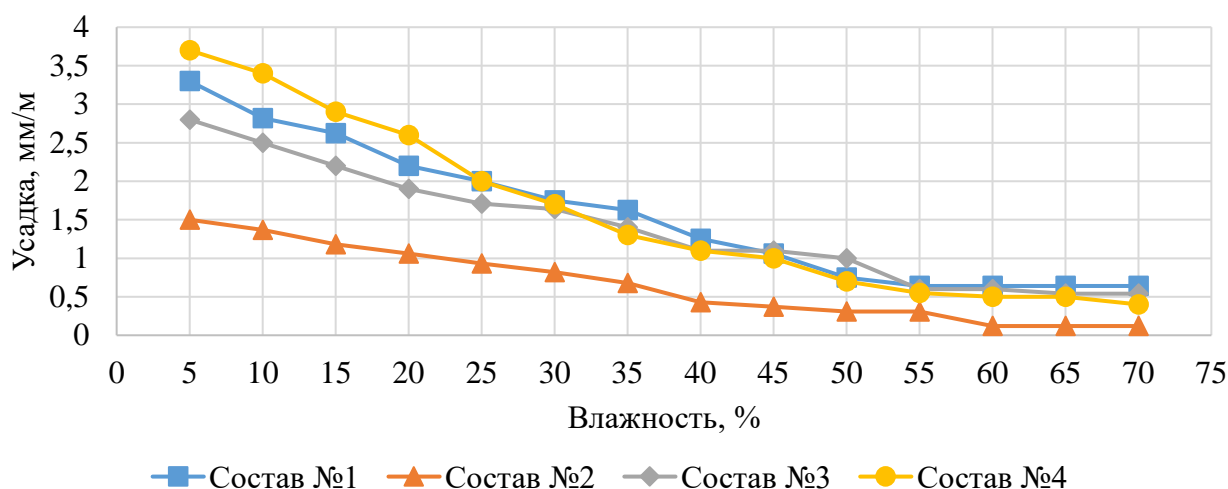


Рисунок 2. Усадка при твердении в нормальных условиях

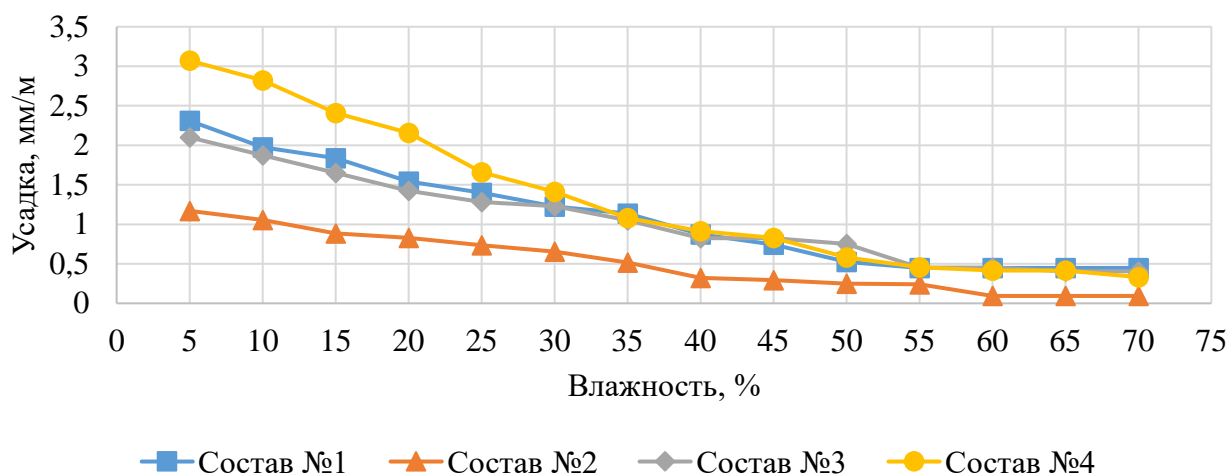


Рисунок 3. Усадка после ТВО

Максимальные деформации усадки характерны для бетонов нормального твердения. Минимальное значение усадки наблюдается у состава №2, которое составляет 0,82 мм/м. У состава №1 усадка составляет 1,67 мм/м, у состава №3 – 1,4 мм/м, у состава №4 – 2,4 мм/м соответственно. Образцы пенобетона подвергнутые ТВО имеют более низкую усадку: для состава №1 – 1,17 мм/м, для состава №2 – 0,65 мм/м, для состава №3 – 1,05 мм/м, для состава №4 – 1,92 мм/м.

Пенобетон из смесей с низким водотвердым отношением за счет наличия добавок-регуляторов в своем составе имеет более плотную структуру перегородок с большим количеством замкнутых пор, а при такой структуре сближение кристаллов при испарении влаги из гидратных оболочек происходит значительно медленнее, процесс гидратации цемента происходит интенсивнее. Значения усадочных деформаций пенобетона снижаются с увеличением средней плотности и не превышают нормативных требований 3 мм/м по ГОСТ 25485 – 2019 [9].

Основной эксплуатационной характеристикой пенобетонов является теплопроводность. На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента теплопроводности от марки по средней плотности.

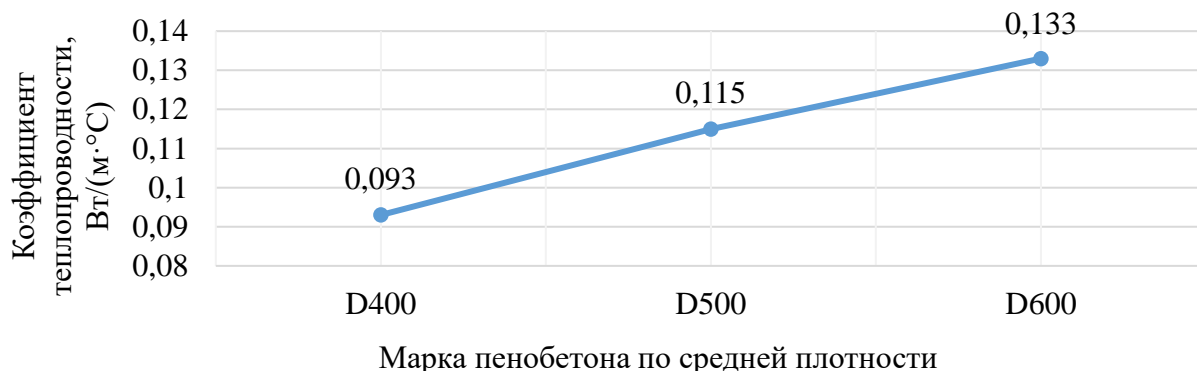


Рисунок 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от марки по средней плотности.

Коэффициент теплопроводности пенобетона зависит в основном от его средней плотности и влажности. При наличии влаги даже в небольших количествах (10%) происходит существенное увеличение значения коэффициента теплопроводности материала. При использовании изделий из ячеистых бетонов в наружных ограждающих конструкциях зданий и сооружений необходимо также предусматривать их защиту от увлажнения.

#### Библиографический список:

1. Кудяков, А. И. Технология цементного пенобетона с дисперсными пористыми добавками / А. И. Кудяков, И. А. Прищепа // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : Материалы XIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Томск, 28 февраля – 02 2023 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 399-405. – EDN OKLOXW.
2. Назарова, А. В. Влияние кремнеземистого компонента и условий твердения на прочностные показатели пенобетонов неавтоклавного твердения / А. В. Назарова, Е. М. Вишторский, О. Б. Конев // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 12(54). – С. 34-37. – EDN MQZIVJ.
3. Ефремов, А. Н. Влияние пластифицирующих добавок различной природы на макроструктуру и прочностные характеристики неавтоклавного пенобетона / А. Н. Ефремов, А. В. Назарова, Е. М. Вишторский // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2018. – № 8(14). – С. 130-134. – EDN YLJBFR.
4. Additive for improving the quality of foam concrete made on the basis of micro silica and quicklime / R. E. Lukpanov, D. S. Dyussebinov, S. B. Yenkebayev [et al.] // Комплексное использование минерального сырья. – 2022. – No. 4(323). – P. 30-37. – DOI 10.31643/2022/6445.37. – EDN FDQAXS.
5. Нецвет, Д. Д. Неавтоклавный пенобетон с комплексом минеральных модификаторов: Дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / Д. Д. Нецвет. – Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2019. – 241 с.
6. Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, and A. A. A. Abang, "Properties and applications of foamed concrete: a review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990–1005, 2015.

7. P. Chindaprasirt and U. Rattanasak, "Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash," *Materials and Design*, vol. 32, no. 2, pp. 723–727, 2011.
8. Стешенко, А.Б. Процессный подход при управлении усадочными деформациями фибропенобетона / А.Б. Стешенко, А.И. Кудяков // Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный ресурс]: труды X международной конференции студентов и молодых ученых. Россия, Томск, 23-26 апреля 2013 г. - Изд-во ТПУ. –2013. – С. 761-764.
9. ГОСТ 25485-2019 Бетоны ячеистые. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.



## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ШУНГИТСОДЕРЖАЩЕГО БЕТОНА ПРИ ЭЛЕКТРОДНОМ ПРОГРЕВЕ

А.М. Гарафиев<sup>1</sup>, аспирант

Р.Х. Мухаметрахимов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Аннотация.** Среди широкого спектра методов повышения эффективности электродного прогрева бетона одним из менее трудоемких, но относительно эффективных является модифицирование его состава различными токопроводящими компонентами, наибольший интерес среди которых представляет минерал шунгит. В ранее выполненных исследованиях экспериментально подтверждена эффективность шунгита с позиции перколяции электрического тока и повышения прочности бетона. Однако, в композитах, твердеющих при отрицательных температурах важно также обеспечить бездефектность и стабильность их структуры. В этой связи цель настоящей работы заключается в изучении особенностей структурообразования цементных систем, модифицированных молотым шунгитом, активной минеральной и пластифицирующей добавками, твердеющих при электродном прогреве. Установлено, что введение шунгита, пластифицирующей и активной минеральной добавок приводит к уплотнению структуры бетона. Методом дифференциально-термического анализа выявлена особенность экзотермической реакции образцов цементного камня, которая обусловлена образованием гидросиликата кальция  $C_2SH(A)$ , выявленного методами количественного РФА и сканирующей электронной микроскопии, что в числе прочих факторов обеспечивает данным композитам более высокую прочность и низкую проницаемость. В целом структура разработанного шунгитсодержащего бетона характерна структуре традиционного цементного камня и бетона, что является подтверждением известных теоретических представлений о структурообразовании бетона на рецептурную систему модифицированного шунгитсодержащего бетона, твердеющего при электродном прогреве при отрицательной температуре наружного воздуха.

**Ключевые слова:** бетон, токопроводящий минерал, шунгит, электродный прогрев, перколяция, структура.

Существуют различные методы повышения эффективности электродного прогрева, которые основаны на введении токопроводящих частиц в сырьевые смеси (стальных фибр, минеральных углеродсодержащих частиц и др.) [1–3].

Но более эффективным и применимым на практике способом повышения электропроводности бетона в технологии электродного прогрева, по нашему мнению, является введение в его смесь молотых ( $S_{уд}$  100-500 м<sup>2</sup>/кг) углеродсодержащих частиц [4,5], например, шунгита [6]. В ранее выполненных работах нами определены оптимальные степень помола ( $S_{уд}$  400 м<sup>2</sup>/кг) и содержание шунгита (5 % от массы цемента), обеспечивающие перколяционный эффект при электродном прогреве [7].

Разработке, получению и исследованию микро- и нано-дисперсных добавок на основе шунгитсодержащих пород для бетона посвящены работы Лукуцовой Н.П., Пыкина А.А. [8], Кравченко Т.Г., Шилина А.Д. [9,10] и др. В

работе [8] показано, что применение добавки с оптимальным содержанием шунгитового наполнителя в количестве 5% в составе мелкозернистого бетона приводит к повышению прочности бетона при сжатии через 3 суток твердения в 4,4 раза по сравнению с контрольным составом, через 28 суток – в 1,5 раза.

Не снижая значимости рассмотренных выше работ, следует отметить, что особенности структурообразования и свойств бетона, модифицированного молотым шунгитом, активной минеральной и пластифицирующей добавками подвергнутого электродному прогреву являются малоизученными, что представляет значительный интерес для научного обоснования предложенного нами технологического решения [6].

Целью работы является изучение особенностей структурообразования цементных систем, модифицированных молотым шунгитом ( $S_{уд}$  400 м<sup>2</sup>/кг) в сочетании с активной минеральной и пластифицирующей добавками, твердеющих при электродном прогреве в условиях отрицательной температуры наружного воздуха.

Объект исследований – модифицированный шунгитсодержащий цементный композит, твердеющий при электродном прогреве.

Предмет исследования – морфология цементного камня, фазовый состав гидратных новообразований, поровая структура и физико-технические свойства бетона.

В качестве исходных компонентов для изготовления цементного камня и бетона, твердеющих при электродном прогреве, были применены:

– портландцемент ЦЕМ I 42,5Н соответствующий ГОСТ 31108-2016 производства ОАО «Сухоложскцемент».

– фракционированный кварцевый песок, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014, Камского месторождения.

– гранитный щебень фракции 5-20 сорта А, изготовленный по ТУ 5711-006-00186938-2017 производства АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат».

– метаксаолин производства по ТУ 5729-097-12615988-2013, ЗАО «Пласт Рифей»,  $S_{уд}$  1357 м<sup>2</sup>/кг, следующего химического состава: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 42,0 %; SiO<sub>2</sub> – 55,8 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,7 %, TiO<sub>2</sub> – 0,4 %; K<sub>2</sub>O – 0,9 %; Na<sub>2</sub>O – 0,05 %; CaO – 0,15 %.

– пластифицирующая добавка – поликарбоксилатный эфир «Glenium® Ace 430» производства ООО «BASF Строительные системы».

– токопроводящий наполнитель – шунгит молотый Зажогинского месторождения, производства ООО НПК «КАРБОН-ШУНГИТ», следующего химического состава: SiO<sub>2</sub> – 57,0 %; TiO<sub>2</sub> – 0,2 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,3 %; MgO – 1,2 %; CaO – 0,3 %; Na<sub>2</sub>O – 0,2 %; K<sub>2</sub>O – 1,5 %; S – 1,5 %; C – 28,0 %; H<sub>2</sub>O<sub>крис</sub> – 3,0 %.

– вода водопроводная питьевая, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены шунгитсодержащие бетоны и пробы цементного камня следующих составов:

Проба 1 – контрольный состав (ПЦ – 370 кг, мелкий заполнитель – 444 кг, крупный заполнитель – 1000 кг);

Проба 2 – состав, модифицированный шунгитом в количестве 5 % от массы цемента;

Проба 3 – состав, модифицированный метакаолином и ПД «Glenium® Ace 430», в количестве 10% и 1 % от массы цемента соответственно;

Проба 4 – состав, модифицированный шунгитом, метакаолином и ПД «Glenium® Ace 430», в количестве 5%, 10% и 1 % от массы цемента соответственно.

Прогрев бетона проводили при отрицательной температуре наружного воздуха от -10 до -15 °С.

Поровую структуру бетона изучали по ГОСТ 12730.4-78, физико-технические свойства по ГОСТ 10180-2012. Определение водонепроницаемости бетона производили с применением прибора «АГАМА–2РМ» производства компании «ВНИИР» по методике ГОСТ 12730.5-2018. Морозостойкость бетона определяли на образцах кубах размером 10×10×10 см по ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости».

Комплексный термический анализ производили на приборе NETZSCH STA 449 F3 Jupiter с разрешением ТГ – 0,1 µg, ДСК < 1 мкВт. Рентгенографический анализ (РФА) выполнен на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker Axs) с геометрией Брега-Брентано в интервале углов 5-65° 2θ и скоростью вращения гониометра 1°/мин. Электронно-микроскопический анализ проводился на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенный спектрометром энергетической дисперсии AZtec X-Max (Oxford Instruments).

По результатам экспериментальных исследований установлено, что введение молотого шунгита в контрольный состав бетона сокращает полный объем пор с 20,98 % до 20,86 %, происходит снижение объема открытых капиллярных пор с 10,65 % до 10,42 % и объема открытых некапиллярных пор с 0,93 % до 0,84 %, при этом увеличивается объем условнозакрытых пор с 9,4 % до 9,6 и показатель микропористости с 0,79 % до 0,91. Введение молотого шунгита в состав, модифицированный АМД и ПД снижает общую пористость и существенно изменяет структуру пор. Отмечается сокращение полного объема пор с 17,26 % до 15,69 %. При одновременном понижении показателя общей пористости происходит значительное перераспределение объема условно-закрытых, открытых некапиллярных, открытых капиллярных и пор. Таким образом, объем условно-закрытых пор увеличивается с 10,2 до 10,9 %, объем открытых некапиллярных пор сокращается с 0,45 % до 0,32 %, объем открытых капиллярных пор понижается с 6,61 % до 4,47 %, а показатель микропористости повышается с 1,79 до 1,95.

Определено, что введение молотого шунгита в бетон, твердеющий в условиях электродного прогрева при отрицательных температурах наружного воздуха, вносит значительный вклад в повышение марки бетона по водонепроницаемости и морозостойкости исходного (немодифицированного) состава (с W8 до W12; с F200 до F300), а также существенный вклад в повышение водонепроницаемости и морозостойкости состава, модифицированного метакаолином в количестве 10 % и ПД «Glenium® Ace 430» в количестве 1 % (с

W16 до W20; с F300 до F400), что предположительно связано с изменением поровой структуры композита.

Методом ДТА установлено, что составы цементного камня при введении модифицирующих добавок характеризуются большим изменением массы для первого и третьего эндотермических эффектов в сравнении с исходным составом, что является признаком наличия большего количества гидросиликатов кальция в модифицированных составах, обуславливающих их более глубокую гидратацию. Увеличение энтальпии второго эндоэффекта, связанного с дегидратацией портландита для модифицированных образцов обусловлено, вероятно, увеличением объема продуктов гидратации данных составов. Экзотермическая реакция при температуре 624 – 732 °С связана с выгоранием шунгитового углерода в составах №2 и 4. Выявлена особенность экзотермической реакции образцов ЦК, модифицированных одинаковым содержанием молотого шунгита, заключающаяся в увеличении энтальпии на 5,6 % пробы №4 по сравнению с пробой №2, что может быть обусловлено образованием гидросиликата кальция  $C_2SH$  (А) в количестве 0,76 и 3,19 % в пробах №2 и №4 соответственно, выявленного методом количественного РФА, и подтверждается результатами полученными методом сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии [11], что в числе прочих факторов обеспечивает им более высокую прочность и низкую проницаемость по сравнению с контрольным образцом.

Методом РФА установлено, что модифицирование цементных композиций шунгитом, метакаолином и пластифицирующей добавкой способствует сокращению интенсивности дифракционных отражений портландита, увеличению интенсивности дифракционных отражений минералов тоберморитовой группы, низкоосновных гидросиликатов кальция (преимущественно ксонотлита), подтверждающих повышение их физико-технических характеристик. При этом, введение молотого шунгита, активной минеральной и пластифицирующей добавок способствует незначительному изменению качественного состава новообразований модифицированных образцов, в которые отличаются наличием высокоосновного гидросиликата кальция группы  $C_2SH$  гиллебрандита, способствующего повышению морозостойкости цементных композиций.

Особенности морфометрических признаков структур композитов ЦК исходного состава, с оптимальным содержанием шунгита и исследуемых модифицирующих добавок, подвергавшихся электродному прогреву изучены методом электронно-микроскопического и микронзондового анализов (рисунки 1, 2).

На рисунке 1 б отчетливо прослеживается относительно равномерное распределение молотого шунгита в объеме, а также топологическое уплотнение структуры модифицированного композита по сравнению с контрольным.

На рисунке 2 б отчетливо прослеживается преобладание новообразований в ЦК модифицированным шунгитом, АМД и ПД, состоящих из волокнистой гелеобразной фазой, близкой по структуре и составу к тобермориту –  $CSH(B)$ ,  $CSH(I)$ , кристаллической фазой, которая представлена из очень тонких

пластинок и чешуек гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , игольчатых и нитеобразных кристаллов этtringита, гексагональных пластинок четырехкальциевого гидроалюмината.

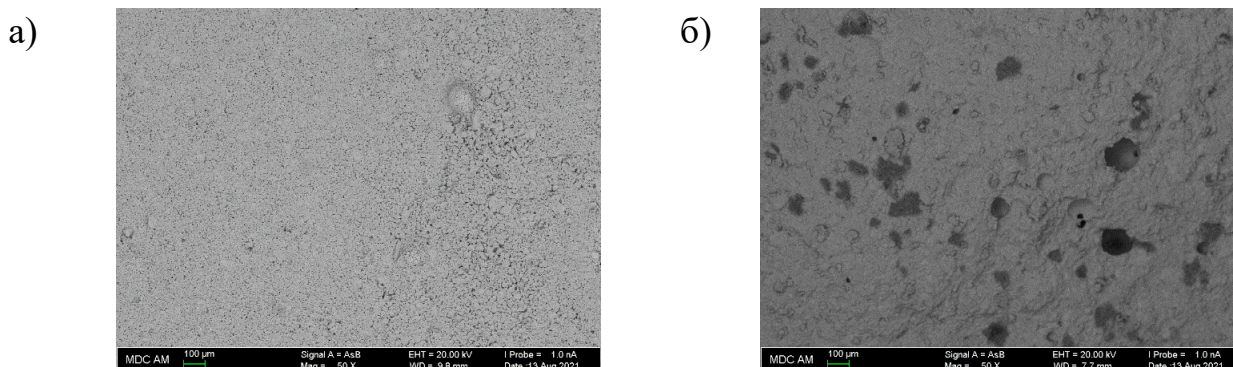


Рисунок 1. Электронно-микроскопические снимки образцов цементного камня (увеличение  $\times 50$ ): а – состав без добавок; б – с шунгитом, АМД и ПД

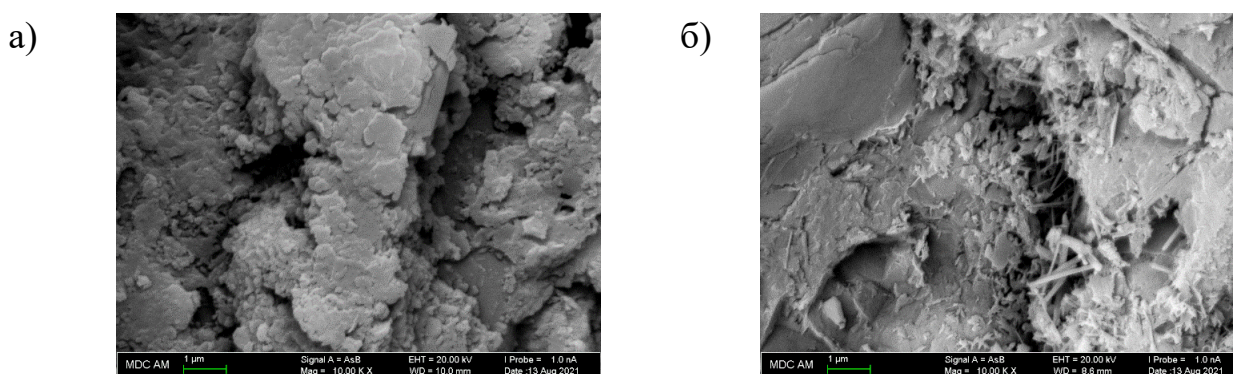


Рисунок 2. Электронно-микроскопические снимки образцов цементного камня (увеличение  $\times 10000$ ): а – состав без добавок; б – с шунгитом, АМД и ПД

В целом структура разработанного шунгитсодержащего бетона характерна структуре традиционного цементного камня и бетона, что является подтверждением известных теоретических представлений о структурообразовании бетона на рецептурную систему модифицированного шунгитсодержащего бетона, твердеющего при электродном прогреве при отрицательной температуре наружного воздуха, и свидетельствует о стабильности исследуемых композиций.

#### Библиографический список:

1. Liu Y. и др. Ohmic heating curing of carbon fiber/carbon nanofiber synergistically strengthening cement-based composites as repair/reinforcement materials used in ultra-low temperature environment // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2019. Т. 125. С. 105570.
2. Gomis J. и др. Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling // *Constr. Build. Mater.* 2015. Т. 75. С. 442–449.
3. Бочаров Г.С., Елецкий А.В., Книжник А.А. Нелинейное сопротивление полимерных нанокомпозитов с присадкой углеродных нанотрубок в условиях перколяции // *Журнал технической физики.* 2016. Т. 86, № 10. С. 64–68.

4. Томоровщенко О.Н. Получение и свойства цементных токопроводящих композитов с использованием углеродных материалов и механоактивированного песка: диссертация кандидата технических наук / Томаровщенко Оксана Николаевна 05.7.11. Белгород, 2017. С. 152.
5. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Томаровщенко О.Н. Влияние рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона с углеродной фазой // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 130–133.
6. Патент № 2750772 Российская Федерация, С2 С04В 40/02, 111/20, 103/32, 14/36, 28/00 Способ зимнего бетонирования строительных конструкций / Р.Х. Мухаметрахимов, А.Р. Галаутдинов, А.М. Гарафиев; опубл. 02.07.2021, Бюл. 19.
7. Гарафиев А.М., Мухаметрахимов Р.Х. Исследование перколяции электрического тока в среде модифицированных цементных композитов для энергосбережения в технологии электродного прогрева // Сборник материалов II Всероссийской научной конференции, посвященной столетнему юбилею МИСИ – МГСУ «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», г. Москва 18-19 ноября 2021. 2021. С. 109–112.
8. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чудакова О.А. Модифицирование мелкозернистого бетона микро- и наноразмерными частицами шунгита и диоксида титана // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 2. С. 66–70.
9. Шилин А.Д. и др. Исследование мелкозернистых бетонов, полученных с использованием механоактивированного шунгита // В сборнике: Материалы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. В 2-х томах. 2019. С. 326–328.
10. Рубаник В.В. и др. Влияние добавок шунгита на свойства мелкозернистых пластифицированных портландцементных бетонов // В сборнике: Перспективные материалы и технологии. Материалы международного симпозиума. В 2-х частях. 2017. С. 301–303.
11. Мухаметрахимов, Р.Х. Галаутдинов А.Р., Потапова Л.И., Гарафиев А.М. Исследование структурообразования модифицированного шунгитсодержащего цементного камня методом ИК-спектроскопии // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 58, № 4. С. 70–81.

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ ВЯЖУЩИХ НА УСЛОВИЯ ТВЕРДЕНИЯ

Р.А. Глазков<sup>1</sup>, аспирант

А.И. Коломыцева<sup>1</sup>, магистрант

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

**Аннотация.** В силу довольно длительной истории развития материалов щелочной активации, а также их перспективности применения в строительной отрасли, исследования ученых-материаловедов в этом направлении активно развиваются. В связи с этим сырьевая база для производства щелочеактивированных композитов неуклонно расширяется. С другой стороны, увеличение разнообразия потенциальных сырьевых компонентов и их комбинаций в составе систем щелочной активации приводит к необходимости обращения более тщательного внимания на каждой стадии технологического процесса, чтобы обеспечить получение конечного щелочеактивированного продукта с требуемыми эксплуатационными параметрами. В исследовании было изучено влияние типа щелочного активатора и гипсосодержащей модифицирующей добавки в составе вяжущего щелочной активации на основе доменного гранулированного шлака на условия его консолидации и формирования каркасной структуры.

**Ключевые слова:** доменный гранулированный шлак, щелочной активатор, цитрогипс, вяжущее, условия твердения

На сегодняшний день, в связи с основными трендами национальных программ в большинстве развитых стран, научная общественность, как отечественная [1–6], так и зарубежная [7] все большее внимание уделяет поиску и возможностям использования в составе строительных композитов более доступного с точки зрения стоимости и месторасположения альтернативного сырья, в то же время, с высокими эксплуатационными свойствами. Как правило, основной акцент делается на переработку и эффективное использование техногенных отходов и побочных продуктов промышленности для частичной или полной замены природных сырьевых компонентов, выступающих как в качестве основных (структурообразующих), так и второстепенных (модификаторов, добавок наполнителей и др.). Одним из перспективных направлений, способных в полной мере реализовать выше отмеченные задачи, является получение шлакощелочных вяжущих, входящих в большую группу материалов щелочной активации [8–10]. Анализ литературных данных показал, что для производства шлакощелочных вяжущих, как правило, используют разновидности металлургических шлаков [11, 12] в качестве твердофазного матричного компонента, а также довольно широкую линейку активирующих агентов, в перечень которых входят гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов (щелочи) [13] и их соли [14]. Однако, широкая и разнообразная сырьевая база с одной стороны является препятствием на пути к применению унифицированных принципов в технологии производства шлакощелочных материалов. Это связано с тем, что в зависимости от комбинации в матричной вяжущей системе «шлак – щелочной активатор» протекают разные процессы

структурообразования, что не допускает применения унифицированных подходов в производственном процессе, а требует индивидуального подбора технологических параметров в зависимости от компонентного состава и назначения конечного продукта.

Среди таких технологических параметров следует выделить термодинамические условия твердения сырьевой смеси.

В рамках этого исследования были изучены особенности процесса твердения шлакощелочного вяжущего в зависимости от компонентного состава: типа щелочного активатора, а также наличия гипсосодержащего компонента в виде добавки.

Для проведения исследований в качестве шлакового компонента был использован доменный гранулированный шлак (ДГШ) Липецкого НЛМК (Россия). В качестве щелочных активаторов использовали следующие реагенты:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . В качестве гипсосодержащей добавки применялся цитрогипс (ЦГ) – побочный продукт, образующийся при производстве лимонной кислоты.

Первым этапом работы было приготовление и формовка шлакощелочных вяжущих разного компонентного состава (Таблица 1).

В качестве экспериментальных образцов были заформованы кубики размером  $2 \times 2 \times 2$  см.

Таблица 1. Компонентный состав экспериментальных шлакощелочных вяжущих

№ состава	Компонентный состав, %					ЦГ
	ДГШ	Вода	Щелочной активатор			
			$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{NaOH}$	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	
1	82,2	17,8	-	-	-	-
2	78,1	17,8	-	-	-	4,1
3	77,8	16,9	5,3	-	-	-
4	78	19	-	4	-	-
5	79,6	17,2	-	-	3,2	-
6	73,9	16,9	5,3	-	-	3,9
7	72,9	19,3	-	4	-	3,8
8	75,6	17,2	-	-	3,1	4

Исходя из гипотезы о том, что шлакощелочные вяжущие относятся к системам гидратационного типа твердения, в качестве условий твердения были выбраны следующие: температура –  $25 \pm 3$  °С; относительная влажность  $\approx 95$  %. Таким образом, в рамках этого исследования твердение экспериментальных образцов шлакощелочных вяжущих осуществлялось в лабораторной камере нормального твердения.

Контроль за динамикой консолидации вяжущих паст осуществлялся в возрасте 3, 14 и 28 суток

Перед проведением испытаний на предел прочности при сжатии на каждом этапе (3, 14 и 28 суток), образцы также подвергались взвешиванию для определения изменения их массы в процессе их отверждения и, следовательно,



структурообразования. Все полученные данные и результаты эксперимента были систематически фиксированы с последующим занесением в таблицу для последующего анализа и интерпретации (таблица 2).

Таблица 2. Кинетика и характер изменения параметров шлакощелочных вяжущих во времени в зависимости от их компонентного состава

№ состава	Характеристики					
	Масса, г			Предел прочности при сжатии, МПа		
	3 сут	14 сут	28 сут	3 сут	14 сут	28 сут
1	–	15,1	14,7	0	5,3	7,33
2	–	14,7	14	0	7,1	8,1
3	–	16,1	16,7	0	19,6	20,9
4	17,7	18	18,6	19	33	38,7
5	14,4	14,7	14,7	8,6	12,2	19,5
6	–	12,9	12,6	0	0,3	0,3
7	17	17,7	17,9	14,2	27	21,9
8	–	11,9	11,7	0	0,2	0,3

Результаты полученных экспериментальных данных кинетики изменения массы и прочностных показателей образцов шлакощелочных вяжущих во времени в процессе твердения в течение 28 суток (таблица 2) показали, что для составов, где в качестве активатора использовались NaOH и Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (составы 4 и 5) имеет место тенденция к консолидации вяжущих систем на ранних сроках (3 суток) и дальнейшему росту прочности на протяжении всего периода твердения. В тоже время, активация шлака щелочным компонентом Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, (состав 3) как и с в случае использования в качестве активатора только водной среды (составы 1 и 2) демонстрирует значительно более слабую интенсивность консолидации, что подтверждается нулевой прочностью этих составов в возрасте 3 суток по сравнению с составами 4 и 5.

Сравнительный анализ составов шлакощелочных вяжущих без добавки цитрогипса и с его содержанием позволил выявить, что введение цитрогипса в вяжущую систему негативно отражается на ее твердении и дальнейшем росте прочностных показателей (составы 6–8). Вероятно, это может быть вызвано тем, что цитрогипс – это гипсосодержащий компонент, который относится к вяжущим воздушного твердения, поэтому повышенная влажность препятствует формированию его прочностного каркаса. В подтверждение этого предположения, а также полученных прочностных показателей на протяжении всего испытания осуществлялся визуальный анализ заформованных экспериментальных образцов-кубов, который позволил установить, что в возрасте 3 суток составы 1, 2, 6 и 8 имели вид свежееотформованных смесей, т.е. не набравших даже расформовочной прочности.

Однако, сопоставление результатов кинетики набора прочности для вяжущих систем, активированных только в водной среде (составы 1 и 2), показали, что, не смотря на слабую интенсивность твердения на начальных сроках, добавка цитрогипса способствует упрочнению каркаса на более поздних сроках твердения.

Анализ кинетики изменения массы образцов экспериментальных составов показали, что образцы с неактивными темпами консолидации и дальнейшим формированием низкопрочной структуры (составы 1, 2, 6, 8) демонстрируют постепенное снижение массы с увеличением времени твердения. В то же время, для составов, образцы которых, демонстрируют более высокие показатели прочности (составы 3, 4, 7), кинетика изменения массы во времени имеет противоположную тенденцию: растет с увеличением длительности твердения. В первом случае снижение массы образцов, вероятно, происходит из-за испарения свободной влаги, вводимой на стадии приготовления сырьевой смеси, но непрореагировавшей с компонентами вяжущей системы в процессе ее твердения.

Во втором случае, в процессе реакций фазо- и структурообразования все сырьевые компоненты участвуют в формировании каркаса. Кроме того, поскольку твердение образцов происходит в высоко влажной среде, вероятно, часть дополнительной влаги из окружающей среды также участвует в формировании продуктов новообразования, чем, предположительно можно объяснить некоторое увеличение массы образцов (составы 3, 4, 7).

Таким образом, на основании проведенного исследования было выявлено, что компонентный состав, а именно, тип щелочного активатора, а также наличие и особенности вводимой добавки, в значительной степени способен оказывать влияние на характер и кинетику протекания процессов консолидации и формирования прочностного каркаса шлакощелочной вяжущей системы.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

#### **Библиографический список:**

1. Эндерс, М. Контроль обжига клинкера в условиях применения альтернативных топливных и сырьевых материалов / М. Эндерс // Цемент и его применение. 2018. № 3. С. 70–75.
2. Алфимова, Н. И. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н. И. Алфимова, С. Ю. Пириева, М. Ю. Елистраткин [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 8-23. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23.
3. Kozhukhova, N. I. On the Question of the Choice of Natural and Man-Made Materials for Geo-Polymer Binders / N. I. Kozhukhova, I. V. Zhernovski, M. S. Osadchaya [et al.] // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 12. P. 1034–1039. DOI 10.3923/rjasci.2014.1034.1039.
4. Alfimova, N. I. Research on the possibility of using volcanic sand of kamchatka as a component of a composite binder / N. I. Alfimova, I. M. Shurakov, M. S. Ageeva, N. I. Kozhukhova // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. P. 113–117. DOI 10.1007/978-3-030-54652-6\_17.
5. Романовский, С. А. Опыт применения теплоизоляционных плит на основе волокон растительного происхождения / С. А. Романовский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 31–43. DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-1-31-43.

6. Sobolev, K. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations / K. Sobolev, P. Turker, S. Soboleva, G. Iscioglu // *Waste Management*. 2007. Vol. 27 (7). Pp. 971–976.
7. Рахимова, Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов / Н.Р. Рахимова // *Строительные материалы*. 2008. № 9. С.77–80.
8. Саламанова, М. Ш. Высокопрочные бетоны с использованием фракционированных заполнителей из отходов переработки горных пород / М. Ш. Саламанова, С. А. Ю. Муртазаев // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2015. Т. 7, № 1. С. 23-28.
9. Кожухова, Н. И. Особенности повышения качества сырья для вяжущих щелочной активации / Н. И. Кожухова, И. Ю. Шураков, Н. И. Алфимова, М. И. Кожухова // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*. 2021. С. 2058–2064.
10. Bellmann, F. Activation of blast furnace slag by a new method / F. Bellmann, J. Stark // *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39. Pp. 644–650.
11. Саламанова, М. Ш. Цементы щелочной активации: возможность снижения энергоемкости получения строительных композитов / М. Ш. Саламанова, С. А. Ю. Муртазаев // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 32-40.
12. Kozhukhova, N. Reasonability of Application of Slags from Metallurgy Industry in Road Construction / N. Kozhukhova, N. Kadyshev, A. Cherevatova [et al.] // *Conference proceedings. Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 692. 2018. P. 776–782. DOI 10.1007/978-3-319-70987-1\_82.
13. Collins, F. Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / F. Collins, J.G. Sanjayan // *Cement and Concrete Research*. 1998. Vol. 28. Pp. 655–664.
14. Bernal, S. A., Alkali-activated slag cements produced with a blended sodium carbonate/sodium silicate activator / S. A. Bernal, R. S. Nicolas, J.S.–J.V. Deventer, J. L. Provis // *Advanced Cement Research*. 2016. Vol. 28. Pp. 262–273.

## ГАЗОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО ВЯЖУЩЕГО

**А.Ф Гордина**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**И.С.Полянских**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**В.М. Украинцева**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашиникова»*

**Аннотация.** Применение безобжиговых материалов из отходов производств и расширение номенклатуры изделий на их основе способствует улучшению экологического состояния среды в местах скопления отходов и одновременно с этим обеспечивает снижение стоимости единицы продукции, выпускаемой на основе техногенных материалов. В работе рассматривается возможность создания газобетона из техногенного вяжущего (фторангидрита) с добавлением активатора твердения (фосфата натрия), физико-механические характеристики которого будут сопоставимы с современными материалами. Предложен состав газобетона на основе фторангидрита, включающий 1% алюминиевой пудры и 3% фосфата натрия, характеризующийся следующими параметрами: коэффициент теплопроводности равен 0,15 Вт/(м·К), средняя плотность до 1200 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности на сжатие в возрасте 28 дней составляет 3 МПа.

**Ключевые слова:** фторангидрит, газобетон, техногенные отходы, механическая прочность.

Одним из трендов в области строительства объектов различного функционального назначения является улучшение энергоэффективности сооружений [1]. Возможным путем снижения затрат на поддержание требуемой нормативной температуры внутри помещений является применение современных конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов, отличающихся малой теплопроводностью. Дополнительным параметром, который необходимо учитывать при выборе подобных материалов, является объем затрат на производство. Применение материалов на основе техногенного сырья реализует данный параметр. В частности, перспективными представляются безобжиговые материалы, являющиеся отходами производства [2, 3]. Применение подобных материалов и расширение номенклатуры изделий на их основе способствует улучшению экологического состояния среды в местах скопления отходов и одновременно с этим обеспечивает значительное снижение стоимости единицы продукции, выпускаемой на основе дисперсных отходов.

В данной работе рассматривается возможность создания газобетона из техногенного вяжущего, физико-механические характеристики которого будут сопоставимы с современными материалами.

В работе в качестве вяжущего применялся фторангидрит – техногенный материал, производства ООО «Химический завод фторсолей», г. Пермь. Фторангидрит – однородный материал, отличающийся постоянством химического состава. Размер частиц сырья варьируется от 1 до 20 мм, для проведения исследований осуществлялся домол вяжущего, до тонкости помола

– не более 13% остаток на сите 0,4 мм. Компонентный состав представлен:  $\text{CaSO}_4(\gamma - \text{CaSO}_4 = 20\%; \beta - \text{CaSO}_4 = 78\%)$ ;  $\text{CaF}_2 = 1,8\%$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 1,2\%$ .

В качестве газообразующей добавки использовалась алюминиевая суспензия, состоящая из алюминиевой пудры и сульфанола, распределенные в воде. Концентрация алюминиевой пудры была выбрана на основе ранее проведенных исследований [4] и вводилась в количестве 0,5 и 1%.

Для активации процесса гидратации и набора прочности техногенного вяжущего использовался водный раствор фосфата натрия. Концентрация раствора варьировалась от 1 до 3%, с шагом 1%.

Для определения физико-механических свойств составов изготавливались образцы в виде балочек размерами 40×40×160 мм и кубов размерами 100×100×100 мм. Распалубка образцов осуществлялась через 24 часа с момента их заливки в формы, после хранились в помещении при  $T = 20^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха 60-75%. Испытания на прочность проводились через 28 дней на лабораторном прессе ПГМ – 100МГ4, со скоростью нагружения 1 МПа/с. Для определения теплофизических параметров изготавливались образцы размерами 100×100 мм и толщиной 20 мм. Правильность геометрической формы и замеры размеров образцов проводили в соответствии с ГОСТ 17177. Образцы взвешивали и высушивали до постоянной массы, по окончании сушки определяли массу и рассчитывали плотность, после чего образцы помещали в прибор для определения теплопроводности, измеритель ИТП-МГ4 «100». Прибор позволяет определять характеристики при средней температуре образца от  $+15^\circ$  до  $+42,5^\circ\text{C}$ .

Исследования физико-механических свойств газобетона при варьировании компонентов – содержание алюминиевой пудры и фосфата натрия приведены на рисунках 1-3.

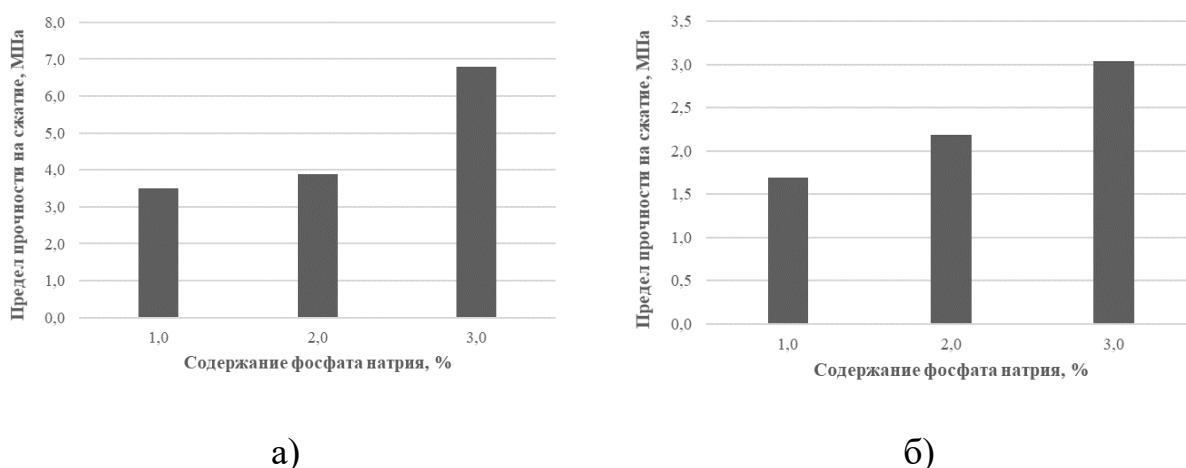


Рисунок 1. Зависимость предела прочности на сжатие образцов-кубов газобетона на фторангидритовом вяжущем при различном содержании алюминиевой пудры: а) 0,5%, б) 1%

Анализируя полученные результаты (рисунок 1 а, б) можно сделать вывод об эффективности влияния активатора твердения в виде фосфата натрия на прочностные характеристики газобетона, так повышение содержания активатора

от 1 % до 3% обеспечивает прирост прочности до 40 %, при этом прирост сохраняется и при увеличении количества вводимого газообразователя.

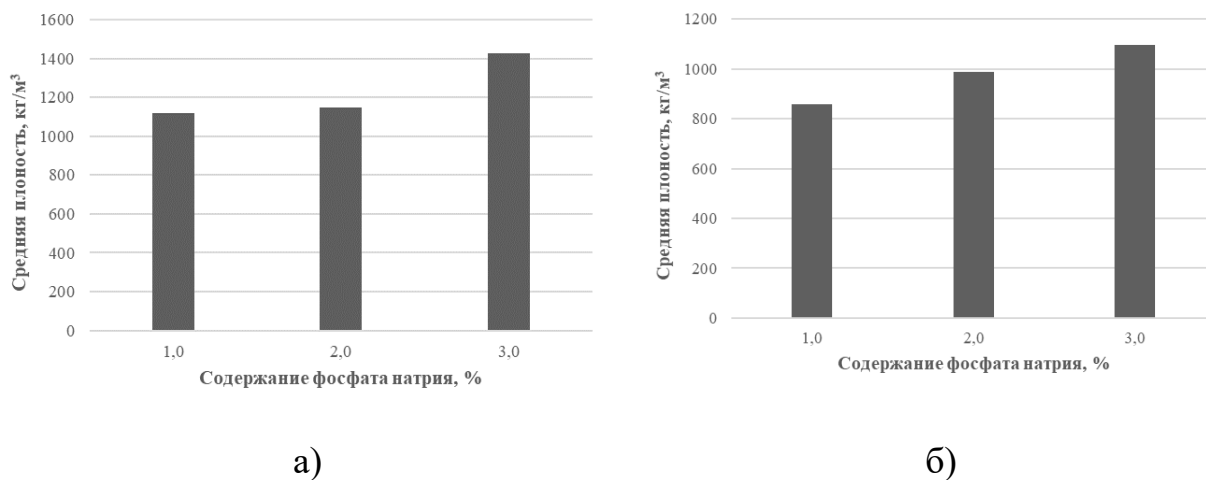


Рисунок 2. Зависимость средней плотности образцов газобетона на фторангидритовом вяжущем при различном содержании алюминиевой пудры: а) 0,5%, б) 1%

Полученные прочностные характеристики коррелируют с параметрами образцов по плотности (рисунок 2 а, б), рост прочности газобетона сопровождается с постепенным ростом плотности образцов.

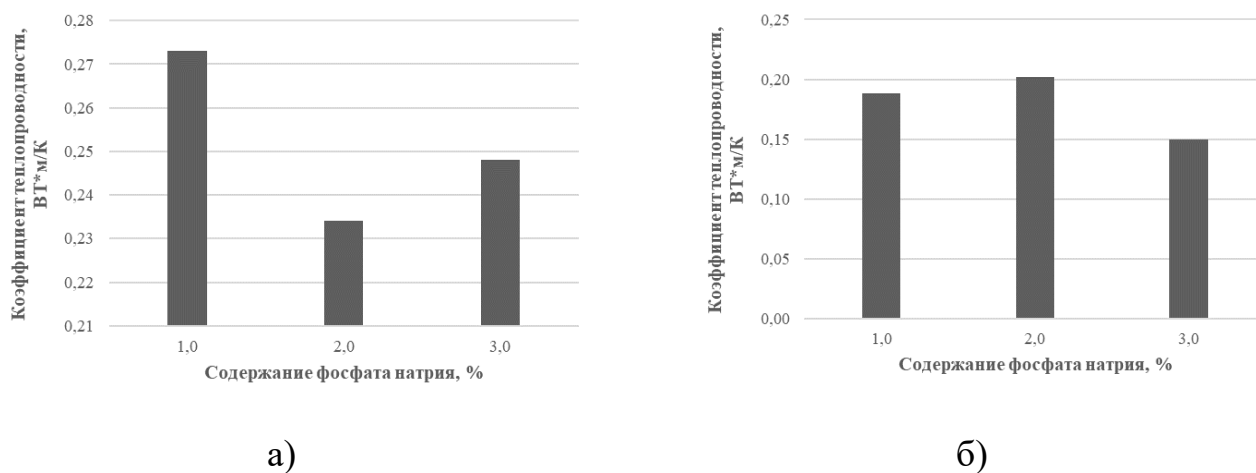


Рисунок 3. Зависимость коэффициента теплопроводности газобетона на фторангидритовом вяжущем при различном содержании алюминиевой пудры: а) 0,5%, б) 1%

Проанализировав приведенные данные, включая полученный коэффициент теплопроводности (рисунок 3 а, б) можно сделать вывод, что увеличение концентрации алюминиевой пудры до 1% и фосфата натрия до 3% позволяет значительно снизить коэффициент теплопроводности до 0,15-0,2 Вт·м/К и среднюю плотность до 1100 кг/м³, при этом предел прочности на сжатие в возрасте 28 дней составляет 3 МПа. При содержании алюминиевой пудры 0,5%

формируется плотная структура, недостаточно насыщенная порами и пустотами, что приводит к повышению средней плотности и механической прочности.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность применения техногенного отхода производства в виде фторангидрита в качестве вяжущего при изготовлении строительных материалов различного назначения, включая изделия с регулируемыми теплофизическими параметрами. Применение рационально подобранных активаторов твердения и газообразователей способствует получению материала с удовлетворительными характеристиками, при дальнейшей доработке и рационализации составов возможно получение энергоэффективных теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных материалов на основе безобжигового техногенного вяжущего.

#### **Библиографический список:**

1. Сапронова О.М., Бирюкова Т.П. Повышение энергоэффективности зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. №4.
2. Аль-азаб Табет Салем, Лесовик Валерий Станиславович, Володченко Анатолий Николаевич Повышение эффективности безобжиговых строительных материалов на основе глинистых пород Йемена // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2009. №2.
3. Водостойкие стеновые материалы с использованием ангидритовых вяжущих / Л. А. Аниканова, А. И. Курмангалиева, А. Т. Пискарева, В. С. Казанцева // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : Материалы VI Международной научно-практической конференции: в 2-х частях, Томск, 01–03 марта 2016 года. Том Часть 1. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. – С. 374-378. – EDN WATRDN.
4. Конструкционно-теплоизоляционный материал на основе фторангидрита/ Г. И. Яковлев, И. С. Полянских, М. А. Кисляков, Д. А. Гырдымов // Фотинские чтения - 2021 (весеннее собрание) : Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Ижевск, 25–27 марта 2021 года. – Ижевск: Издательство УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 193-198. – EDN WRLHNQ.

## ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВП

Горохов Сергей Иванович<sup>1</sup>

Назарчук Андрей Павлович<sup>1</sup>

Ковалев Никита Святославович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Тамбовский государственный технический университет*

**Аннотация.** Изучение влияния повышенных температур на структуру и физико-механические характеристики ДВП позволяет оценить поведение материала в неблагоприятных условиях эксплуатации. В данном исследовании оценивались такие показатели, как прочность и твердость по Бринеллю. Для моделирования теплового воздействия образцы помещались в сушильный шкаф. Для оценки прочности образцов определялась максимальная разрушающая нагрузка при поперечном изгибе. Для определения твердости по Бринеллю использовался метод невосстановленного отпечатка. Закономерности изменения физико-механических параметров подтверждены изучением микроструктуры материала.

**Ключевые слова:** Древесноволокнистая плита, метод невосстановленного отпечатка, прочность, твердость, тепловое старение.

Древесноволокнистая плита представляет собой универсальное долговечное изделие, получаемое из остатков древесных волокон, соединяемых друг с другом с помощью синтетической смолы под воздействием повышенной температуры и давления. Одним из основных преимуществ ДВП является его универсальность. В зависимости от толщины его область применения может быть самой различной – от мебельной продукции до элементов кровли и стен. Кроме того, древесноволокнистую плиту можно резать, сверлить и придавать ей любую форму с помощью стандартных деревообрабатывающих инструментов, что упрощает работу с изделиями из него [1].

Одним из основных недостатков ДВП является его восприимчивость к влаге. При отсутствии защиты древесноволокнистая плита может деформироваться, разбухать или даже разрушаться под воздействием воды или высокой влажности. Кроме того, при воздействии на материал неблагоприятных климатических воздействий, таких как воздействие высоких температур возможно снижение физических характеристик [2, 3].

Для определения влияния продолжительности теплового воздействия на физическо-механические показатели ДВП, такие как прочность и твердость было проведено настоящее исследование. Процессы теплового старения моделировались в сушильном шкафу (рисунок 1) при температуре 80 °С. Для этого партию образцов длиной 115...135 мм, толщиной около 3,3 мм и шириной около 30 мм выдерживали в сушильном шкафу в течении определённого промежутка времени, после чего доставались и охлаждались до комнатной температуры. Каждая последующая партия из шести образцов подвергалась тепловому воздействию на 50 часов дольше. В итоге было испытано 6 партий



образцов с продолжительностью 50, 100, 150, 200, 250 и 300 часов соответственно [4...6].



Рисунок 1. Сушильный шкаф

После охлаждения до комнатной температуры образцы подвергались испытаниям на прочность и на твердость по Бринеллю.

Для испытания на прочность образцов при поперечном изгибе использовался шестипозиционный стенд (рисунок 2). Схема нагружения образцов – балка на шарнирных опорах со сосредоточенной нагрузкой по середине.

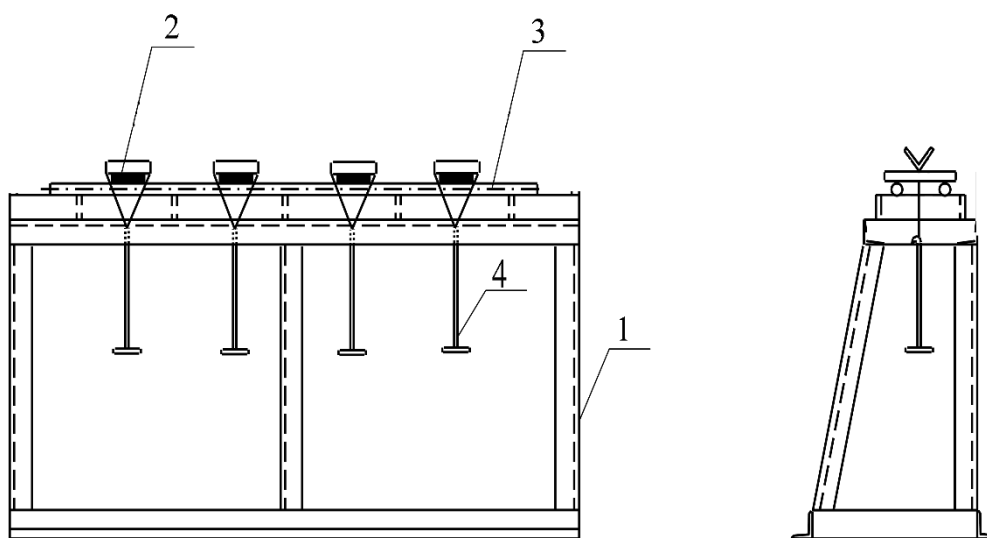


Рисунок 2. Стенд для испытаний на поперечный изгиб

Разрушающее напряжение определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{1,5P \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, кг;  
 $l$  – расчетный пролет, равный 10 см;  
 $b$  – ширина поперечного сечения образца;  
 $h$  – длина поперечного сечения образца.

Результаты влияния продолжительности теплового старения на прочность ДВП представлены на графике (рисунок 3).

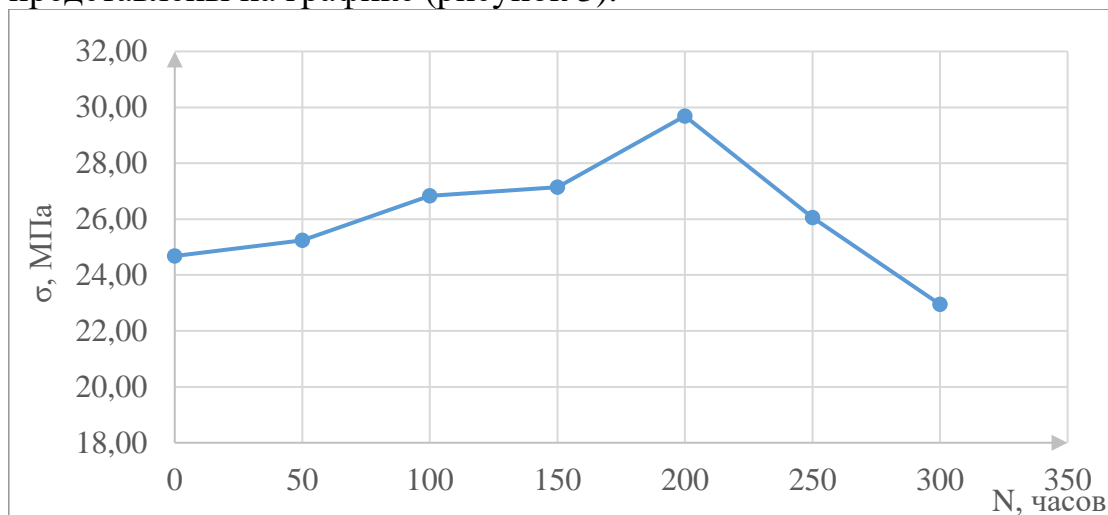


Рисунок 3. Зависимость изменения прочности ДВП от продолжительности теплового воздействия

Как видно из графика (рисунок 3), в первые 200 часов после воздействия повышенных температур на образцы увеличивается прочность материала. Далее, прочность начинает падать, и уже при воздействии более 280 часов ее значение становится ниже первоначального. Такое изменение прочности материала можно описать внутренними процессами, связанными со скоростью протекания процессов полимеризации синтетической смолы в составе ДВП и деструкции древесных волокон. В первые 200 часов преобладают процессы, связанные с отверждением смолы. Однако, далее интенсивность процессов затвердевания смолы снижается и они уже не могут компенсировать разрывы внутренних связей, вызванных разрушением древесных волокон [7, 8].

Твердость по Бринеллю по методу невосстановленного отпечатка определяется по формуле:

$$HBW = \frac{0,102 \cdot F}{\pi Dh} \quad (2)$$

Где  $F$  – приложенная нагрузка, Н;  
 $D$  – диаметр шарика, равный 9,6 мм;  
 $h$  – глубина внедрения индикатора, мм.

За конечный результат твердости принимается среднее арифметическое значение шести образцов.

Результаты определения твердости по Бринеллю представлены на графике в координатах  $t(ч) - HBW$  (МПа) (рисунок 4).

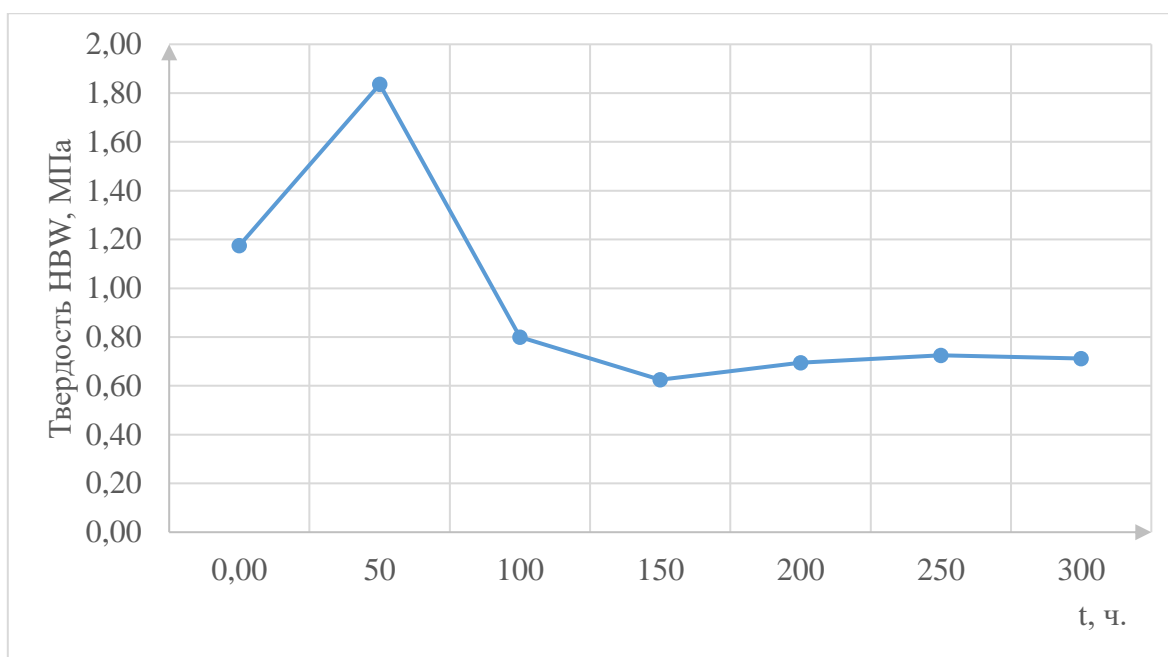
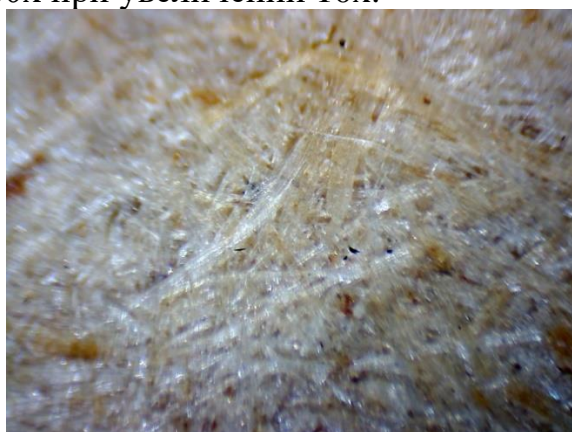


Рисунок 4. Зависимость твердости по Бринеллю от продолжительности теплового воздействия

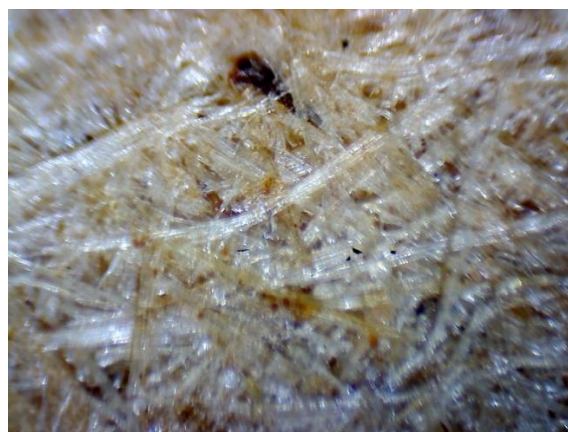
Из графика (рисунок 5) видно, что изменение твердости от продолжительности теплового воздействия в первые 150 часов уменьшается, а далее стабилизируется.

Однако, из зависимости выбивается величина твердости при продолжительности воздействия повышенных температур в течении 50 ч. Данная закономерность описывается теми же процессами, что приводились ранее – процесс дополимеризации смолы в составе ДВП в первые часы воздействия увеличивает сопротивляемость материала внешним воздействиям до тех пор, пока интенсивность деструкции древесных волокон не начнет превалировать [9].

Проследить данную закономерность можно путем изучения микроструктуры материала под микроскопом. На рисунке 5 представлены изображения ДВП, сделанные с помощью микроскопа Микромед Эврика 40х-1280х при увеличении 10х.



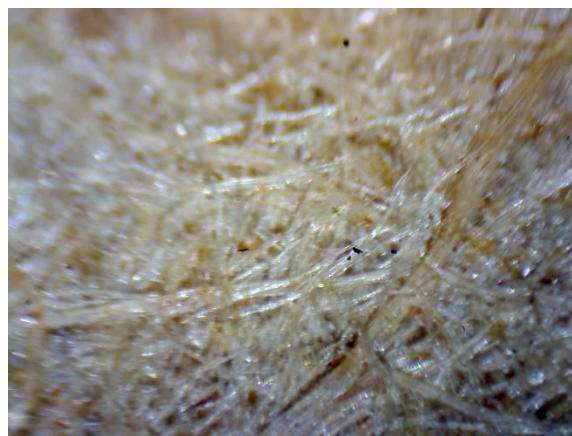
а)



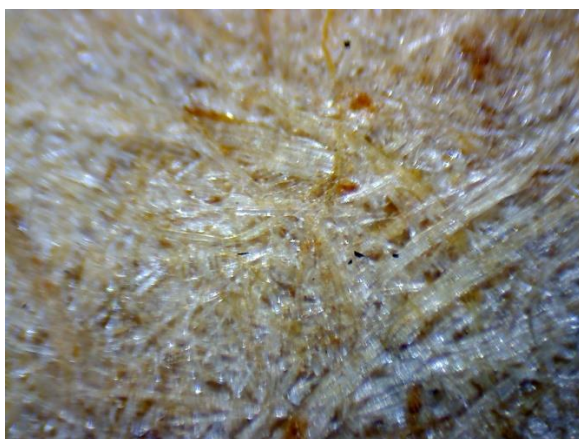
б)



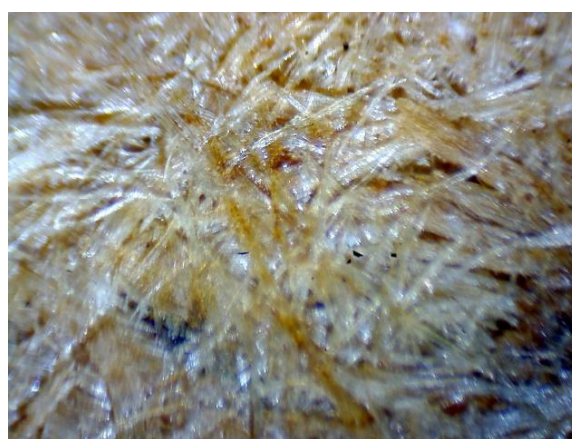
в)



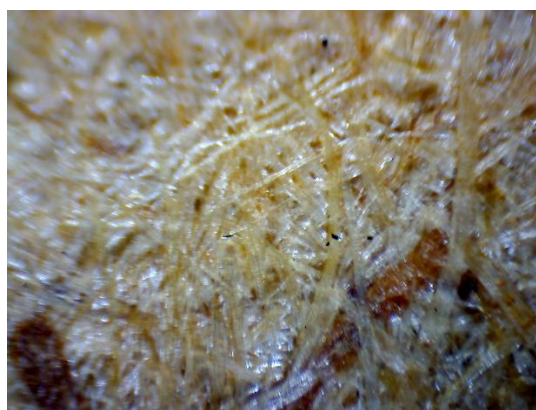
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 5. Микроструктура материала после теплового воздействия (а – без воздействия; б – 50 часов; в – 100 часов; г – 150 часов; д – 200 часов; е – 250 часов; ж – 300 часов)

Как видно на рисунке 4, с увеличением продолжительности теплового воздействия увеличиваются расстояния между волокнами материала в связи с их усушкой. В связи с этим повышается неоднородность распределения волокон, а, следовательно, увеличивается количество структурных дефектов и материал теряет свою прочность. Процессы упрочнения материала ввиду полимеризации

смолы невозможно разглядеть на изображениях, так как данный процесс протекает на межмолекулярном уровне.

Таким образом, было установлено, что при длительном тепловом воздействии на ДВП в структуре материала протекают два противоположных процесса. Первый процесс связан с затвердеванием смолы в составе ДВП, а второй процесс вызывает разрушения древесных волокон. Также установлено, что воздействие температуры 80° С продолжительностью до 50 часов увеличивает прочность и твердость материала. Далее твердость материала начинает снижаться, а прочность продолжает расти до продолжительности воздействия в 200 ч, после чего также начинает снижаться.

#### **Библиографический список:**

1. Киселева О.А. Прогнозирование работоспособности древесноволокнистых и древесностружечных композитов в строительных изделиях / Киселева О.А. // Дис... к-та техн. наук: 05.23.05. – Воронеж, 2003. – 205 с.
2. Ерофеев, А. В. Влияние атмосферных воздействий на твердость декоративных плит / А. В. Ерофеев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 1-2(46). – С. 14-17.
3. Бекетов, В. Д. Повышение эффективности производства древесноволокнистых плит / В. Д. Бекетов. — М.: Лесная промышленность, 1988. — 160 с.
4. Мамонтов, С. А. Анализ термического старения древесноволокнистых плит / С. А. Мамонтов // Состояние современной строительной науки: сб. науч. трудов X Междунар. науч.-практ. интернет-конф. — Украина, Полтава: Полтавский ЦНИИ, 2012.— С. 53—57.
5. Ерофеев, А. В. Влияние атмосферных воздействий на эксплуатационные свойства декоративной плиты / А. В. Ерофеев, В. П. Ярцев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 181-185. Ерофеев, А. В. Эксплуатационные характеристики декоративно-защитных плит покрытия зданий и сооружений / А. В. Ерофеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2011. – № 3. – С. 112-113.
6. Ерофеев, А. В. Влияние агрессивных сред на прочность декоративных плит / А. В. Ерофеев, В. П. Ярцев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – № 2(40). – С. 34-38.
7. Ерофеев, А. В. Влияние циклов замораживания-оттаивания на физико-механические характеристики декоративно-защитных плит покрытия на основе древесно-волоконистых плит / А. В. Ерофеев // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: Сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов / Тамбовский государственный технический университет. Том Выпуск II. – Тамбов: Издательство ГОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – С. 227-230.
8. Мамонтов, С. А. Тепловое и световое старение древесно-стружечных плит в контексте термофлуктуационного подхода к прогнозированию долговечности / С. А. Мамонтов, А. А. Мамонтов, О. А. Киселева // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 1(1037). – С. 62-64.
9. Ерофеев, А. В. Влияние атмосферных воздействий на прочность декоративных плит / А. В. Ерофеев, В. П. Ярцев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 1(50). – С. 114-118.

## РАЗРАБОТКА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Е.В. Доржиева**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Н.И. Шестаков**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент

**О.Ж. Аюрова**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент

**А.Б. Цыденова**<sup>1</sup>, инженер

<sup>1</sup>*ВосточноСибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ;*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

<sup>3</sup>*Бурятский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (БНЦ СО РАН), г. Улан-Удэ*

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность получения биоразлагаемых композиционных материалов на основе древесных отходов и полилактида. Приведены составы композиционных материалов. Изучены основные физико-механические свойства полученных композитов.

**Ключевые слова:** полилактид, древесные отходы, композиционный материал биоразлагаемость, физико-механические свойства

Из композиционных материалов на основе древесины в настоящее время важнейшее место занимает производство фанеры, древесно-стружечных плит, ориентированно-стружечных плит (ОСП). Основными связующими в этих композиционных материалах служат фенолформальдегидные, карбамидо-меламино-формальдегидные, которые относятся к токсичным материалам. И фенол, и формальдегид ядовиты и огнеопасны. Формальдегид обладает канцерогенным, а также угнетающим воздействием на нервную систему. Большой проблемой является сложность утилизации или повторного использования изделий на основе фенолформальдегида. В обществе постоянно нарастает беспокойство по вопросам защиты окружающей среды и здоровья человека. Осознание той реальной цены, которую человечество должно платить за сохранение среды своего обитания, так или иначе, приведет к введению серьезных ограничений на использование неразрушающихся изделий массового спроса и переходу к пусть более дорогим, но более экологичным материалам. Кроме того, на этом фоне многие стремятся ограничивать свою зависимость от нефтехимического сырья, снижать объем выбросов в окружающую среду углеродсодержащих соединений.

Авторами работ предлагается альтернативный композиционный материал на основе древесины с заменой связующего на экологический чистый, полностью биоразлагаемый полимер – полилактид (ПЛА). Полилактид – это биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства

служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), популярен в 3D печати как самый простой в использовании материал, а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов. Вопросам разработки композиционных материалов на основе биоразлагаемых полимеров для получения 3D-нитей для метода послойного наплавления посвящены работы многих российских ученых [1-4] Авторами работы рассматривается возможность получения композиционного материала на основе древесных отходов и полилактида с гарантированными физико-механическими свойствами для применения в области отделочных строительных материалов. Предполагается, что композиционный материал полученный на основе полилактида и отходов деревоперерабатывающих производств позволит решить не только глобальную проблему утилизации многотоннажных отходов деревоперерабатывающих производств Республики Бурятия, но и позволит решить серьезную экологическую проблему актуальную для сохранения самого чистого озера планеты - Байкал. Получение и повсеместное внедрение экологически чистых строительных материалов при отделочных работах малоэтажного строительства в Республики Бурятия позволит улучшить экосистему о. Байкал. Композиционные строительные на основе древесины также как и большинство строительных материалов, очень трудно поддаются вторичной переработке, и проблема их утилизации в Республике Бурятии непосредственно представляют научный интерес и практическую значимость.

Исходным сырьем для получения композиционного материала на основе ПЛА и отходов деревоперерабатывающих производств являлась древесная стружка и синтетический полилактид марки 4043D производства NatureWorks. Древесная стружка породы сосна, фракцией 15-25 мм влажностью 1-2 % представляет собой отход деревоперерабатывающего производства.

Предварительно были изучены свойства применяемого полилактида его растворимость в воде, устойчивость к воздействию ультрафиолетовых лучей, макро- и микроструктура полилактида.

Методом горячего прессования были получены серия экспериментальных образцов композиционных материалов.



Рисунок 2. Экспериментальные образцы композита на основе ПЛА и древесных отходов

Составы композиционных материалов и их основные физико-механические свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1. Составы композиционных материалов

№ состава	Древесный наполнитель, %	ПЛА, %	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочность при статическом изгибе, МПа
1	35	65	820	50	40
2	30	75	850	55	45
3	20	80	865	55	45

Исследование на прочность при изгибе проводилось согласно ГОСТ 4648-2014 на универсальной разрывной машине JLTTC LDS-5L. Испытуемый образец подвергался изгибу с постоянной скоростью, равной 2 мм/мин, в середине между опорами до разрушения.

Таким образом, композиционные материалы, полученные на основе полилактида и древесного наполнителя в виде древесной стружки позволяют получить материалы со следующими свойствами: плотностью 820-865 кг/м<sup>3</sup>, пределом прочности при сжатии 50-55 МПа, при изгибе 40-45 МПа, что показывает возможность полученных композиционных материалов использовать в качестве строительных материалов.

#### Библиографический список:

1. Галяветдинов Н.Р., Талипова Г.А., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Разработка древесно-наполненного композитного состава для 3D принтеров // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2019. – № 1. – С. 33– 39.
2. Сабирова Г.А., Сафин Р.Р., Хайруллин Р.З. Влияние концентрации наполнителя на физико механические свойства древесно-наполненных композиционных материалов // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 3 (15). – С. 24– 34.
3. Выдрина, Т.С. Исследование возможности получения биоразлагаемых древесно-полимерных материалов / Т.С. Выдрина, А.В. Артемов, А.Е. Шкуро [и др.] // *Вестник Технологического университета*. – 2019. – Т. 22. – № 12. – С. 15-18.
4. Вильданов, Ф.Ш. Биоразлагаемые полимеры – современное состояние и перспективы использования / Ф.Ш. Вильданов, Ф.Н. Латыпов, П.А. Красуцкий [и др.] // *Башкирский химический журнал*. – 2012. – Т. 19. – № 1. – С. 135-139.



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПОВЫШЕННОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ

С.Д. Епихин<sup>1</sup>

А.С. Иноземцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** Тенденция современной строительной индустрии направлена на поиск новых технологий в области строительного материаловедения. Перед строителями-технологами стоит задача по разработке новых технологических подходов к производству и подбору компонентов для материалов, отвечающих повышенным требованиям эксплуатационным характеристикам. К таким материалам можно отнести самоуплотняющийся легкий бетон, важным показателем качества которого являются технологические свойства. В работе исследованы технологические свойства легкого бетона на полых керамических микросферах с объемным содержанием 0,46. С использованием метода математического планирования эксперимента (полная двухфакторная модель) выполнены поисковые исследования для установления возможности получения легких бетонов средней плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> с повышенной подвижностью. Продемонстрировано влияния В/Ц и концентрации пластификатора на технологические свойства исследуемых составов бетонной смеси. Получены уравнения регрессии, определяющие влияние варьируемых факторов на подвижность смеси. Показана возможность достижения положительных технологических показателей для получения самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах.

**Ключевые слова:** легкие самоуплотняющиеся бетоны, полые микросферы, подвижность смеси, математическая модель, водоцементное отношение, концентрация пластификатора

## Введение

Тенденция современной строительной индустрии направлена на поиск новых и модернизацию уже изученных технологий в сфере строительного материаловедения. На сегодняшний день активно применяется монолитная технология строительства, поэтому важнейшим материалом является бетон. Изучение и разработка новых технологических подходов к производству и подбору компонентов для получения материала с повышенными требованиями к эксплуатационным характеристикам является актуальной задачей для строителей-технологов [1]. С конца прошлого века заслуженное внимание уделяется изучению самоуплотняющихся бетонов (далее СУБ) [2-6]. Это связано с его способностью самостоятельно заполнять пространство внутри опалубки без принудительного уплотнения при сохранении однородности. В настоящее время опыт получения СУБ весьма обширен [7-9]. Однако возможность получения самоуплотняющихся бетонов на легких заполнителях сталкивается с закономерными трудностями и при снижении средней плотности становится сложно реализуемой [9-11]. Цель получения самоуплотняющихся легких бетонов заключается в объединении положительных качеств материалов на легких заполнителях и технологических преимуществ высокоподвижных смесей тяжелых бетонов.

Важным показателем качества для бетонных смесей являются технологические свойства, определяющие особенности ее использования в производстве бетона. В работах [12-14] показано, что естественным ограничением для получения самоуплотняющихся легких бетонных смесей является наличие легкой фракции заполнителя (полых микросфер), который при достижении критического разжижения дисперсионной среды стремится к всплытию. Это вызывает расслоение бетонной смеси и снижает его технические характеристики. Исследование подвижности легких бетонных смесей на полых микросферах позволит установить возможность получения самоуплотняющихся легких бетонов.

#### Материалы и методы

Для определения возможности получения цементных дисперсных систем на легких заполнителях с повышенной текучестью объектом исследований были выбраны легкие бетоны на полых микросферах [1]. В состав бетонной смеси входят следующие компоненты [1]: портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 (Ц), соответствующий ГОСТ 10178—85, керамические микросферы ForeSphere (М<sub>с</sub>), микрокремнезем МК-85 (МКМ), фракционный песок фр. 0,16-0,63 мм (П<sub>ф</sub>), кварцевая мука (П<sub>м</sub>), гиперпластификатор Melflux 2651F (П<sub>л</sub>) и вода (В). Соотношение сухих компонентов было постоянным и соответствовало проектной средней плотности бетона 1400 кг/м<sup>3</sup>.

Для оценки технологических свойств легкого бетона было принято 2 варьируемых взаимозависящих фактора  $X_1$  – количество воды (В/Ц),  $X_2$  – концентрация пластификатора (С<sub>д</sub>, % от массы цемента), основные уровни которых были выбраны 0,5 и 1,4, а интервалы варьирования 0,1 и 0,4 соответственно.

Исследуемыми параметрами выбран критерий подвижности, оцениваемый диаметром расплыва усеченного конуса размерами  $D \times d \times h$  — 101,6×69,9×50,8 мм на встряхивающем столике по ASTM C230 согласно п. 1.3 ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Методика определения подвижности бетонной смеси на встряхивающем столике представлена на рисунке 1. При этом оценивался диаметр расплыва до и после встряхивания.

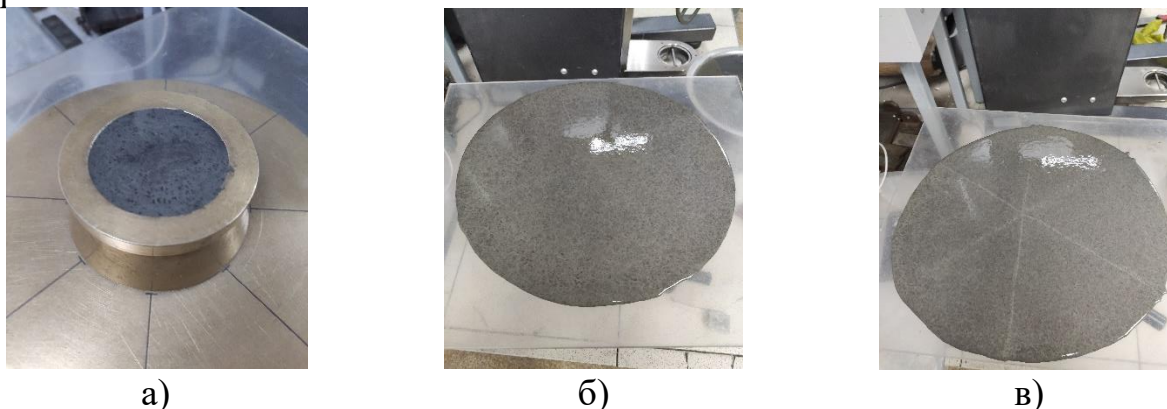


Рисунок 1. Методика определения подвижности бетонной смеси на встряхивающем столике: а) заполнение конуса бетонной смесью; б) расплыв

бетонной смеси после снятия конуса (до встряхивания); в) расплыв бетонной смеси после встряхивания

### Результаты исследования

В результате проведенных исследований получены зависимости реологических показателей от варьируемых факторов. Методом математического планирования эксперимента (полная двухфакторная модель) выполнены поисковые исследования с целью установления возможности получения легких бетонов на полых микросферах с повышенной подвижностью. Получены уравнения регрессии:

$$Y_1 = 303,7 + 71,1 \cdot X_1 + 20,3 \cdot X_2 - 15,6 \cdot X_1 X_2 - 40,9 \cdot X_1^2 - 10,9 \cdot X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 308,7 + 63,9 \cdot X_1 + 17,7 \cdot X_2 - 12,5 \cdot X_1 X_2 - 31,1 \cdot X_1^2 - 7,75 \cdot X_2^2 \quad (2)$$

где  $Y_1$  – диаметр самопроизвольного расплыва бетонной смеси ( $D_{p,1}$ ), мм;  $Y_2$  – диаметр расплыва бетонной смеси после встряхивания ( $D_{p,2}$ ), мм.

Установлено, что коэффициенты установленных моделей для диаметра расплыва бетонной смеси при самопроизвольном и принудительном растекании имеют близкие значения. Значения коэффициента  $B_0$  показывают, что бетонная смесь при величине варьируемых факторов, соответствующих основным уровням ( $B/C = 0,5$  и  $C_d = 1,4$  %), имеет одинаковый диаметр расплыва  $D_{p,1} \approx D_{p,2}$ , отличающийся в пределах 2%. Каждый из коэффициентов модели  $Y_1$  или  $D_{p,1}$  имеет большее значение (по модулю), чем у модели  $Y_2$  или  $D_{p,2}$ . При этом экстремумы наблюдается при  $X_1 \in [0,75; 1,00]$  и  $X_2 \in [0,0; 0,5]$  для  $D_{p,1}$  и  $D_{p,2}$  (Рисунок 2).

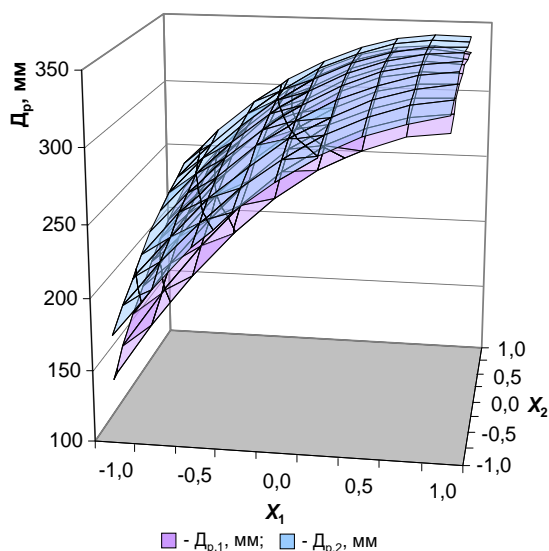


Рисунок 2. График зависимости диаметра расплыва бетонной смеси от переменных факторов В/Ц ( $X_1$ ) и концентрации пластификатора ( $X_2$ )

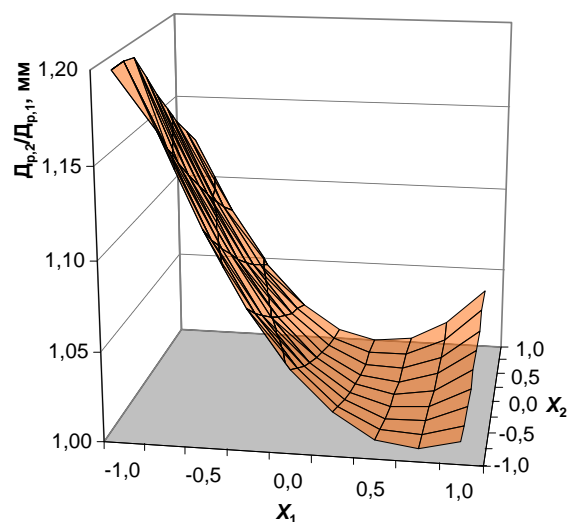


Рисунок 3. График зависимости отношения  $D_{p,2}/D_{p,1}$  от переменных факторов В/Ц ( $X_1$ ) и концентрации пластификатора ( $X_2$ )

Дополнительным показателем, позволяющем судить о способности бетонной смеси на полых микросферах растекаться самостоятельно настолько,

сколько это возможно при внешнем воздействии (встряхивании), является отношение  $D_{p,2}/D_{p,1} \rightarrow 1,0$  (Рисунок 3). При этом эффективным самоуплотнением стоит считать значение этого критерия стремящееся к 1,0 в пределах допустимой погрешности.

На рисунке 3 видно, что в исследуемых диапазонах в бетонных смесях на полых микросферах внешнее воздействие приводит к незначительному разжижению после самостоятельного растекания ( $D_{p,2}/D_{p,1} < 1,20$ ). Это свидетельствует о способности исследуемых смесей самостоятельно растекаться до близких к предельным значениям диаметра расплыва. Исследуемые варьируемые факторы (В/Ц и концентрация пластификатора) имеют большее влияние на самопроизвольное растекание бетонной смеси, чем на расплыв при встряхивании. При этом общий характер и направление влияния факторов для обеих моделей закономерно идентичны. Диапазоны варьирования выбранных факторов позволяют получать бетонные смеси конструкционных легких бетонов с высокой подвижностью, выраженной диаметром расплыва до 325 мм (без встряхивания) и до 335 мм (после встряхивания) без внешних признаков расслоения.

В состав исследуемых легких бетонов входит минеральная фаза различной дисперсности: фракционированный ( $P_f$ ) и тонкий ( $P_m$ ) кварцевый песок. Это позволяет проследить роль минеральной части идентичного минерального состава на распределение воды в дисперсной системе. При постоянном расходе всех составляющих легкого бетона общее объемное содержание кварцевых компонентов в смеси легкого бетона составляет  $P_m + P_f = \text{const} = 8,7\%$ , а В/Ц = 0,5,  $C_d = 1,4\%$ . Варьирование соотношения  $P_m/P_f$  осуществлялось таким образом, чтобы доля каждой фракции изменялась от 0 до 100 %. Технологические свойства бетонных смесей с варьированием соотношения молотового и фракционированного песка представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры подвижности бетонной смеси легкого бетона при варьировании соотношения  $P_m/P_f$

№	Показатель	$P_m/P_f$				
		0 / 100	25 / 75	50 / 50	75 / 25	100 / 0
1	Диаметр расплыва конуса до встряхивания, $D_{p,1}$ , мм	305 ± 6	304 ± 4	301 ± 5	305 ± 6	302 ± 5
2	Диаметр расплыва конуса после встряхивания, $D_{p,2}$ , мм	317 ± 2	314 ± 5	313 ± 3	315 ± 5	317 ± 3
3	Коэффициент самоуплотнения, $D_{p,2}/D_{p,1}$	1,04	1,03	1,04	1,03	1,05

Как видно из таблицы 1 диаметр расплыва бетонной смеси из конуса без встряхивания для всех составов в варьируемом диапазоне  $P_m/P_f$  имеет значения 301...305 мм, а диаметр расплыва после встряхивания 313...317 мм при стандартном отклонении до ±6 мм. То есть подвижность смеси не дает представление о роли дисперсности кварцевого песка в исследуемом диапазоне. Полученные данные статистически не позволяют сделать вывод о влиянии указанного фактора на распределение воды в системе через технологический

критерий качества смеси. Коэффициент самоуплотнения меняется в статистически незначимом диапазоне 1,03...1,05.

#### Вывод

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности достижения положительных технологических показателей для получения самоуплотняющихся бетонных смесей на полых микросферах. Дальнейшие исследования следует осуществлять с учетом корректировки эффективных значений варьируемых факторов. Целесообразным является установление значений механических свойств исследуемых составов и оценку граничных значений однородности при варьировании плотности легкого бетона.

#### Библиографический список:

1. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны: монография / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-9227-1265-1
2. Белова Я.С., Воробьева Т.А., Кочеткова М.И., Маношкина Г.В. Применение модифицированных и самоуплотняющихся бетонов в высотном строительстве: новые возможности и перспективы // XVI Межвузовская научно-техническая конференция «Новые технологии в учебном процессе и производства», Рязань. – 2018. – С.146-150.
3. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава // Строительные материалы. 2009. № 5. С. 54-57.
4. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77-85.
5. Самченко С.В., Воронин В.В., Ларсен О.А., Наруть В.В. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 71-78.
6. Мозгалев К. М., Головнев С.Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2011. Вып. 4. С. 55-60.
7. Горюшин К. В. Самоуплотняющийся бетон в современной строительной индустрии // Будущее науки -2020. Курск. 2020. Том 4.С.71-73.
8. Устименко М.Б., Михайлов А.С., Шрайбер Д.А. Самоуплотняющийся бетон // Дальний восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Вып. 1-3. С. 455-459.
9. Фаликман В.Р., Денискин В.В., Калашников О.О., Сорокин В.Ю. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона // Национальная ассоциация ученых. 2015. Вып. 2-3. С. 68-73.
10. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон и их перспективы // Новое слово в науке: стратегии развития. 2018. С. 10-14.
11. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон – будущее монолитного домостроения // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития. 2017. Том 1. С. 354-358.
12. Бычков М.В., Удодов С.А. Легкий самоуплотняющийся бетон как эффективный конструкционный материал // Интернет-журнал науковедение. 2013. Вып. 4. С. 41-47.
13. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Способность бетонных смесей на полых микросферах к самоуплотнению // Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции

«Актуальные проблемы строительной отрасли и образования», Москва, МГСУ. – 2023. – С. 218-222.

14. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3 (40). С. 24-34.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВЯЖУЩЕГО

А.Д. Жуков<sup>1</sup>

Б.А. Ефимов<sup>1</sup>

Демиссе Бекеле Арега<sup>1</sup>

А.А. Маторин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** Целью исследований, изложенных в статье, была разработка и оптимизация состава модифицированного вяжущего для изделий и конструкций малой толщины, как-то текстиль-усиленных бетонов, бетонного полотна и армированных штукатурных покрытий для фасадной отделки. В результате разработаны основы методики подбора состава модифицированного гидравлического вяжущего на основе портландцемента, вулканического туфа и водоудерживающей синтетической добавки.

**Ключевые слова:** модифицированное вяжущее, портландцемент, вулканический туф, аналитическая оптимизация, пластическая усадка, текстиль бетон

### Введение

В современных строительных технологиях активно развивается направление связанной с использованием конструкций на основе силикатных материалов, толщина которых не превышает 60 мм. Применение таких изделий позволяет значительно снизить материалоемкость строительных работ без ухудшения эксплуатационных характеристик этих изделий [1, 2].

Применение подобных систем и конструкций ставит перед разработчиками две очень важные задачи: изучение закономерностей адгезии волокон (дисперсных или в составе армирующих сеток) с материалом основы; изучение и минимизацию деформаций в твердеющей системе (особенно на ранних стадиях твердения); анализ условий и результатов взаимодействия материалов с окружающей средой [3].

Целью исследований, изложенных в статье, была разработка и оптимизация состава модифицированного вяжущего для изделий и конструкций малой толщины, как-то текстиль-усиленных бетонов, бетонного полотна и армированных штукатурных покрытий для фасадной отделки. В основу исследований была положена гипотеза о том, что причиной усадочных деформаций является дефицит влаги в капиллярах твердеющего вяжущего, а преодоление этого дефицита позволит снизить пластическую усадку и получать изделия, соответствующие нормативным требованиям.

### Эксперимент и его результаты

В качестве основных сырьевых компонентов использовались портландцемент, вулканический туф и эфир целлюлозы. Среднюю плотность вулканического туфа составляла 300...400 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии 2,6...2,8 МПа, коэффициент теплопроводности — 0,10...0,14 Вт/(м·°С).

Пуццолановая активность молотого вулканического туфа по поглощению СаО в течение 30 суток составляла 110–200 мг/г.

Использовалась гидроксипропилметил целлюлоза (НРМС), применяемая в производстве строительных материалов в качестве добавки, обеспечивающей тискотропию растворов и пластифицирующий эффект.

Свойства гидравлического вяжущего принимались в соответствии с ГОСТ 10178 (портландцемент и шлакопортландцемент); ГОСТ 22266 (цементы пуццолановые и сульфатостойкие); ГОСТ 25328 (цементы для строительных растворов). В основу исследований положены методики, изложенные в отечественных стандартах: ГОСТ 7473; ГОСТ 10178; ГОСТ 10180; ГОСТ 10181; ГОСТ 26633; ГОСТ 30459–2008; ГОСТ Р 58277.

Исследование свойств модифицированного гидравлического вяжущего реализовано на основе методик математического планирования и обработки результатов эксперимента. В эксперименте в качестве варьируемых факторов приняты расход молотого туфа ( $X_1$ , % от массы цемента), удельная поверхность молотого туфа ( $X_2$ , м<sup>2</sup>/кг) и расход эфира целлюлозы ( $X_3$ , % от массы цемента). Функциями отклика приняты прочность модифицированного вяжущего при сжатии ( $Y_1$ , МПа), его средняя плотность ( $Y_2$ , кг/м<sup>3</sup>) и водопотребность (определялась по нормальной густоте) модифицированного вяжущего ( $Y_3$ ).

Расход портландцемента установлен в пределах 320 кг/м<sup>3</sup> смеси. Расход воды устанавливается в соответствии с В/Ц в зависимости от требуемой подвижности смеси (ПЗ-П4) и не является независимым фактором. Формовались образцы-балочки 5×5×15 см. Условия эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1. Условия эксперимента по оптимизации состава модифицированного вяжущего

Наименование фактора	Символ, $X_i$	Среднее значение фактора, $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход молотого туфа, % от массы цемента	$X_1$	20	5	15	25
Удельная поверхность молотого туфа, м <sup>2</sup> /кг	$X_2$	360	100	260	460
Расход эфира целлюлозы, % от массы цемента	$X_3$	1,0	0,4	0,6	1,4

Обработка результатов эксперимента, расчет коэффициентов уравнений регрессии и проверка статистических гипотез осуществлялась в программе Statistika. Оптимизация полученных результатов осуществлялась аналитическим методом по методике, разработанной в НИУ МГСУ [4, 5] с последующей проверкой полученных результатов в контрольных сериях экспериментов.

Получены следующие математические модели (полиномы):

- для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 42,1 + 4,6X_1 + 3,5X_2 + 1,8X_3 + 0,9X_2X_3 - 2,7X_1^2 \quad (1)$$

- для средней плотности:



$$Y_2 = 1672 - 48X_1 + 22X_2 + 19X_1X_2 \quad (2)$$

- для водопотребности модифицированного вяжущего:

$$Y_3 = 0,30 + 0,04X_1 + 0,02X_2 + 0,02X_3 + 0,1X_2X_3 \quad (3)$$

Оптимальный расход вулканического туфа был определен путем аналитической оптимизации. Определялась частная производная функции ( $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ ) по фактору  $X_1$ . Полученное значение  $X_{1\text{опт}}$  подставлялось в полиномы (1-3). В результате были получены оптимизированные по расходу вулканического туфа зависимости.

Экстремум (оптимальные значения) функции  $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$  по  $X_1$  находим методом локальной аналитической оптимизации.

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_1} = 4,6 - 5,4X_1 = 0 \rightarrow X_1 = \frac{4,6}{5,4} = 0,85$$

Переходя с помощью данных из таблицы 1 к натуральным значениям факторов получаем, что оптимальный расход молотого туфа находится в интервале от 24 до 25 % от массы цемента. Это соответствует установленным нормативным показателям.

Подставляем полученное оптимальное значение ( $X_1 = 0,85$ ) в алгебраические полиномы (1-3). В результате получаем оптимизированные по  $X_2$  (расходу молотого туфа) полиномы:

- для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 44,1 + 3,5X_2 + 1,8X_3 + 0,9X_2X_3 \quad (4)$$

- для средней плотности:

$$Y_2 = 1631 + 38X_2 \quad (5)$$

- для водопотребности модифицированного вяжущего:

$$Y_3 = 0,33 + 0,02X_2 + 0,02X_3 + 0,1X_2X_3 \quad (6)$$

Осуществляем графическую интерпретацию оптимизированных функций (4-6) и полученный графики объединяем в номограмму (рисунок 1). Номограмма может быть использована при решении прямой и обратной инженерных задач. Пример решения прогностической задачи приведен на рисунке 1: задается удельная поверхность молотого туфа-скория, равная  $400 \text{ м}^2/\text{кг}$  и расход эфира целлюлозы, равный 1,1 % от массы цемента. В секторе I определяем прочность при сжатии (активность) как точку пересечения прямых удельной поверхности и расхода целлюлозы.

Получаем прочность равную 49,6 МПа. Прямую параллельную оси абсцисс продлеваем в сектор II. В секторе III проводим прямую, параллельную оси ординат до пересечения с графиком плотности и определяем среднюю плотность композиционного вяжущего (равна  $1642 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). В секторе II на пересечении прямых проведенных из секторов I и III определяем значение водопотребности модифицированного вяжущего, равное 0,359.

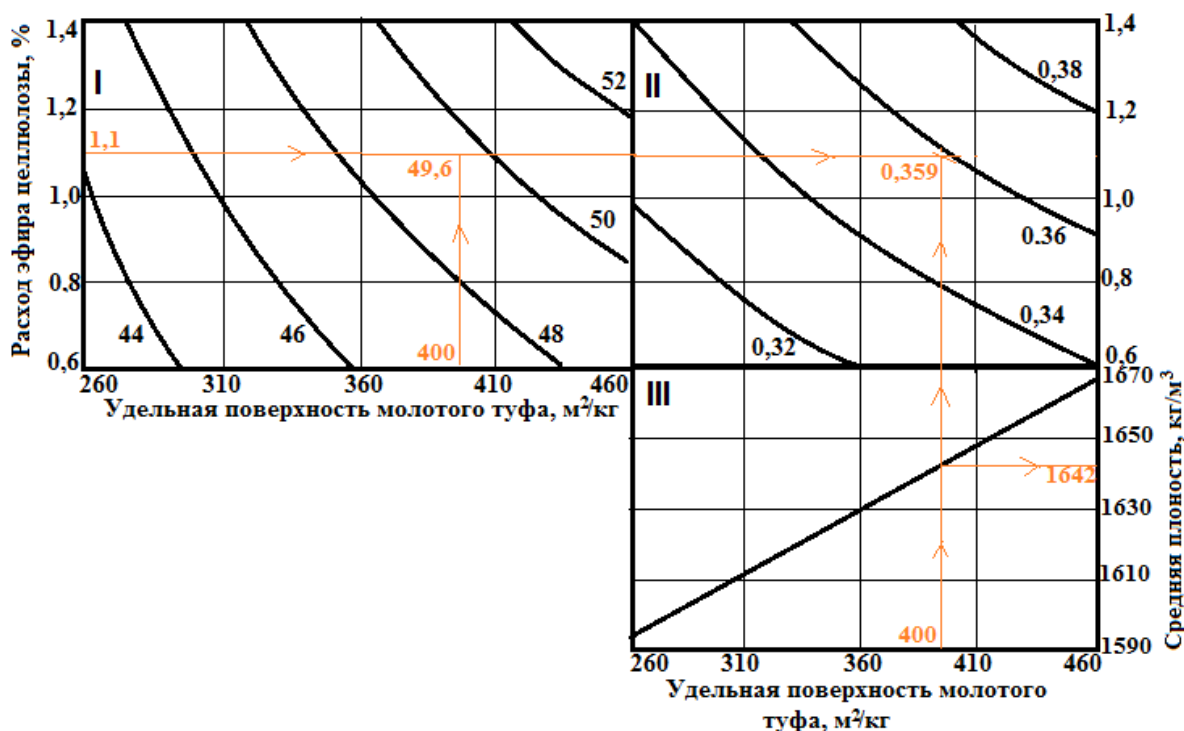


Рисунок 1. Решение задачи прогнозирования свойств модифицированного вяжущего при расходе вулканического туфа 24–25% от массы портландцемента.

После получения расчетных значений проводились серии активных экспериментов, в которых осуществлялось сравнение расчетных значений и значений полученных по результатам натуральных испытаний. Свойства модифицированного вяжущего в зависимости от расхода эфира целлюлозы и удельной поверхности молотого вулканического туфа при расходе вулканического туфа 19–25% от массы портландцемента приведены в таблице 2.

Наиболее перспективные показатели по прочности и средней плотности имеет состав №2. Расход молотого до удельной поверхности 460 м<sup>2</sup>/кг вулканического туфа 25% от массы цемента, расход эфира целлюлозы 1,4% от массы цемента. С учетом расхода портландцемента 320 кг/м<sup>3</sup> смеси определяем расходы вулканического туфа 80 кг/м<sup>3</sup>; эфира целлюлозы 4,48 кг/м<sup>3</sup>. Прочность при сжатии 50,2 МПа; средняя плотность 1665 кг/м<sup>3</sup>; водопотребность 0,387.

Таблица 2. Свойства модифицированного вяжущего

№	Расход, %		Удельная поверхность туфа, м <sup>2</sup> /кг	Прочность при сжатии, МПа		Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	
	Туф-скори я	Эфир целлюлозы		Расчётная	Эксперимент	Расчётная	Эксперимент
1	25	1,0	460	47,5	46,1	1665	1632
2	25	1,4	460	50,2	52,4	1665	1648
3	25	1,0	360	44,0	48,2	1624	1639
4	20	1,4	360	43,9	47,4	1672	1647
5	20	1,0	460	45,6	40,1	1672	1638
6	20	1,4	460	48,3	43,3	1694	1661

Разработанное вяжущее опробовано в различных типах материалов, относящихся к группе специальных текстиль-бетонов: бетонном полотне, фиброармированных материалах, а также в фасадных штукатурных покрытиях. Заслуживает внимание возможность получения легких и теплоизоляционных штукатурных покрытий на основе модифицированного вяжущего, содержащего водоудерживающие компоненты.

#### Заключение

Эксперимент, проведенный по методам математического планирования, статистической обработки результатов и аналитической оптимизации, позволил разработать основы методики прогнозирования свойств модифицированного вяжущего и подбора его состава. Получена модифицированное вяжущее следующего состава: расход портландцемента  $320 \text{ кг/м}^3$ ; расход вулканического туфа  $80 \text{ кг/м}^3$ ; расход эфира целлюлозы  $4,48 \text{ кг/м}^3$ , прочность при сжатии  $50,2 \text{ МПа}$ ; среднюю плотность  $1665 \text{ кг/м}^3$ ; водопотребность  $0,387$ .

Рецептуры модифицированного вяжущего могут изменяться в зависимости от установленных требований, и оно может быть использовано в технологиях текстильно-усиленного бетона, бетонного полотна, фибробетона, а также фасадных штукатурных покрытий, в том числе легких или теплоизоляционных.

#### Библиографический список:

1. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее. Вестник МГСУ. 2017. Том 12. № 1 (100), С. 9-16.
2. Умнякова Н.П. Возведение энергоэффективных зданий в целях уменьшения негативного воздействия на окружающую среду [Текст] / Н.П. Умнякова // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3 – С. 459-464.
3. Лам Н. З. Т., Самченко С. В., Швецова В. А., Булгаков Б. И. Влияние комплексных добавок на прочность цементного камня в раннем возрасте // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 5. С. 52-59. doi: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59
4. Ivan I. Popov, Marina V. Shitikova, Artem V. Levchenko, and Alexey D. Zhukov, Experimental identification of the fractional parameter of the fractional derivative standard linear solid model for fiber-reinforced rubber concrete // Mechanics of advanced materials and structure. Accepted. 2023. – DOI: 10.1080/15376494.2023.2191600. – EDN TQXUYA.
5. Жуков А.Д., Попов И.И., Ефимов Б.А., Демиссе Б.А., Белканов В.В. Оптимизация составов фасадных штукатурок на основе модифицированного вяжущего // Известия вузов. Строительство. Новосибирск. 2022. №5. С. 57-66. DOI: 10.32683/0536-1952-761-5-57-66

## СТРУКТУРНАЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ О ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.А. Задорин<sup>1</sup>, аспирант, ассистент кафедры СКИС

М.В. Мишнев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент кафедры СКИС

А.С. Королев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент кафедры СКИС

Д.Д. Гусев<sup>1</sup>, магистрант кафедры СКИС

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет

**Аннотация.** Одной из перспективных областей применения полимерных композитов в строительстве является изготовление из них крупногабаритных оболочечных конструкций газоотводящих трактов (дымовых труб и газоходов). Такие конструкции эксплуатируются в условиях длительного совместного воздействия механических нагрузок и переменных температур. В таких условиях в полимерных оболочечных конструкциях формируется сложное напряженное состояние, а также возможно постепенное накопление остаточных напряжений при циклической смене температурного режима эксплуатации. Ранее для учета такого эффекта была предложена многоэлементная модель материала [2]. Целью настоящей работы являлась отработка методики экспериментального определения упругих и реологических свойств материала для такой модели. Для этого проводились испытания на ползучесть для определения реологических параметров для модели Кельвина-Фойгта при разных видах напряженного состояния. В результате получены нужные константы и установлен характер работы полимерного материала: эпоксидной смолы горячего отверждения, применяемой в качестве матрицы для полимерных композитов.

**Ключевые слова:** полимерный композит, эпоксидная смола, ползучесть, промышленные дымовые трубы, газоходы.

Перспективной и развивающейся областью применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются конструкции газоотводящих трактов промышленных предприятий, к которым относятся дымовые трубы, газоходы, системы газоочистки и десульфуризации. Главное преимущество ПКМ перед традиционными материалами: сталью, железобетоном и кирпичом, заключается в высокой стойкости к агрессивным воздействиям в сочетании с высокой прочностью и малым весом [1]. При этом некоторые конструкционные свойства ПКМ недостаточно изучены применительно к условиям длительной эксплуатации в газоотводящих трактах в условиях повышенных циклически меняющихся температур в сочетании с механическими нагрузками.

Одним из направлений исследований является изучение зарождения и развития остаточных напряжений в элементах конструкций из полимерных композиционных и гибридных материалов при нестационарных термомеханических воздействиях с учетом их предыстории. Актуальность данной темы состоит в том, что рассматриваемые сооружения (газоотводящие тракты) работают при нестационарных температурных режимах, а также могут испытывать динамические и циклические механические воздействия (например, ветровая нагрузка на дымовые трубы). Таким образом, для оценки напряженно-

деформированного состояния сооружения на этапе проектирования нужно учитывать накопление напряжений. Математическое моделирование процесса формирования остаточных напряжений планируется осуществить на основе модели, описанной в [2, 3].

Одним из важных этапов является определение упругих и реологических параметров материала для вышеописанной модели, в которую в качестве подэлемента входит известная вязкоупругая трехэлементная модель Кельвина-Фойгта (Рисунок 1).

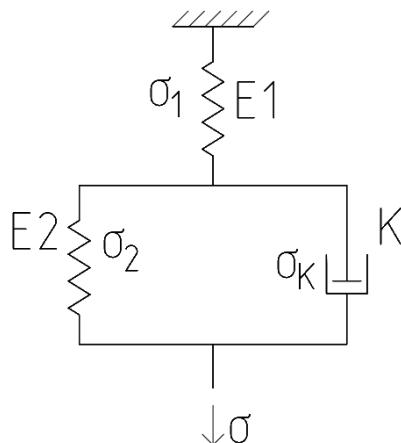


Рисунок 1. Трехэлементная модель Кельвина-Фойгта

Модель Кельвина-Фойгта базируется на трех константах:  $E_1$  и  $E_2$  – коэффициенты упругости, соответствующие упругим элементам,  $K$  – коэффициент вязкости (коэффициент внутреннего сопротивления), соответствующий вязкому элементу.

Эти константы связаны между собой следующими зависимостями [4]:

$$H = \frac{E_1 * E_2}{E_1 + E_2} \quad (1)$$

где  $H$  – длительный модуль упругости.

$$n = \frac{K}{E_1 + E_2} \quad (2)$$

где  $n$  – постоянная, называемая временем релаксации.

$$E_1 = E \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости материала.

Эти зависимости позволяют упростить запись закона ползучести. В конечной форме он принимает вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{H} + \sigma \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{H} \right) e^{-H * \frac{t}{En}} \quad (4)$$

$\varepsilon, \sigma, E, t$  определяются из испытаний.

Таким образом, в уравнении остается 2 неизвестных:  $H$  и  $n$ . Определив их, можно воспользоваться уравнениями (1-3) и определить константы модели. Для этого из массива экспериментальных данных (точки на графике ползучести)

создается система уравнений  $\varepsilon(t)$ , которая в программном комплексе Mathcad решается численно и подбирает константы так, чтобы теоретическая кривая соответствовала экспериментальной, примеры приводятся на рисунке 3. Полученные значения констант приводятся в таблице 1.



Рисунок 2. Испытания на изгиб (слева) и растяжение (справа).

В нашей работе испытания проводились по схеме трехточечного изгиба и растяжения (Рисунок 2.). Это делалось для того, чтобы, во-первых, оценить возможный различный характер длительного деформирования материала при разных видах напряженного состояния, а также для оценки применимости испытаний на изгиб в целом, т.к. они технологически проще, чем испытания на растяжение. Состав испытываемого полимера: эпоксидная смола 54,5% (KER 828 - аналог ЭД20) + ИЗОМТГФА (отвердитель) 42,5% + Алкофен (ускоритель) 3%.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Длительный модуль упругости  $N$  имел близкие значения при разных уровнях напряжений.

2. Константы, отвечающие вязкой работе материала  $K$  и  $n$  при растяжении, существенно отличаются от полученных при изгибе, при этом значения упругих констант являются достаточно близкими.

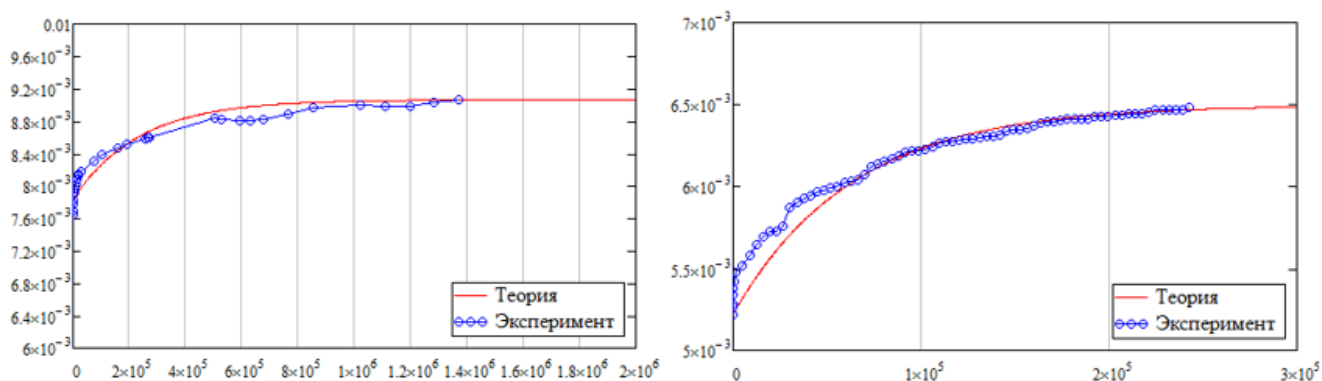


Рисунок 3. Графики ползучести при испытаниях на изгиб при напряжениях 21,5 МПа (слева) и на растяжение при 20,74 МПа (справа).

Таблица 1. Результаты длительных испытаний на изгиб и растяжение

НДС	$E_1=E$ , МПа	$E_2$ , МПа	$K$ , МПа·сек	$n = \frac{K}{E_1+E_2}$ , мин	$H = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$ , МПа
Изгиб	3182.5	1,70E+04	4,32E+09	3,43E+03	2,61E+03
Растяжение	3979	1.60E+04	2.94E+09	6.16E+02	3.13E+03

3. В целом форма теоретических кривых близка к форме экспериментальных кривых. Характер работы материала соответствует рассмотренной вязкоупругой модели. В начале ползучести угол наклона меняется быстро, что соответствует неустановившейся ползучести. Далее происходит выравнивание кривой.

Таким образом, в результате данного этапа исследований были получены упругие и реологические константы материала, которые в дальнейшем будут использоваться в математическом моделировании с учетом циклического воздействия температур для анализа накопления напряжений. При испытаниях получены достаточно стабильные результаты, что говорит о применимости методики и модели, при этом при разных схемах нагружения они отличаются друг от друга. Предположительно это связано с разным характером реологического поведения материала при растяжении и сжатии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00425/РФФ2023007.

#### Библиографический список:

1. Дымовые трубы: традиции и инновации: монография / В.М. Асташкин, В.С. Жолудов, А.З. Корсунский и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Асташкина и канд. техн. наук А.З. Корсунского. – Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 496 с.
2. Асташкин В.М., Лихолетов В.В. Формирование остаточных напряжений в пластмассовых элементах конструкций при теплосменах в условиях стесненной деформации. - Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1985, №10, с.128-131.
3. Моделирование реологических свойств полимеров на основе структурной модели среды / Асташкин В.М., Ершов А.Л., Пазушан В.А., Садаков О.С. - Известия ВУЗов. Строительство, 1995, №11, с.48-53.
4. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести / А.Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1968. – 416 с.

## ЦЕМЕНТОБЕТОНЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**С.В. Золотарева**<sup>1</sup>, аспирант

**С.В. Ключев**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

**Н.А. Аюбов**<sup>2</sup>, канд. эконом. наук, доцент

<sup>1</sup>*Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова*

<sup>2</sup>*Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской Академии Наук*

**Аннотация.** В аннотации кратко рассмотрены критерии бетонной смеси для дорожного строительства. Рассмотрены примеры зарубежной дорожно-строительной практики.

**Ключевые слова:** автодорога, строительный материал, строительные конструкции, цементобетон, материалы.

В отечественной дорожной сети цементобетон используется в незначительных масштабах, применяясь лишь в 3% дорог с твердым покрытием [1].

Основные критерии качества готового бетонной смеси для дорожного строительства – это:

- низкий уровень склонности к трещинообразованию;
- устойчивость к вибрациям и абразивному воздействию;
- химическая стойкость: невосприимчивость к маслам, топливу, реагентам, которыми посыпают дорожное полотно для защиты от обледенения;
- устойчивость к высоким нагрузкам на сжатие и растяжение;
- прочность и морозостойкость.

Достижение высокой долговечности цементобетона осуществляется регулированием водоцементного отношения (В/Ц):

- для верхнего слоя покрытия  $V/C \leq 0,5$ ;
- для нижнего слоя покрытия  $V/C \geq 0,6$ .

Подвижность цементобетонных смесей для покрытий должна быть в пределах 2-4 см (марка П1), но современное дорожное строительство в ряде случаев применяет укатываемые жесткие смеси [2].

Щебень различных фракций используется для изготовления дорожных цементобетонных смесей. В частности, верхние слои двухслойных дорожных покрытий используют крупный заполнитель фракцией 20 мм, а в цементобетоне для однослойных покрытий находят применение щебень фракцией 40 мм. Учитывая необратимый износ поверхности дорожного покрытия, крупный заполнитель должен отвечать повышенным требованиям по истираемости [3].

Теоретические основы бетоноведения, в том числе и дорожного назначения, заложены в работах многих отечественных и зарубежных ученых [4].



Наибольшее использование отходов горнорудной промышленности можно осуществить в дорожном строительстве (наиболее материалоемкая отрасль). Такие ресурсы, как вскрышные породы и горнорудные отходы практически неисчерпаемы, что делает их очень значимым сырьем для строительной индустрии. Доказано [5-6], что применение техногенных ресурсов дает возможность обеспечить около 40% сырьевой базы строительства, снижая затраты до 30% (в сравнении с природным сырьем).

При проектировании и устройстве цементобетонных покрытий автомобильных дорог необходимо обеспечивать их равную толщину. Исключением являются крайние внешние полосы шестиполосных покрытий дорожных одежд, где разрешено увеличивать на 20 мм толщину покрытия с целью проезда тяжелого транспорта. По толщине цементобетонные покрытия могут быть однослойными или двухслойными (с обеспечением необходимой адгезии между слоями) [7, 8].

Зарубежная практика эксплуатации цементобетонных дорожных покрытий доказывает их эффективность для платных высокоскоростных автомагистралей. Экономичность цементобетонных дорожных покрытий проявляется не сразу, показывая несколько более высокие затраты на их устройство, по сравнению с асфальтобетонными покрытиями, однако эксплуатационные и ремонтные расходы на всем сроке службы, составляющем 25 лет, снижают общую себестоимость покрытия на 40-50%.

Цементобетонное покрытие обеспечивает более эффективное распределение нагрузки на большую площадь, позволяя экономить материальные ресурсы при строительстве и эксплуатации (рисунок 1).

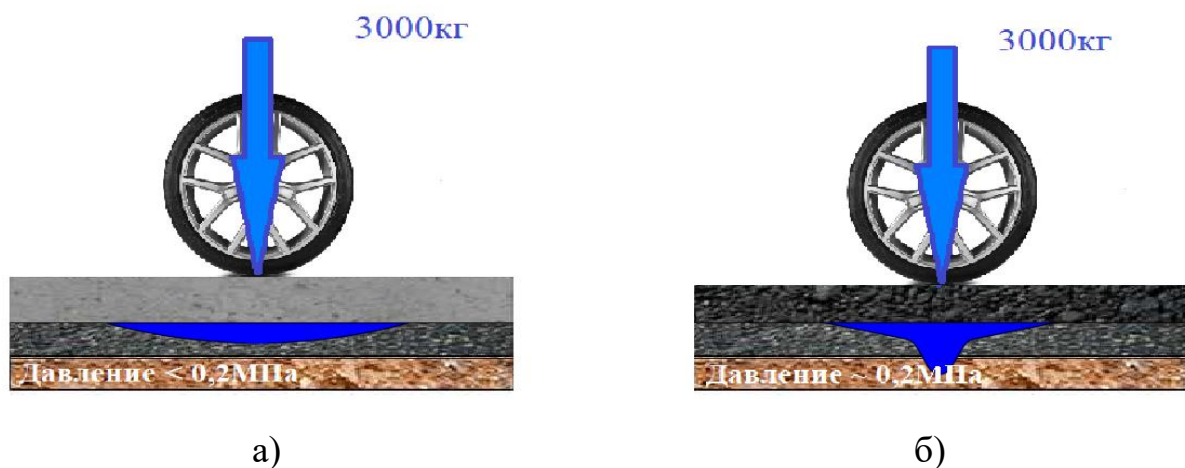


Рисунок 1. Сравнение механизмов работы цементобетонных (а) и асфальтобетонных (б) дорожных покрытий

Современными вяжущими для цементобетонов являются тонкомолотые цементы (ТМЦ), которые в результате повышения дисперсности и механоактивации становятся более активным материалом по сравнению с традиционным цементом. При добавлении в ТМЦ суперпластификатора получают вяжущие низкой водопотребности [9-12].

Большие перспективы имеет недавно разработанный за рубежом cement-treated material (СТМ), состоящий из экстремально малого количества цемента

(2-4%) и воды (4-7%), смешанной с заполнителями различной природы. Другим перспективным зарубежным материалом является engineered cementitious composite (ЕСС), обладающий высокой пластичностью и деформативностью перед разрушением, в числе за счет сдерживания раскрытия микротрещин и способностью к самовосстановлению.

Монолитный цементобетон требует 28 дней для достижения нормативных прочностных свойств, что не всегда является приемлемым при строительстве объектов дорожной инфраструктуры. Этот недостаток избегается при использовании сборных железобетонных конструкций. В последние годы, вопросам повышения эффективности сборных железобетонных плит посвящено большое количество работ. Например, научная школа Д.Э. Маиляна занимается исследованиями различных деформированных состояний сборных железобетонных изделий.

Работа цементных композитов должна рассчитываться для каждого конкретного случая строительного применения с использованием законов механики, как, например, в трудах научной школы Б.М. Языева.

Для повышения эксплуатационных характеристик при производстве цементобетонных покрытий применяются различные виды арматуры (в том числе, фибра).

В Соединенных Штатах Америки разработан цементобетонный композит, обладающий сниженным содержанием клинкерной составляющей; он называется «эконкрет», что подчеркивает его экономичность. Экономическая эффективность обоснована тем, что для его создания возможно применения местных сырьевых ресурсов. В отличие от традиционного цементобетона, требования к гранулометрии компонентов для дорожных материалов не столь строги. В частности, при расходе портландцемента от 100 до 200 кг/м<sup>3</sup> и В/Ц от 0,8 до 1,2 прочность такого композита на сжатие варьируется от 4 до 20 МПа,  $R_{изг}$  от 1 до 3,5 МПа, Е от 7 до 28 ГПа .

В зарубежной дорожно-строительной практике широкое распространение получили укатываемые цементобетонные смеси для местных и сельскохозяйственных автодорог с низкой интенсивностью движения.

В Западной Европе во избежание расслоения цементобетонной смеси рекомендуется использовать заполнитель размером зерен не более 22 мм, чтобы предотвратить расслоение жесткой бетонной смеси. Необходимо обеспечивать большее содержание мелких фракций заполнителя, чем традиционно проектируется для пластичных цементобетонных смесей.

Шведский институт цемента и бетона рекомендует использовать только портландцемент с низкой скоростью гидратации (14 мас. % от заполнителя), способствуя снижению внутренних напряжений в материале, возникающих в процессе твердения.

Французские материаловеды рекомендуют добавлять портландцемент в количестве 8-14 мас. % от заполнителя. При этом, самое широкое распространение получили портландцементы классов СРА 45 и 55 и СРJ 45, особенно СРА, в связи с тем, что он позволяет получать максимальный эффект пуццолановых способностей зол, позволяя получить заданные сроки

схватывания. Реже используется портландцемент с добавлением измельченного шлака, активных зол-уноса или природного пуццоланового сырья.

Обязательным компонентом современных цементобетонов является суперпластификатор. При этом, в связи с тем, что большая часть суперпластификаторов на российском рынке иностранного производства, важной задачей в условиях импортозамещения является применение в составах дорожных цементобетонов отечественных материалов.

#### **Библиографический список:**

1. Петров, А.А. Наука в обществе / А.А. Петров. – М.: Наука, 2000. 456 с.
2. Сидоров, И.П. Наука и производство / И.П. Сидоров // Экономика. 2000. № 5. С. 23-27.
3. Епифанов, Ю.А. О некоторых результатах исследования влияния дорожной сети на решение проблемы обеспечения безопасности на дорогах России / Ю.А. Епифанов // Вестник университета. - 2012. - № 4. - С. 24-29.
4. Лесовик, В.С. Строительные материалы из отходов горнорудного производства Курской магнитной аномалии / В.С. Лесовик. - Белгород: Изд. АСВ, 1996. - 155 с.
5. Ушаков, В.В. Исследование истираемости цементобетонных покрытий автомобильных дорог / В.В. Ушаков, Г.Г. Дьяков // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2014. - № 1 (67). - С. 30-32.
6. Лесовик, Р.В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: дисс. ... д-р техн. наук 05.23.05 / Р.В. Лесовик. - Белгород, 2009. -463 с.
7. Якушев, Н.М. Цементобетонные дороги в России. Сравнение с асфальтобетонным покрытием / Н.М. Якушев, Е.Ю. Романов // Фотинские чтения. - 2017. - № 1 (7). - С. 161-165.
8. Клюев С.В., Авилова Е.Н. Бетон для строительства оснований автомобильных дорог на основе сланцевого щебня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 38-41.
9. Клюев С.В., Клюев А.В. Управление проектными параметрами в задачах оптимального проектирования // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 1. С. 15-19.
10. Клюев С.В. Сталефибробетон на основе композиционного вяжущего // В сборнике: Белгородская область: прошлое, настоящее, будущее. Материалы областной научно-практической конференции в 3-х частях. 2011. С. 32-36.
11. Клюев С.В. Мелкозернистый сталефибробетон на основе отсева кварцитопесчанника // В сборнике: Белгородская область: прошлое, настоящее, будущее. Материалы областной научно-практической конференции в 3-х частях. 2011. С. 27-31.
12. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, У.Х. Магдеев. - М.: Изд-во АСВ, 2004. - 236 с.

## АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИХ УПРОЧНЕНИЯ

С.В. Золотарева<sup>1</sup>, аспирант

С.В. Ключев<sup>1</sup>, д.т.н., проф.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова

**Аннотация:** В статье проведен анализ состояния взлетно-посадочных полос аэропортов ЦФО. Рассмотрены преимущества применения сталефибробетона в ремонтных работах.

**Ключевые слова:** цементобетон, современные материалы, новые материалы, сталефибробетон, взлетно-посадочные полосы, фибробетон, дорожное строительство.

Процесс строительства взлетно-посадочных полос (ВВП) аэродрома был и остается технически сложным и материалоемким этапом дорожного строительства. Рассмотрим города ЦФО и состояние аэропортов в них. В настоящее время на территории Белгородской области построено два аэропорта: в г. Белгород и г. Старый Оскол. Аэропорт в г. Старый Оскол расположен в 3 км от центра города. Для получения статуса международного аэропорта необходимо проведение ремонта взлетно-посадочной полосы, характеристики которой на данный момент составляют: длина ВВП 1800 метров и ширина 40 метров. Пропускная способность аэровокзала составляет 37 чел/час. Аэропорт в г. Белгород расположен в 7 км от центра города. Аэропорт является международным, характеристики его ВВП составляют: длина 2500 метров и ширина 45 метров. Полотно, выполненное из искусственного асфальтобетонного покрытия способно принимать транспорт в 190 тонн. [1, 2]

На расстоянии 129 км от г. Белгорода расположен г. Курск. В этом городе находится единственный международный аэропорт, который имеет одну взлетно-посадочную полосу протяженностью 2500 метров и шириной 40 метров, в качестве покрытия использована бетонная составляющая. Максимальный взлетный вес судов, обслуживаемых аэропортом Курск не должен превышать 190 тонн. [3, 4]

Одним из важных транспортных узлов Черноземья является транспортный узел в г. Воронеж, обслуживающий международные и российские пассажирские перевозки. Аэропорт «Чертовицкое» имеет три взлетно-посадочные полосы. Основная полоса размерами 2300 метров в длину и 45 метров в ширину выполнена из асфальтобетонного покрытия. Вторая и третья полосы – грунтовые размерами 700×100 и 450×60 метров соответственно.

Международный аэропорт города Брянск, расположен в 14 км от города. Стратегическое расположение взлетной полосы позволяет осуществлять перелеты в юго-восточном и южном направлениях. Единственная полоса размерами 2400 метров в длину и 42 метров в ширину выполнена из цементобетонного покрытия.

Учитывая объем строительства к восстановлению актуально применение бетона.

При проектировании и устройстве цементобетонных покрытий дорог необходимо обеспечивать их равную толщину. Исключением являются крайние внешние полосы шестиполосных покрытий дорожных одежд, где разрешено увеличивать на 20 мм толщину покрытия с целью проезда тяжелого транспорта. По толщине цементобетонные покрытия могут быть однослойными или двухслойными (с обеспечением необходимой адгезии между слоями) [5, 6].

Бетонное покрытие имеет более высокую прочность и более длительный срок службы, чем асфальтовое покрытие. За последнее десятилетие в развивающихся странах возросло использование бетонного покрытия. В России тема качественного и доступного ремонта дорог была и остается актуальной. Обычный бетон по своей природе является хрупким материалом с низкой прочностью на растяжение и деформационной способностью. Использование стальной фибры значительно улучшает ее конструктивные характеристики, такие как статическая прочность на изгиб, ударная вязкость, прочность на растяжение и деформационные возможности сталефибробетона (СФБ) т.к. по сравнению с жизненным циклом асфальтобетонной дороги покрытия из СФБ служат в два раза дольше.

Наибольшее применение СФБ в покрытиях аэропортов из-за высоких и разрушающих нагрузок. Стальные волокна значительно улучшают ударопрочность бетона, что делает его подходящим материалом для конструкций, подвергающихся ударным нагрузкам. [7]

Аккумулируя информацию из различных источников по данным общедоступных проведенных исследований, отметим основные результаты:

Отмечено, что включение фибры в бетонную смесь влияет на свойства свежего бетона, такие как величина осадки, прочность на сжатие и прочность на изгиб.

Включение стальной фибры в бетонную смесь влияет на свойства затвердевания свежего бетона, такие как прочность бетонной смеси на сжатие через 28 дней.

Включение стальной фибры показывает постоянное увеличение прочности на изгиб с увеличением % стальной фибры. Она максимальна при 2%, но с экономической точки зрения стоимость при 2% смеси больше, чем при 1 % смеси.

Замечено, что радиус относительной жесткости увеличивается с увеличением содержания фибры в бетонной смеси до 1%, т.к. с увеличением содержания фибры модуль упругости смеси увеличивается.

Исследования подчеркивают, что волокнистая арматура в дорожном основании, связанном цементом, может улучшить эксплуатационные характеристики за счет увеличения усталостной долговечности основания и повышения сопротивления отражающему растрескиванию асфальта. [8, 9] Исследования также установили, что свойства закаленного сталефибробетона, такие как прочность на изгиб, значительно лучше, чем у обычного фибробетона.

Таким образом, использование стальной фибры для эффективной конструкции дорожной одежды можно рекомендовать положительно. [10]

#### **Библиографический список:**

1. Елифанов, Ю.А. О некоторых результатах исследования влияния дорожной сети на решение проблемы обеспечения безопасности на дорогах России / Ю.А. Елифанов // Вестник университета. - 2012. - № 4. - С. 24-29.
2. Степаненко, А.А. Деформации и разрушения покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог / А.А. Степаненко // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: Межвузовский сборник научных статей (с международным участием). - Самара, 2019. - С. 208-212.
3. Сайдаминов, И.А. Факторы, влияющие на процессы разрушения дорожных покрытий нежесткого типа в условиях высокогорья / И.А. Сайдаминов, А.Т. Бердиев, Р.Э. Зиёев, Б.А. Бердиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - 2019. - № 1 (45). - С. 204-207.
4. Жалко, М.Е. Неудовлетворительное состояние водоотвода, как причина разрушения дорожного покрытия / М.Е. Жалко // Стратегия устойчивого развития регионов России. - 2013. - № 15. - С. 153-157.
5. Иванова, Л.А. Композиционные составы для локализации очагов разрушения дорожного покрытия / Л.А. Иванова, В.А. Шевченко, В.П. Киселев. - Красноярск, 2012. - 356 с.
11. Красиков, О.А. Весенние деформации и разрушения дорожных покрытий / О.А. Красиков // Автомобильные дороги. - 2022. - № 6 (1087). - С. 82-85.
6. Крикунова, Т.М. Реализация государственных программ: использование бюджетных средств, направляемых на объекты капитального и дорожного строительства / Т.М. Крикунова // Вестник АКСОР. - 2017. - № 3-4 (43). - С. 227-230.
7. Ионов, В.В. Особенности организации и проведения внешнего финансового контроля за использованием бюджетных средств, направляемых на объекты капитального и дорожного строительства при реализации государственных программ / В.В. Ионов // Вестник АКСОР. - 2017. - № 3-4 (43). - С. 201-208.
8. Куцури Г.Н. Риск-ориентированный подход к государственному финансированию транспорта и дорожного строительства / Г.Н. Куцури // Финансовый бизнес. - 2021. - № 6 (216). - С. 158-164.
9. Старкова, О.Я. Государственная поддержка строительства сельских дорог / О.Я. Старкова // Экономика: экономика и сельское хозяйство. - 2018. - № 3 (27). - С. 15-22.
10. Лонцих, П.А. Актуальные тенденции строительной отрасли Иркутской области / П.А. Лонцих, В.А. Москвитина, Е.Ю. Головина, Ю.В. Кибирев // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. - 2019. - Т. 9. - № 1 (28). - С. 10-25.

## АКТИВАЦИЯ ВЯЖУЩИХ В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

**Р.А. Ибрагимов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Е.В. Королев**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup>*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы активации вяжущих в высокоэнергетических устройствах. Для описания процесса измельчения в таких устройствах разработаны теории Риттингера, Кика-Кирпичева, Бонда и др. Но в процессе измельчения на выход фракций также влияют составляющие: количество суперпластификатора, количество обрабатываемого материала, и мощность (энергия) измельчения. С этих позиций показано, что в аппаратах вихревого слоя происходят три стадии измельчения, перетекающие в процессе обработки одна в другую. При этом четкие границы между этими процессами отсутствуют, а состояние обрабатываемого материала (агломерация, аморфизация) перетекает из одной стадии в другую. Таким образом, рассмотренные стадии и состояния обрабатываемого вещества происходят параллельно, перекрывая друг друга.

**Ключевые слова:** механическая активация, размол, измельчение, энергия.

Механическая активация вяжущих для получения строительных материалов с высокими физико-механическими характеристиками является хорошо известным методом. Так, систематические исследования активации в области механохимии были зарегистрированы ещё в конце 19 века [1]. Считается, что W. Ostwald впервые ввел термин «механохимии» в научную литературу в 1919 году [2]. W. Ostwald впервые рассматривал различные скорости химических реакций при процессах механоактивации.

Одним из пионеров в механохимии является американский химик М. Carry-Lea, установивший специфику и отличие механохимических процессов от термических [3]. В России одним из первых ученых, занимающийся механоактивацией строительных материалов был И.А. Хинт, сконструировавший первые дезинтеграторы [4].

Анализ многочисленных исследований [5-8], посвященных вопросам механохимии и механоактивации свидетельствует о том, что практически большинство их них посвящено оптимизации стадии измельчения с целью получения максимальной поверхности твердого вещества при минимальных энергозатратах, при этом, фазовые реакции при механоактивации сильно зависят от устройств, применяемых для этих целей, и процессов в них протекающих. Именно параметры измельчения и протекающие при этом процессы в измельчаемых аппаратах являются ключевыми. Они могут быть использованы для управления механохимическими реакциями.

Одним из эффективных аппаратов для диспергирования и перемешивания являются аппараты вихревого слоя, представляющие собою немагнитную трубу, вокруг которой имеется обмотка индуктора, в немагнитной трубе находится

измельчаемый материал и ферромагнитные элементы, приводимые в движение вращающимся электромагнитным полем.

В литературе отсутствуют систематические сведения, обобщающие процессы, происходящие при измельчении в аппаратах вихревого слоя (АВС). При этом такие параметры АВС как высокая энергонапряженность, высокая плотность энергии, непрерывная подача материала, регулировка частоты вращения электромагнитного поля, количество измельчаемых частиц и др. делают их перспективными для получения высококачественных материалов.

Определено оптимальное время измельчения минеральных вяжущих в АВС, кинетика изменения удельной поверхности вяжущих в процессе активации [9-10]. Однако, научный и практический интерес представляют процессы распределения частиц по размерам различной размолотоспособности бинарных систем при их совместной активации. Так, введение суперпластификатора в систему «портландцемента – зола» при помоле способствует росту размолотоспособности данной системы, причем с увеличением дозировки суперпластификатора с 1 до 3 % коэффициент размолотоспособности увеличивается на 27 %, а повышение доли клинкера с 30 до 70 % от общей массы повышает коэффициент размолотоспособности в 1,65 раза [11-12].

В процессе измельчения наступает момент, когда средний диаметр частиц не уменьшается даже при увеличении времени помола. Hüttig описывает этот процесс как равновесное состояние измельчения. Tanaka описывает этот процесс следующим уравнением:

$$S = S_{\infty}(1 - e^{-kW_z}) \quad (1)$$

где  $S_{\infty}$  – удельная поверхность в состоянии равновесия;  $W_z$  – вклад энергии на измельчение;  $k$  – постоянная, зависящая от материала.

Аналогичную формулу предложил Г.С. Ходаков, но вместо расходов на энергию измельчения он вводит параметр  $t$  – время измельчения:

$$S = S_m(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

где  $S_m$  – максимальная удельная поверхность.

В работе [13] предложена функция, описывающая изменение удельной поверхности смеси при помоле:

$$S_{\tau} = S_0 + \alpha(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}) \quad (3)$$

где  $\tau$  – время измельчения,  $\tau_0$  – эффективное время изменения интенсивности помола, при котором скорость увеличения удельной поверхности снижается в  $e$  (2,72) раз.

Однако для достижения таких структурных изменений обычные мельницы с низкой энергонапряженностью не подходят, поэтому необходимо применять мельницы с высокой энергонапряженностью, такие как планетарные шаровые мельницы, вибрационные мельницы или аппараты вихревого слоя, чтобы обеспечить вышеуказанные эффекты.

В процессе активации в АВС происходит уменьшение размера измельчаемых частиц, а удельная площадь поверхности увеличивается, при этом



накапливается свободная энергия Гиббса в системе макрочастиц. В тоже время процесс механической активации приводит к изменению характеристик кристаллической структуры вещества. Корреляция этих изменений может быть описана уравнением:

$$k_0 = a + b\left(\frac{S_{BET}}{C_{XRD}}\right) \quad (4)$$

где  $k_0$  – начальная константа скорости изменения реакции;  $S_{BET}$  – удельная площадь поверхности, определенная методом БЭТ;  $C_{XRD}$  – степень кристалличности после механической активации;  $a$  и  $b$  – коэффициенты.

На основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований можно выделить несколько состояний твердого вещества при механической активации в АВС:

а) механическое диспергирование (уменьшение размера), когда более высокая реакционная способность материала достигается за счет увеличения удельной площади поверхности (рисунок 1 а);

б) поверхностная активация, когда происходят механохимические реакции на поверхности частиц (рисунок 1 б);

в) механохимическая активация, когда механохимические реакции происходят во всем объеме частицы (Рисунок 1 в).

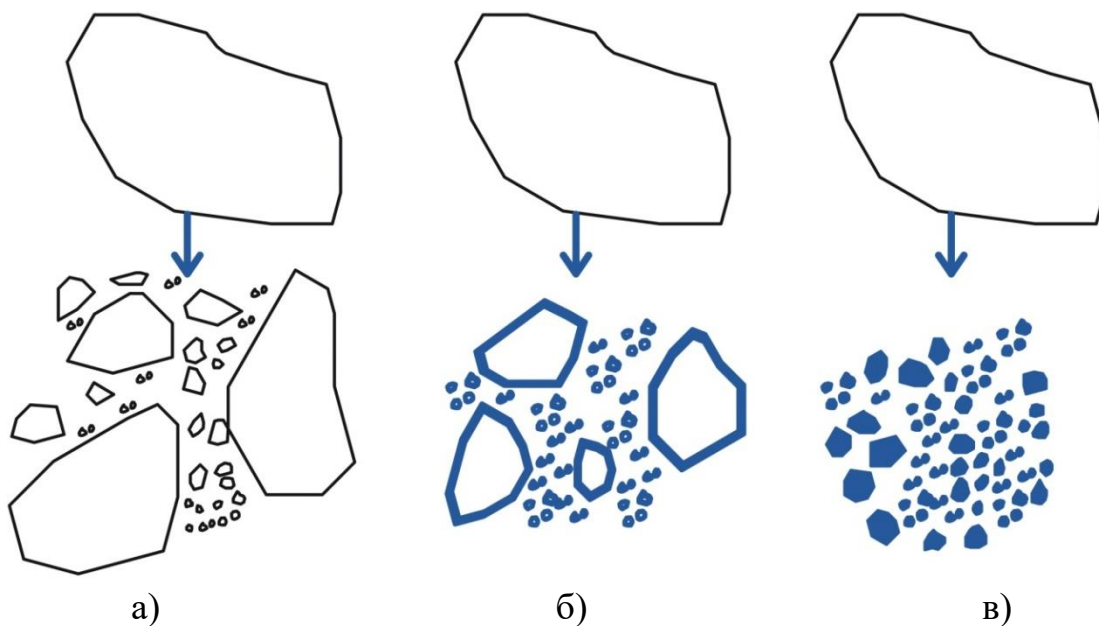


Рисунок 1. Схематическое изображение различных состояний поверхности после механической активации: а) механическая диспергация; б) поверхностная активация; в) механохимическая активация

Так как процесс механической активации в АВС происходит непрерывно можно заключить, что три рассматриваемых стадии (Риттингера, агрегация и агломерация) и три состояния при механической активации (механическое диспергирование, активация поверхности и механохимическая активация) происходят параллельно, перекрывая друг друга.

### Библиографический список:

1. Takacs, L., 2013. The historical development of mechanochemistry. *Chem. Soc. Rev.* 42, 7649–7659.
2. Ostwald, W., Leipzig 1919. Die chemische Literatur und die Organisation der Wissenschaft. *Handbuch der allgemeinen Chemie 1 Akademische Verlagsgesellschaft.*
3. L.Takacs. *J. Mater. Sci.*, 39, 4987 (2004)
4. J.Hint. *Silikattechnik*, 21, 116 (1970)
5. Tianyu Xie, Phillip Visintin, Xinyu Zhao, Rebecca Gravina. Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach. *Construction and Building Materials*, Volume 256, 2020, 119380
6. Thiessen, P.A., Meyer, K., Heinicke, G., 1967. *Grundlagen der Tribochemie.* Akademie-Verlag, Berlin.
7. Tkačova, K., Balaž, P., 1988. Structural and temperaturesensitivity of leaching of chalcopyrite with iron (III) sulphate. *Hydrometallurgy* 21, 103–112.
8. Boldyrev, V.V., 2006. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. *Russ. Chem. Rev.* 75.
9. Ibragimov, R.A., Korolev, E.V., Kayumov, R.A., Deberdeev, T.R., Leksin, V.V., Sprince, A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering.* 2018. 82(6). Pp. 191–198. DOI: 10.18720/MCE.82.17
10. R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, T.R. Deberdeev, V.V. Leksin. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses / *ZKG International* 5/2018, pp. 28-35
11. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // *Бетон и железобетон.* – 2020. – № 1(601). – С. 15-28.
12. В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, Н.М. Качурин, Г.В. Стась. Параметры активации золы уноса в качестве вяжущего при изготовлении бетонов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330, № 8. – С. 173-179. – DOI 10.18799/24131830/2019/8/2223.
13. Хохряков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности. Возможности и перспективы применения в строительных материалах // *Строительные материалы.* – 2022. – № 1-2. – С. 123-133. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ВУЛКАНИЧЕСКОГО ШЛАКА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОНСТРУКЦИОННОМ САМОУПЛОТНЯЮЩЕМся БЕТОНЕ

П.С. Калмакова<sup>1</sup>, аспирант

В.К. Веселов<sup>1</sup>, студент

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В статье представлены данные исследования фазового и химического состава вулканического шлака Камчатки. В настоящее время на Дальнем Востоке имеется потребность в высококачественных строительных материалах. На территории Дальневосточного региона имеются значительные запасы сырья для производства легких бетонов на пористых заполнителях, включающих вулканический шлак, пемзу и туф. Перспективным направлением в данном регионе будет развитие технологии конструкционных самоуплотняющихся бетонов с использованием местных пористых заполнителей вулканического происхождения. Пористые заполнители Камчатки сочетают в себе низкую стоимость в виду широкого распространения и высокие теплозащитные свойства, они будут являться наиболее дешевым и сравнительно мало энергоёмким строительным материалом, а их применение в самоуплотняющемся бетоне позволит улучшить показатели экономической эффективности за счет уменьшения стоимости бетонных работ и сокращения сроков строительства.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, вулканический шлак, портландцемент, гранулометрический состав, пористые заполнители, легкий бетон

Реализация приоритетных государственных программ включает, в том числе, развитие гражданского и жилищного строительства. Особое значение имеет выполнение данной программы в Дальневосточном регионе, что связано с ростом стратегической роли нашей страны. Регион испытывает дефицит благоустроенного жилья, строительство которого в 90-х годах прошлого века резко сократилось. В настоящее время в регионе возросли темпы строительства, которые повысили спрос на строительные материалы. На территории Дальневосточного региона имеются значительные запасы сырья для производства легких бетонов на пористых заполнителях, включающих вулканический шлак, пемзу и туф.

Перспективным является разработка самоуплотняющихся легких бетонов бетоны с применением природных пористых заполнителей вулканического происхождения, которые являются наиболее дешевым и сравнительно мало энергоёмким строительным материалом с высокими теплозащитными свойствами [2]. Самоуплотняющиеся бетоны на пористом заполнителе природного происхождения будут иметь улучшенные показатели экономической эффективности за счет уменьшения стоимости бетонных работ и сокращения сроков строительства. В регионе Дальнего Востока использование широко применяемых компонентов бетонной смеси в виде гранитного щебня и речного песка является высокочрезвычайно затратным. Данная проблема останавливает

развитие монолитного строительства, а также возможность снижения стоимости строительства и возможности возведения уникальных зданий и сооружений.

В настоящее время актуальным является, по нашему мнению, проведение исследований в направлении расширения области применения природных пористых заполнителей и отходов каменных карьеров [3, 4, 5]. Результаты анализа многочисленных зарубежных исследований показывают, что применение пористых заполнителей в местах их месторождений значительно эффективнее искусственных. Удельные капитальные вложения на производство 1 м<sup>3</sup> естественных заполнителей почти в 6 раз меньше, чем на производство искусственных [6].

Получение легких высокопрочных самоуплотняющихся бетонов позволит увеличить этажность зданий, возводимых в сейсмоактивных регионах. Для снижения веса конструкции наиболее целесообразным будет использование пористых заполнителей, месторождения которых имеются в значительном количестве на Дальнем Востоке. Целью данного исследования является изучение гранулометрического, фазового и химического состава вулканического шлака Камчатского края.

#### Материалы и методы

На рисунке 1 представлен рентгенофазовый анализ образца вулканического шлака Камчатки, полученного рентгенодифрактометрическим методом. Химический состав вулканического шлака получен с использованием метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

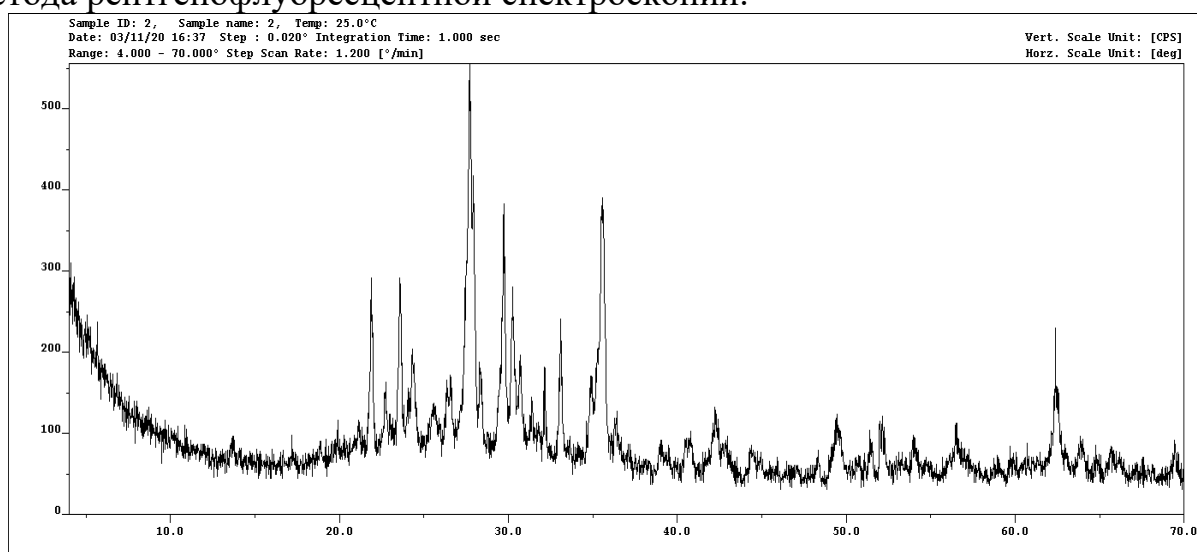


Рисунок 1. Рентгенодифрактограмма вулканического шлака

Таблица 1. Химический состав вулканического шлака.

Соединение	Содержание, %
SiO <sub>2</sub>	49,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,8
CaO	6,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,42
MgO	4,53
Na <sub>2</sub> O	4,62

TiO <sub>2</sub>	1,92
K <sub>2</sub> O	2,92
SO <sub>3</sub>	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,07
MnO	0,18
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,008
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,012
NiO	0,007
ZnO	0,013

Физико-химические методы исследования позволяют сделать вывод, что вулканический шлак представлен минералами анортитом CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> в количестве 58,3%; нефелином NaAlSiO<sub>4</sub> в количестве 2,4%; нематитом Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в количестве 7,4%; авгитом (Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub> в количестве 21,9% и аморфной фазой в количестве 10%.

В таблице 2 представлен гранулометрический состав вулканического шлака Камчатки.

Таблица 2. Гранулометрический состав вулканического шлака

№ сита, мм	Масса, г
20	7,1
10	86,5
5	467,9
2,5	607,1
1,25	419,2
0,63	242,3
0,315	73,7
0,150	26,9
<0,150	71,5
Общая масса	2000

Из полученных данных можно сделать вывод о пригодности гранулометрического состава шлака для его использования в качестве крупного заполнителя для самоуплотняющегося бетона.

#### Библиографический список:

1. Трунов П.В., Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Потапов В.В., Шадский Е.Е. К вопросу об использовании вулканического сырья Камчатки в качестве минеральной добавки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова 2014, №4.
2. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов Б.Н. Использование золы и топливных шлаков в производстве строительных материалов. Москва: Стройиздат. 1984, 255 с.
3. Oksana Larsen, Svetlana V. Samchenko, Anton Bakhrakh, Artyom Polozov. Evaluation of Pozzolanic Activity of Mineral Additives for Hydraulic Concrete // July 2022. Solid State Phenomena (Volume 334). <https://doi.org/10.4028/p-tur4f1.202-208>
4. Ларсен О. А., Александрова О. В., Наруть В. В., Полозов А. А., Бахрах А. М. Исследование свойств активных минеральных добавок для применения в гидротехническом строительстве. Вестник БГТУ. 2020. №8. С. 8-17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-8-17
5. Larsen O A, Bulgakov B I, Gafarov R M, and Melihov D O. Influence of light aggregate on structure formation of lightweight concrete. Journal of Physics: Conference Series 1614 (2020) 012008 doi:10.1088/1742-6596/1614/1/012008

6. Youssef Y. W., Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Pozzolanic activity assessment of some mineral additives used in roller compacted concrete for dam construction. Proceedings of XX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, 30 June – 6 July, Volume 19 “Nano, Bio and Space: Technologies for Sustainable Future”, Issue 6.2, p. 415-426.

## УСИЛЕНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ УГЛЕВОЛОКНА

**С.В. Клюев**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

**Д.М. Лобов**<sup>2</sup>, старший преподаватель

<sup>1</sup>*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*

**Аннотация.** Рассматриваются результаты экспериментального исследования усиления деревянных балочных конструкций композитным материалом на основе углеволокна. Выполнено исследование изменения прочности и жесткости деревянных балочных конструкций при варьировании параметрами геометрии поперечного сечения и параметрами внешнего армирования. По результатам анализа испытаний усиленных деревянных балок и контрольных образцов, не подлежащих усилению, дана оценка прироста прочности и жесткости при применении системы усиления. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных по результат проведенного исследования.

**Ключевые слова:** углеродное волокно, углеродные композиционные материалы, усиление деревянных конструкций, внешнее армирование деревянных балок.

В процессе эксплуатации деревянных конструкций зданий и сооружений возникает необходимость усиления и восстановления несущей способности. В настоящем исследовании рассматривается метод усиления деревянных изгибаемых элементов с применением композитного материала в качестве элемента внешнего армирования. Усиление деревянных балочных конструкций осуществлялось на действие изгибающего момента с нанесением композитного материала на нижнюю грань поперечного сечения, зону максимальных растягивающих напряжений.

В настоящее время системы внешнего армирования композитными материалами активно используются с целью усиления или восстановления несущей способности как железобетонных, так и деревянных конструкций. Вопросы применения композитного материала при усилении деревянных конструкций отражены в исследованиях как зарубежных авторов [1-6], так и отечественных авторов [7-12]. В работах приводится обзор методов усиления деревянных конструкций композитными материалами, обосновывается эффективность и целесообразность применения данных методов усиления.

В рамках изучения прочности и жесткости деревянных изгибаемых элементов, усиленных композитным материалом, было выполнено экспериментальное исследование. Исследование проводилось на моделях деревянных балок на действие статического изгиба. В качестве элемента внешнего армирования применялся композитный материал на основе углеволокна. При назначении параметров моделям деревянных балок осуществлялось варьированием геометрическими размерами образцов, а также параметрами внешнего армирования композитным материалом. По результатам было испытано 5 серий балок с различным соотношением высоты поперечного

сечения к пролету и различным коэффициентом армирования. Каждая серия включала в себя как усиленные образцы, так и контрольные образцы балок, не подлежащие усилению. Геометрические параметры образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры образцов

Серия	Геометрические размеры, мм			Отношение, h/l	Кол-во слоев усиления	Коэффициент армирования, $\mu$ , %
	b	h	l			
Б1	50	150	1800	1/12	2 слоя	1.87
Б2	40	100	1800	1/18	1 слой	1.40
Б3	50	150	1800	1/12	1 слой	0.93
Б4	50	125	1800	1/14.4	1 слой	1.12
Б5	50	125	1800	1/14.4	2 слоя	2.24

Образцы изготавливались из досок цельной древесины сосны с влажностью 10-12%. Измерение влажности осуществлялось игольчатым электровлагомером ИВ-1-1. В качестве элемента усиления внешнего армирования использовались ламели MBrace® Lam на основе углеродных волокон приклеиваемые к нижней растянутой грани деревянного элемента с использованием двухкомпонентного клея Mbrace® Laminate Adhesive на эпоксидной основе производства химического концерна BASF.

Расчетная схема испытываемых моделей деревянных балок была принята в виде однопролетной шарнирноопертой балки с двухточечной схемой приложения нагрузки. В процессе проведения испытаний нагрузка на образцы прикладывалась ступенями, величина нагрузки ступени принималась из соображений, чтобы общее количество ступеней до наступления момента разрушения составляло 10 штук. Скорость приложения нагрузки устанавливалась, чтобы время приложения нагрузки составляло 1 минуту, каждая ступень нагрузки выдерживалась в течение 5 минут. На каждой ступени действия нагрузки с использованием прогибомеров Максимова с ценой деления 0,01 мм фиксировались значения линейных перемещений в середине пролета балки, а также в точках приложения нагрузки. Деформации смятия на опорных участках измерялись с использованием индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм. В середине пролета балки, на участке зоны чистого изгиба производилось измерение осевых деформаций по высоте поперечного сечения в восьми точках с использованием средств тензометрии. В качестве регистрирующего устройства использовалась тензостанция ZET 017-T8, подключение тензорезисторов осуществлялось через мост Уитсона по полумостовой схеме. Тензорезисторы приклеивались на боковые поверхности балок, тензорезисторы расположенные на одном уровне по высоте противоположных граней объединялись в один регистрирующий канал.

Схема испытательного стенда деревянных балок представлена на рисунке 1. Фотография балки в процессе проведения испытаний приведена на рисунке 2.



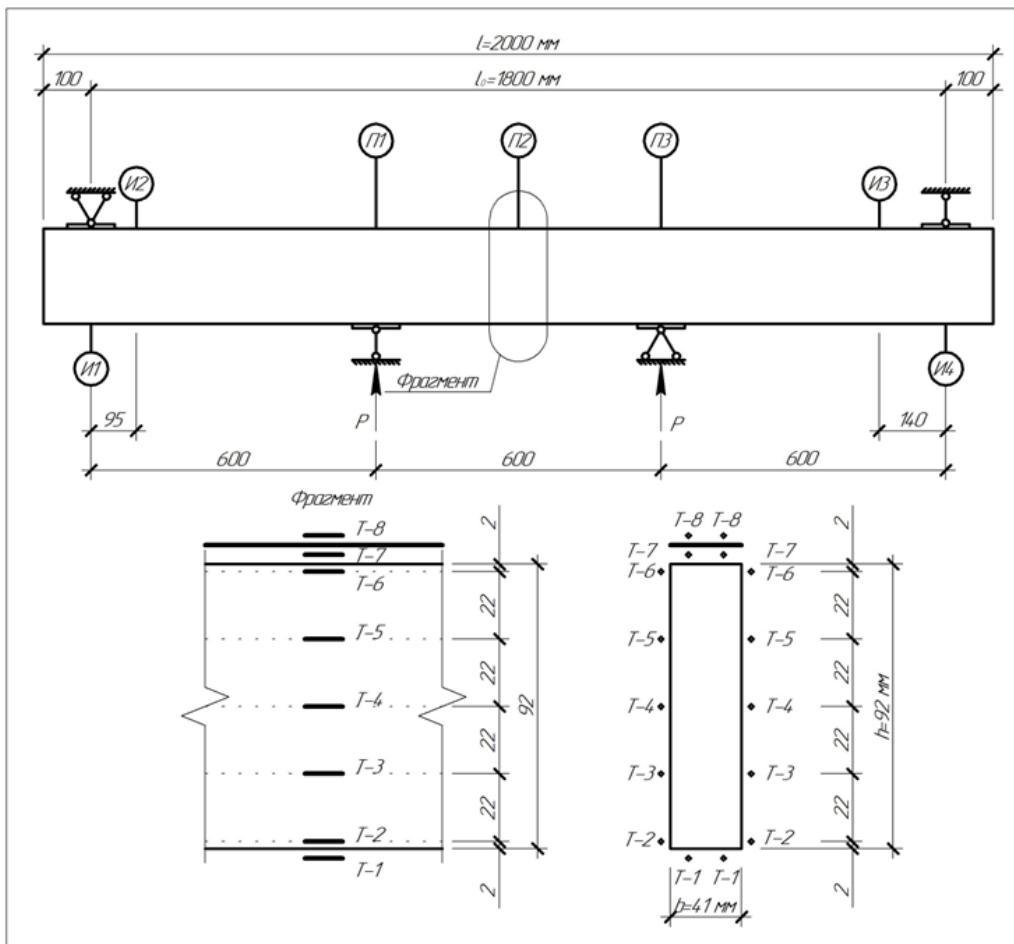


Рисунок 1. Схема испытательного стенда

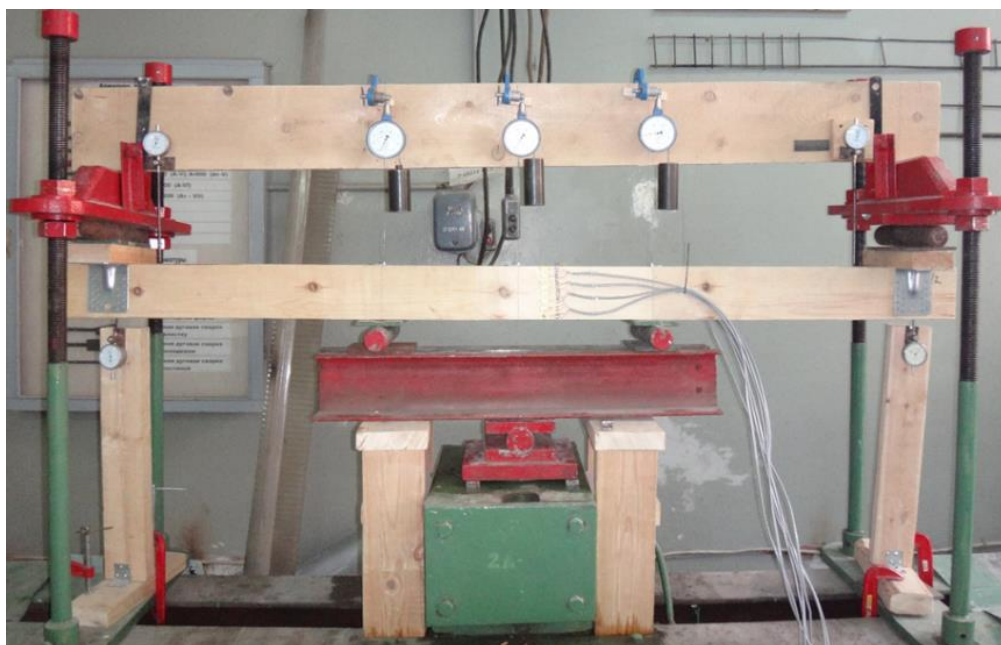


Рисунок 2. Модель балки в процессе проведения испытаний

Данные, полученные в процессе проведения испытаний, обрабатывались. Для получения прогибов из значений линейных перемещений вычитались значения деформаций смятия на опоре. По результатам испытаний были получены следующие данные:

- значения прогибов усиленных балок и контрольных неусиленных образцов;

- по шкале силоизмерителя было зафиксировано значение разрушающей нагрузки усиленных балок и контрольных неусиленных образцов.

Данные, полученные по результатам испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний

Серия	Наличие системы усиления	Предельная разрушающая нагрузка, Р, кН	Предельный разрушающий момент, М, кН*м	Прирост прочности, %	Прогиб, f, мм	Прирост жесткости, %
Б1	усиленный	21,8	13,1	45,3	20,3	25,0
	без усиления	15,0	9,0		27,1	
Б2	усиленный	8,0	4,8	33,3	18,2	24,5
	без усиления	6,0	3,6		24,1	
Б3	усиленный	20,3	12,2	35,3	13,2	27,7
	без усиления	15,0	9,0		18,3	
Б4	усиленный	21,8	13,1	32,1	14,5	34,3
	без усиления	16,5	9,9		22,1	
Б5	усиленный	18,8	11,3	25,3	15,1	24,8
	без усиления	15,0	9,0		20,1	

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

- прочность деревянных изгибаемых элементов, усиленных с применением композитного материала на основе углеродного волокна сравнительно выше прочности не усиленных образцов, и требует специальной методики расчета;

- жесткость деревянных изгибаемых элементов, усиленных с применением композитного материала на основе углеродного волокна сравнительно выше жесткости не усиленных образцов, и требует специальной методики расчета

- разрушение усиленных образцов происходит по сжатой зоне древесины и имеет пластический характер в сравнении с не усиленными образцами;

- система внешнего армирования снижает влияние естественных пороков строения древесины на работу деревянных балочных конструкций под нагрузкой.

#### Библиографический список:

1. Lacroix, D., Doudak, G. Towards Enhancing the Post-Peak Performance of Glued-Laminated Timber Beams Using Multi-Directional Fibre Reinforced Polymers/ D. Lacroix, G. Doudak // Engineering Structures. 2020. № 215. P. 110680.

2. Donadon, B. F., Mascia, N.T., Vilela, R., Trautwein, L.M. Experimental Investigation of Glued-Laminated Timber Beams with Vectran-FRP Reinforcement / B.F. Donadon, N.T. Mascia, R. Vilela, L.M. Trautwein // *Engineering Structures*. 2020. № 202. P. 109818.
3. Lengyel, K. S. A. Strengthening Timber Structural Members with CFRP and GFRP / K. S. A. Lengyel // *Polymers*. 2022. № 14(12). P. 2381.
4. Vetter, Y., Stakheiko, M., Chen, H., Siciliano, S., Lacroix, D. Analytical Investigation of Wood Material Properties on the Flexural Behaviour of FRP Reinforced Glulam / Y. Vetter, M. Stakheiko, H. Chen, S. Siciliano, D. Lacroix // *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference*. 2021. P. 303-315.
5. Thongchom, C., Van, C.N., Lai, V.Q., Keawsawasvong, S., Mathuros, A. Flexural Performance of Timber Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Rods / C. Thongchom, C.N. Van, V.Q. Lai, S. Keawsawasvong, A. Mathuros // *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development*. 2020. P. 201-209.
6. Guo, N., Yang, C., Li, L., Li, G., Zhao, Y.: Experimental Study on Flexural Performance of Regulated Reinforced Glulam Beam after Long-Term Loading / N. Guo, C. Yang, L. Li, G. Li, Y. Zhao // *Sustainability*. 2021. № 13 (10). P. 5556.
7. Инжутов, И.С., Жаданов, В.И., Бахарева, Н.А., Мельников, П.П. Исследование напряженно-деформированного состояния в узле деревянной клееной большепролетной конструкции с использованием углеволокна / И.С. Инжутов, В.И. Жаданов, Н.А. Бахарева, П.П. Мельников // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 11. С. 12-17.
8. Линьков, Н.В. Статистический анализ деформативности соединения "КМ-обклейка" на основе стеклоткани полотняного переплетения / Н.В. Линьков // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 2(380). С. 169-174.
9. Griбанov, A.S., Roshchina, S.I., Popova, M.V., Sergeev, M.S. Laminar Polymer Composites for Wooden Structures / A.S. Griбанov, S.I. Roshchina, M.V. Popova, M.S. Sergeev // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 7(83). С. 3-11.
10. Roshchina, S., Griбанov, A., Lukin, M., Chibrikin, D., Shunqi, M. Investigation of the Stress–Strain State of Wooden Beams with Rational Reinforcement with Composite Materials / S. Roshchina, A. Griбанov, M. Lukin, D. Chibrikin, M. Shunqi // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. № 182. С. 475-483.
11. Koshcheev, A., Roshchina, S., Lukin, M., Vatin, N. Wood and Steel Rope: A Rational Combination in Floor Beams. / A. Koshcheev, S. Roshchina, M. Lukin, N. Vatin // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. № 182. С. 447-462.
12. Рощина, С.И., Лукин, М.В., Лабудин, Б.В., Мелехов, В.И. Расчет композитных деревоклееных балок на основе применения инженерного метода / С.И. Рощина, М.В. Лукин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2012. № 3(327). С. 90-94.

## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕМЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВП.

Н.С. Ковалев<sup>1</sup>

А.П. Назарчук<sup>1</sup>

С.И. Горохов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет

**Аннотация.** В современном строительстве очень развито стилистика применения одно и того же строительного изделия как внутри, так и снаружи здания. Но не все строительные изделия могут сохранять свою структуру, твердость и прочность при изменении условий эксплуатации. Одним из самых неблагоприятных воздействий среды является попеременное замораживание-оттаивание строительного изделия. Для получения данных о том, как поведет себя материал в новых условиях эксплуатации, необходимо провести ряд экспериментов, т. е. воссоздать максимально приближенные к реальным условия эксплуатации.

**Ключевые слова:** древесноволокнистая плита, эксперимент, попеременное замораживание-оттаивание, твердость, прочность, структура.

Древесноволокнистая плита (ДВП) – листовый материал, который изготавливается с помощью метода горячего прессования или с помощью метода сушки ковра, состоящего из древесных волокон, с введением при должной необходимости специальных добавок или связующих (Рисунок 1.) [1].



Рисунок 1. Древесноволокнистая плита (ДВП)

Область применения ДВП в строительстве очень обширна. Данное изделие применяют не только при проведении внутренних и внешних строительных работ, но и при возведении домов заводского изготовления, а также малоэтажных строений. Также плиты из ДВП используются в качестве листового материала для проведения внешних и внутренних отделочных работ: обшивка бытовок, облицовка внутренних и наружных стен домов, заполнения пустот в дверях и т.д. Также известно о практике облицовки мест, предназначенных для общественного посещения [2, 3].

Не смотря на разнообразие методов применения, ДВП, как и любой другой материал для наружного применения, испытывает воздействие окружающей

среды. Одним из таких воздействий является попеременное замораживания-оттаивание. Данный процесс воздействует на структуру и механические свойства древесноволокнистых плит.

Для получения данных о влиянии попеременного замораживания-оттаивания на механические свойства, а именно, прочность и твердость древесноволокнистой плиты по Бринеллю по методу невозстановленного отпечатка, необходимо провести испытания. Суть испытаний заключается в помещении образцов на определенное количество циклов попеременного замораживания-оттаивания: от 0 до 30, через каждые 5 циклов. Один цикл попеременного замораживания-оттаивания для ДВП проводился по схеме составляет 2-2-4 часа. При данной схеме продолжительность замачивания и замораживания образцов составляет по 2 часа, а высушивание – 4 часа. Для получения одной точки в идентичных условиях испытывалось не менее 6 образцов, полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке. После окончания циклов образцы подвергались испытаниям на прочность и на твердость [4...6].

Для испытания на прочность образцов при поперечном изгибе использовался шестипозиционный стенд (рисунок 2). Схема нагружения образцов – балка на шарнирных опорах со сосредоточенной нагрузкой по середине.

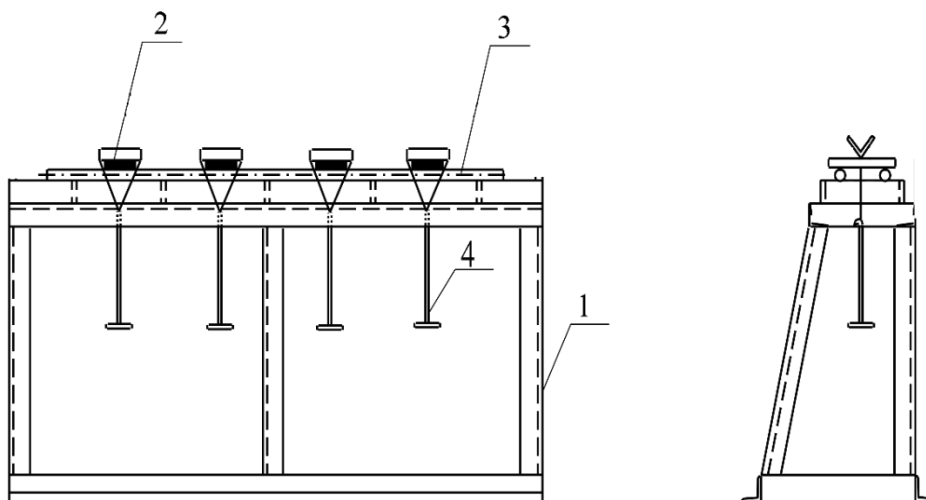


Рисунок 2. Стенд для испытаний на поперечный изгиб

Разрушающее напряжение определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{1,5P \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

где P – разрушающая нагрузка, кг;

l – расчетный пролет, равный 10 см;

b – ширина поперечного сечения образца;

h – длина поперечного сечения образца.

Результаты воздействия процесса попеременное замораживания-оттаивание на прочностные показатели ДВП обозначены на графике (рисунок 3).

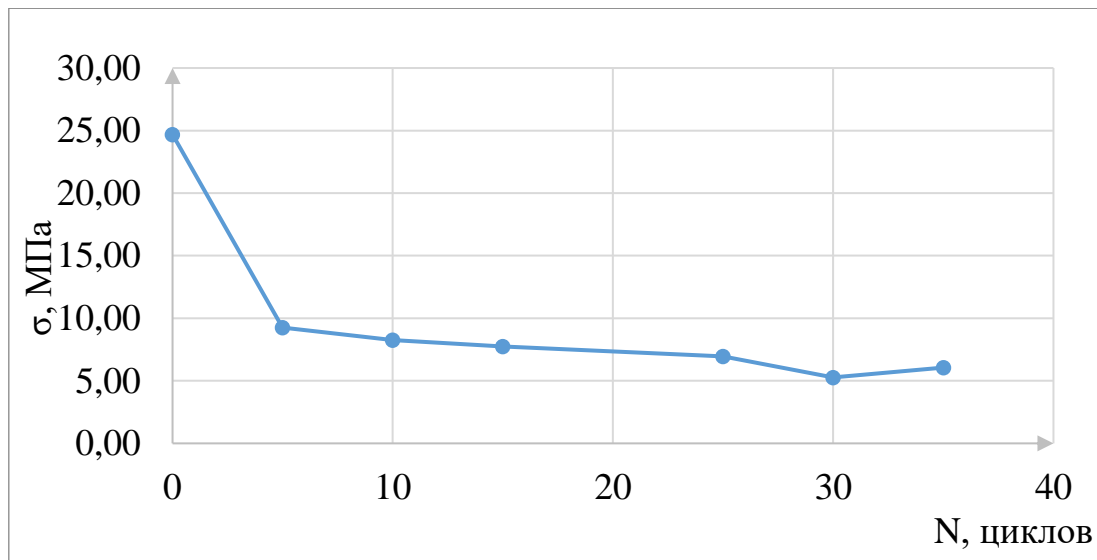


Рисунок 3. График зависимости изменения значений прочности ДВП от количества циклов попеременного замораживания-оттаивания

Проанализировав график (рисунок 3), можно сделать вывод о том, что основное снижение прочности более чем в 2,5 раза наблюдается в первые 5 циклов, после чего значение твердости стабилизируется. Это говорит о том, что прочность материала меняется при самых первых воздействиях попеременного замораживания-оттаивания, а вместе с тем, меняется и его структура. После 30 циклов попеременного замораживания-оттаивания прочность ДВП снижается в 3 раз [7, 8].

Значение твердости по Бринеллю по методу невосстановленного отпечатка определялась с помощью формулы:

$$HBW = \frac{F}{\pi Dh} \quad (2)$$

где F – приложенная нагрузка, Н;

D – диаметр шарика, мм;

h – глубина внедрения индентора, мм.

График зависимости в координатах N (кол-во) – HBW (МПа) представлен на рисунке 4.

Проанализировав график, можно сделать вывод о том, что изменения твердости по Бринеллю по методу невосстановленного отпечатка от количества циклов попеременного замораживания-оттаивания ДВП подчиняются логарифмической зависимости:  $HBW = -0,095 \ln(N) + 0,5143$ .

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что попеременное замораживание-оттаивание значительно влияет на твердость по Бринеллю древесноволокнистой плиты. Значительное снижение твердости, более чем в 4 раза, наблюдается в первые 5 циклов, после чего значения твердости начинают стабилизироваться. Это говорит о том, что показатель твердости материала меняется при самых первых воздействиях попеременного замораживания-оттаивания, а вместе с тем, меняется и его структура. После 30

циклов попеременного замораживания-оттаивания твердость ДВП снижается в 6 раз [9].

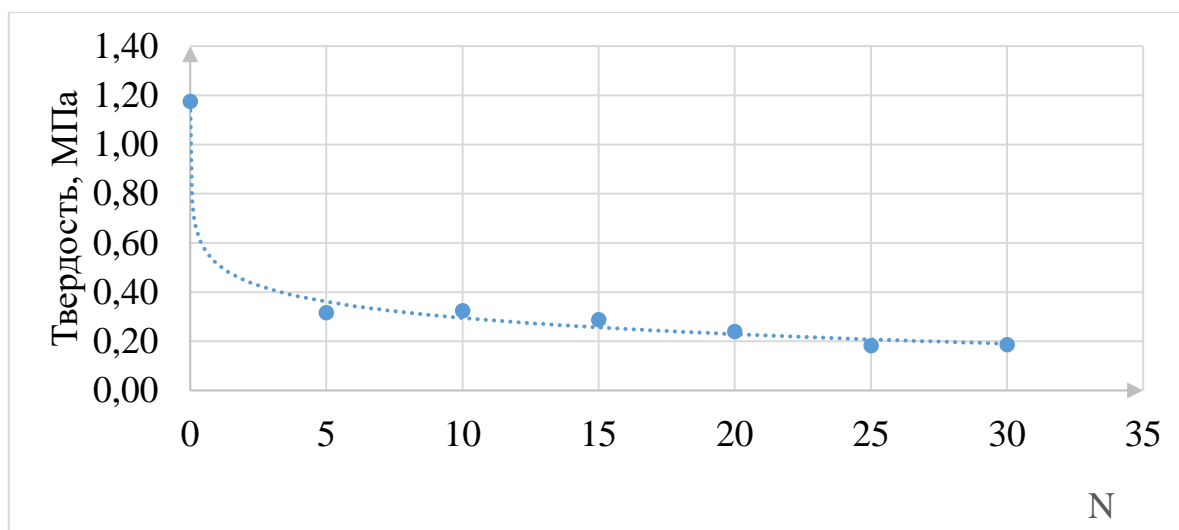
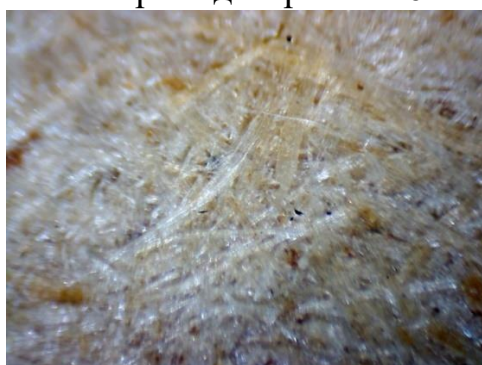


Рисунок 4. График зависимости изменения показателей твердости ДВП по Бринеллю по методу невосстановленного отпечатка от количества циклов попеременного замораживания-оттаивания

Изменения структуры образцов древесноволокнистых плит после циклов попеременного замораживания-оттаивания можно наблюдать с помощью микроскопа Микромед Эврика  $\times 40 - \times 1280$  при увеличении  $\times 10$  (Рисунок 5.).



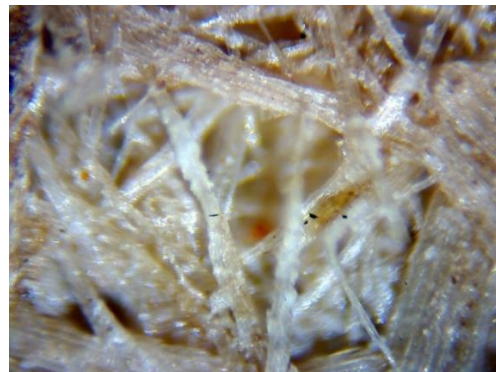
а)



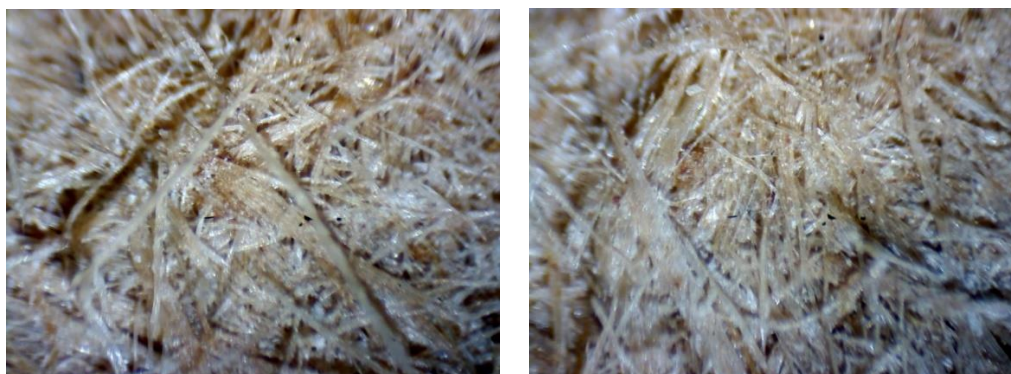
б)



в)

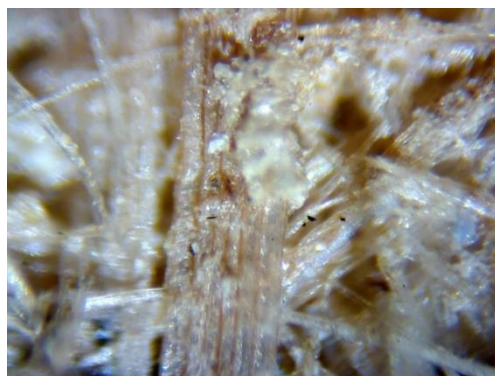


г)



д)

е)



ж)

Рисунок 5. Микроструктура материала после попеременного замораживания-оттаивания (а – без воздействия; б – после 5 циклов; в – после 10 циклов; г – после 15 циклов; д – после 20 циклов; е – после 25 циклов; ж – после 30 циклов)

Таким образом, проанализировав все фотографии структуры образцов ДВП до и после проведения испытаний можно сделать вывод, что с увеличением разрозненности структуры, в ходе проведения циклов попеременного замораживания-оттаивания, образцы уменьшают свою твердость. Отчетливее всего разрозненность можно заметить, сравнив 5а и 5ж рисунки, об этом свидетельствует появление большого количества темных пустот в структуре образцов.

Анализируя данный эксперимент, можно сделать вывод о том, что воздействие циклов попеременного замораживания-оттаивания негативно сказывается на целостности структуры ДВП, из-за чего происходит значительное уменьшение показателей твердости и прочности в первые 5 циклов. После первых 5 циклов показатели прочности и твердости стабилизируются, но остаются в несколько раз ниже, чем показатели исходных образцов, до проведения циклов попеременного замораживания-оттаивания. Это говорит о том, что ДВП не рекомендуется использовать внутри и снаружи конструкций, которые подвержены неблагоприятному воздействию окружающей среды, так как это может вызвать потерю механических свойств и разрушение данного материала.



### Библиографический список:

1. Киселева О.А. Прогнозирование работоспособности древесноволокнистых и древесностружечных композитов в строительных изделиях / Киселева О.А. // Дис... к-та техн. наук: 05.23.05. – Воронеж, 2003. – 205 с.
2. Ерофеев, А. В. Влияние атмосферных воздействий на твердость декоративных плит / А. В. Ерофеев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 1-2(46). – С. 14-17.
3. Бекетов, В. Д. Повышение эффективности производства древесноволокнистых плит / В. Д. Бекетов. — М.: Лесная промышленность, 1988. — 160 с.
4. Мамонтов, С. А. Анализ термического старения древесноволокнистых плит / С. А. Мамонтов // Состояние современной строительной науки: сб. науч. трудов X Междунар. науч.-практ. интернет-конф. — Украина, Полтава: Полтавский ЦНИИ, 2012.— С. 53—57.
5. Ерофеев, А. В. Влияние атмосферных воздействий на эксплуатационные свойства декоративной плиты / А. В. Ерофеев, В. П. Ярцев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 181-185. Ерофеев, А. В. Эксплуатационные характеристики декоративно-защитных плит покрытия зданий и сооружений / А. В. Ерофеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2011. – № 3. – С. 112-113.
6. Ерофеев, А. В. Влияние агрессивных сред на прочность декоративных плит / А. В. Ерофеев, В. П. Ярцев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – № 2(40). – С. 34-38.
7. Ерофеев, А. В. Влияние циклов замораживания-оттаивания на физико-механические характеристики декоративно-защитных плит покрытия на основе древесно-волоконистых плит / А. В. Ерофеев // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: Сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов / Тамбовский государственный технический университет. Том Выпуск II. – Тамбов : Издательство ГОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – С. 227-230.
8. Мамонтов, С. А. Тепловое и световое старение древесно-стружечных плит в контексте термофлуктуационного подхода к прогнозированию долговечности / С. А. Мамонтов, А. А. Мамонтов, О. А. Киселева // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 1(1037). – С. 62-64.
9. Ерофеев, А. В. Влияние атмосферных воздействий на прочность декоративных плит / А. В. Ерофеев, В. П. Ярцев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 1(50). – С. 114-118.

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОБОЧНОГО ФОСФОГИПСА В СТРОИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЯХ

Ю.Н. Коваль<sup>1</sup>, канд. биол. наук

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск

**Аннотация:** Переработка, утилизация и вторичное использование отходов производства является одной из основных проблем на сегодняшний момент. В статье рассмотрены актуальные проблемы вторичного применения побочного фосфогипса. Побочный фосфогипс возникает при производстве фосфорной кислоты. Как отход фосфогипс складывается и хранится на открытых полигонах. Автор приводит анализ научных публикаций по данному вопросу и примеры для вторичного применения фосфогипса в строительных целях.

**Ключевые слова:** фосфогипс, строительство, минеральные удобрения, побочный продукт.

Фосфогипс – это кристаллическое химическое вещество состоящие из сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Фосфогипс это кристаллический побочный продукт, который возникает при производстве фосфорной кислоты и минеральных удобрений. С 1 тонны отмытой кислотами фосфорной руды получается 2-6 тонн фосфогипса, который остается не задействован в дальнейшем технологическом процессе [1].

В природном фосфогипсе содержится большое количество включений – таких как естественные радионуклиды (радий, торий, уран), а также тяжелые металлы (мышьяк, стронций, кадмий), кремнезём. Как побочный продукт фосфогипс в основном состоит из гипса, но из-за кристаллизации в его составе присутствуют фосфат ионы ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и другие редкоземельные элементы [2].

Присутствие примесей усложняет его вторичную переработку. Чтобы удалить нежелательные примеси из побочного фосфогипса применяют введение нейтрализаторов, промывку большим количеством воды, метод термического разложения примесей. Из-за дороговизны его повторного использования фосфогипс долгосрочно хранят на открытых отвалах. В России крупнейшими производителями минеральных удобрений и фосфогипса являются такие предприятия как: «УралХим», «Апатит», «Еврохим». Мировые запасы фосфогипса в отвалах на сегодняшний день оцениваются в 200 млн тонн, и ежегодно количество данных отходов увеличивается на 14 млн. тонн. Изъятие и использование фосфогипса из отвалов составляет всего 0,2% в год.

Таким образом, как при технологическом процессе получения фосфогипса, так и при его хранении возникает ряд проблем – это его размещение.

К примеру, «Воскресенский» отвал фосфогипса. Отвал в высоту около 90 метров, занимает огромную площадь, которая с каждым годом увеличивается. Вопросы утилизации и вовлечения побочного фосфогипса в технологический процесс обсуждаются и рассматриваются со второй половины прошлого века. В связи, с чем является актуальным включение в использование побочного

фосфогипса. На данный момент является перспективным использование в строительстве отходов различных производств.

Цель: рассмотреть возможность применения фосфогипса для строительных целей

Рассматривая физико-химические особенности фосфогипса можно выделить, что вещество является полидисперсным, серо-белого цвета в виде пористого комка, разжижающимся при механических воздействиях и содержит в себе до 40% воды.

Можно отметить его две разновидности – это полугидрат ( $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Хотя свойства их отличаются, но тот и другой находятся в отвалах и образуется из фосфогипса. Возможность перехода фосфогипса в его химические разновидности определяются температурой окружающей среды и концентрацией фосфорной кислоты.

Отвальный фосфогипс при попадании влаги преобразуется в дигидрат сульфата кальция. Так дигидрат не обладает вяжущими свойствами, содержит меньшее количество воды, имеет более белый цвет, меньший фракционный состав.

Анализ литературных источников позволил выявить ряд направлений в строительном деле, где можно использовать фосфогипс. К примеру, использовать фосфогипс как регулятор сроков схватывания сульфоминеральных цементов, или в виде заменителей природных ресурсов при строительстве автомобильных дорог. То есть отход производства фосфорной кислоты вполне возможно применять в качестве компонента для дорожной одежды коробчатого типа [3].

Вывод: так как побочный фосфогипс практически готов для использования в строительстве - не требуется затраты для добычи из недр и дробления и переработки. Это обуславливает экономическую целесообразность применения побочного фосфогипса, так как он имеет более низкую стоимость, чем применение в строительстве природного сырья. При применении побочного фосфогипса можно сократить затраты при производстве строительного материала до 40%.

Таким образом применение побочного фосфогипса для строительства является целесообразным по экономическим и экологическим соображениям. Одним из сдерживающих факторов широкого применения фосфогипса в строительстве является отсутствие должного опыта и нормативной базы.

#### **Библиографический список:**

1. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Проблемы промышленной переработки фосфогипса в РФ, Состояние и перспективы. // Фундаментальные исследования. - 2015. - № 6-2. - С. 273-276
2. Игленкова, М.Г. Физико-химические закономерности получения композиционных материалов на основе фосфогипса: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук, Саратов. 2013
3. Солдаткин, С. И. К вопросу о возможности использования фосфогипса в дорожном строительстве / С. И. Солдаткин, А. Е. Хохлов // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2018. – № 93. – С. 73-76

## УГЛЕКИСЛОТНАЯ КОРРОЗИЯ ГИПСОЦЕМЕНТНОЗОЛЬНОГО КАМНЯ

**В.К. Козлова**<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, профессор

**А.В. Вольф**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Л.В. Завадская**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Е.В. Божок**<sup>1</sup>, ассистент

**Ю.С. Саркисов**<sup>3</sup>, д-р. техн. наук, профессор

**Д.А. Афанасьев**<sup>4</sup>, НОИСТ АОА «СИБУР»

<sup>1</sup>*Алтайский государственный технический университет им. Ползунова В.В.*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный строительный университет*

<sup>3</sup>*Томский государственный архитектурно - строительный университет*

**Аннотация.** Известно, что при воздействии на гипсоцементный камень углекислого газа и влаги прочность его прочность снижается в 2-3 раза. Среди всех видов коррозии особую роль играют углекислотная и сульфатная коррозия цементного камня. В работе изучено влияние карбонизационного воздействия на исследуемую систему, как при обычных условиях, так и в автоклавных условиях. Показано, что в присутствии карбонатсодержащих добавок коррозионные процессы резко замедлились, а продукты гидратации почти не изменились. На дериватограммах всех продуктов гидратации до карбонизации основным является эндотермический эффект при температуре 100-130<sup>0</sup>С, а после карбонизации эндоэффекты характеризуются значительным увеличением потери массы от 30 до 84 мг. В присутствии же карбоната кальция или доломита таких эффектов не наблюдается.

**Ключевые слова:** гипсоцементный камень, углекислотная, сульфатная коррозия, коррозия, прочность, карбонизация, этрингит и таумасит, карбонизационная стойкость, карбонатсодержащие добавки.

Изучение коррозионной стойкости затвердевшего гипсоцементного камня показали, что при воздействии на него основных эксплуатационных факторов в виде влаги и углекислого газа в составе воздуха происходит значительное разупрочнение материала. Процесс карбонизации снижает первоначальную прочность в 2-3 раза [1]. В присутствии добавок активного кремнезема под действием углекислого газа интенсифицируется процесс образования таумасита, но происходит разложение этрингита с утратой возможности его восстановления. Таким образом, можно считать, что основной причиной деструктивных процессов в гипсоцементном камне является углекислотная коррозия и условия ее протекания.

По мнению многих авторов, изучавших продукты гидратации различных вяжущих веществ, в процессе твердения наблюдается многократная перестройка первоначально сформировавшейся структуры с переходом первичных новообразований в более термодинамически устойчивые фазы. Изменение состава продуктов гидратации и их структуры продолжается и в процессе службы материалов. По этой причине необходимо изучение устойчивости

гидратных новообразований в различных условиях твердения, а также при воздействии агрессивных факторов окружающей среды. В полной мере это относится к гипсоцементному вяжущему, который подвергается действию углекислого газа, к снижению карбонизационной стойкости, прочности и к увеличению усадки. Среди всех видов коррозии основной является - углекислотная.

Согласно обобщенному первому и второму закону термодинамики [2], любой вид коррозии определяется изменением следующих видов энергий: тепловая, механическая, химическая, электромагнитная, поверхностная и др. Следовательно, эти же факторы могут быть использованы и для управления коррозионными процессами, и даже в ряде случаев обращать их вспять, например, введением в цементную систему добавок спиновых меток или генерированием в цементной системе короткоживущих частиц и состояний [3].

Главными факторами, влияющими на степень углекислотного воздействия на гипсоцементный камень, являются относительная влажность и температура окружающей среды, пористость затвердевшего камня, состав продуктов гидратации и природа вводимых добавок. В работе [4] при изучении карбонизационной стойкости гидросиликатов кальция, образующихся в автоклавных условиях твердения, что введение в смесь извести и кварцевого песка, добавок гипса, хлорида и нитрата кальция приводит к более интенсивному взаимодействию новообразований с углекислым газом по сравнению с аналогичными смесями без добавок. В то же время карбонизация продуктов гидратации и связанная с ней углекислотная коррозия, в присутствии карбонатсодержащих добавок (карбонат кальция, доломит, зола от сжигания бурых углей и др.) протекает значительно медленнее. Так, для продуктов гидратации известково-кварцевой смеси степень карбонизации 54% достигается за 24 часа обработки углекислым газом, а у аналогичной смеси с добавкой 20% карбоната кальция за это же промежуток времени карбонизация составила 38%, а у аналогичной смеси с добавками гипса эта величина составила 64%. Степень карбонизации определялась как отношение количества углекислого газа, связанного в процессе карбонизации к теоретически возможному. Общим для всех гидратированных смесей было отсутствие свободной извести в продуктах гидратации.

На дериватограммах всех продуктов гидратации, исследованных смесей до карбонизации основным является низкотемпературный эндотермический эффект при температуре 100-130°C с потерей массы от 2 до 42 мг. После карбонизации потеря массы увеличилась от 30 до 84 мг. Таким образом в присутствии карбонатсодержащих добавок продукты гидратации в процессе карбонизации почти не изменились. Авторами установлено, что наличие добавок хлоридов, нитратов и сульфатов при гидратации всех видов вяжущих приводит к образованию продуктов, наиболее быстро взаимодействующих с углекислым газом, способных изменяться под действием атмосферных условий с перестройкой структуры.

Резонно предположить, что в присутствии карбонатсодержащих добавок углекислотную стойкость можно значительно повысить. Для определения

скорости и степени карбонизации продуктов гидратации композиционных гипсоцементных вяжущих веществ использовался метод принудительной карбонизации, предложенной в работе [5]. Карбонизации были подвергнуты образцы цементного камня, полученные при гидратации четырех видов вяжущих: ЦЕМ 1 – 42,5 (состав 1); тоже с добавкой строительного гипса при соотношении 1:1 (состав 2); гипсоцементнозольное вяжущее, содержащее 50% гипса, 30% цемента и 20% золы бурых углей (состав 3) и наконец – гипсоцементнозольное вяжущее с добавкой 10% доломита (состав 4).

Результаты приведенных экспериментов приведены на рисунке.

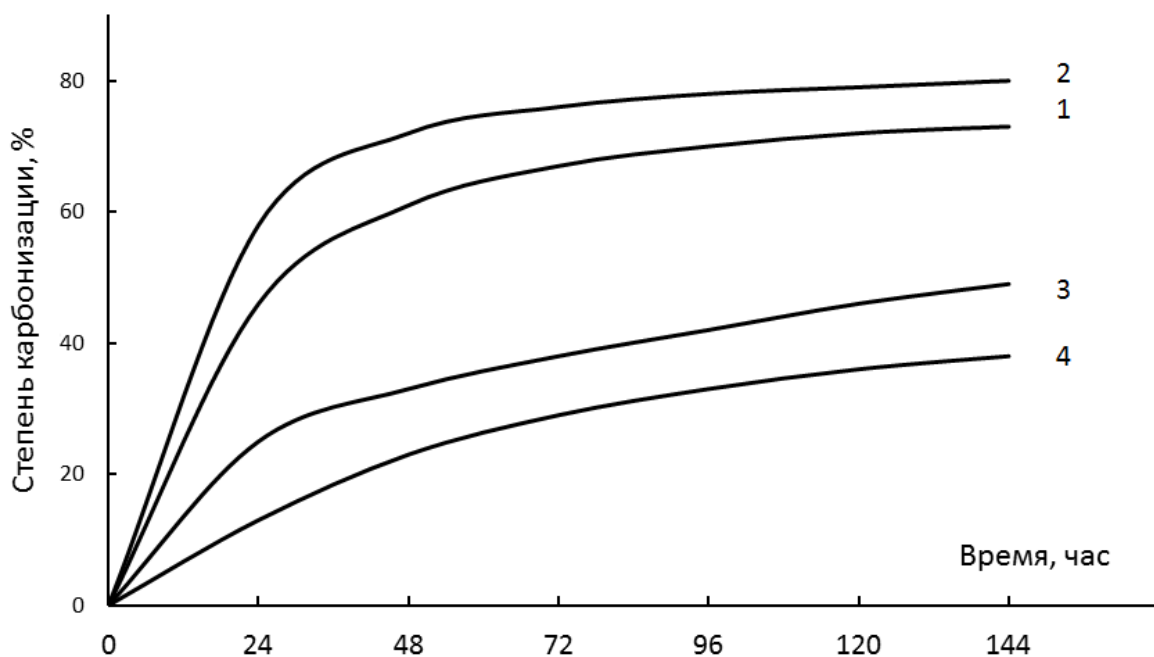


Рисунок 1. Кинетика процесса карбонизации

1 - гидратированный портландцемент ЦЕМ 1 – 42,5; 2 - гидратированное портландцементное вяжущее состава: 50 % Г + 50 % ПЦ; 3 - гидратированное гипсоцементноезольное вяжущее состава: 50 % Г + 30 % ПЦ + 20 % зола; 4 - гидратированное гипсоцементноезольное вяжущее состава: 40 % Г + 30 % ПЦ + 20 % зола + 10 % доломит

По результатам дифференциально термического и термогравиметрического анализа портландцемент, твердеющий в течение 28 суток в нормальных условиях, характеризуется высокой степенью гидратации. Общая потеря массы при нагревании составляет 248 мг на 1 г цемента. Степень естественной карбонизации за это же время твердения составляет 8 %. Степень принудительной карбонизации в течение 144 часов составила 75,8 %, поглощение углекислого газа – 360 мг на 1 г цемента. В первые сутки твердения степень карбонизации достигает 75 %. В дальнейшем рост степени карбонизации замедляется и в конечном итоге составляет около 80 %. Следовательно, в присутствии гипса цементная составляющая гипсоцементного вяжущего гидратируется более полно. В работе [6] отмечалось, что при высокой концентрации сульфат ионов даже при пониженном содержании

трехкальциевого алюмината в цементе, возможно некоторое расширение цементного камня, а значит и коррозии под действием внутренних напряжений. Экспериментально установлено, что существенное снижение скорости карбонизации продуктов гидратации гипсоцементнозольного вяжущего наблюдается с добавкой доломита (через 24 часа степень карбонизации составляет 12 %, а через 144 часа – 40 %). По мнению авторов, полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены тем, что присутствие карбонатсодержащих добавок уже во время процесса гидратации возможно образование карбоалюминатов и карбосиликатов кальция за счет активного взаимодействия углекислого газа гидроксида кальция и клинкерными минералами.

Таким образом, при введении карбонатсодержащих добавок в вяжущие системы удастся достигнуть эффекта технического иммунитета, т.е. такого состояния твердеющей системы, когда карбонизация будет протекать в незначительной степени, что гарантирует ее деструктивную безопасность и долговечность.

#### **Библиографический список:**

1. Четтерджи С. Механизм сульфатного расширения твердевшего цементного теста / С. Четтерджи // Пятый международный конгресс по химии. – М.: Стройиздат, 1978. 305 с.
2. Саркисов Ю.С., Коррозия как фактор деградации материалов / Т.С. Шепеленко, Н.П. Горленко, Д.А. Афанасьев // Техника и технология силикатов 2014. Т14 .№ 4. С 21-23
3. Афанасьев Д.А. Роль спиновых эффектов в процессах структурообразования цементных систем / Д.А. Афанасьев, Ф.Г. Унгер, Л.В. Цыро, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко, А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев // Вестник ТГАСУ, 2014. № 2. С. 94-102.
4. Козлова В.К. О составе продуктов гидротермального синтеза и их устойчивости при действии углекислого газа / В.К. Козлова, Ю.В. Карпова // Резервы производства строительных материалов. Ч. 1. – Барнаул, 1997. С. 37-39.
5. Козлова В.К. Влияние добавок золы на процессы карбонизации автоклавных бетонов / В.К. Козлова, А.В. Рижех // Резервы производства строительных материалов. – Барнаул, 1994. 87 с.
6. Алкснис Ф.Ф. Твердение и деструкция гипсоцементных композиционных материалов / Ф.Ф. Алкснис. – Ленинград: Стройиздат, 1988. С. 55.

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРМИРОВАННЫХ ПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**А.С. Королев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**М.В. Мишнев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Д.Д. Гусев**<sup>1</sup>, магистрант

<sup>1</sup>*Южно-Уральский государственный университет, кафедра Строительные конструкции и сооружения*

**Аннотация.** Представленная работа включает обобщающие результаты исследования влияния модуля упругости тяжелых и легких цементных бетонов на эффективность армированных пролетных конструкций. В работе приведены решения двух основных задач исследования: обоснование актуальности контроля и регулирования модуля упругости бетонов для пролетных конструкций, совершенствование моделирования модуля упругости бетонов и методов прогнозирования модуля упругости на основе разработанных моделей. В исследовании применены стандартные методы испытания модуля упругости бетонов и оценки деформативных свойств армированных балок при изгибе по 4-хточечной схеме нагружения. Результатами исследования подтверждено, что небольшая вариация модуля упругости (в пределах 10%) равнопрочных бетонов приводит к значительной вариации (до 30%) предела трещинообразования и, как следствие, деформаций армированных балок под нагрузкой, что в первую очередь связано с резким изменением уровня передачи напряжения от бетона на арматуру. Моделирование модуля упругости на основе слоевых структурных моделей привело к разработке адекватных расчетных моделей модуля упругости и позволило определить основные факторы вариативности модуля упругости бетона. Помимо модулей упругости компонентов бетона наиболее значимым фактором модуля упругости бетона является относительная толщина зоны контакта между матрицей и заполнителем. Применение разработанных моделей и других методов в регулировании модуля упругости равнопрочных бетонов позволяет обеспечить значительное повышение эксплуатационной нагрузки и снижение прогибов пролетных конструкций.

**Ключевые слова:** тяжелый бетон, легкий бетон, пролетные конструкции, модуль упругости, деформации под нагрузкой, расчетные модели.

## Введение

Современное отечественное строительное материаловедение уделяет значительно меньше внимания вопросам изучения деформативных свойств конструкционных материалов в сравнении с исследованием их прочности, т.е. обеспечению первой группы предельных состояний при проектировании. В то же время современное конструирование все чаще применяет технические решения, в которых главным ограничением является вторая группа предельных состояний, т.е. ограничения по допустимым деформациям. В случае с пролетными конструкциями таким ограничением является допустимый прогиб, в том числе в сочетании с трещинообразованием. При этом практика проектирования армированных бетонных перекрытий показывает, что нередко,



несмотря на обеспеченность, закладываемую в расчеты, и достижение заданной прочности бетона прогибы перекрытий, особенно монолитных и большепролетных, в результате строительства не обеспечены. Если в случае с тяжелыми бетонными перекрытиями на больших пролетах проектировщик компенсирует это перерасходом арматуры, то применение легких бетонов в перекрытиях ограничивается в связи их повышенной деформативностью и, как следствие, неуверенностью проектировщика в обеспечении допустимых прогибов в той степени, что в настоящее время легковесные перекрытия применяются в отечественной строительной отрасли эпизодически.

Рассмотрение расчета деформаций и прогибов железобетонных перекрытий в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [1] показывает, что значимыми характеристиками материалов, определяющими деформации, являются модуль упругости бетона и модуль упругости арматуры. При этом, в связи с превышением на порядок по значению, модуль упругости арматуры является гораздо более значимым фактором деформативности конструкции, чем модуль упругости бетона. Поэтому вариативность модуля упругости бетона в пределах вариативности его прочности никогда не рассматривалась как значимый фактор, определяющий эффективность армированных конструкций. Как следствие, само значение модуля упругости бетона является справочным, и, согласно СП, коррелируется с классом прочности бетона, практически не нормируется в проектах, и в принципе нормирование модуля упругости бетона сейчас встречается только в проектах, реализуемых по иностранным техническим решениям.

В связи с вышеизложенным была поставлена цель исследования – оценить перспективность метода прогнозирования и регулирования модуля упругости бетона в повышении эффективности пролетных армированных конструкций.

Для этого решались задачи:

Исследование влияния модуля упругости тяжелых и легких бетонов на деформации пролетных конструкций под нагрузкой.

Разработка зависимости модуля упругости бетона от состава бетонной смеси на основе структурного и расчетного моделирования.

Материалы и методы исследования

Множество исследований за несколько десятилетий посвящено определению зависимостей модуля упругости бетонов [2, 3, 4]. Наиболее известными являются зависимости, использующие долю цементного камня или соотношение объемных долей цементного камня и заполнителя, в соответствии с которыми, с повышением доли низко модульного цементного камня снижается модуль упругости бетона [4, 5]. Воспользовавшись самым доступным и простым методом повышения крупности и доли крупного заполнителя в бетоне, были получены два состава бетонной смеси класса В25:

1) тяжелый бетон В25 на песке с модулем крупности  $M_{кр} = 2,0$  и щебне фракции 5-20, с модулем упругости  $E=30000$  МПа;

2) тяжелый бетон В25 на песке с модулем крупности  $M_{кр} = 2,5$  и щебне фракции 10-20 с повышенным модулем упругости  $E=33000$  МПа.

В исследовании легких бетонов использовались:

- легкий керамзитовый бетон В7,5 D1200 на основе керамзита 10-20 мм и перлитового песка,  $E=5900$  МПа;

- легкий арболитовый бетон В7,5 D1300 на основе древесной щепы и кварцевого песка,  $E=6600$  МПа.

Для определения модуля упругости и прочности при сжатии бетонов различных классов применялись стандартные методы ГОСТ 24452-80, ГОСТ 22690-2015.

Для проведения испытаний по исследованию эффективности повышения упругих свойств бетона были изготовлены балки с размерами граней  $8 \times 14 \times 140$  см, армированные одним арматурным стержнем  $\varnothing 8$  стеклопластиковой арматуры марки АСК-8-1000/35 или  $\varnothing 10$  стальной арматуры марки 10-А400 ГОСТ 5781-82. Армированные балки соответственно изготавливались из тяжелого бетона В25 с модулем упругости 30000 МПа, и из тяжелого бетона В25 с улучшенным составом и модулем упругости 33000 МПа. Схема испытания балок, фото эксперимента показаны на рисунке 1.

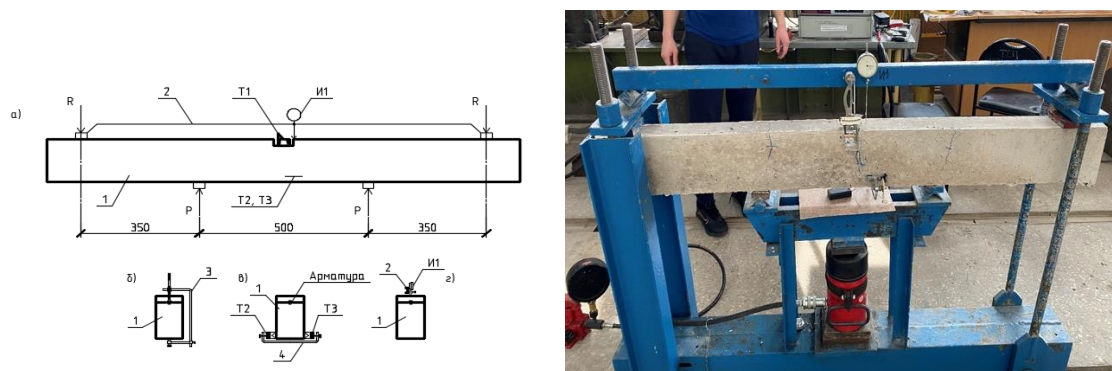


Рисунок 1. Схема испытания образцов-балок. а) расположение сил и приборов; б) крепление тензометра Т1 для измерения прогибов арматурного стержня; в) крепление тензометров Т2, Т3 для измерения деформаций сжатой зоны бетона; г) крепление индикатора измерения прогибов; 1 – балка; 2 – траверса для измерения прогибов индикатором часового типа И1; 3, 4 – струбицины для крепления тензометров Т2, Т3.

### Результаты исследований

На рисунке 2 приведены сравнительные графики прогиба армированных балок из тяжелого бетона с обычным и повышенным модулями упругости.

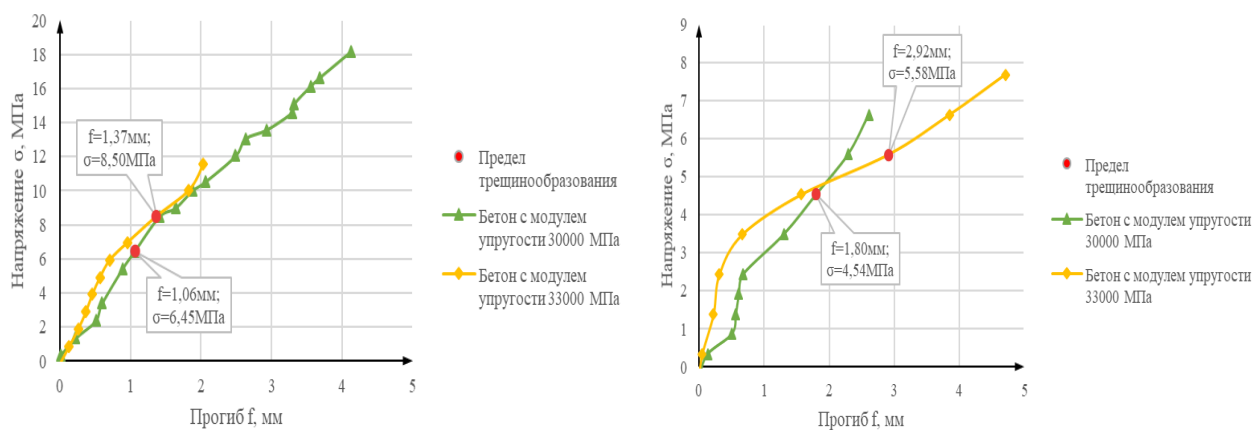


Рисунок 2. График зависимости напряжения от прогиба балок для составов 1 и 2 на стальной (1) и стеклопластиковой арматуре (2)

Из результатов видно, что в балках из бетона с повышенным на 10% модулем упругости в 33 000 МПа предел трещинообразования и по напряжению, и по прогибу, превышает показатели балок из бетона на 30%.

Причина данного эффекта выявляется при анализе напряжения в арматуре при нагружении балок (рисунок 3). В балках, армированных стальной арматурой, из бетона с повышенным модулем упругости напряжение в арматуре увеличилось в 1,5 раза. Это подтверждает тот факт, что повышение модуля упругости бетона приводит к повышению уровня передачи напряжения на арматуру в связи со снижением деформаций в зоне опоры бетона на арматуру и, вследствие этого, релаксации напряжений в арматуре.

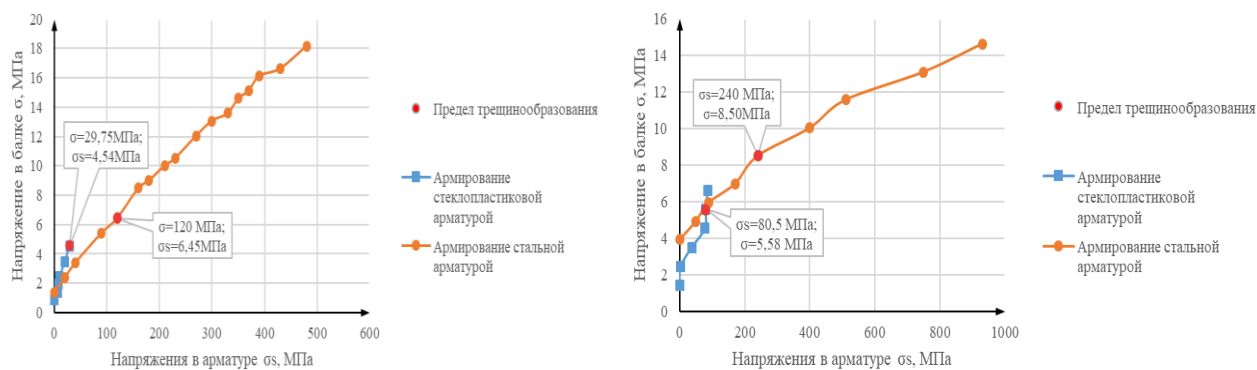


Рисунок 3. График взаимосвязи напряжений в балках и арматуре для составов 1 и 2 на стальной (1) и стеклопластиковой арматуре (2)

В случае с легкими бетонами данная тенденция только усугубляется. Как показывают результаты испытаний, при равной прочности повышение модуля упругости на 12% позволяет увеличить разрушающий изгибной момент балки под нагрузкой на 30...35%. То есть прирост модуля упругости приводит и к снижению деформаций под нагрузкой и к приросту разрушающей нагрузки на балку. В первую очередь это также связано с ростом напряжения в арматуре при нагружении конструкции.

Таблица 1. Результаты испытания армированных балок из легких бетонов

Наименование параметров	Обозначение и формулы параметров	Керамзитовый бетон		Арболитовый бетон	
Характеристики легкого бетона	класс, $B$	7,5	7,5	7,5	7,5
	$D$ , кг/м <sup>3</sup>	1200	1200	1300	1300
	$R_b$ , МПа	5	5	5	5
	$E_b$ , МПа	5900	5900	6600	6600
Характеристики арматуры	$\varnothing$ , мм	A400	A400	A400	A400
		$\varnothing 10$	$\varnothing 14$	$\varnothing 10$	$\varnothing 14$
Разрушающая нагрузка	$q$ , кг	1 013	1 280	1 333	1 707
Напряжение в арматуре фактическое	$\sigma_a$ , МПа	8,9	12,7	18,6	25,0
Изгибающий момент фактический	$M_{\text{факт}} = \frac{q \times l}{6}$ , кгс·см	20260	25600	26660	34140

Таким образом, экспериментально доказано, что регулирование модуля упругости имеет значительную эффективность в снижении деформаций и повышении несущей способности армированных пролетных конструкций. Регулирование модуля упругости бетонов ставит задачу совершенствования, уточнения и углубления зависимости модуля упругости бетонов от их состава.

Основываясь на работах по влиянию зоны контакта «матрица-заполнитель» на деформативные свойства бетона [7, 8], авторами было предложено использовать для математического моделирования модуля упругости слоевую структурную модель сечения композита (рисунок 4).

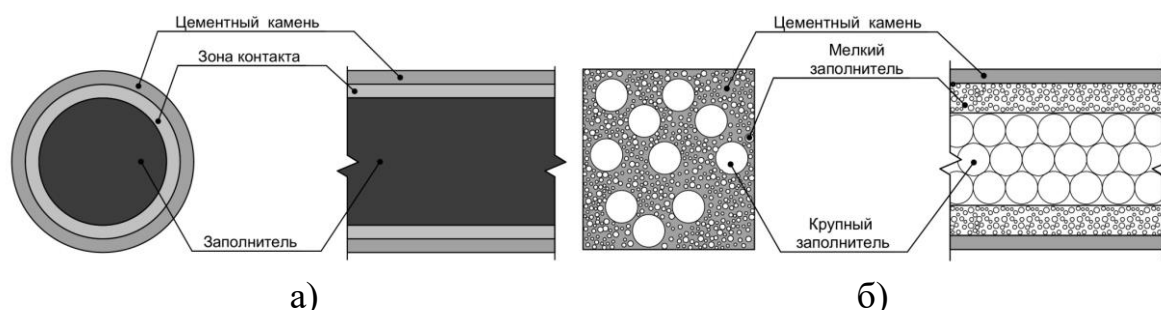


Рисунок 4. Расчетная слоевая модель деформативности бетона на а) тяжелом заполнителе, б) легком заполнителе

В качестве авторской расчетной модели деформативных свойств тяжелых и легких бетонов для оценки модуля упругости по слоевой модели с количеством слоев  $i=n$ , модулем упругости слоя  $E_i$  и относительной толщиной слоя  $\delta_i$  была предложена зависимость

$$E_c = \frac{E_1 E_2 \dots E_n}{\sum_{i=1}^n \delta_i \frac{E_1 \dots E_n}{E_i}} \quad (1)$$

Реализация расчетной модели с учетом факторов состава бетонной смеси подробно рассмотрена в предыдущих публикациях [9, 10].

## Заключение

Экспериментально доказана высокая эффективность регулирования, и как следствие, прогнозирования и нормирования модуля упругости бетона армированных пролетных конструкций. Повышение модуля упругости на 10% позволяет снизить прогибы и повысить предел трещинообразования под нагрузкой на 30 и более %. Авторами выполнен ряд работ по расчетному моделированию модуля упругости тяжелых и легких бетонов, на основе которых применение легких бетонов в пролетных конструкциях может быть обеспечено и значительно расширено.

## Библиографический список:

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Общие положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082?ysclid=lgxn907498531623350>
2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981.
3. Шейкин А.Е. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979.
4. Jurowski, K., Grzeszczyk, S. The influence of concrete composition on Young's modulus. *Procedia Engineering*. 2015. DOI:10.1016/j.proeng.2015.06.181.
5. Zouaoui, R., Miled, K., Limam, O., Beddey, A. Analytical prediction of aggregates' effects on the ITZ volume fraction and Young's modulus of concrete. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2017. 41(7). DOI:10.1002/nag.2660.
6. Tibbetts, C.M., Perry, M.C., Ferraro, C.C., Hamilton, H.R. Aggregate correction factors for concrete elastic modulus prediction. *ACI Structural Journal*. 2018. 115(4). DOI:10.14359/51701914.
7. Four-phase sphere modeling of effective bulk modulus of concrete. Li, Guoqiang, Zhao, Yi и Pang, Su Seng. 1999 г., *Cement and Concrete Research*. 10.1016/S0008-8846(99)00040-X.
8. Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete. Zhu, Xingyi, и др. 2018 г., *Cement and Concrete Research*. 10.1016/j.cemconres.2018.02.014.
9. Korolev, A.S., Vatin, N.I. Elasticity modulus of cement composites predicting using layer structure model. *Magazine of Civil Engineering/ 2021/ 104(4)*. DOI: 10.34910/MCE.104.13
10. Korolev, A., Vatin, N. Layer model of elasticity modulus prediction for lightweight concretes / *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 106(6). Article No. 10611, DOI: 10.34910/MCE.106.11

## ОЦЕНКА КАПИЛЛЯРНО-ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПЕНОБЕТОНОВ

В.Г. Куликов<sup>1</sup>, канд. техн. Наук

Г.Г. Белоусов<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** Целью исследования являлось выявление и исследование аналитических зависимостей технологических параметров и аспектов приготовления пенобетонов в зависимости от концентрации пенообразователей (ПАВ) в различные моменты времени формирования капиллярно-пористой структуры.

Пористость пенобетонов, как композиционного материала особого рода, обусловлена наличием пор в цементном камне, пор в самом заполнителе, пор контактной зоны между цементным камнем и заполнителем, а также процессами воздухоувлечения, обусловленных введением пены.

Поры в твердеющем цементном камне керамзитопенобетонов образуются испаряющейся водой, а характер этих пор определяется формами связи влаги с материалом. В работах А.В. Лыкова приведена классификация форм связи влаги с материалом. Согласно этой классификации, формы связи делятся на химическую, физико-химическую и физико-механическую. Химическая связь, это наиболее сильная из всех форм связи. Она нарушается лишь при прокаливании материала. Физико-химическая связь в бетонах проявляется в первую очередь как связь влаги в гидратных оболочках частиц цементного геля.

Мономолекулярный слой воды вокруг частиц цементного геля находится под большим давлением, вызванным молекулярным силовым полем. Следующие слои воды удерживаются в гидратных оболочках менее прочно. Толщина полиадсорбционного слоя не одинакова. Исследования, проведенные на термографе Казанского М.Ф. показали, что толщина этого слоя составляет около двух диаметров молекул воды. Согласно исследованиям Б.В. Дерягина [1, 2], полиадсорбционный слой имеет размеры до  $1,5 \times 10^{-9}$  см, а т.к. расстояние между частицами геля составляет 15-40 А, то можно считать, что вода в гидратных оболочках частиц геля связана адсорбционной связью. При ее испарении образуются так называемые «поры геля».

Физико-механической связью с материалом обладает вода, находящаяся между агрегатами частиц геля. Эта вода носит название «капиллярной», т.к. она удерживается в материале капиллярным давлением. При испарении этой воды образуются «капиллярные поры», вероятный размер которых от  $5 \times 10^{-7}$  см до  $50 \times 10^{-4}$  см.

Кроме вышеназванных пор в цементном камне могут существовать так называемые «контракционные поры». Они возникают из-за того, что абсолютный объем системы, образовавшейся при гидратации цемента, всегда меньше абсолютного объема исходной системы «цемент-вода», т.е. при гидратации цемента происходит контракционная (химическая) усадка.

Контракция не приводит к уменьшению общего объема цементного камня, в результате чего возникают «контракционные поры», занимающие от 4 до 8% объема цементного камня.

Удобно дифференцировать поры по их происхождению, т.к. это дает возможность применения расчетного метода для определения объемов отдельных групп пор. Наиболее обстоятельная классификация пор по происхождению предложена Н.А. Мощанским [3]. Но, по этой классификации трудно установить связь между свойствами и характером пористости, т.к. происхождение пор не всегда определяет ее влияние на стойкость. Так, например, поры одной группы (тупиковые и сквозные капилляры) оказывают различное влияние на стойкость бетона, а поры разного происхождения - контракционные и микрокапилляры - могут быть одинаково, как пассивны, так и опасны при попеременном замораживании и оттаивании бетона.

Широкое распространение получили экспериментальные методы дифференциации пористости бетонов. Определение дифференциальной пористости методом Бехгольца-Думанского [4] основано на освобождении пор, заполненных жидкостью, газом под давлением, превышающем капиллярные силы. С увеличением давления будут открываться более мелкие поры. В лаборатории ВНИИГ им. В.В. Веденеева разработан метод определения размера пор в цементном камне и в строительных растворах путем продавливания воздуха через цилиндрический образец при увеличении давления [5]. Этим методом определяется размер пор от  $1 \times 10^{-4}$  до 0,05 см.

Приборы, разработанные Р.Е. Брилингом [6], Г.П. Вербецким [7], Сталом и Джонсом [8] основаны на принципе определения пористости по откачиванию воздуха из пор образца.

А.С. Беркман и И.Т. Мельникова использовали метод ртутной порометрии для определения пористости стеновых материалов [9]. Метод ртутной порометрии применялся и для исследования пористости цементного камня [10, 11].

Все вышеназванные способы дифференциации пористости бетонов лишь с большими допущениями можно использовать для анализа структурной пористости керамзитопенобетонов, как композиционных материалов.

Будем считать, что объем пор  $V_{\text{общ}}$  в пенобетонах складывается из объема пор в цементном камне  $V_{\text{ц.к.}}$ , объема воздушных ячеек  $V_{\text{возд.}}$ , образованных вязкой пеной, и пор внутри зерен заполнителя  $V_{\text{зап.}}$ . Объем пор в поризованном цементном камне без заполнителя складывается из объемов воздушных ячеек  $V_{\text{п.п.к./возд.}}$ , капиллярных пор «П1», пор геля «П3» и контракционных пор «П2».

В поризованном пеной цементном камне получают мелкие, почти сферические полости, окруженные гидратированным цементом. В этом случае капиллярные поры межпоровых перегородок не имеют большой протяженности, они прерываются воздушными ячейками. И так как скорость всасывания обратно пропорциональна диаметру капилляров, то интенсивность капиллярного подсоса снижается. Таким образом, воздушные ячейки можно рассматривать как замкнутые сферические пузырьки воздуха различного диаметра, оказывающие

особое влияние на прочность, капиллярное всасывание, водопоглощение, стойкость и другие свойства пенобетонов.

Так, например, в результате давления, возникающего в капиллярах при замерзании воды, избыток ее отжимается в эти своего рода запасные «резервуары», каждая воздушная ячейка играет роль как бы «компенсатора» давления замерзающей воды. Объем пор в поризованном цементном камне без заполнителя складывается из объемов воздушных ячеек  $V_{п.ц.к./возд.}$ , капиллярных пор, пор геля и контракционных пор.

Для вычисления объема воздушных, капиллярных, контракционных, гелевых пор и общей  $V_{п.ц.к./общ.}$  пористости цементного камня в зависимости от «В/Ц» и степени гидратации цемента  $\alpha$  применяют следующие формулы (объем пор дан в долях от объема пенобетона):

$$V_{п.ц.к./возд.} = 1 - V_{цЦ} + BV_{п} \quad (1)$$

или

$$V_{п.ц.к./возд.} = 1 - \alpha_{я.с.} \alpha_{ц.т.} \quad (2)$$

$$П1 = В + В_{ц} - 0,5\alphaЦ \quad (3)$$

$$П2 = 0,9\alphaЦ \quad (4)$$

$$П3 = 0,2\alphaЦ \quad (5)$$

$$V_{п.ц.к./общ.} = 1 - V_{цЦ} + 0,21\alphaЦ \quad (6)$$

где  $V_{ц} = 1/\rho_{ц}$  - удельный объем цемента при его плотности  $\rho_{ц}$  в ( $м^3/т$ ). Если  $\rho_{ц} = 3,1$ , то  $V_{ц} = 0,322$ , при этом расход цемента «Ц» должен выражаться в  $т/м^3$ , а расход воды «В» и пенообразователя «В<sub>п</sub>» - в долях от объема  $1м^3$  бетона;

$\alpha_{я.с.}$  - объемная масса поризованного цементного теста,  $кг/м^3$ ,

$\alpha_{ц.т.}$  - объемная масса цементного теста, определенная по формуле

$$\alpha_{ц.т.} = \frac{\left(\frac{1 + В + В_{п}}{Ц}\right)}{\left(\frac{V_{ц} + В + В_{п}}{Ц}\right)} \quad (7)$$

Приведенные формулы дают возможность вычислить усредненные значения пористости, нужные при рассмотрении стойкости. Они позволяют отделить объем воздушных ячеек от объема пор самого цементного камня, а также определить капиллярную, контракционную и гелевую пористость межпоровых перегородок.

Важным фактором уменьшения общей и капиллярной пористости цементного камня, т.е. улучшения качества материала межпоровых перегородок (при низких значениях В/Ц) является полнота гидратации цемента. В некоторых же случаях с увеличением В/Ц, т.е. капиллярной пористости межпоровых перегородок, можно получить эффективный материал вследствие образования мелких равномерно распределенных воздушных пор.

Введение керамзитового гравия в поризованное цементное тесто меняет картину распределения пор в пенобетоне. Способность пористого заполнителя



поглощать воду позволяет рассматривать крупный пористый заполнитель как компонент, регулирующий структуру поризованного цементирующего вещества и регулировать свойства композита.

Для оценки относительного объема пор различного характера в поризованных беспесчаных легких бетонах можно применять следующие формулы (пористость измеряется в долях от объема бетона):

$$V_{\text{общ.}} = V_{\text{ц.к.}} + V_{\text{возд.}} + V_{\text{зап.}} = 1 - \frac{\alpha_{\text{б/о}}}{\rho_{\text{б}}} \quad (8)$$

$$\rho_{\text{ц.к.}} = (V + V_{\text{п}})_{\text{ист.}} - 0,5\alpha_{\text{ц}} \quad (9)$$

$$П1 = (V + V_{\text{п}})_{\text{ист.}} - 0,5\alpha_{\text{ц}} \quad (10)$$

$$V_{\text{возд.}} = 1 - \left[ V_{\text{ц}} + (V + V_{\text{п}})_{\text{ист.}} + \frac{m_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к/о}}} \right] \quad (11)$$

$$V_{\text{зап.}} = 1 - \left( 1 - \frac{\alpha_{\text{к/о}}}{\rho_{\text{к}}} \right) V_{\text{к}} \quad (12)$$

где -  $\rho_{\text{б}}$  ,  $\rho_{\text{к}}$  - соответственно плотность поризованного легкого бетона и керамзитового гравия ( $\text{т/м}^3$ );

$\alpha_{\text{б/о}}$ ,  $\alpha_{\text{к/о}}$  - средняя плотность поризованного легкого бетона и керамзитового гравия в куске ( $\text{т/м}^3$ );

$(V + V_{\text{п}})_{\text{ист}}$  - суммарный расход воды «В» и пенообразователя «В<sub>п</sub>» за вычетом воды, поглощенной пористым заполнителем, доли от объема 1 м<sup>3</sup> бетона;

$m_{\text{к}}$  - масса керамзитового гравия ( $\text{т/м}^3$ );

$V_{\text{к}}$  - объем керамзитового гравия, доли от объема 1 м<sup>3</sup> бетона.

При выводе формул учитывалось, что ввиду отсоса части воды пористым заполнителем из поризованного цементирующего вещества истинное водоцементное отношение в затвердевшем бетоне всегда будет меньше водоцементного отношения в момент приготовления бетонной смеси. Это влечет за собой изменение объема пор цементного камня. Поэтому для вычисления пористости связующего (цементного камня) в облегченном бетоне необходимо знать истинное водоцементное отношение и содержание связанной воды.

Сделаны оценки объёмов пор пен, динамически меняющихся в процессе структурообразования капиллярно-поровой структуры керамзитопенобетона, с помощью «Платоновых Тел» оптико-аналитическими методами. Установлены обобщенные зоны пор исследуемых пен, рисунок 1.

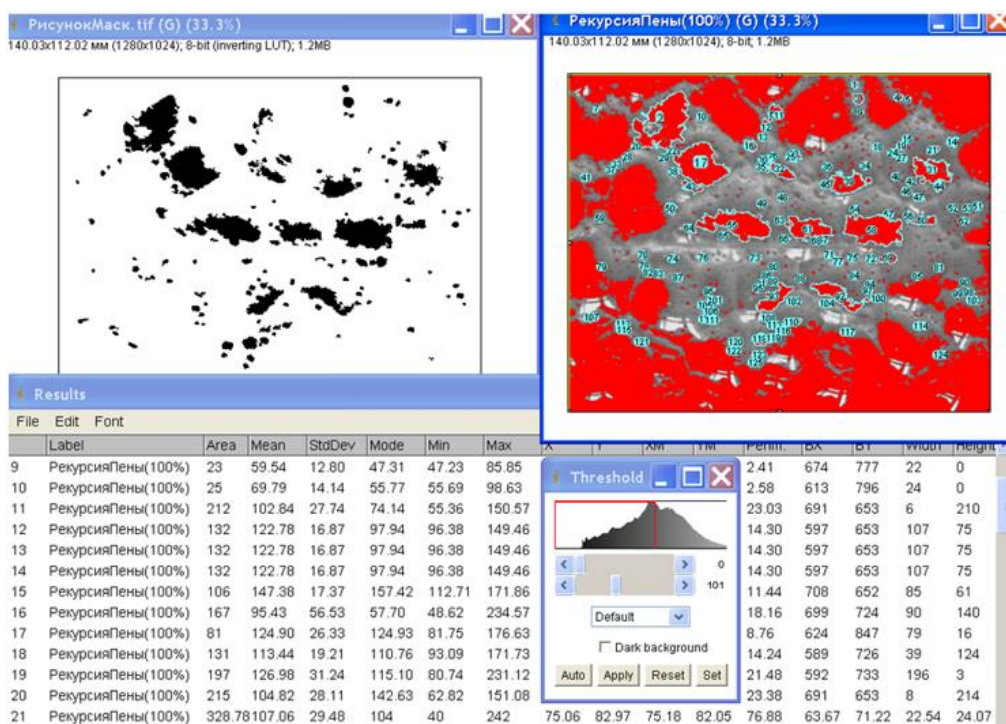


Рисунок 1. Статистическо-аналитическая оценка объёмов пор керазитопенобетона

На основании проведенных исследований и обработки полученных результатов установлено, что наиболее вероятный определяющий размер пузырьков газовых эмульсий и пен возрастает с уменьшением концентрации ПАВ. Величина «работы образования пузырьков» сохраняется постоянной.

#### Библиографический список:

1. Дерягин Б.В. Упругие свойства тонких слоев воды. – Физическая химия, 1932, т. 3. – с. 18
2. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. – М.: Изд-во АН СССР. Серия химия, 1936, с – 46.
3. Мощанский Н.А., Плотность и стойкость бетонов. – М.: Госстройиздат, 1951. – 166 с.
4. Думанский А.В., Думанская А.П. Определение пористости гетеропорозных стенок. – Журнал физико-химического общества, 1939, вып. 3. – с. 67.
5. Стольников В.В. Исследование по гидротехническому бетону. – М.: Госэнегоиздат, 1962. – 357 с.
6. Брилинг Р.Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. – М.: Стройиздат, 1948ю – 131 с.
7. Вербецкий Г.П. Структура и водонепроницаемость бетона. – в кн.: Труды совещания по теории технологии бетона. – Ереван, 1956. – с. 129.
8. Stull R.I. Johnson P.V. Ires. H.V.S., 1940, v. 25, p. 24.
9. Беркман А.С., Мельникова И.Г. Структура и морозостойкость строительных материалов. – М.: Л.: Госстройиздат, 1962. – 173 с.
10. Эдельман Л.И., Сомнинский Д.С., Копчикова Н.В. Исследование распределения пор по размерам в цементном каине. – Коллоидный журнал, 1961, №2 – с. 34.
11. Кравченко И.В., Юдович Б.Э. Опыт применения ртутной порометрии для определения дифференциальной пористости цементного камня. – Научные сообщения ВНИИЦемент, 1960, №9. – с. 90.

## ЭСТЕТИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ КЛИНКЕРНОГО КИРПИЧА

К.А. Лапунова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

М.И. Шарифова<sup>1</sup>, магистр

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет

**Аннотация.** Эстетические особенности кирпича и кирпичной кладки являются в настоящее время одним из основных направлений внимания потребительского строительного рынка и, соответственно, производителей керамических строительных материалов. Существует целый ряд традиционных декорирующих технологий, таких как глазурование и ангобирование, которые на протяжении многих столетий делали кирпич не только красивым, но и улучшали его технические показатели. Однако для расширения цветового ассортимента и увеличения морозо- и атмосферостойкости, защиты от высолов, нами предлагается технология полимерного покрытия клинкерного кирпича. Полимерные краски состоят из нескольких компонентов, взаимодействующих между собой при нагреве, образуя гомогенный защитный слой. Данный метод позволяет организовать производство цветного клинкерного кирпича с минимальными затратами на производство и минимальной себестоимостью изделий.

**Ключевые слова:** клинкерный кирпич, полимеры, покрытие, эстетика, технология, порошкообразные краски.

Внешний вид кирпича в настоящее время является одним из важнейших показателей. «Красный» традиционный кирпич очень красив, востребован, однако современный строительный рынок и потребность заказчиков, маркетологов направляет производителей в эстетическое «русло». Рассматривается форма кирпича, его фактура и цвет поверхности [1].

Керамические изделия, в том числе и строительные, имеют достаточное количество технологий окрашивания. Традиционными являются ангобирование, глазурование, окрашивание в массу (рисунок 1).



Рисунок 1. Пример цветного керамического кирпича

Клинкерный кирпич имеет ряд отличий и от лицевого кирпича и тем более от обычного строительного. Его марка прочности (от М300 до М1000), водопоглощение (не более 6 %), морозостойкость (от марки Б75 до Б300),

показатели кислотостойкости (менее 95 %) – говорят об отличных технологических характеристиках данного строительного изделия [2].

Что касается эстетических характеристик, то и тут он в большом «выигрыше». Благодаря высокой температуре обжига клинкерный кирпич радует глаз богатой палитрой цветовых оттенков и нюансных переходов (рисунок 2).



Рисунок 2. Цвет и оттенки клинкерного кирпича

Клинкерный кирпич предпочитают использовать в качестве изысканной облицовки. Архитекторы и проектировщики смело «берут» его для воплощения дорогих и оригинальных фасадов, где цвет и фактура играют ведущую роль [3].

Яркий локальный цвет клинкерному кирпичу придает окраска порошкообразными полимерными красителями. Такой кирпич может создать акцент в любой точке фасада: цоколь, угловые завершения, дверные и оконные обрамления, горизонтальные пояса, карнизы, вставки в межоконных пространствах и т.д. Обычно весь фасад не выкладывают кирпичом насыщенных цветов, так как композиция улиц диктует свою гармонизацию пространства, хотя есть и исключения. Все эти «желания» по расширению ассортимента продукции необходимо продумывать и исполнять в стенах предприятий по производству керамического кирпича. Задача стоит и в улучшении прочностных и экономических характеристик, наряду с эстетическими и дизайнерскими. В этом плане, предлагаемое нами нанесение полимерного декоративного покрытия и решает эти две задачи: создает широкую линейку цветного покрытия и усиливает технологические показатели кирпича.

Нанесение полимерного покрытия увеличивает морозо- и атмосферостойкость, гидроизоляционные и электроизоляционные свойства, препятствует высолом, оно надежно защищает внешнюю поверхность кирпича, что придает долговечность фасаду [4].

Полимерная порошковая краска специального назначения, изготавливается с использованием особого отвердителя и применяется для защиты поверхностей, подвергаемых нагреву и значительной механической нагрузке в процессе использования. Данная краска представляет собой мелкодисперсное вещество, состоящее из термоотверждаемых, образующих пленку, компонентов, пигментов, определяющих цвет покрытия и специальных

добавок. Каждая частица порошковой краски имеет размер в диапазоне от 10 до 100 микрон, что говорит о равномерном покрытии.

Нами предлагается нанесение полимерного покрытия на лицевую сторону кирпича с целью улучшения технологических и эстетических свойств. Метод нанесения полимерного покрытия на кирпич состоит из следующих основных технологических операций (рисунок 3):

- обеспыливания и механическая очистка поверхности кирпича;
- нагрев кирпича, который происходит в туннельной сушилке при температуре 200 °С;
- нанесение порошковой краски методом электростатического распыления. Горячая поверхность кирпича позволяет краске расплавиться и заполнить все микронеровности, создав однородную цветную защитную пленку;
- охлаждение кирпича.

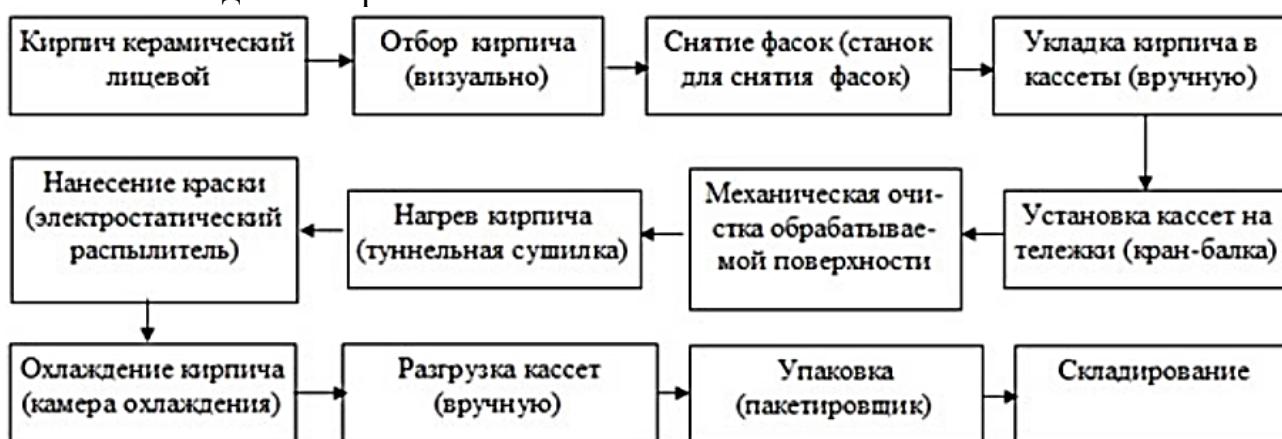


Рисунок 3. Технологическая схема нанесения полимерного покрытия на лицевую сторону клинкерного кирпича

Предлагаемая нами технологическая схема нанесения полимерного покрытия на клинкерный кирпич позволяет организовать небольшую, но универсальную линию по декорированию кирпича на керамическом кирпичном производстве. Она с минимальными затратами и себестоимостью изделий расширит ассортимент выпускаемой продукции, которая является востребованной на рынке. Кирпич с полимерным цветным покрытием отвечает техническим и эстетическим требованиям и пользуется спросом у архитекторов и строителей.

#### Библиографический список:

1. Котляр, В.Д., Новикова, А.С., Терехина, Ю.В. Технология и дизайн керамического кирпича с декоративным полимерным покрытием с эффектом деграде / В.Д. Котляр, А.С. Новикова, Ю.В. Терехина // Инженерный Вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 208-209.
2. Яковлев, А.Д., Здор, В.Ф., Каплан, В.И. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе / А.Д. Яковлев, В.Ф. Здор, В.И. Каплан. – Л.: Химия, 2009. 256 с.
3. Серебряков, А.И., Абакумов, А.Е., Лукьянчиков, С.А. Защитно-декоративное полимерное покрытие стеновых материалов / А.И. Серебряков и др. // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 20–21.

4. Патент на полезную модель № 98173 РФ, МПК В44С 1/00. Технологическая линия для нанесения полимерного покрытия керамического кирпича / М.Ю. Ананина, К.А. Лапунова, В.Д. Котляр и др. (РФ). - Оpubл. 10.10.2010; Бюл. № 28.

## РОЛЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.П. Лукутцова<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

С.Н. Головин<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Брянский государственный инженерно-технологический университет

**Аннотация.** Рассмотрена роль наноразмерных частиц (НРЧ) в формировании структуры и свойств цементных композиционных материалов (ЦКМ). Показана эффективность НРЧ в ускорении твердения, увеличении плотности и прочности цементных композитов за счет увеличения площади раздела фаз, химического взаимодействия НРЧ с минералами цементного клинкера, каталитической роли НРЧ, как центров кристаллизации твердеющей системы и заполнения наноразмерными частицами и их агрегатами пространства между продуктами гидратации цемента. Выполненные исследования пористости ЦКМ с добавкой НРЧ кремнезема и диоксида титана, показали снижение среднего диаметра пор, общей пористости и перераспределение пор по размерам в сторону уменьшения доли макро- и микропор и возрастанию доли наноразмерных пор. В присутствии НРЧ кремнезема суммарная интенсивность дифракционных максимумов алита в цементном камне (ЦК) 7-суточного возраста уменьшается от 354 до 211 имп./с, т.е. на 41%, по сравнению с ЦК контрольного состава, что подтверждает ускорение процесса гидратации цементного вяжущего.

**Ключевые слова:** наноразмерные частицы, структура, цементные композиционные материалы, пористость, плотность, прочность

Цементные композиционные материалы с наноразмерными частицами представляют собой сложную многоуровневую систему, свойства которой в значительной степени определяются характером распределения, формой и химическим составом микро- и наноразмерных элементов, входящих в их состав. Известно, что действие НРЧ проявляется через химические процессы на поверхности твердой, жидкой и газообразной фаз [1, 2]. Адсорбированные на поверхности твердой фазы НРЧ выполняют различную роль в формировании структуры ЦКМ. Для управления процессом структурообразования ЦКМ с НРЧ необходимо установить влияние наноразмерных частиц на формирование структуры и свойств цементных композитов.

Целью данной работы является установление роли наноразмерных частиц в формировании структуры и свойств ЦКМ.

Для оценки влияния НРЧ на структуру и свойства ЦКМ использовались следующие сырьевые компоненты для получения образцов цементного камня (ЦК) и КЦМ: нормальнотвердеющий портландцемент ЦЕМ 42,5Н по ГОСТ 31108-2020 (ОАО «Мальцовский портландцемент», г. Фокино Брянская обл.); природный кварцевый песок с модулем крупности 1,63 и кварцево-глауконитовый песок с модулем крупности 1,54 и насыпной плотностью 1490 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 8736-2014 (г. Брянск).

Добавку НРЧ кремнезема получали химическим поликонденсационным способом по золь-гель технологии, при которой образующийся нанодисперсный

кремнезем стабилизировался ацетатом натрия. Диоксид титана с НРЧ предварительно обрабатывался ультразвуком в механоактиваторе ПСБ 4035-04 при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и частоте ультразвука 35 кГц в течение 3 минут. Диспергированный  $TiO_2$  вводился в виде готовой суспензии в количестве 0,05 % (в пересчете на сухое вещество).

Рентгенофазовый анализ (РФА) исследуемых проб и образцов проводился на дифрактометре ARL X'TRA (Швейцария) по методу порошковой дифрактометрии. Показатели пористости образцов цементного камня определяли на азотном порозиметре ASAP 2020 (США), предназначенном для измерения объема, размера и площади поверхности пор. Структура ЦК и ЦКМ изучалась методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия).



Рисунок 1. Влияние наноразмерных частиц на структуру и свойства ЦКМ



Влияние наноразмерных частиц на структуру и свойства цементных композиционных материалов зависит от многих факторов и условно отображено в виде схемы, представленной на рисунке 1. Уникальные свойства КЦМ с НРЧ по прочности, водонепроницаемости, морозостойкости, коррозионной стойкости, усадке и др. обеспечиваются за счет увеличения площади раздела фаз, химического взаимодействия НРЧ с минералами цементного клинкера, каталитической роли НРЧ, как центров кристаллизации твердеющей системы и заполнения наноразмерными частицами и их агрегатами пространства между продуктами гидратации цемента.

Наночастицы из-за высоких значений удельной поверхности обладают избытком свободной энергии по сравнению с частицами, расположенными в объеме фазы и являются активными центрами кристаллизации, формируя вокруг себя интенсивный рост новообразований (Рисунок 2). Наноразмерные частицы и их агрегаты, заполняя промежутки между кристаллогидратами в твердеющей цементной системе, повышают плотность и прочность ЦКМ.

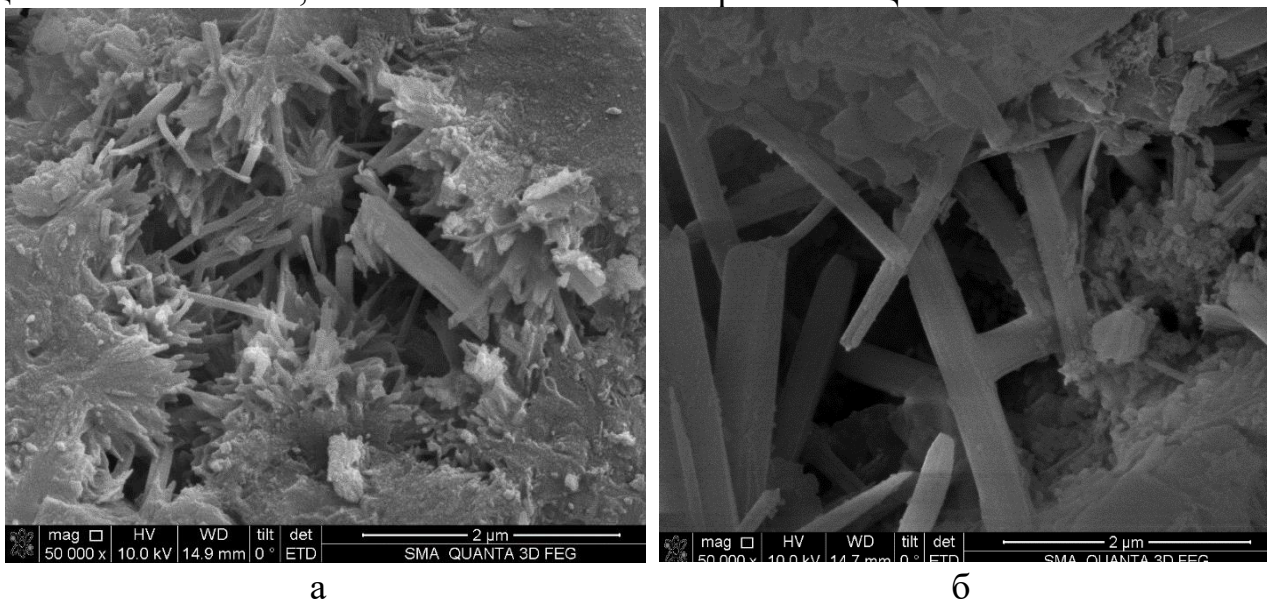


Рисунок 2. Микроструктура цементного камня в возрасте 7 (а) и 28 суток твердения. Новообразования в порах ЦК с НРЧ кремнезема. Увеличение 50000.

Уже в первые минуты гидратации НРЧ кремнезема активно влияют на концентрацию ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  в жидкой фазе цементных паст что приводит к сокращению длительности индукционного периода (или он вовсе не наступает). В присутствии наноразмерных частиц  $\text{SiO}_2$  образование продуктов гидратации в ранний период происходит в непосредственной близости от их поверхности. При этом цементные зерна в меньшей степени блокируются новообразованиями, что способствует интенсификации процесса гидролиза цементных фаз [3-4].

При химической активности НРЧ возможно взаимодействие между ними и минералами цементного клинкера с образованием, в основном, дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция.

По данным качественного РФА в цементном камне с добавкой НРЧ диоксида титана зафиксировано снижение суммарной интенсивности отражения портландита от 474 до 205 имп./с, т.е. на 57%, по отношению к цементному

камню семисуточного возраста и от 346 до 204 имп./с, т.е. на 40%, по сравнению с контрольным ЦК в возрасте 28 суток твердения.

В присутствии НРЧ кремнезема суммарная интенсивность дифракционных максимумов алита в цементном камне 7-суточного возраста уменьшается от 354 до 211 имп./с, т.е. на 41 % по сравнению с ЦК контрольного состава, что подтверждает ускорение процесса гидратации цементного вяжущего.

Выполненные исследования пористости цементного композиционного материала с добавкой НРЧ кремнезема и диоксида титана, показали снижение среднего диаметра пор, общей пористости и перераспределение пор по размерам в структуре ЦКМ.

Общий объем пор ЦКМ с добавкой НРЧ кремнезема снижается от 0,091 до 0,057 мг/л, средний диаметр пор - от 3,5 мкм до 0,75 мкм, т.е. в 4,7 раза, а общая пористость - от 19,2 до 13,6 % (табл. 1). При этом удельная поверхность пор увеличивается от 1,75 до 3,21 м<sup>2</sup>/г.

Таблица 1. Порометрические показатели ЦКМ

Состав	Общий объем пор, мг/л	Общая поверхность пор, м <sup>2</sup> /г	Общая пористость, %	Средний диаметр пор, мкм
ЦКМ В/Ц 0,44	0,091	1,75	19,2	3,5
ЦКМ с 10% НРЧ SiO <sub>2</sub> В/Ц 0,4	0,057	3,21	13,6	0,75
ЦКМ В/Ц 0,44	0,08	3,0	17,5	0,4
ЦКМ с 10% НРЧ TiO <sub>2</sub> В/Ц 0,4	0,05	4,4	12,8	0,18

Установлено, что добавка НРЧ диоксида титана снижает общую пористость ЦКМ от 17,5 до 12,8 %, а средний диаметр пор – от 0,4 до 0,18 мкм, т.е. в 2,2 раза, по сравнению с ЦКМ контрольного состава. При этом в ЦКМ с добавкой НРЧ TiO<sub>2</sub> зафиксировано увеличение общей площади поверхности пор от 3,0 до 4,4 см<sup>2</sup>/г, т.е. в 1,5 раза, при снижении их объемной доли от 0,08 до 0,05 мг/л, т.е. в 1,6 раза. Перераспределение пор по размерам в сторону уменьшения доли макро- и микропор и возрастание доли наноразмерных пор приводит к увеличению плотности структуры материала.

Роль наночастиц в процессе структурообразования на ранних стадиях гидратации связана с уменьшением пространства между гидросиликатами кальция и этtringитом, за счет того, что наночастицы, встраиваются в промежутки между ними без нарушения структуры, что даже при водоцементном отношении более 0,25 приводит к гидратации по варианту с преобладающей роли гидросиликатов кальция, как структурной составляющей цементного камня по сравнению с гидроалюминатами [1].

Установлено, что НРЧ кремнезема, вступают в реакцию с Ca(OH)<sub>2</sub>, уменьшая его общее содержание в цементной системе, что приводит к снижению скорости выщелачивания и увеличению прочностных показателей ЦКМ (табл. 2).

Таблица 2. Прочностные показатели ЦКМ

Состав					Расплав конуса, мм	Среднее значение прочностного показателя ЦКМ		
						в возрасте, сут.		
цемент, кг	Песок кварцевый, кг	Песок кварцево-гlaubриновый, кг	вода, л	Добавка НРЧ кремнезема, %		1	3	28
Прочность при сжатии ЦКМ, МПа								
500	1350	150	215	-	110	2,6	7,9	21,1
500	1350	150	145	0,1	109	5,5	23,7	47,8
Прочность при изгибе ЦКМ, МПа								
500	1350	150	215	-	110	0,7	1,3	2,3
500	1350	150	145	0,1	109	1,9	5,1	7,6

Таким образом, рассмотрена роль наночастиц в формировании структуры и свойств цементных композиционных материалов. Показана эффективность НРЧ в ускорении твердения, увеличении плотности и прочности цементных композитов за счет дополнительных площадей раздела фаз, химического взаимодействия НРЧ с минералами цементного клинкера, каталитической роли НРЧ, как центров кристаллизации твердеющей системы и заполнения наноразмерными частицами и их агрегатами пространства между продуктами гидратации цемента.

**Библиографический список:**

1. Баженов, Ю.М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин. М.: МГСУ, 2013. 204 с.
2. Лукутцова, Н.П. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона. Монография. / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин. Брянск: Изд-во БГИТА, 2013. 231 с.
3. Брыков, А.С. Применение ультрадисперсных кремнезёмов в бетонных технологиях / А.С. Брыков, Р.Т. Камалиев // Цемент и его применение. 2009. март-апрель. С. 122–125.
4. Камалиев, Р.Т. Портландцемент с добавкой ультрадисперсных кремнезёмов / Р.Т. Камалиев, В.И. Корнеев, А.С. Брыков // Цемент и его применение. 2009. январь-февраль. С. 86–89.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЛИТОВЫХ ПОРОД ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА

С.А. Лхасаранов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

Л.А. Урханова<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

А.А. Иванов<sup>1</sup>, аспирант

С.С. Культиков<sup>1</sup>, студент

<sup>1</sup>*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия*

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований по применению композиционного вяжущего на основе портландцемента и стекловидного перлита для бетона гидротехнических сооружений. Проведен дифференциально-термический анализ портландцемента и композиционного вяжущего, свидетельствующий об изменении степени гидратации цементной системы и образовании дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция. Спланирован и проведен трехфакторный эксперимент по оптимизации состава гидротехнического бетона по критерию прочности при сжатии бетона в возрасте 28 суток.

**Ключевые слова:** гидротехнический бетон, портландцемент, стекловидный перлит, композиционное вяжущее, оптимизация состава, прочность.

При подборе состава бетона для гидротехнических сооружений, важным аспектом является выбор вяжущего обеспечивающего набор требуемых физико-механических свойств и обладающего умеренным уровнем тепловыделения [1-4]. При этом необходимо обеспечить технологические свойства бетонной смеси с одновременным достижением физико-механических и эксплуатационных свойств бетона [5-7].

Целью научного исследования является оптимизация состава гидротехнического бетона методом математического планирования эксперимента при варьировании составляющих бетонной смеси по критерию высоких физико-механических показателей.

Для получения гидротехнического бетона класса В30 были использованы: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Н, перлит стекловидный Мухор-Талинского месторождения (Республика Бурятия), суперпластификатор поликарбоксилатного типа Sika Viscocrete 5 New, кварц-полевошпатовый песок с модулем крупности 2,5, щебень гранитный смеси фракций 5-20 мм.

Ранее авторами были определены оптимальные составы композиционных вяжущих с применением стекловидного и закристаллизованного перлита, используемых для повышения трещиностойкости гидротехнического бетона [8]. Было определено, что введение стекловидного перлита и суперпластификаторов различного типа приводит к приросту прочности цементного камня и снижению тепловыделения при гидратации цементной матрицы.

Для установления оптимальных составов гидротехнического бетона был спланирован трехфакторный эксперимент (табл. 1).

Таблица 1. Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Содержание ПЦ, кг/м <sup>3</sup>	x1	325	375	425	50
Содержание перлита, кг/м <sup>3</sup>	x2	35	75	115	40
Удельная поверхность перлита, м <sup>2</sup> /кг	x3	450	600	750	150

Выбор факторов и параметров оптимизации производили исходя из технологической и экономической целесообразности. С учетом оценки значимости коэффициентов уравнение регрессии принимает вид:

$$Y = 58,53 + 5,2x_1 - 4,16x_2 + 6,39x_3 - 2,87x_1^2 - 4,15x_2^2 - 5,38x_3^2 - 0,63x_1x_2 + 1,4x_1x_3 - 0,3x_2x_3$$

На рисунке 1 представлены поверхности откликов полученной регрессионной модели в зависимости от влияния исследуемых факторов.

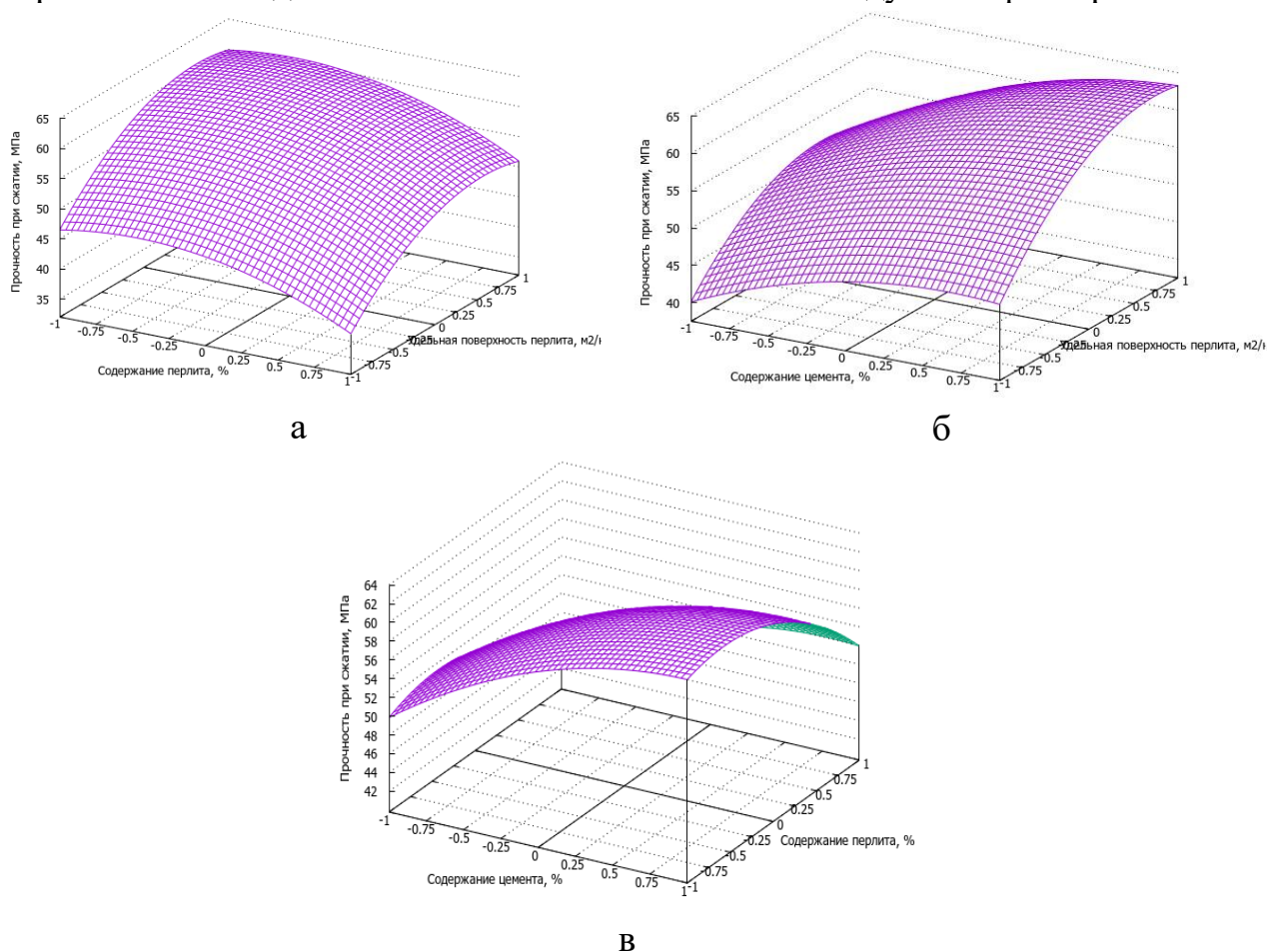


Рисунок 1. Зависимости прочности при сжатии гидротехнического бетона в возрасте 28 суток от варьируемых факторов: а – при содержании цемента 375 кг, б – при содержании перлита 75 кг, в – при удельной поверхности перлита 600 м<sup>2</sup>/кг

По результатам трехфакторного планирования установлено, что при увеличении содержания портландцемента в составе гидротехнического бетона от 325 кг до 425 кг происходит увеличение прочности при сжатии на 24%, оптимальное содержание перлита лежит в пределах 10-20% от массы портландцемента, при котором достигаются максимальные значения по прочности на сжатие. При увеличении удельной поверхности перлита до 750 м<sup>2</sup>/кг происходит увеличение прочности при сжатии на 30-35%.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при введении в состав композиционных вяжущих перлита в количестве до 30 % получены физико-механические показатели, превышающие прочность исходного портландцемента;

- проведена оптимизация составов гидротехнического бетона классов В35-В50 с композиционным вяжущим на основе цемента и перлита с различной удельной поверхностью. По результатам исследований оптимальным является состав с содержанием цемента 425 кг. Введение стекловидного перлита с удельной поверхностью 600-800 м<sup>2</sup>/кг в количестве 10-20% по массе приводит к повышению прочности на сжатие гидротехнического бетона на 20-25% по сравнению с контрольным бездобавочным составом.

#### **Библиографический список:**

1. Сафаров, К.Б. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС / К.Б. Сафаров, В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 20-25.
2. Григорьев, В.Г. Композиционные портландцементы для гидротехнического строительства / В.Г. Григорьев, В.К. Козлова, Е.Е. Андрияшина, Е.В. Шкробко, А.А. Лихошерстов // Ползуновский вестник. 2012. №1. С. 62–64.
3. Нго, С.Х. Влияние золы рисовой шелухи на свойства гидротехнических бетонов / С.Х. Нго, В.Л. Танг, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, О.А. Ларсен, Х.К. Ха // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 6 (117). С. 768-777.
4. Ahverdieva, T. A. Modern Technologies in the Production of Hydrotechnical Concrete / T. A. Ahverdieva, R. Jafarov // Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). – 2020. – No. 3. – P. 76. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-779-3-76-79.
5. Ашрабова, М. А. Особенности формирования структуры и свойств гидротехнических бетонов на заполнителях из дробленого бетона / М. А. Ашрабова // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2017. – № 2(66). – С. 157-160.
6. Коваленко, А. В. Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона для ремонта гидротехнических сооружений / А. В. Коваленко, А. Ю. Юзюк // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2(104). – С. 66-68.
7. Дубяго, Д. С. Уход за бетоном посредством увеличения срока твердения гидротехнического бетона в опалубке / Д. С. Дубяго // Инновационные технологии в мелиорации и строительстве: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 180-летию образования УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», Горки, 29–30 июня 2020 года. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 108-110.

8. Иванов А.А. Исследование влияния тонкодисперсных добавок на свойства композиционных вяжущих для гидротехнического бетона / А. А. Иванов, Л. А. Урханова, С. А. Лхасаранов, П. К. Хардаев // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 2(89). С. 80-88. DOI 10.53980/24131997\_2023\_2\_80.

## ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ФОРМАЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ В ЗАДАЧАХ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.И. Макеев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>*Воронежский государственный технический университет*

**Аннотация.** В статье обсуждаются необходимость системной идентификации и формализации структуры конгломератных строительных композитов для разработки информационной модели композитов в целях оптимизационного конструирования и технологического синтеза этих материалов с характеристиками, задаваемыми в зависимости от условий их работы в строительных конструкциях. Проблема заключается в том, что конгломератные строительные композиты (в их числе бетоны) как объекты идентификации, формализации и моделирования их структуры весьма сложны, так как представляют собой структурированные твёрдые тела, наделённые признаками субстанциональности, многофазности, полиструктурности, масштабной многоуровневости, детерминированности, стохастичности и диалектичности. В качественной постановке структура такого материала идентифицируется как пространственно-геометрическая конструкция, обладающая минимум 5-6 масштабными уровнями и тремя типами конструкции подструктур, различающихся по своему масштабу, генезису и механике проявления свойств. В статье дается общая качественная характеристика каждого типа подструктуры и обосновывается задача установления их специфических количественных идентификационных показателей.

**Ключевые слова:** строительные композиты, конструирование и синтез, информационная модель, идентификация и формализация структуры, типы конструкции подструктур, параметры конструкций, инструментальный анализ.

Рассмотрение ретроспекции накопления научного знания, эволюции концепций и методологий теоретического и прикладного материаловедения строительных композитов [1] показывает, что решение перманентной проблемы оптимизации структуры и технологии бетонов с древнейших времен и до наших дней осуществлялось, по сути, на основе информационного моделирования [2]. Современное состояние системно-структурного материаловедения и технологии бетонов можно оценивать как выход на постановки и решения задач конструирования и синтеза их оптимальных структур на основе компьютерного моделирования причинно-следственных отношений в системе «технология — материал — конструкция — здание (сооружение) — эксплуатационная среда».

Цифровизация строительного материаловедения означает переход от физических, натуральных моделей (образцов бетона) на работу с математическим образом, позволяющим совершать управляющие действия с цифровым двойником строительной конструкции (виртуальным объектом) с помощью компьютера, причем последний используется не столько как средство обработки информации и вычислений, сколько как непосредственная «производительная сила» в получении конечного результата [3].

Это подчеркивает актуальность разработки и использования информационной модели бетона в управлении свойствами материала строительной конструкции «на основе знания о механике проявления свойств



как функции эволюционирующей структуры материала в условиях контролируемых режимов эксплуатационных воздействий на неё» [4]:

$$R(\tau_i) = f[(4C)_{\tau_0}; P_{ф.ср.}; \tau] \quad (1)$$

посредством управляемого варьирования совокупностью рецептурно-технологических факторов синтеза структуры для ее оптимизации по формуле «4С»:

$$R(\tau_0) = \phi[(4C)_{\tau_0}] = f(РТФ) \quad (2)$$

где  $R(\tau_0)$  и  $(4C)_{\tau_0}$  – свойства (конструкционный потенциал) композита и его Состав, Структура, Состояние и Свойства на момент времени изготовления  $\tau_0$ ; РТФ - рецептурно-технологические факторы;  $R(\tau_i)$  – конструкционный ресурс композита на момент времени эксплуатации  $\tau_i$ ;  $P_{ф.ср}$  – факторы эксплуатационной среды [4].

Информационная модель бетона должна, во-первых, описывать идентификационные универсалии и качественно-количественные признаки строения бетона на всех его масштабных уровнях, а во-вторых, раскрывать причинно-следственные связи и отношения в системах (1) и (2).

Соответственно, для разработки информационной модели композитов необходима их формализация - переход от реальных сторон и отношений объекта к их знаковому обозначению. В свою очередь, формализация возможна только после соответствующей идентификации (распознавания для отображения в человеческом сознании [5]). Отметим, что проблема идентификации строения рассматривается ведущими отечественными специалистами как ключевая в методологии системно-структурного строительного материаловедения [6].

При этом идентификацию строения можно трактовать как теоретический этап формирования фундаментальной базы знаний по композитам (в их числе – и бетонам), необходимый для обоснования дальнейших этапов формализации и моделирования их строения. С другой стороны, системная идентификация конгломератных строительных композитов включает инструментальный анализ полученной в результате технологического синтеза реальной структуры (с соответствующим конструкционным потенциалом) в целях ее сопоставления с априорно сконструированной структурой.

Основы для качественно-количественной идентификации структуры конгломератных строительных композитов заложены развитием и эволюцией системно-структурного подхода в строительном материаловедении. Методология идентификации структуры опирается на комплексность постановки задачи, системность представления строения композита, качественную и количественную характеристику структуры, учет механики проявления свойств композита, выполнение требования адекватности отображения, достоверности и воспроизводимости количественной оценки характеристик структуры.

При рассмотрении поставленной проблемы необходимо решение задач аналитического разложения композита на составные части и синтеза этих частей в единое целое. В рамках пространственно-геометрической концепции

организации структуры пространства, занимаемого твёрдым телом композита, его структура должна восприниматься как результат формирования и взаимодействия системы сложения и системы роста.

На основе этих исходных посылок была проведена качественная идентификация конгломератных строительных композитов (бетонов) [7], в результате которой они квалифицируются как структурированные твёрдые тела, наделённые признаками субстанцииальности, многофазности, полиструктурности, масштабной многоуровневости, детерминированности, стохастичности и диалектичности, которые Е.М. Чернышов обозначил как универсалии строения.

Универсалии полиструктурности и масштабной многоуровневости [8] реализуются в том, что несмотря на все многообразие разновидностей плотных, поризованных, мелко- и микрозернистых строительных композитов на основе гидратно-, гидротермально- и термальносинтезных систем твердения их структура представляет собой своего рода пространственно-геометрическую конструкцию характеристической размерностью от  $10^{-10}$  до  $10^{-1}$  м, обладающую минимум 5-6 структурными уровнями и тремя типами конструкции подструктур, различающихся по своему масштабу, генезису и механике проявления свойств (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика подструктур конгломератных строительных композитов

Характеристический признак	Тип подструктуры		
	I (конгломератный композит)	II (микроконструкция)	III (сплошная среда)
«Занимаемые» уровни целостной структуры	макро-, мезо- и микромасштабные	субмикро-, ультрамикро- и наномасштабные	наномасштабный и атомно-молекулярный
Размерный диапазон структурных элементов, м	$10^{-1} - 10^{-(4\div 5)}$	$10^{-(4\div 5)} - 10^{-(8\div 9)}$	$10^{-8} - 10^{-10}$
Описание строения	двухкомпонентная «конструкция» из пространственно непрерывной матрицы и детерминировано-стохастически распределённых в ней дискретных включений; сплошное гетерогенное тело	«микромасштабная пространственная конструкция» новообразований цементирующего вещества из консолидированных индивидуальных кристаллических и скрытокристаллических разностей	твёрдофазная субстанция индивидуальных скрытокристаллических или кристаллических новообразований; сплошное монофазное тело, наделённое несовершенствами (дефектами) в форме вакансий, замещений, дислокаций

Генезис	продукт формирования «системы сложения»	продукт взаимодействия «системы сложения» и «системы роста»	продукт эволюции «системы роста»
Закономерности механики свойств	механика композитов	строительная «микромеханика»	термофлуктуационная теория, механика трещин
Критерии конструирования	управление полем напряжений по параметрам их концентрации и локализации	несущая способность	кинетическая прочность, вязкость разрушения
Научная база средств синтеза	механика и механохимия зернистых сред, физикохимия дисперсных систем	физикохимия дисперсных систем, теория строения вещества, химия твердого тела, кристаллохимия, нанохимия	
Объем в пространстве композита, %	100	15-20	6-10

Отсюда становится актуальной задача постановки исследований по формированию специфической системы количественных оценок и характеристик параметров конструкций каждого выделенного типа подструктур. Исходными данными для таких исследований являются результаты экспериментального анализа материала. В системно-структурном материаловедении строительных композитов уже к 60-70 гг. прошлого века сложился инструментарий методов, дававший при комплексном, системном их применении достаточно глубокую характеристику явлений их структурообразования [9]: визуальный анализ макроструктуры; оптическая микроскопия мезоструктуры; петрографический анализ микроструктуры, минералогического и морфологического состава; комплексный химический анализ вещественного состава; калориметрия для оценки энергетического состояния поверхности твердофазных структурных составляющих; дифференциально-термический и термогравиметрический анализ минералогического состава, рентгенофазовый анализ минералогического состава; рентгеноструктурный анализ кристаллохимии минералов; инфракрасная спектроскопия структурных связей; электронная растровая микроскопия микро-, субмикро- и наноструктуры, минералогического и морфологического состава; микротвердометрия субстанции и контактных зон; порометрия оптическая, гигрометрическая, ртутная; стереометрия структуры композитов.

Представляется, что выполненная системная идентификация, формализация и компьютерное моделирование структур конгломератных строительных

композитов обеспечит решение практических задач оптимизационного конструирования и технологического синтеза этих материалов с характеристиками, задаваемыми в зависимости от условий их работы в строительных конструкциях.

#### **Библиографический список:**

1. Чернышов, Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 2. / Е.М. Чернышов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 1. С. 57-77.
2. Чернышов, Е.М. О проблеме развития, эволюции «цифрового подхода» в материаловедении и технологии строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Современная наука: теория, методология, практика: Мат-лы III всеросс. (национальной) научно-практ. конф. - Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2021. С. 9-21.
3. Баженов, Ю.М. Компьютерное материаловедение строительных композитных материалов / Ю.М. Баженов, В.А. Воробьев, А.В. Илюхин [и др.]. - М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2006. 256 с.
4. Чернышов, Е.М. Базовые положения механики проявления конструкционных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 1. / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев А.И., Д.Н. Коротких // Известия вузов. Строительство. 2020. № 8. С. 43-51
5. Будылина, Е.А. Общая схема идентификации и синтеза строительных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство, 2022. № 4. С. 26-30.
6. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. - М: МГСУ, 2012. 432 с.
7. Чернышов, Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 3. / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Известия вузов. Строительство. 2021. № 3. С. 5-26.
8. Чернышов, Е.М. Универсалии строительных композитов как структурированных твердых тел / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 37-54.
9. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2. С. 75-80.

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КЛИНКЕРНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ЧЕРЕПИЦЫ НА ОСНОВЕ АРГИЛЛИТОВ ВЕРХНЕАЛКУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ИНГУШЕТИЯ

А.Х. Мархиев<sup>1</sup>, аспирант

М.Е. Орлова<sup>1</sup>, ассистент

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет

**Аннотация.** Клинкерная керамическая черепица является одним из популярных видов кровельных материалов. По сравнению с другими кровельными покрытиями, клинкерная черепица имеет более высокие показатели по прочности, стойкости по отношению к агрессивным средам и эстетическим показателям. Актуальность производства клинкерной керамической черепицы обусловлена тем, что в настоящее время архитекторы и строители проявляют большой интерес к такому элитному кровельному материалу, такому как клинкерная черепица. Однако основными тенденциями при производстве керамической черепицы являются увеличение её прочности при снижении веса за счёт уменьшения толщины. Нами предлагается технология производства клинкерной черепицы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения с пределом прочности при изгибе 23,9 МПа, с водопоглощением менее 4 % и морозостойкостью более 200 циклов.

**Ключевые слова:** черепица, клинкер, аргиллиты, химический состав, минеральный состав, керамические изделия, свойства, технология.

Одним из самых распространённых кровельных материалов является керамическая черепица. Её применяют на протяжении не одного столетия в таких государствах как Китай, Средняя Азия, Индия, Греция и Италия, это связано с её технологическими и эстетическими показателями. На территории России керамическую черепицу применяли в основном для строительства индивидуального строительства, но глобального распространения она не получила [1]. Во времена Советского Союза были предприняты попытки производства керамической черепицы, в связи с чем были построены десятки заводов. Но производимая продукция была нестабильна в геометрических размерах, из-за этого требовались квалифицированные рабочие, которые могли устранить данный дефект, что привело к увеличению стоимости монтажных работ.

На сегодняшний день на керамическую черепицу увеличивается спрос, обусловлено это тем, что данный вид изделий является самым надёжным кровельным материалом. Керамическая черепица обладает высокими эксплуатационными показателями, такими как морозостойкость, долговечность, водонепроницаемость [2]. Несмотря на то, что вероятность разрушения черепицы во время эксплуатации очень мала, её легко ремонтировать, по причине довольно простой конструкции крепления на крыше. У керамической черепицы есть один весомый минус – это высокая стоимость на рынке. Производство отечественной керамической клинкерной черепицы решило бы этот вопрос, так как для снижения стоимости черепицы нужна надёжная

сырьевая база и продуманная технологическая схема производства, на выходе которой получалось бы изделие, способное конкурировать с зарубежной черепицей и другими современными материалами. Производство клинкерной черепицы на территории России также повлияло бы на уровень развития строительного комплекса, позволило бы готовить квалифицированных специалистов и обеспечивать страну большим разнообразием кровельных материалов.

Аргиллиты Верхнеалкунского месторождения могут являться перспективным сырьем для производства клинкерной черепицы. Мощность толщи аргиллитов выходит на поверхность около селения Верхний Алкун Республики Ингушетия на левом берегу Асса и составляет около 100 метров.

Химический состав аргиллитов Верхнеалкунского месторождения, согласно ГОСТ 9169-21 «Сырьё глинистое для керамической промышленности можно отнести к полукислому сырью с содержанием кремнезёма от 60 до 65 %,  $Al_2O_3$  от 14 до 18 %, с высоким содержанием красящих оксидов, что представлено на таблице 1.

Таблица 1. Усреднённый химический состав аргиллитов Верхнеалкунского месторождения, % по массе

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$ общ.	$K_2O$	$CaO$	$CO_2$	$Na_2O$	$MgO$	$SO_3$	ППП
60,50 - 65,35	14,28 - 18,57	3,15 - 5,21	2,69- 3,76	2,55- 4,81	2,10 - 3,90	1,55 - 1,98	1,16 - 2,40	0,09 - 0,15	5,51 - 8,14

Из таблицы 1 видно, что оксид калия преобладает над оксидом натрия при их общем содержании 4-6%, это говорит о низкотемпературном спекании сырья, что является благоприятным моментом для производства клинкерной черепицы [3-6]. Минеральный состав характерен тем, что в аргиллитах Верхнеалкунского месторождения присутствуют минералы всех групп, это говорит о том, что глинистая составляющая аргиллитов может быть охарактеризована как полиминеральная (рисунок 1). Особенностью данного минерального состава является присутствие слюдистых минералов, цеолитов и глауконита преимущественно алевритовой размерности.

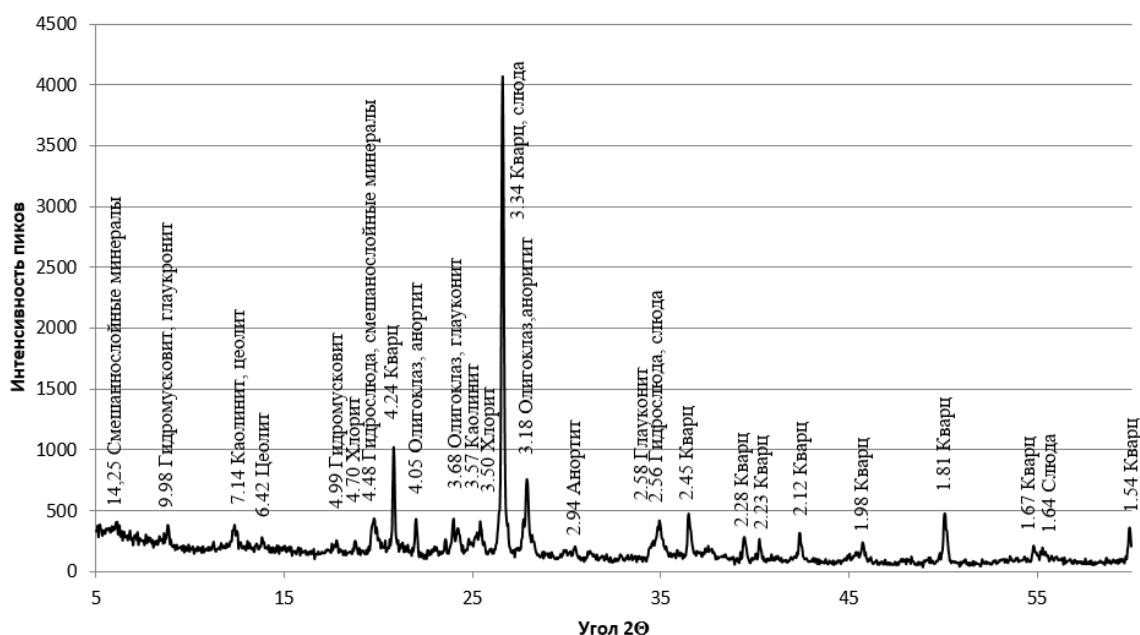


Рисунок 1. Рентгенограмма аргиллитов Верхнеалкунского месторождения

Структура неразрушенного аргиллита Верхнеалкунского месторождения является пелито-алевритистая скрытокристаллическая, при этом текстура слабослоистая. Под электронным микроскопом видны удлинённые кристаллики гидрослюда размерами 5-10 мкм (рисунок 2).

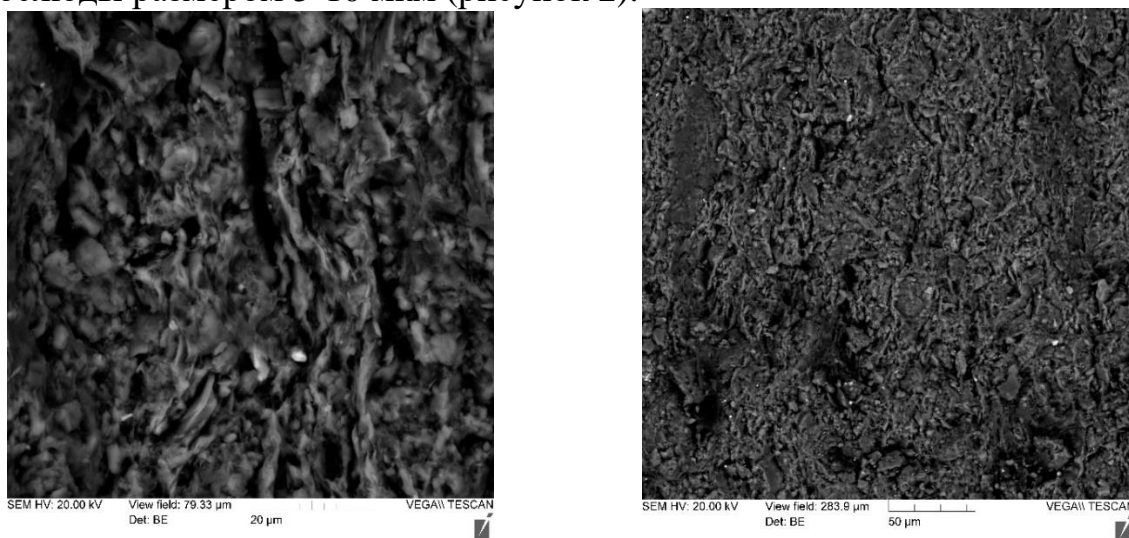


Рисунок 2. Внешний вид аргиллитов под электронным микроскопом

Аргиллиты без дополнительного измельчения являются грубодисперсным сырьем. Пластичность варьируется от 9 до 12 единиц в зависимости от степени измельчения сырья, при этом воздушная усадка составляет 2-4 %.

Для клинкерной черепицы важными показателями являются водопоглощение и предел прочности при изгибе. Предел прочности при изгибе нами определялся на образцах, обожженных при различных температурах – 1000, 1050 и 1100 °С и составляет 12,5; 23,9 и 28,5 МПа (рисунок 3). Это весьма высокий показатель для кровельной керамики. Также важным показателем для клинкерной черепицы является водопоглощение (рисунок 4). Керамический

черепок из предварительно измельченного аргиллита до фракции 0-0,5 мм и обожжённый при температуре 1050 °С составляет 3,8 %, а при температуре 1100 °С – 1,5%.

По полученным данным в ходе проведения исследований было установлено, что предпочтительным способом производства клинкерной керамической черепицы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения является метод экструзионного формования с последующим штампованием [7-10].

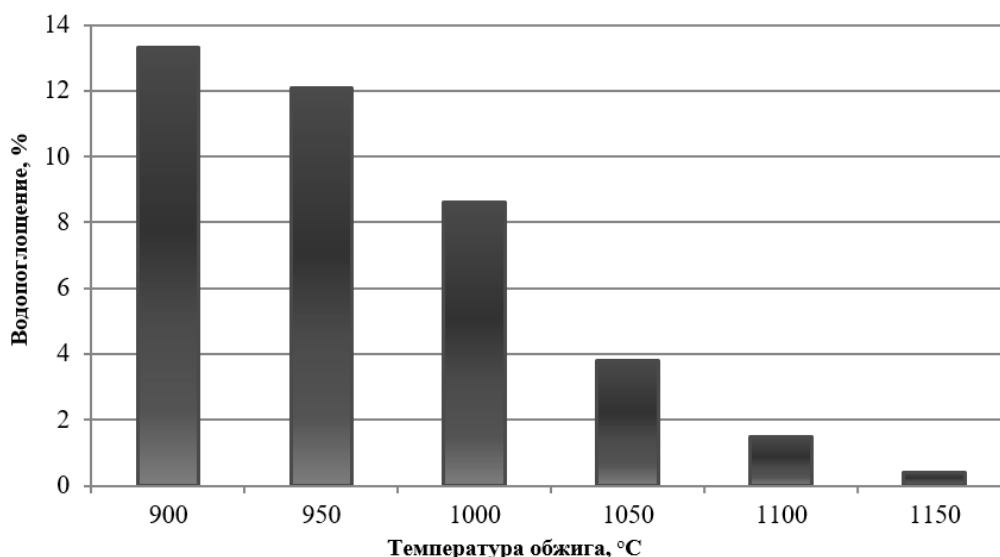


Рисунок 3. Водопоглощение керамических образцов на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения

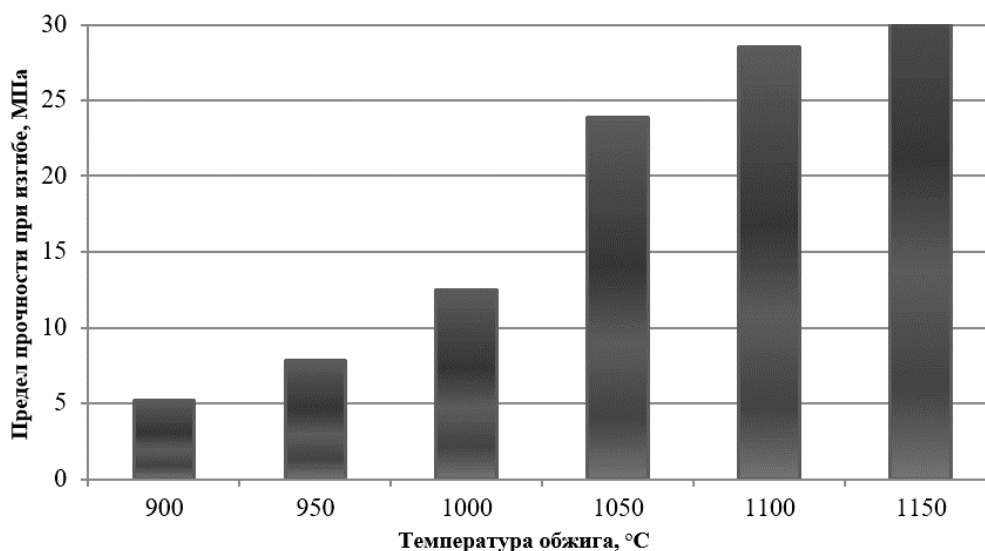


Рисунок 4. Предел прочности при изгибе керамических образцов на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения

Для разработки технологической схемы производства необходимо учитывать особенности выбранного сырьевого материала, способ производства керамической клинкерной черепицы и результаты полученных лабораторных экспериментов:



- карьерная влажность сырья (10 %);
- особенности камневидного сырья с медленной размокаемостью;
- кусковая прочность аргиллитов (5–15 МПа);
- измельчение аргиллитов до 0,5 мм, для получения изделий с требуемыми характеристиками;
- интервал обжига 1050-1100 °С.

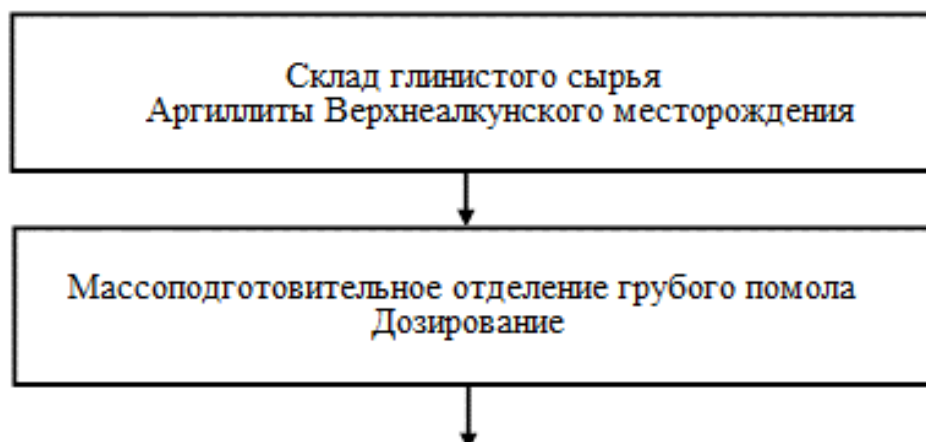
Таким образом, технологическая схема по производству керамической клинкерной черепицы будет выглядеть следующим образом (рисунок 5).

Образцы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения обладают высокими прочностными показателями. Предел прочности при изгибе в интервале температур 1050-1100°С составляет более 20 МПа. Данный показатель плотно связан со степенью измельчения. Следовательно, с увеличением температуры обжига и уменьшением степени измельчения можно наблюдать закономерное возрастание прочности образцов на основе аргиллитов.

Показатели по водопоглощению для керамической черепицы должны быть не менее 6 %. Образцы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения в зависимости от степени измельчения при температурах обжига 1050-1100 °С имеют значение по водопоглощению 3,8 и 1,5 %. При полученном значении черепица становится гарантированно водонепроницаемой.

При этих показателях водопоглощения образцы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения выдерживают более 200 циклов замораживания и оттаивания без признаков разрушения.

Проведенные исследования в Донском государственном техническом университете на базе кафедры «Строительные материалы» позволили считать аргиллиты Верхнеалкунского месторождения перспективным сырьем для производства клинкерной черепицы с водопоглощением менее 4 %, пределом прочности при изгибе 23,9 МПа и морозостойкостью более 200 циклов. Данное сырье также имеет перспективы для дальнейшего изучения в области формования и декорирования.



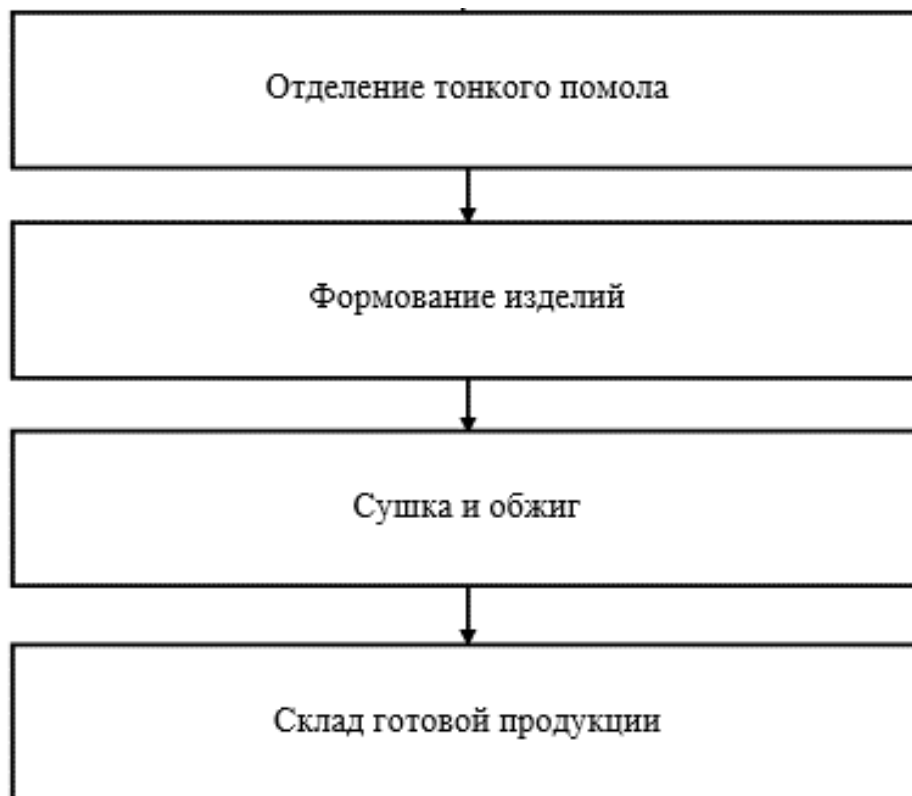


Рисунок 5. Технологическая схема производства клинкерной черепицы на основе аргиллитов Верхнеалкунского месторождения

#### Библиографический список:

1. Охотная, А.С., Котляр, В.Д., Орлова, М.Е. Керамическая черепица: особенности современного дизайна и технологии производства. Технология художественной обработки материалов / А.С. Охотная, В.Д. Котляр, М.Е. Орлова // Сборник материалов XXI Всероссийской научно-практической конференции. Ижевск, 2018. С. 319–324.
2. Орлова, М.Е., Лапунова, К.А. Перспективные виды сырья для производства декорированной керамической черепицы / М.Е. Орлова, К.А. Лапунова // Наука сегодня: вызовы и решения. 2018. Ч. 1. С. 46–48.
3. Лапунова К.А., Орлова М.Е., Лазарева Я.В., Васин Д.С. Технология производства высокопрочной керамической черепицы на основе аргиллитоподобных глин. Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы XII Международной научной конференции молодых ученых. Пенза: ПГУАС, 2017. С. 104–108.
4. Котляр, В.Д. История появления и основные этапы развития производства керамической черепицы / В.Д. Котляр, М.Е. Орлова, К.А. Лапунова, Я.В. Лазарева // Строительство. Архитектура. Экономика. Материалы Международного форума «Победный май 1945 года»: Сборник статей. Министерство образования и науки Российской Федерации, Донской государственный технический университет, Профсоюз работников народного образования и науки Российской Федерации. Ростов н/Д. 2018. С. 47–50.
5. Lazareva Y.V., Kotlyar A.V., Orlova M.E., Lapunova K.A Water permeability of argillite-based ceramic tiles // MATEC Web Conf. 2018. 04072. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819604072>.
6. Ужахов, К.М. Сырьевая база Республики Ингушетия для производства клинкерного кирпича / К.М. Ужахов, А.В. Котляр // Труды III Всероссийской научно-практической

конференции с международным участием «Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России». Новокузнецк, СГИУ-АСИ. 2022. С. 225-228.

7. Котляр, А.В. Технологические свойства аргиллитоподобных глин при производстве клинкерного кирпича / А.В. Котляр // Вестник ТГАСУ. 2016. № 2 (55). С. 164–175.

8. Котляр, В.Д. Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение / В.Д. Котляр, К.М. Ужахов, А.В. Котляр, Ю.В. Терёхина // «Строительные материалы». 2023. № 5. С. 4-8.

9. Котляр, А.В. Характеристика камнеподобных глинистых пород как сырья для производства строительной керамики / А.В. Котляр // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 31-37.

10. Лазарева, Я.В., Котляр, А.В., Орлова, М.Е. Технологическая схема производства клинкерной черепицы на основе аргиллитов способом мягкого компрессионного формования. Теория и практика повышения эффективности строительных материалов. Материалы XIII Международной научно-технической конференции молодых ученых, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова. Пенза, 2018. С. 83–89.

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕНОСТЕКЛЬНОГО ЩЕБНЯ ДЛЯ ЛЕГКОГО САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Д.О. Мелихов<sup>1</sup>, аспирант

Ю.И. Марков<sup>1</sup>, студент

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В статье рассмотрены виды легких заполнителей применяемых для получения легких самоуплотняющихся бетонов. Были установлены основные критерии зависимости свойств заполнителя от их вида. В работе был определен зерновой состав используемого заполнителя и определены основные физические свойства пеностеклового щебня, влияющие на эксплуатационные характеристики самоуплотняющегося бетона. Также был проведен сравнительный анализ исследуемого заполнителя с керамзитовым гравием и установлены отличительные различия между ними.

**Ключевые слова:** пеностеклоный щебень, легкий самоуплотняющийся бетон, портландцемент

### Введение

Исследования показывают, что в самоуплотняющемся бетоне используются несколько типов естественных и искусственных заполнителей. В качестве естественного легкого заполнителя чаще применяют пемзу, сланцевый керамзит, шлак, перлит и кокосовый сланец [1]. В то время как керамзитовый гравий, пенополистирол, отходы заполнителей из пластика, отходы переработанной резины обычно используются в качестве искусственных легких заполнителей в самоуплотняющемся бетоне [2].

Несмотря на то, что было проведено много исследований с использованием естественных и искусственных легких заполнителей для исследования свойств легкого самоуплотняющегося бетона, до сих пор не установили корреляции между свойствами легкого заполнителя и эксплуатационными характеристиками самоуплотняющегося бетона, полученного на этих заполнителях [3].

Физические свойства легкого заполнителя и их характеристики сильно зависят от вида используемых заполнителей. Прочность, плотность и водопоглощение являются важными характеристиками легкого заполнителя, которые варьируются в зависимости от типа используемого заполнителя и могут оказывать существенное влияние на эксплуатационные характеристики бетонной смеси и бетона [4].

Водопоглощение искусственных легких заполнителей в основном зависит от размера пор и внутренней структуры капилляров и от типа и количества пенообразователей, используемых для производства данного заполнителя [5]. Размеры пор заполнителя может привести к ряду вариаций прочности и

плотности легкого заполнителя. Большой объем пор может привести к снижению плотности и прочностных характеристик готового бетона [6].

Исследования показывают, что использование мелкого легкого заполнителя может устранить пустоты между заполнителями и показать лучшую плотность упаковки, что приводит к большей устойчивости к сегрегации и более высокой текучести, позволяя уменьшить количество цементного теста в самоуплотняющемся легком бетоне [7].

В данной работе рассматривается возможность применения пеностекольного щебня в качестве заполнителя для легкого самоуплотняющегося бетона.

Исследования по определению зернового состава данного заполнителя установили, что данный заполнитель не попадает в допустимую область и как следствие его необходимо подвергать расसेву и фракционированию (Рисунок 1) [8].

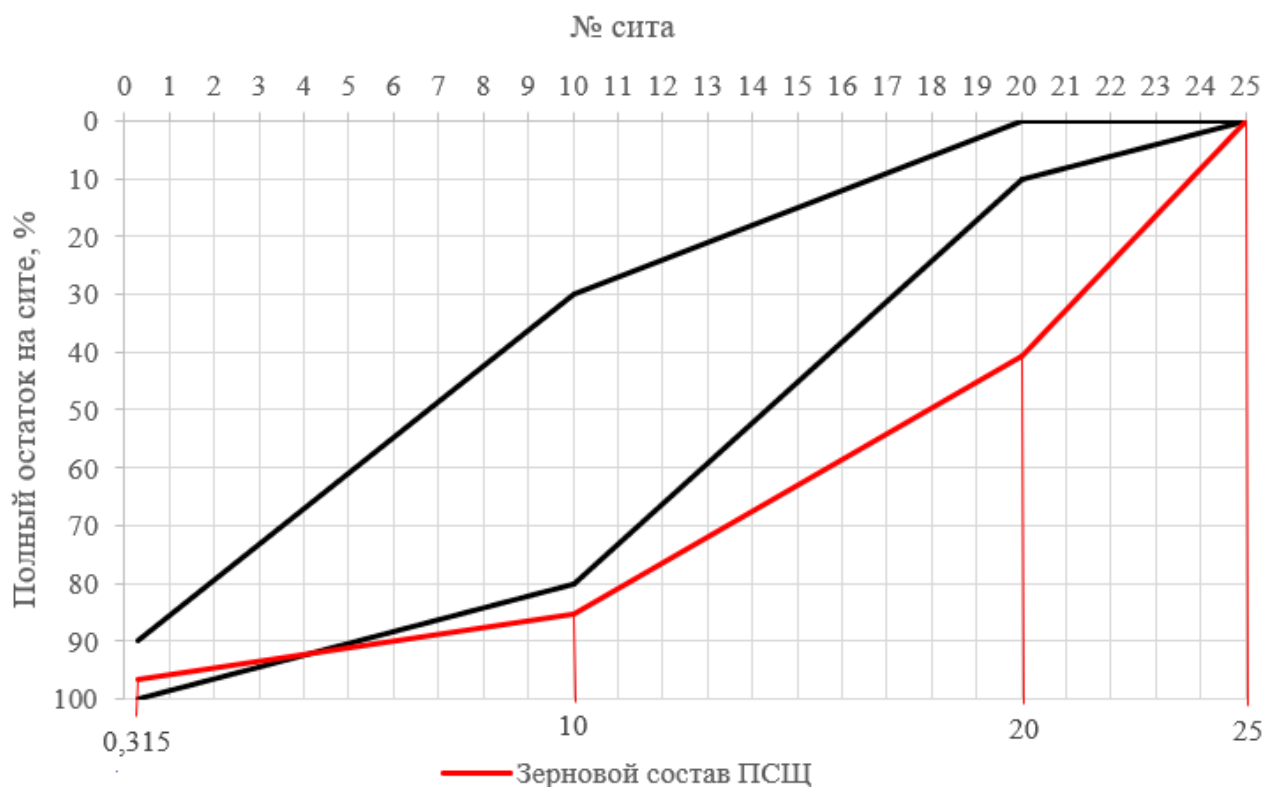


Рисунок 1. Определение зернового состава пеностекольного щебня

#### Материалы и методы

Целью данной работы является определение характеристик используемого некондиционного пеностекольного щебня необходимых для разработки легкого самоуплотняющегося бетона на его основе. На данном заполнителе были проведены испытания по определению зернового состава. Исследования по определению физических характеристик проводились на заполнителе с размером фракции 5 – 10 мм в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

## Результаты исследования

В ходе исследований по определению физических характеристик были определены следующие параметры:

- насыпная плотность - 140 кг/м<sup>3</sup>;
- истинная плотность - 2412 кг/м<sup>3</sup>;
- пористость - 78,07%;
- объем межзерновых пустот - 73,53%;
- водопоглощение - 79,7%;
- прочности заполнителя при сдавливании в цилиндре - 0,085МПа.

Сравнение полученных данные с керамзитовым гравием представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение основных свойств легких заполнителей

Наименование показателя	Пеностекло	Керамзит
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	140	250
Истинна плотность, кг/м <sup>3</sup>	2412	1540
Пористость, %	78,07	70
Объем межзерновых пустот, %	73,53	45
Водопоглощение, %	79,7	8-20
Прочность в цилиндре, МПа	0,085	0,3

При анализе полученных данных установлено, что некондиционный пеностекольный щебень обладает пониженной насыпной плотность и повышенным водопоглощением.

Также исследуемый заполнитель на 70% менее прочный при сдавливании в цилиндре чем пеностекольный гравий.

### Выводы

Эффективно фракционированный заполнитель может снизить содержание пустот и обеспечить превосходную текучесть и прочность полученного бетона.

Исследование свойств пеностекольного щебня показали, что его нельзя использовать сразу после производства для изготовления самоуплотняющегося бетона. Данный заполнитель необходимо дополнительно фракционировать для достижения более плотной упаковки зерен.

Полученный данные будут полезны при решении задач, связанных с подбором состава легкого самоуплотняющегося бетона, и помогут в дальнейшем более подробно изучить данный вид заполнителя.

### Библиографический список:

1. Kurt M., Kotan T., GüL M.S., GüL R., Aydin A.C. The effect of blast furnace slag on the self-compact ability of pumice aggregate lightweight concrete. – 2016. – Pp. 253-264.
2. Yim Wan D.S.L., Aslani F., Ma G. Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Perlite, Scoria, and Polystyrene Aggregates. – 2018. – 30 p.
3. F.M.L. Ernst. Onderzoek zelfverdichtend beton. MSc Thesis TUE/CCO/00-09, Eindhoven University of Technology, Faculteit Bouwkunde // Capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen, Eindhoven, The Netherlands. – 2000 (Dutch).
4. H. Ter Welle. Betoncentrale Twenthe, Hengelo, The Netherlands // Personal communications. – 2003.

5. B. Bos. BAS, Venray, The Netherlands // Personal communications. – 2003.
6. Yashar M., Behzad V. Effect of pre-coating lightweight aggregates on the self-compacting concrete. – 2021. – Pp. 1-12.
7. Larsen O.A., Bulgakov B.I., Gafarov R.M., Melikhov D.O. Influence of light aggregate on structure formation of lightweight concrete // Journal of Physics: Conference Series. Сер. «International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies». – 2020. – С. 012008.
8. Ларсен О.А., Мелихов Д.О. Применение пеностекольного щебня в легком самоуплотняющемся бетоне // Строительство - формирование среды жизнедеятельности. сборник материалов семинара молодых учёных XXVI Международной научной конференции. – Москва, 2023. – С. 15-18.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИИ БЕТОНОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Нгуен Зоан Тунг Лам<sup>1</sup>, аспирант

И.Д. Сизяков<sup>1</sup>, аспирант

С.В. Самченко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В работе обозначены основные виды коррозии в морской среде и подобраны лабораторные составы морской воды для исследования коррозии цементного камня и бетона в агрессивной среде. Представлено два варианта получения морской воды заданного химического состава в лаборатории, составлены и решены системы уравнений для соблюдения ионного баланса в морской воде. Выработана методика, по которой, имея соединения, в составе которых присутствуют ионы морской воды, можно получить морскую среду, моделирующую агрессивное воздействие морской воды на бетонную или железобетонную конструкцию. В качестве примера приведены два комплекса, в состав которых входят соли: 1 комплекс – NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, KCl, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O; 2 комплекс – NaCl, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>, KCl, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O.

**Ключевые слова:** морская вода, коррозионная стойкость, моделирование, долговечность бетона, разновидности коррозии

Агрессивное влияние морской воды на бетонные конструкции всегда волновало строителей для оценки долговечности таких масштабных сооружений как порты, трубопроводы, нефтяные платформы, плавучие заводы. Не правильная оценка влияния коррозии может привести к значительному сокращению срока эксплуатации здания или сооружения, при наиболее ответственных сооружениях может привести к катастрофическим последствиям, например: разлив газа, нефти и нефтепродуктов в морское пространство и уничтожение близлежащей флоры и фауны; прорыв волн через оградительные сооружения. Даже с имеющимися технологическими возможностями, сложно предсказать влияние морской воды на конструкцию с достаточной степенью точности, известно лишь влияние отдельных факторов, разрушающих бетон, но в реальном мире коррозия бетона в морской среде связана с большим числом факторов, накладывающихся друг на друга.

Состав морской воды принято считать в среднем по солености мирового океана – 33–36 г/л [1]. Для более точного учета влияния всех факторов необходимо учитывать соленость именно той водной акватории, в которой находится изучаемый объект. В работе объектом исследования является морская вода, предмет исследования комплексное воздействие ионов морской воды на бетонную конструкцию.



Таблица 1. Ионный состав морской воды [2]

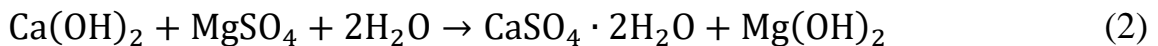
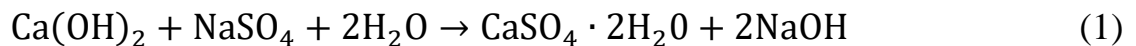
№	Ионы	Концентрация, г/л
1	Na <sup>+</sup>	11,00
2	K <sup>+</sup>	0,40
3	Mg <sup>2+</sup>	1,33
4	Ca <sup>2+</sup>	0,43
5	Cl <sup>-</sup>	19,80
6	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,76

Оценка долговечности конструкции в морской воде затруднительный процесс, связанный с комплексным влиянием большого числа факторов: механические воздействия, связанные с волновыми процессами вымывания; физико-химические, связанные с диффузией и взаимодействием отдельных компонентов бетона и железобетона с ионами морской среды; а также физико-механические процессы, связанные с попеременным замораживанием и оттаиванием и намоканием-высушиванием [3–5]. Таким образом сложно оценивать одновременное действие многих факторов, но также мало изучено одновременное коррозионное влияние морских солей на бетон и конструкции из железобетона.

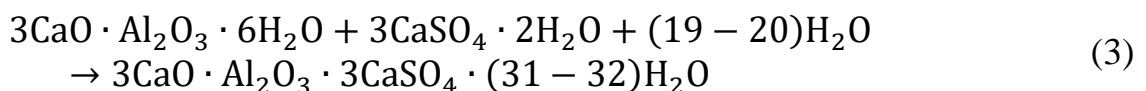
Принято разделять коррозию на 3 вида: коррозия выщелачивания (I вид), кислотная и магниезальная коррозия (II вид), сульфатная коррозия (III вида). В морских бетонных сооружениях выделяют все 3 вида коррозии, которые слоями уходят в толщу конструкции.

Учитывая все выше, сказанное необходимо тщательно подбирать состав соли для моделирования процессов коррозии морской воды в лабораторных условиях. Основным условием моделирования является нахождение существенных факторов, охарактеризовывающих коррозионные свойства морской воды и отбрасывание несущественных факторов, не влияющих на цель исследования. Наиболее опасным видом коррозии в подводной зоне является сульфатная коррозия и магниезальная. Поэтому основными компонентами для морской соли являются SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup> - ионы.

Самым уязвимым соединением в цементном камне является - Ca(OH)<sub>2</sub>. Таким образом имеют место быть такие реакции как [6]:



Гипс, получаемый в результате приведенных реакций, может реагировать с другими продуктами гидратации цемента этtringит:



В результате образовавшийся труднорастворимый продукт имеет большой мольный объем в сравнении с исходными компонентами, что в свою очередь вызывает повреждения в структуре бетонного камня.

Основным критерием коррозионностойкого цемент-содержащего материала является особая пористая структура, не позволяющая агрессивной среде попасть в толщу конструкции и начать деструктивные процессы в материале. Структура материала зависит от вида и формы пор.

В данной работе подобрали составы морской соли для моделирования морской среды для испытания по коррозии цементного камня в лаборатории. В качестве сырья использовали следующие химические соединения:  $\text{CaCl}_2$  (96,5%) в соответствии ГОСТ 450 – 77,  $\text{KCl}$  (99,81%) по ГОСТ 4234 – 77,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (99,54%) в соответствии ГОСТ 4166 – 76,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (99,3%) по ГОСТ 4523 – 77,  $\text{NaCl}$  (99,9%) в соответствии ГОСТ 4233 – 77,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (99,94%) по ГОСТ 4209 – 77. Вода, используемая в приготовлении морской воды, должна удовлетворять требованиям ГОСТ Р 58144 – 2018. Решение систем уравнений для вычисления состава морской соли при исследовании коррозионностойкой структуры каменного материала по ГОСТ Р 58896 – 2020.

При выборе сухих химических реактивов решающим фактором является ионный состав морской воды, который указан в таблице 1:

Первый комплекс:  $\text{NaCl} = x_1$  моль/л,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 = x_2$  моль/л,  $\text{CaCl}_2 = x_3$  моль/л,  $\text{KCl} = x_4$  моль/л,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = x_5$  моль/л. Определение содержания солей проводили в таблице 2 и таблице 3:

Таблица 2. Система уравнений для определения содержания чистой соли по первому комплексу

Ионы	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
Концентрация, мол/л	0,478	0,010	0,055	0,011	0,56	0,03
Система уравнений	$x_1 + 2x_2 = 0,478$					
	$x_4 = 0,010$					
	$x_5 = 0,055$					
	$x_3 = 0,011$					
	$x_1 + 2x_3 + x_4 + 2x_5 = 0,56$					
	$x_2 = 0,03$					

Решая систему уравнений, были получены результаты:  $x_1 = 0,418$  моль/л;  $x_2 = 0,03$  моль/л;  $x_3 = 0,011$  моль/л;  $x_4 = 0,010$  моль/л;  $x_5 = 0,055$  моль/л.

Таблица 3. Фактические значения содержания солей для приготовления 1 кг морской воды

Химические соли	$\text{NaCl}$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{CaCl}_2$	$\text{KCl}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Масса солей (г)	24,453	4,260	1,221	0,745	11,165	
Фактические значения соли	$\text{NaCl}$ (99,9%)	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (99,54%)	$\text{CaCl}_2$ (96,5%)	$\text{KCl}$ (99,81%)	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99,94%)	
Масса солей (г)	24,477	4,280	1,265	0,746	11,172	
Составы для приготовления морской воды	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaCl}$ (99,9%)	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (99,54%)	$\text{CaCl}_2$ (96,5%)	$\text{KCl}$ (99,81%)	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99,94%)
Масса (г) в 1 кг морской воды	958,06	24,477	4,280	1,265	0,746	11,172

Второй комплекс:  $\text{NaCl} = x_6$  моль/л,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = x_7$  моль/л,  $\text{CaCl}_2 = x_8$  моль/л,  $\text{KCl} = x_9$  моль/л,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = x_{10}$  моль/л. Определение содержания солей проводили в таблице 4 и таблице 5:

Таблица 4. Система уравнений для определения содержания чистой соли по второму комплексу

Ионы	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
Концентрация, мол/л	0,478	0,010	0,055	0,011	0,56	0,03
Система уравнений	$x_6 = 0,478$					
	$x_9 = 0,010$					
	$x_7 + x_{10} = 0,055$					
	$x_8 = 0,011$					
	$x_6 + 2x_8 + x_9 + 2x_{10} = 0,56$					
	$x_7 = 0,03$					

При решении системы уравнений были получены результаты:  $x_6 = 0,478$  моль/л;  $x_7 = 0,03$  моль/л;  $x_8 = 0,011$  моль/л;  $x_9 = 0,010$  моль/л;  $x_{10} = 0,025$  моль/л.

Таблица 5. Фактические значения содержания солей для приготовления 1 кг морской воды

Химические соли	$\text{NaCl}$	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2$	$\text{KCl}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Масса солей (г)	27,963	7,380	1,221	0,745	5,075	
Фактические значения соли	$\text{NaCl}$ (99,9%)	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (99,3%)	$\text{CaCl}_2$ (96,5%)	$\text{KCl}$ (99,81%)	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99,94%)	
Масса солей (г)	27,991	7,432	1,265	0,746	5,078	
Составы для приготовления морской воды	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaCl}$ (99,9%)	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (99,3%)	$\text{CaCl}_2$ (96,5%)	$\text{KCl}$ (99,81%)	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99,94%)
Масса (г) в 1 кг морской воды	957,49	27,991	7,432	1,265	0,746	5,078

В результате проведённой работы получили 2 состава для моделирования морской среды в лаборатории. Полученные результаты будут положены в основу дальнейшей работы по изучению коррозионной стойкости цементного камня и бетонов в агрессивной среде по ГОСТ Р 58896–2020.

#### Библиографический список:

1. Дроздов В. В. Общая экология. СПб: РГГМУ, 2011. 412 p.
2. Mehta P.K. Concrete in the Marine Environment. 1st ed. 1991. 224 p.
3. R. Gat J. Marine Chemistry: by R.A. Horne, Wiley, Chichester, 568 pp., 1969. // Desalination. Elsevier, 1971. Vol. 9, № 3. P. 295.
4. Хунг Н.С. Коррозионностойкий бетон с модифицированной структурой для морских сооружений. Москва, 2022. 146 p.
5. Ma D., Zhang M., Cui J. A review on the deterioration of mechanical and durability performance of marine-concrete under the scouring action // Journal of Building Engineering. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 66.
6. Нгуен Д.В.К. Модифицированный бетон для подземных сооружений прибрежной зоны с высоким содержанием сульфатов. Москва, 2022. 202 p.

## ОСОБЕННОСТИ ЛИЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА МЯГКОГО ФОРМОВАНИЯ

Ю.И. Небежко<sup>1</sup>, аспирант

К.А. Лапунова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>*Донской государственный технический университет*

**Аннотация.** В последние годы всё большую популярность приобретает лицевой керамический кирпич мягкого формования. Это обусловлено неповторимыми чертами его лицевой поверхности похожими на старинный кирпич, достигаемыми за счёт особых технологических приёмов. Нами сделана попытка классифицировать виды поверхности лицевого кирпича с целью оценки его эстетической ценности и особенностей технологии получения того или иного вида поверхности. В настоящее время в России не существует какой-либо классификации поверхности лицевого кирпича. Каждый завод или дистрибьютор сами дают чисто маркетинговые названия, в связи с чем происходит недопонимание между технологами, архитекторами, потребителями и маркетологами. На основе технолого-эстетического анализа нами выделено три типа фактур лицевого кирпича, каждая из которых подразделяется на несколько видов. Для лицевого кирпича мягкого формования мы предлагаем обозначить семь видов, которые могут сочетаться между собой.

**Ключевые слова:** кирпич, фактура, поверхность, мягкое формование, вид, технология.

Термин «фактура лицевого кирпича» или «фактура лицевой поверхности» керамического кирпича не имеет в среде производителей кирпича, архитекторов и строителей чёткого и общепринятого определения и, соответственно, чётких критериев оценки. Наиболее близкое определение термина «фактура», которое частично может быть отнесено и к керамическому кирпичу, приведено в ГОСТ 30629-2011 «Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний», где указывается, что «фактура лицевой поверхности изделия – это показатель, определяемый характером и высотой рельефа поверхности». Определение достаточно лаконичное и чёткое, единственное, что не совсем понятно, что имеется в виду под характером лицевой поверхности. Исходя из основных положений строительного материаловедения и петрографии, можно более-менее чётко говорить, что характер поверхности – это текстурно-структурные признаки, характеризующиеся формой, видом, ориентацией, абсолютными и относительными размерами элементов рельефа. Поэтому, с технической точки зрения, под фактурой керамического кирпича надо понимать совокупность признаков его лицевой поверхности, обусловленных формой, размерами, ориентировкой, распределением и относительным расположением элементов рельефа, а также технологией нанесения фактурного «рисунка».

Фактура лицевого кирпича является неотъемлемой частью его эстетики, красоты, привлекательности, что в совокупности с моно- или полихромными цветовыми решениями создаёт уникальные неповторимые изделия, а комбинирование в кладке с различными вариациями расшивки швов – неповторимую кирпичную кладку. И здесь типичной является ситуация, когда

для покупателя, маркетолога или продавца та или иная фактура кирпича кажется простой, но для технолога её получение является достаточно сложным процессом и, соответственно, дорогим. И наоборот, когда для покупателей, маркетологов, продавцов кирпича фактура кажется непростой, замысловатой и особо привлекательной, а её получение не является сложным и дорогим процессом. Такая ситуация становится «мечтой» технолога и для её достижения существует множество технологических приёмов, секретов, а самое главное, требует глубоких знаний и большого опыта.

Согласно классификации, предложенной нами ранее, фактура с эстетической и технологической точек зрения может быть трех уровней сложности или трёх типов: гладкая, шаблонная и полиструктурная [1-3].

Гладкая поверхность кирпича – это поверхность, не имеющая каких-либо неровностей. Однако, «гладкость» поверхности – это понятие относительное, так как зрительно она зависит от расстояния, на котором рассматривается изделие. Поэтому не зря по ГОСТ 9480-2012 «Плиты облицовочные пиленые из природного камня. Технические условия» сравнение образцов и эталонов облицовочных плит из горных пород производят на расстоянии 2 метров от глаз. При этом гладкая поверхность подразделяется на несколько видов:

- полированная – с зеркальным блеском, с отражением предметов, которая для керамических изделий по аналогии достигается только глазурованной поверхностью;

- лощёная – гладкая матовая, которая по аналогии характерна для многих видов керамической изделий, выпускаемых способом экструзионного и компрессионного формования;

- шлифованная – с высотой микрорельефа до 0,630 мм;

- пиленая – с высотой неровностей рельефа до 2,0 мм.

«Шаблонная» фактура, которая сейчас широко применяется при производстве лицевого кирпича, отличается от «гладкой» наличием углублений или выпуклостей, имеющих повторяющийся характер или визуальную одинаковую по виду поверхность. Обычно поверхность такого кирпича стилизована под определенные природные фактуры – кору дерева, натуральный камень, орнаментальные узоры и т.д. (рисунок 1). Часто, рельефная поверхность комбинируется с цветовыми решениями, что существенно повышает и расширяет декоративную привлекательность изделий.

Шаблонную фактуру получают обработкой выходящего из экструдера бруса прижимными роликами различного диаметра с обратным рельефом, установленных на специальной конструкции сразу после экструдера. Ролики формируют рельеф на одной ложковой и одной или двух тычковых гранях. Наносимый рельеф может быть весьма многообразным: простым, сложным, орнаментальным и стилизованным. Простой рельеф или фактура формируются одним или двумя роликами, а сложный рельеф или фактура формируются тремя-пятью роликами (рисунок 2). Различный диаметр роликов и порядок их расположения могут создавать огромное многообразие неповторяющихся видов поверхности. Однако для нанесения качественного рельефа и во избежание деформирования бруса, формовочная масса должна обладать достаточной

пластической прочностью. Как правило, высокая пластическая прочность характерна для высокодисперсных полиминеральных глин, которые встречаются достаточно редко. Кроме того, после экструдера должно быть предусмотрено место для накаточной установки. Поэтому далеко не все заводы имеют возможность производить кирпич способом экструзионного формования с разнообразным сложным рельефом поверхности.



Рисунок 1. Керамический кирпич с шаблонным видом поверхности

Наиболее сложной и привлекательной с эстетической точки зрения является полиструктурная фактура. Она не имеет повторяющегося рисунка или узора и каждый кирпич по-своему является уникальным изделием. Данная фактура создаёт иллюзию старинного кирпича, что в свою очередь вызывает у человека на подсознательном уровне особые эмоциональные ощущения – чувство вечности, надёжности, спокойствия, теплоты, уверенности, побуждая его к диалогу и творческим действиям. Элементы поверхности – бороздки, наслоения, выпуклости, выплавы, скругления углов и граней, визуальные посечки, складки, каверны и т.д., имеют произвольный характер и по тому, какой кирпич выбрал для себя тот или иной человек, можно судить о его личности, устремлённости, психологическом складе. Часто полиструктурная фактура дополняется торкретированием поверхности и различными цветовыми решениями с нанесением ангобов, что делает декоративные возможности практически неисчерпаемыми. При этом если ранее на обычном лицевом кирпиче некоторые определённые элементы кирпича, к примеру – выплавы, неровности поверхности, каверны, неровности граней и т.д., считались браком, то на кирпиче мягкого формования эти элементы уже являются украшением поверхности, придающими неповторимый вид.



Рисунок 2. Накатка рельефа на поверхность бруса

Особенностью технологии мягкого формования является формовка изделий при влажности массы выше формовочной, но ниже влажности при мокром формовании – литьевой способ. Особенностью подготовки сырьевых масс является то, что сами массы используются более подвижными с меньшей пластической (структурной) прочностью за счёт повышенного водосодержания и в тоже время не являются липкими, т.е. не прилипают или плохо прилипают к стенкам пресс-форм. На первый взгляд нет ничего сложного в подборе составов сырьевых масс для технологии мягкого формования, однако, это не простая задача и в настоящее время в России нет разработанных методических материалов по этому вопросу [3].

Изготовление кирпича мягкого формования может осуществляться различными способами:

- способ непосредственно ручной формовки – формование кирпича производится собственно руками в деревянных или металлических пресс-формах, как это было в прошлые столетия. При подаче массы в форму или сама форма могут посыпаться различным песком или шамотом для уменьшения налипания массы к стенкам формы, а также для придания декоративности граням изделий. Избыточная часть массы в форме удаляется струной;

- способ разгонного формования – кусок массы сферической формы забрасывается в форму с определённой скоростью с помощью специального ускорителя, который обычно представляет собой два спаренных установленных вертикально небольших резиновых ленточных транспортёров с рассчитанным уменьшением расстояния между ними в нижней части. Кусок формовочной массы, не на много превышающий объём кирпича, который может быть посыпан песком или другим материалом, подаётся с верху и разгоняется между лент транспортёра до необходимой скорости;

– способ задавливания – кусок массы неправильной формы подаётся в форму, а затем при низком давлении масса пуансоном поддавливается в форму, в которой не совсем равномерно распределяется по граням;

– литьевой способ – массой, близкой к вязко текучему состоянию, заполняются формы с вибрированием с различной частотой и амплитудой.

Анализ, проведённый нами, позволил выделить 7 видов простых поверхностей кирпича мягкого формования, частично показанных на рисунках 3-5, которые по мере накопления данных с течением времени будут дополняться и уточняться:

– зернистая – со следами зёрен на поверхности с размерами до 0,5-0,6 мм, которая может быть равномерно и неравномерно зернистой;

– бугорковая или бугристая – на поверхности выделяются близкие к сферическим выпуклости с размером более 0,6 мм. Выделяются мелко-, средне- и крупнобугорковые фактуры, которые могут быть равномерно- и неравномернобугорковыми;

– бороздчатая – образованная мелкими субпараллельными прерывистыми бороздами с высотой рельефа до 5,0 мм. Выделяются мелко-, средне- и крупнобороздчатая фактуры;

– волнистая – с параллельным чередованием сглаженных бугров и впадин, расположенных волнистыми грядами, с высотой рельефа до 15 мм;

– рифлёная – с параллельными бороздами различного размера, направленными вертикально, горизонтально или по диагонали, с высотой рельефа до 5 мм и расстоянием между бороздами до 10 мм;

– пятнистая – на общем цветовом фоне выделяются пятна неправильной формы другого цвета с различными размерами;

– чешуйчатая – субпараллельные, перекрывающие друг друга небольшие надвиги, образующие чешуи, пластинки и плиточки, одинаково смещенные и круто падающие в одном направлении.



а



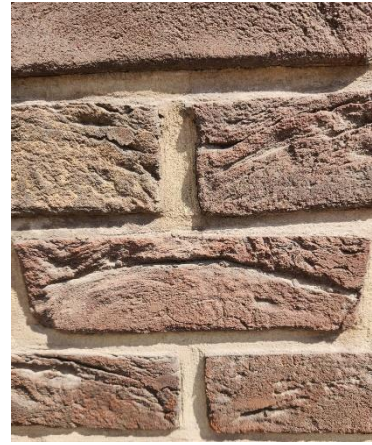
б

Рисунок 3. Кирпич мягкого формования с зернистой (а) и пятнистой (б) фактурой поверхности





а



б

Рисунок 4. Кирпич мягкого формования с бугорковой (а) и бороздчатой (б) фактурой поверхности



а



б

Рисунок 5. Кирпич мягкого формования с чешуйчатой (а) и волнистой (б) фактурой поверхности

Выделенные нами виды фактуры кирпича мягкого формования путём комбинирования могут образовывать сложные полиструктурные фактуры, имеющие двойное и тройное название. Предложенная классификация фактур кирпича мягкого формования поможет упорядочить терминологию и наладить взаимопонимание между производителями, архитекторами, маркетологами и потребителями. Безусловно, в будущем, по мере привлечения различных специалистов к данной теме, данная классификация будет совершенствоваться и уточняться.

#### Библиографический список:

1. Божко, Ю.А. Проблемы регламентации терминологии brick-дизайна и области его применения / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова // Строительные материалы. 2021. № 4. С. 37-41.

2. Божко, Ю.А. Применение облицовочного кирпича мягкой формовки в современной архитектуре / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова // Дизайн. Материалы. Технология. 2018. №1. С. 61-65.
3. Месхи, Б.Ч. Віск-дизайн и его основные элементы / Б.Ч. Месхи, Ю.А. Божко, Ю.В. Терёхина, К.А. Лапунова //Строительные материалы. 2020. № 8. С. 47-51.
4. Котляр, В.Д. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоковидных пород / В.Д. Котляр, Н.И. Небежко, Ю.А. Божко, Х.С. Явруян // Строительные материалы. 2019. № 12. С. 18-23.

## БЕСЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ГИПСОВЫЕ ВЯЖУЩИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВОДОСТОЙКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕЛА СТРОИТЕЛЬНОГО И ИЗВЕСТИ ГАШЕНОЙ

А.С. Неверов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

Д.В. Малашков<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Расширение производства и применения гипсовых материалов позволяет в определенной мере решать проблемы присущие портландцементу, так как они имеют меньше плотность, меньше энергозатраты, тепло и звукопроводность, экологическую безопасность, огне- и пожаростойкость. Однако, несмотря на все преимущества гипсовых материалов, они имеют один большой недостаток – низкая водостойкость, что значительно ограничивает его применение. В данной статье приведены результаты исследования влияния добавки мела строительного с известью гашеной на водостойкость гипсовых вяжущих. Водостойкость композиционного гипсового вяжущего с добавкой 10% мела строительного и 20% гашеной извести увеличилась на 13%, что говорит о перспективности проведения более широких исследований с целью получения оптимального состава композиционного материала повышенной водостойкостью.

**Ключевые слова:** бесцементные композиционные гипсовые вяжущие, мел строительный, известь гашеная, повышенная водостойкость.

Одной из ключевых проблем отечественного жилищно-гражданского строительства является необходимость снижения материалоемкости возводимых зданий. Одними из наиболее значимых проблем являются снижение цемента- и энергоемкости, экологической нагрузки на окружающую среду и повышение производительности труда в производстве строительных материалов и строительстве, пожаробезопасности и обеспечение санитарно-гигиенических требований, предъявляемых к помещениям.

Расширение производства и применения гипсовых материалов позволит в значительной степени решить перечисленные проблемы, так как гипсовые материалы отличаются пониженной плотностью, тепло и звукопроводностью, декоративностью, экологической безопасностью, огне- и пожаростойкостью и позволяют создавать благоприятный микроклимат помещений в течение короткого времени. Их производство отличается более низкими по сравнению с материалами и изделиями на основе цемента расходами топлива и энергии (примерно в 5 раз), значительно меньшими капиталовложениями и металлоемкостью оборудования (примерно в 3 раза) и в 10-15 раз ускоряется оборачиваемость форм при производстве изделий [1].

Для решения главной проблемы гипсовых материалов – очень низкая водостойкость, были применены добавки мела строительного и извести гашеной. Выбор данных добавок был сделан в первую очередь ввиду наличия в составе

всех трех материалов – кальция Са. При этом все материалы имеют свои особенные физико-химические свойства.

1. Строительный гипс – сульфатный минерал с химической формулой  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (гидрат сульфата кальция). Внешне выглядит как мелкого помола порошок, как правило, белого или серого цвета с желтоватым или розоватым отливом.

Все гипсовые основы более или менее одинаковые:

- мелкозернистые, с плотной структурой;
- обладающие способностью быстро твердеть за срок около 5 минут;
- хорошо выдерживающие высокие температуры до 600-700 °С;
- обладающие способностью противостоят ряду механических воздействий, в частности, на сжатие;
- обладающие высокими характеристиками теплопроводности, благодаря чему строительный гипс просто незаменим при отделке.

Основным недостатком его является низкая водостойкость продуктов его твердения, связанная с заметной растворимостью гипса в воде, и плохая морозостойчивость влажных гипсовых изделий.

Строительный гипс входит в состав шпатлёвки, штукатурки, наливных полов и других строительных смесей. Из него строят макеты и модели, нужные в архитектуре и творчестве. Он есть в составе гипсокартона, гипсобетонных блоков, перегородочных плит. В плане отделки он незаменим при заделке швов, неровностей и трещин, создании полов, потолков и стен.

2. Природный мел – это белая или желтоватая слабоцементированная горная порода осадочного происхождения на основе минерала кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ), образованного из обломков скелетов многоклеточных морских планктонных водорослей кокколитофорид (30–40 масс. %) и корненожек-фораминифер (1–20 масс. %), осевших в виде ила из воды теплых морей.

Мел строительный на основе природного мела является многотоннажным недорогим ингредиентом композиционных материалов, которые широко используются во многих отраслях промышленности таких как: строительная, резинотехническая, лакокрасочная и т.д.

В настоящее время наиболее ценными и востребованными сортами мела, используемого в производстве композиционных материалов, являются тонкодисперсные с содержанием  $\text{CaCO}_3$  не менее 97% и средним размером частиц (D50) 1-3 мкм, которые обеспечивают высокие эксплуатационные, в том числе физико-механические, характеристики композиционных материалов при высоком их наполнении карбонатом кальция [3, 5].

Мел в строительстве применяется достаточно широко. Он является необходимым сырьем для производства строительных материалов. Мел используется для приготовления сухих строительных смесей – клея и побелки, шпаклевок и замазок, а также штукатурки; для производства вяжущих материалов – извести и цемента.

3. Известь, известка или пушонка – это белое порошкообразное вещество неорганической природы. С точки зрения химической классификации это

гидроксид кальция, с формулой –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  . При этом образуется такое соединение только после процедуры гашения.

Гашеную строительную известь в больших количествах используют при выполнении строительных работ, где она служит вяжущим материалом при каменной кладке, штукатурных работах, а также при побелке стен и потолков зданий. При этом воздушную известь применяют для строительства и отделки только надземных сооружений, не подвергающихся воздействию воды.

Все материалы активно применяются в строительстве, при этом при этом зачастую применяются совместные растворы.

Однако отсутствуют достаточные исследования физико-химических свойств материала, объединяющего все три вышеуказанных материалов.

Для исследования использовались: строительный гипс Г-5 марки «Мастер тайфун», мел мелкогранулированный высшего сорта марки «Люкс» и известь гашеную марки «Мастер тайфун».

Смешивание осуществлялось вручную.

Определение водопоглощения осуществлялось по ГОСТ 23789-2018.

В гипсовое вяжущее добавили 10% мела строительного и 20% гашеной извести после чего у полученного бесцементного композиционного гипсового вяжущего, по сравнению гипсовым вяжущим без добавок, водопоглощение уменьшилось на 13%.

По результатам проведенных исследований и анализа полученных результатов был сделан следующий вывод:

1. Гипс строительный, мел строительный и гашеная известь смешиваются хорошо, образуя однородную массу.

2. Добавка 10% мела строительного и 20% гашеной извести в гипсовое вяжущее увеличивает водостойкость последнего на 13%.

3. Результаты данных исследований подтвердили перспективность проведения более глубоких и широких исследований с целью получения оптимального состава композиционного материала повышенной водостойкости. В дальнейшем для определения оптимального состава композиционного материала повышенной водостойкости будет использован метод симплекс-решётчатого планирования.

#### **Библиографический список:**

1. Ферронская А.В. Развитие теории и практики в области гипсовых вяжущих веществ. Сб. «Развитие теории и технологий в области силикатных и гипсовых материалов». Ч.1.М., МГСУ, 2000. - 56.с
2. Рахимов Р.З. Рахимова Н.Р. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего, будущего // Строительные материалы. 2013. № 5. С. 57-59.
3. Шамис, Е.Е. Строительство XXI - инновационные идеи совершенствования промышленных методов // Технический университет Молдовы, 2010. 262 с.
4. Лесовик В.С., Погорелов С.А., Строкова В.В. Гипсовые вяжущие материалы и изделия. Белгород, 2000. 224 с.
5. Бойтон Р.С. Химия и технология извести. - М.: Стройиздат, 1972. - 237 с.
6. ГОСТ 17498-72 Мел. Виды, марки и основные технические требования.

7. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Мельниченко С.В., Чумаков Л.Д. Водостойкие гипсовые вяжущие низкой водопотребности для зимнего бетонирования./«Строительные материалы», 1992, №5. -39с.

## ПЕСЧАНИКИ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЛИНКЕРНОЙ ЧЕРЕПИЦЫ

М.Е. Орлова<sup>1</sup>, ассистент

О.И. Дмитриев<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет

**Аннотация.** Производство клинкерной черепицы, да и в целом строительных материалов, напрямую зависит от сырьевой базы. Из-за высокой стоимости и малой распространенности традиционного тугоплавкого сырья, появляется потребность в поиске нового техногенного сырья. В нашем случае это песчаники Восточного Донбасса. Лабораторные исследования показали возможность применения песчаников Восточного Донбасса для производства клинкерной черепицы.

**Ключевые слова:** черепица, клинкер, песчаники, исследования, химический состав, минеральный состав, керамические изделия, свойства, исследование, технология.

Строительный рынок нашей страны не стоит на месте. С каждым днем появляются новые инновационные материалы. К новому элитному кровельному материалу можно отнести клинкерную черепицу (рисунок 1). На строительном рынке России в основном керамическая черепица зарубежного производства, это такие фирмы как «Brass», «Ludowici-Celadon», «Terreal», «Creaton», но цена из-за транспортировки и по ряду экономических причин на такой продукт высока. Следовательно, перед производителями, геологами и технологами первостепенной и актуальной задачей стоит поиск новых сырьевых материалов для производства керамической промышленности [1-3].



Рисунок 1. Клинкерная черепица фирмы «Creaton»

В Европейской части России и в Ростовской области разрабатывают бутовый камень и щебень. Геологической особенностью данной территории является выход на поверхность пород каменноугольного периода (300-360 млн. лет назад), который представлен песчаниками, глинистыми сланцами и известняками. В Ростовской области разведано около сотни месторождений песчаников. Но данные песчаники без правильной, дополнительной переработки не соответствуют требованиям ГОСТа по содержанию глинистых и пылевидных частиц. Связанно это с структурными и текстурными особенностями

песчаников. Мелкие и более прочные прослойки чередуются между собой, при этом мелкие прослойки состоят из малопрочных изменённых полевошпатовых, глинистых и слюдяных минералов. Более прочные прослойки, состоящие из кварца (рисунок 2). Это характеризуется тем, что в процессе переработки песчаников наиболее слабые минералы и породы попадают в мелкие фракции, что и является отсевами. Большая часть отсевов, да и самих песчаников, остается не востребованной для дальнейшего производства и переработки, но данный процесс можно усовершенствовать и использовать данное сырье для производства клинкерной черепицы [4-5].



Рисунок 2. Слоистое строение толщи песчаников Восточного Донбасса

В таблице 1 приведен химический состав, как песчаников, так и отсевов на их основе.

Таблица 1. Химический состав отсевов и песчаников (% , по массе)

Материал	ппп	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Отсевы	4,70	63,72	15,80	5,04	2,90	1,65	0,14	3,96	1,68	0,17
Песчаники	2,86	75,83	9,05	4,90	2,24	1,38	0,12	1,90	1,38	0,14

Как видно из данной таблицы, песчаники характеризуются высоким содержанием глинозема и щелочных оксидов, это связано с увеличением глинистых и слюдяных минералов. При этом в химическом составе отсевов видно увеличенное содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Если главный минерал у песчаников является кварц, его содержание 50-60%, то в отсевах его количество уменьшается до 40 %, но при этом содержание полевых шпатов, слюд и глинистых минералов меньше. Следует отметить, что химико-минералогический состав отсевов существенно отличается. Данное изменение связано с тем, что у отсевов песчаников меняется минеральный состав. Фракции 1-5 мм похожи на «материнскую породу» – песчаники, при этом фракция менее 1 мм существенно отличается [6-8].

Как уже писалось, в естественном состоянии отсевы и песчаники мало пригодны для производства клинкерных кровельных изделий. Наибольшая крупность зерен в сырье для производства клинкерной черепицы не должна



превышать 0,5-1,0 мм. Подготовка отсевов и песчаника возможна одним из следующих образов:

- удаление крупных фракций с последующим доизмельчением до более мелкой фракции;
- удаление крупных фракций с помощью сепарации или отсева;
- отсев можно доизмельчить до фракции менее 1,0-0,1 мм.

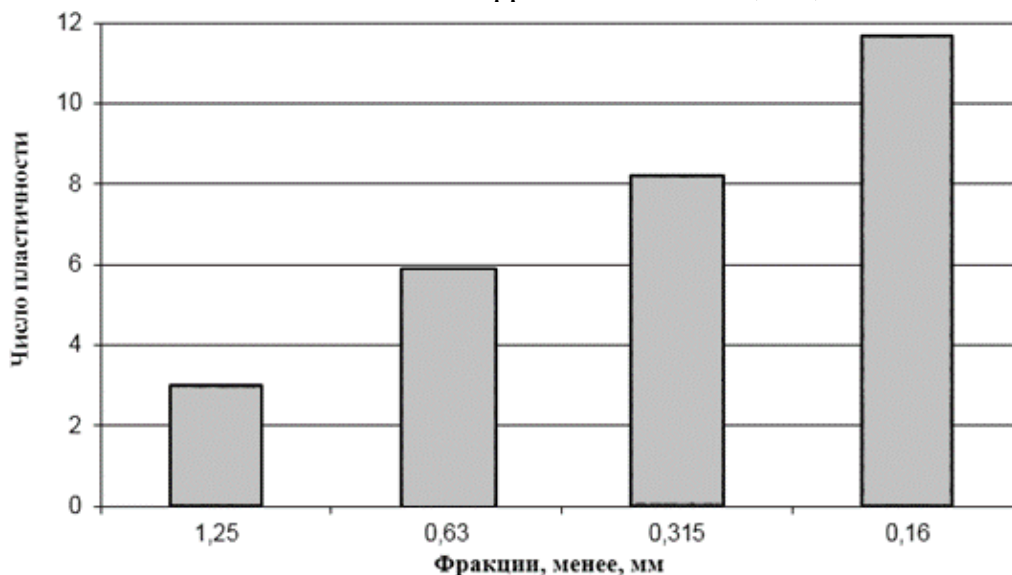


Рисунок 3. Зависимость пластичности от фракций песчаников Восточного Донбасса (менее, мм)

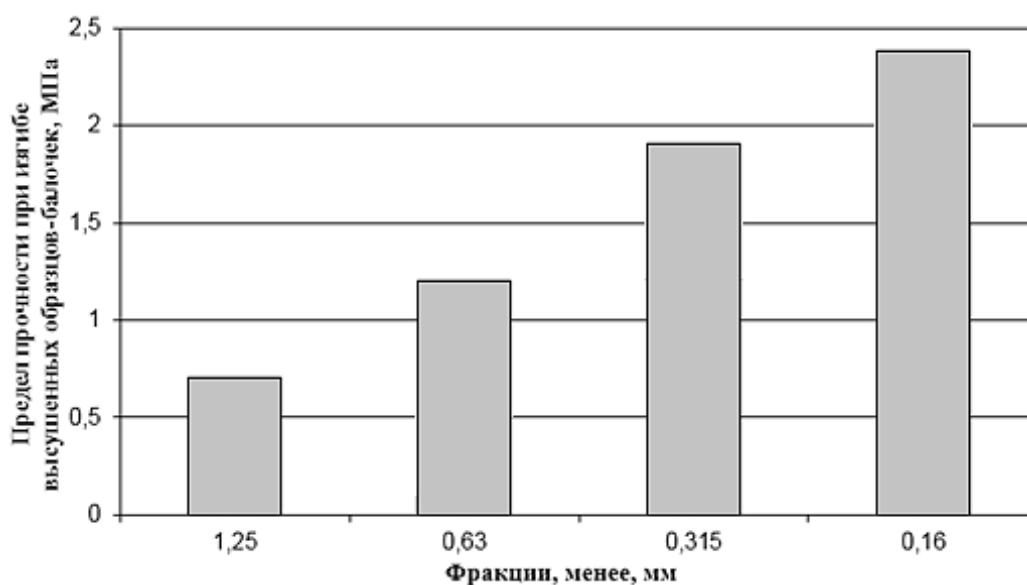


Рисунок 4. Зависимость связности от фракций песчаников Восточного Донбасса (менее, мм)

С экономической точки зрения 1 и 2 вариант являются более перспективными. Во-первых, возможно параллельно с подготовкой массы для производства клинкерной черепицы выпускать фракционированный песок, который является на сегодняшний момент одним из самых востребованных продуктов. Во-вторых, в тонких фракциях содержатся предпочтительные для керамических масс минералы – тонкодисперсные слюды, глинистые и полевые

шпаты. Содержание данных напрямую влияет на дообжиговые свойства отсеков. На рисунках 3, 4 показаны зависимости пластичности и связности различной фракции песчаников Восточного Донбасса.

Как видно из рисунков 3 и 4, пластичность и связность закономерно увеличиваются. Это связано с более тонким фракционным составом и увеличением содержания глинистых минералов. Такая же закономерность наблюдается и для формовочной влажности и воздушной усадки (рис 5, 6).

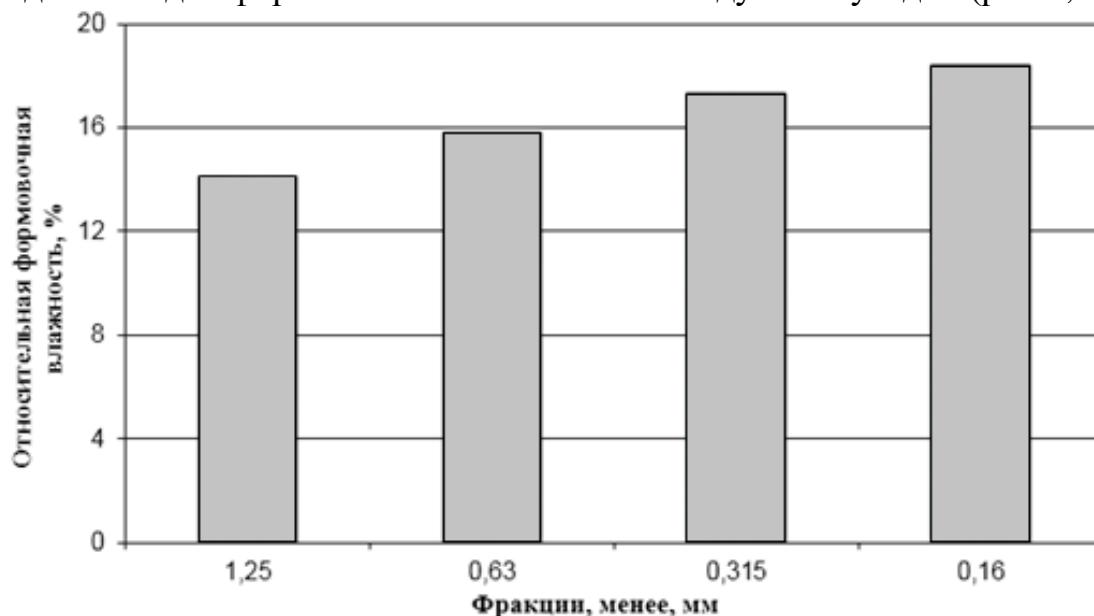


Рисунок 5. Зависимость формовочной влажности от фракций песчаников Восточного Донбасса (менее, мм)

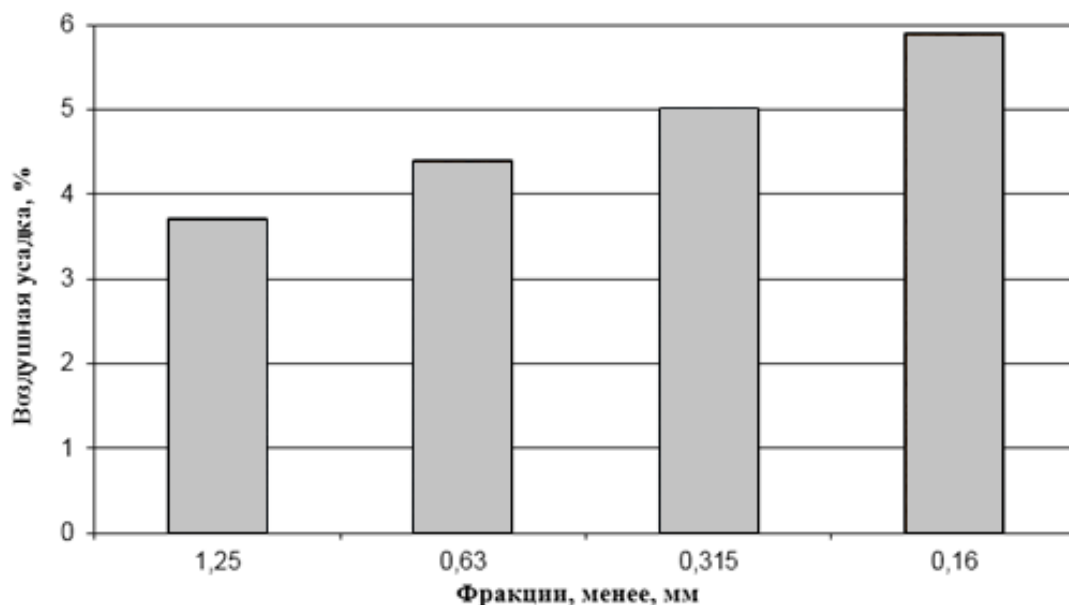


Рисунок 6. Зависимость воздушной усадки от фракций песчаников Восточного Донбасса (менее, мм)

Данные закономерности являются нормальными для технологии керамики на основе каменного сырья.

Оценивая полученные данные и свойства сырьевого материала можно говорить, что более приемлемый для указанных фракций дробления песчаников Восточного Донбасса является метод прессования. Для фракций 0-0,16 мм возможна обычная или жесткая экструзия.

Для клинкерной черепицы подходит как метод прессования, так и метод экструзионного формования изделия. В Донском государственном техническом университете на базе кафедры «Строительные материалы» ведутся комплексные исследования песчаников и отсеков Восточного Донбасса. Полученные первоначальные данные лабораторных исследований говорят о том, что данное месторождение можно считать перспективным сырьем для производства клинкерной черепицы.

#### **Библиографический список:**

1. Котляр, В.Д. История появления и основные этапы развития производства керамической черепицы / В.Д. Котляр, М.Е. Орлова, К.А. Лапунова, Я.В. Лазарева // Строительство. Архитектура. Экономика. Материалы Международного форума «Победный май 1945 года»: Сборник статей. Министерство образования и науки Российской Федерации, Донской государственной технической университет, Профсоюз работников народного образования и науки Российской Федерации. Ростов н/Д. 2018. С. 47–50.
2. Орлова, М.Е., Лапунова, К.А. Перспективные виды сырья для производства декорированной керамической черепицы / М.Е. Орлова, К.А. Лапунова // Наука сегодня: вызовы и решения. 2018. Ч. 1. С. 46–48.
3. Охотная, А.С., Котляр, В.Д., Орлова, М.Е. Керамическая черепица: особенности современного дизайна и технологии производства. Технология художественной обработки материалов / А.С. Охотная, В.Д. Котляр, М.Е. Орлова // Сборник материалов XXI Всероссийской научно-практической конференции. Ижевск, 2018. С. 319–324.
4. Лапунова, К.А., Орлова, М.Е., Лазарева, Я.В., Васин, Д.С. Технология производства высокопрочной керамической черепицы на основе аргиллитоподобных глин. Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы XII Международной научной конференции молодых ученых. Пенза: ПГУАС, 2017. С. 104–108.
5. Lazareva Y.V., Kotlyar A.V., Orlova M.E., Lapunova K.A Water permeability of argillite-based ceramic tiles // MATEC Web Conf. 2018. 04072. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819604072>.
6. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of opokamorphic rocks. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Materials Science Forum. 2018. T. 931 MSF. С. 568-572.
7. Medium-fraction materials for processing of coal-thread waste drains for the production of wall ceramics. Yavruyan K.S., Kotlyar V.D., Gaishun E.S. Materials Science Forum. 2018. T. 931 MSF. С. 532-536.
8. Yavruyan K., Gaishun E., Teryokhina Y., Kotlyar V. The research on the sifting from processing of East Donbass refuse heap for manufacturing wall ceramics goods. MATEC Web of Conferences. 2018. С. 04055.

## ДИЗАЙН И ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТЕРЬЕРНОЙ КЛИНКЕРНОЙ МОЗАИКИ

М.Е. Орлова<sup>1</sup>, ассистент

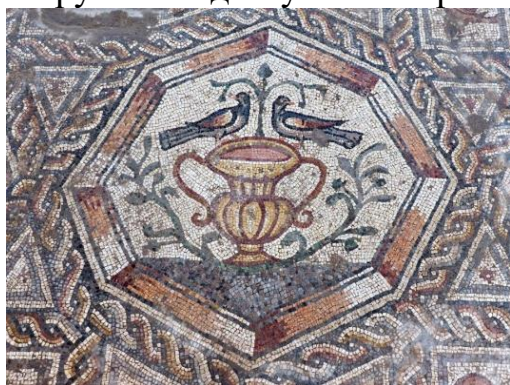
Е.В. Хасабова<sup>1</sup>, магистр

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет

**Аннотация.** Древнейшее искусство мозаики повсеместно вошло и в нашу современную жизнь. Ею украшают стены внешние и внутренние, интерьерные и садово-парковые объекты, предметы быта, и, конечно, полы. Все более популярным у ландшафтных дизайнеров, архитекторов становится тротуарная мозаика, созданная как из различных кусочков битого камня, плитки, спилов дерева, так и из унифицированных керамических, бетонных, керамогранитных элементов. Очень прочный и долговечный керамический материал был создан как дорожное покрытие. Нами разработан определенный набор мозаичных клинкерных элементов с технологической схемой их производства. В качестве сырья используются аргиллиты с минеральным пигментом, изделия формируются экструзионным способом с последующей штамповкой пазов для раскалывания. Благодаря разработанному составу сырья и эффективной технологической линии, изготовление клинкерной мозаики вполне рентабельно внедрять в керамическое производство.

**Ключевые слова:** клинкер, мозаика, аргиллиты, орнамент, технология, прочность.

«Мозаика» – очень ёмкое понятие, включающее в себя технологию изготовления декоративных покрытий из кусочков различных материалов и само декоративное изделие. Мозаичные полы из камня, керамики, дерева нам известны с давних времен и были уникальными произведениями (рисунок 1). В наше время дизайна и промышленного производства мозаика стала более тиражируемой и доступной широкому потребителю.



а



б

Рисунок 1. Виды древних мозаичных покрытий пола: а – римская мозаика, найденная в 2015 г. в городе Лод, Израиль, 2 в. н.э.; б – средневековая керамическая плитка Уэльского собора, Сомерсет, Англия, 12 в.

Большую популярность у архитекторов и строителей в последнее время приобретает тротуарная мозаика. Дорожки с орнаментальным покрытием великолепно украшают улицы, площади, радуют глаз, гармонизируют городское

пространство [1, 2]. Небольшой набор форм для клинкерной экстерьерной мозаики позволяет создавать множество композиционных решений дорожных орнаментов разных стилевых направлений: геометрический, флоральный, символический и др. В нашем случае мы комбинируем три формы: параллелепипед, куб и треугольную призму (рисунок 2).

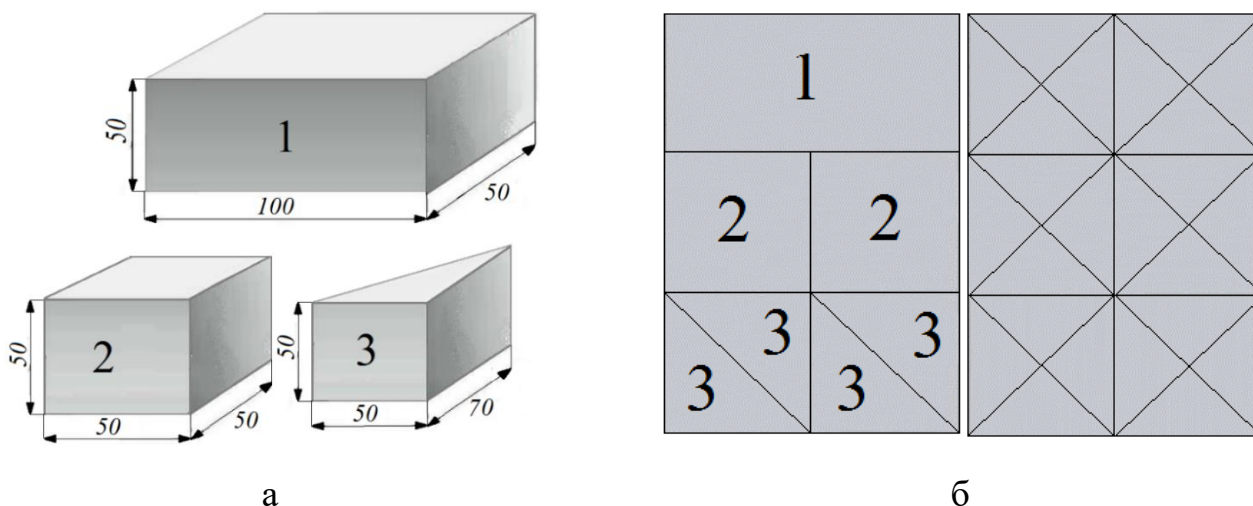


Рисунок 2. Ассортимент клинкерной плитки: а – формы (параллелепипед, куб, призма); б – сочетание типоразмеров плитки между собой

Цвета используются как чисто «керамические», полученные при обжиге клинкера, так и «природных» оттенков – путем внесения пигментов на стадии подготовки сырьевой массы.

На базе кафедры «Строительные материалы» Донского государственного строительного университета были выполнены лабораторные эксперименты по пригодности аргиллитов Некрасовского месторождения для производства клинкерной дорожной мозаики.

Сырьевая база нашей страны с каждым годом истощается, из-за этого основной задачей становится поиск нового инновационного сырья. Данным новым сырьем могут служить аргиллиты. Аргиллиты – это камнеподобное сырье, которое плохо размокает в воде. Если правильно организовать технологический процесс по подготовке сырьевой смеси, то данное сырье может стать альтернативой для строительной керамической промышленности [3-5].

В Туапсинском районе Краснодарского края находится залежание аргиллитов Некрасовского месторождения (рисунок 3). Аргиллит Некрасовского месторождения в основном представлен отдельными кусками лещадной формы размерами 2-10 см (рисунок 4). Из данного месторождения были отобраны пробы и исследованы на качественный состав масс.

Макроскопическое исследование проб аргиллитов Некрасовского месторождения представлено в таблице 1. Фотографии микроструктуры – на рисунке 5. Химический состав представлен в таблице 2. Стоит учитывать, что при данном анализе оксиды могут находиться в различных состояниях, данный момент важен при прогнозировании технологических свойств сырья.

Аргиллиты Некрасовского месторождения согласно ГОСТ 9169-2021 «Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация» можно отнести к полукислой группе. В аргиллитах оксид железа является сильным плавнем и также влияет на цвет черепка, что необходимо учитывать при разработке режима обжига изделий [6,7].



Рисунок 3. Фрагмент геологической карты Краснодарского края.

● район изученных аргиллитов



Рисунок 4. Аргиллиты Некрасовского месторождения

Таблица 1. Макроописание пробы аргиллитов

Наименование месторождения	Цвет породы	Структура и текстура	Наличие карбонатных включений и их распределение.	Содержание и виды других включений
Некрасовское	Серый и тёмно-серый.	Структура плотная ориентированная пелито-алевритистая. Текстура скорлуповатая, слабослоистая.	Карбонатных включений не наблюдается. Не вскипает при взаимодействии с соляной кислотой.	Кусочки и тонкие пропластки, обогащённые гидроксидами железа. Редкие зёрна кварца и кремния, растительные остатки.

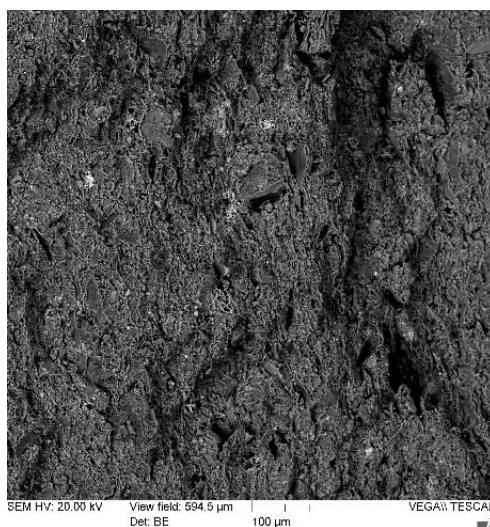


Рисунок 5. Фото Некрасовского аргиллита под электронным микроскопом

Таблица 2. Химический состав аргиллитов, % по массе

Наименование месторождения аргиллитов	П.П.П.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	Сорг.
Некрасовское	5,5 9	61,1 6	17,5 3	6,48	0,7 7	1,8 6	0,0 5	3,5 7	1,0 8	0,1 4	0,9 8	0,0 9	1,6 5

По полученным данным можно сделать вывод, что химический состав аргиллитов Некрасовского месторождения подходит для получения клинкерной дорожной мозаики.

Разработанная технологическая схема для производства клинкерной дорожной мозаики представлена на рисунке 6.

Для производства клинкерной дорожной мозаики подойдут аргиллиты Некрасовского месторождения фракции менее 0,63 мм. Данные аргиллиты проходят тщательное измельчение на технологическом оборудовании. В качестве основных красителей выбраны минеральные пигменты, которые вводятся в сырьевую массу в отделение тонкого помола. После тщательного смешивания всех сырьевых материалов, данная масса поступает в отделение формовки. Глиняный «брус» выходит из экструдера, поступает на автомат резчик, где уже разделяется на отдельные кирпичики. Дальше на каждый кирпичик наносятся пазы. После чего сырец поступает в отделение сушки и обжига. На выходе получается обожженный кирпичик с нанесенными пазами. Сами мозаичные элементы получают путем раскалывания кирпичика по пазам непосредственно на месте мощения.

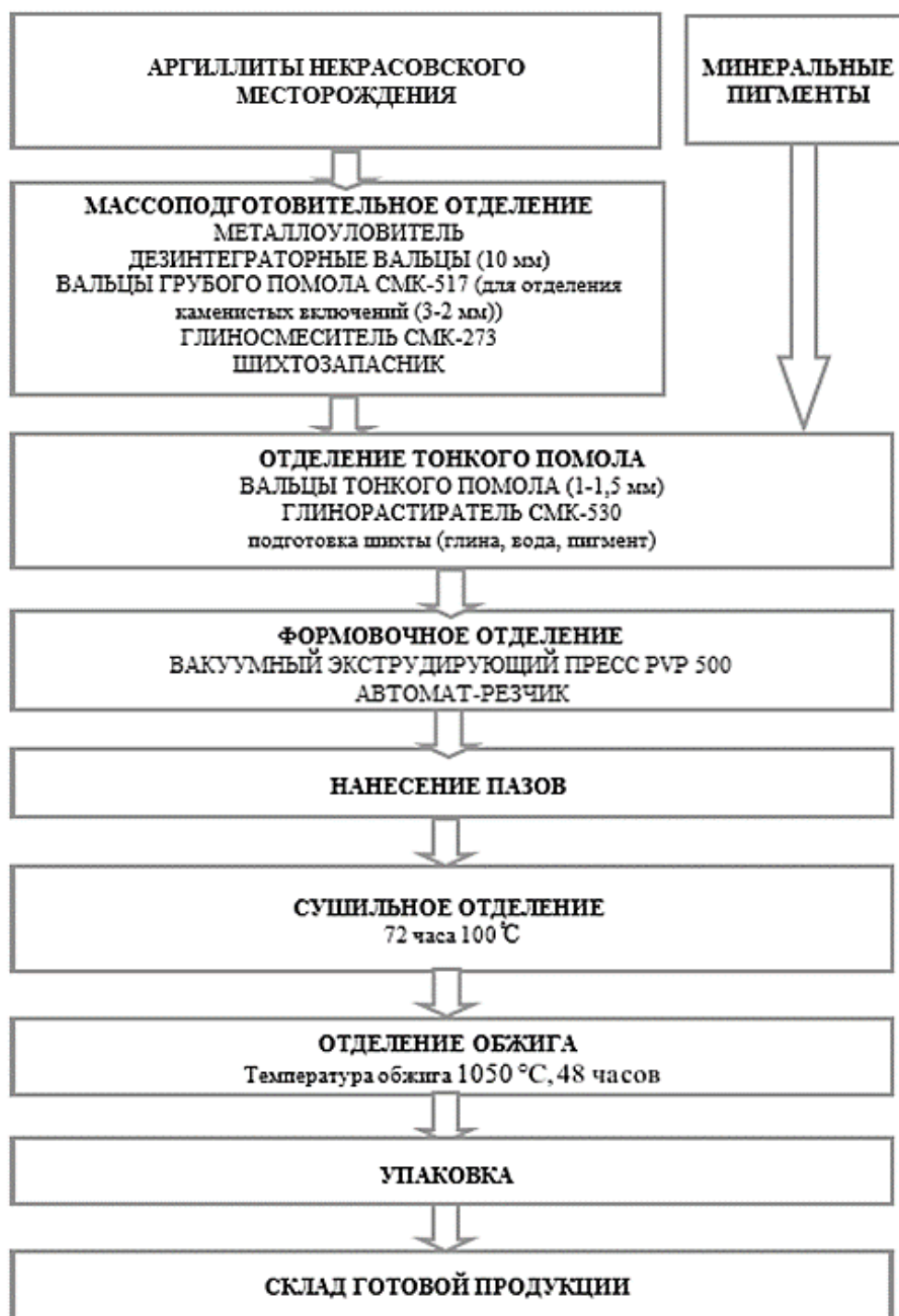


Рисунок 6. Принципиальная технологическая схема производства клинкерной дорожной мозаики на основе аргиллитов Некрасовского месторождения

Разработанная технологическая схема производства клинкерной тротуарной плитки на основе аргиллитов позволяет создавать множество вариантов орнаментального рисунка (Рисунок 7) и организовать эффективное рентабельное производство на базе керамического предприятия как дополнительная встроенная линия.





Рисунок 7. Предлагаемые виды тротуарной клинкерной мозаики

Благодаря своим эстетическим и техническим характеристикам, клинкерная мозаика достойно занимает место в маркетинговой линейке востребованных строительных керамических изделий.

#### Библиографический список:

1. Иванова, Е.А. Техника мозаики. Применение мозаики в ландшафтной архитектуре / Е.А. Иванова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2010. № 4-6 (29). С. 52-55.
2. Кличова, Ш.А. Значение мозаичного искусства в архитектуре / Ш. А. Кличова // Вестник науки. 2023. № 4 (61), Т. 5. С. 432-436.
3. Котляр, А.В. Технологические свойства аргиллитоподобных глин при производстве клинкерного кирпича / А.В. Котляр // Вестник ТГАСУ. 2016. № 2 (55). С. 164–175.
4. Котляр, В.Д. Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу / В.Д. Котляр, Ю.В. Терехина, А.В. Котляр // «Строительные материалы». 2015. № 4. С. 72-74.
5. Котляр, А.В. Характеристика камнеподобных глинистых пород как сырья для производства строительной керамики / А.В. Котляр // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 31-37.
6. Lazareva Y.V., Kotlyar A.V., Orlova M.E., Lapunova K.A Water permeability of argillite-based ceramic tiles // MATEC Web Conf. 2018. 04072. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819604072>.
7. PAVING CLINKER OF LOW-TEMPERATURE SINTERING ON THE BASIS OF OPOKAMORPHIC ROCKS. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Materials Science Forum. 2018. Т. 931 MSF. С. 568-572.

## РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА С ОБОГАЩЕННОЙ ЗОЛОЙ ТЭС

**И.Ю. Петрик**<sup>1</sup>, ассистент

**Н.М. Зайченко**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор

**В.Н. Губарь**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup>*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасская национальная академия, строительства и архитектуры»*

**Аннотация.** Электростатическое обогащение золы ТЭС с повышенным содержанием несгоревшего углерода может обеспечить получение золы, отвечающей техническим требованиям для ее применения в составе вяжущего вещества взамен части портландцемента. В статье представлены результаты исследования влияния обогащенной золы ТЭС на морозостойкость и коррозионную стойкость бетонов с высоким содержанием активных минеральных добавок. Установлено, что морозостойкость бетона с обогащенной золой ТЭС выше, чем у бетона контрольного состава, при этом изменение массы образцов до и после испытаний после 150 циклов не превысило 2%, что соответствует марке по морозостойкости F150. Коррозионная стойкость образцов бетона с обогащенной золой ТЭС выше, чем у образцов контрольного состава. Таким образом, применение обогащенной золы ТЭС снижает пористость бетона в следствии повышения степени гидратации портландцемента, так как происходит заполнение порового пространства дисперсными новообразованиями, и тем самым, повышает показатели морозостойкости и коррозионной стойкости бетона.

**Ключевые слова:** обогащенная зола, электростатическая сепарация, несгоревшие угольные частицы, потери при прокаливании, дисперсность, морозостойкость, коррозионная стойкость.

Зола – это отход производства, который образуется на тепловых электростанциях при сжигании пылевидного угля.

В настоящее время на тепловых электростанциях зола улавливается электрофильтрами и накапливается в бункерах или вместе с образующимся шлаком утилизируется системой гидроудаления. Размещение золы в золоотвалах является проблемой для всех электростанций, поскольку утилизированные отходы, как правило, не находят применения для практических целей.

В результате длительного хранения золошлаковых отходов в золоотвалах возникает ряд проблем: происходит ухудшение гранулометрического состава золы ТЭС, протекают различные химико-минералогические реакции. В дальнейшем, при использовании такой золы ТЭС в составе бетона, она оказывает влияние на гидратацию цемента, повышает водопотребность бетонной смеси, и тем самым снижает эксплуатационные свойства бетона, такие как коррозионная стойкость и морозостойкость.

Утилизация золы ТЭС взамен размещения в отвалах может быть обоснована с одной стороны с экономической точки зрения при использовании в качестве пуццоланы при частичной замене цемента, а с другой стороны в связи с её положительным влиянием на свойства бетонных смесей и бетонов [1].

Множество факторов оказывает влияние на морфологию, фазовый и химический состав золы. В результате химический состав, в частности содержание потерь при прокаливании не более 5%, ограничивает содержание золы в цементных бетонах до 15-20%. Кроме того, при нормативном содержании золы ТЭС не решаются проблемы коррозионной стойкости бетона и термического трещинообразования для массивных конструкций. В связи с этим канадскими учеными разработаны составы бетонов с высоким содержанием золы – High-Volume Fly Ash Concrete (HVFAC) [2, 3].

Но в это же время при высоком расходе золы замедляется рост прочности бетона в раннем возрасте, снижается его морозостойкость в случае, если в золе присутствует несгоревший углерод сверх нормативно допустимого содержания (свыше 5%). Это обуславливает необходимость разработки способов повышения качества золы ТЭС с целью снижения содержания несгоревших угольных частиц.

В последние годы исследованы различные способы обогащения золы и предложено ряд способов отделения минерального материала высокого качества от несгоревшего угля. Однако способ электростатической сепарации несгоревшего угля из предварительно подготовленной золы имеет наибольшее практическое значение [4, 5].

Электрическая сепарация золы осуществлена с помощью камерного электростатического сепаратора свободного падения (Рисунок 1).

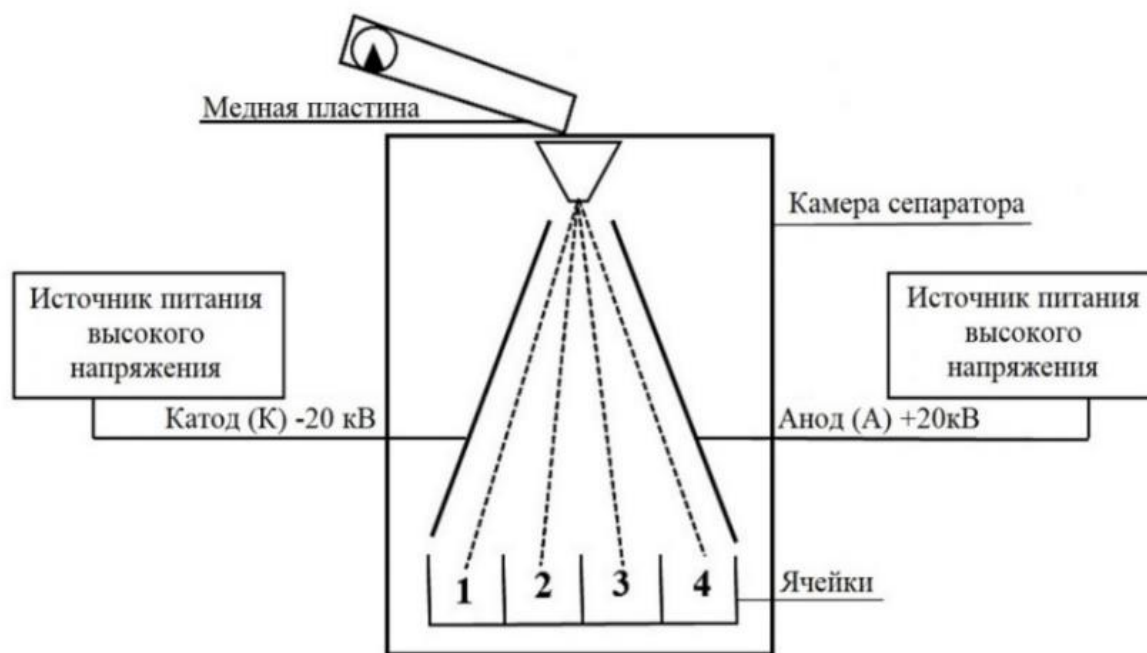


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Частицы золы, контактируя с поверхностью медного питателя, приобретают поверхностный заряд, в частности частицы угля будут заряжаться положительно, а частицы золы – отрицательно. Заряженные частицы попадают в камеру сепаратора, оборудованную электродами из двух медных пластин, прикреплённых к её противоположным боковым стенкам. Под действием постоянного электрического поля, создаваемого источником

высокого напряжения, заряженные частицы отклоняются к электродам в соответствии с их полярностью.

Физические свойства обогащенной золы ТЭС представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства обогащенной золы ТЭС

Зона отбора сепаратора	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Остаток на сите №008, %
Катод (К)	1116	0,00
1	1110	1,93
2	1124	3,52
3	1149	3,70
4	1145	1,83
Анод (А)	1137	0,00

Результаты определения размера частиц и потерь при прокаливании обогащенной золы ТЭС представлены в таблице 2.

Таблица 2. Размер частиц и потери при прокаливании обогащенной золы ТЭС

Зона отбора сепаратора	Навеска		Размер частиц, мкм		Частицы менее 2 мкм, %	Потери при прокаливании (ППП)		
	г	%	максимальный d <sub>98</sub>	средний d <sub>50</sub>		г	%	% ко всей навеске
Катод (К)	15	1,5	76,461	19,891	7,64	3,3	22,0	4,8
1	45	4,5	123,972	27,302	6,17	21,5	47,8	31,1
2	113	11,3	134,805	28,592	5,89	19,2	17,0	27,7
3	276	27,6	151,125	26,546	5,75	11,4	4,1	16,5
4	482	48,2	142,337	25,859	6,96	12,3	2,6	17,8
Анод (А)	69	6,9	66,576	17,930	8,01	1,5	2,2	2,1
Всего	1000	100				69,2		100

После электростатической сепарации дисперсность золы, которая определяется как величина остатка навески после просеивания через сито №008, возрастает в ячейках электросепаратора, расположенных ближе к пластинчатым электродам. Наиболее крупные частицы золы накапливаются в ячейках 2 и 3. Максимальное содержание несгоревших угольных частиц, определяемое по показателю потерь при прокаливании, после электрического сепарирования сосредоточено в навесках, отобранных с катода и ячеек, близких к нему [6].

Для выполнения программы экспериментальных исследований в качестве исходных компонентов бетонной смеси приняты:

– вяжущее вещество – портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н (ООО «ПИК-Цемент», Амвросиевский цементный комбинат, пгт. Новоамвросиевское);

- мелкий заполнитель – песок (П) кварцевый Ясиноватского карьера (модуль крупности  $M_k=1,34$ ; насыпная плотность –  $1206 \text{ кг/м}^3$ );
- крупный заполнитель – щебень (Щ) гранитный Тельмановского месторождения (фракция 5-10 мм; насыпная плотность –  $1349 \text{ кг/м}^3$ );
- активная минеральная добавка – зола (З) Зуевской ТЭС (удельная поверхность по Блэйну  $290 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; потери при прокаливании  $6,92 \%$ );
- химические добавки – суперпластифицирующая добавка-модификатор (СП) на основе углеродных наноструктурированных материалов «АРТ-КОНКРИТ Р» (концентрация  $37 \%$ ; плотность  $1,1 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$ ; рН  $7,0 \pm 1,0$ ) и воздухововлекающая добавка (ВВД) на основе композиции синтетических поверхностно-активных веществ Sika® Aer Pro-100 (плотность  $0,995\text{-}1,005 \text{ г/см}^3$ ; рН  $10,0\text{-}11,0$ ).

В таблице 3 представлены экспериментальные составы бетонов.

Таблица 3. Составы бетонов

Состав	Расход компонентов, $\text{кг/м}^3$						
	Щ	З	СП (л)	ВВД (л)	В (л)	Щ	П
1	457	-	-	-	210	1112	553
2	251	206	0,6	0,6	136	1112	553

Результаты определения морозостойкости бетона представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты определения морозостойкости бетона

Состав	Показатели	Число циклов «замораживания-оттаивания»		
		50	75	100
1	Потери массы, %	0,18	0,64	1,53
	Предел прочности на сжатие, МПа	41,9 (44,3)	39,5 (45,1)	37,2 (45,9)
2	Потери массы, %	0,00	0,12	0,31
	Предел прочности на сжатие, МПа	45,1 (48,8)	44,7 (49,4)	44,1 (50,3)

Результаты определения коррозионной стойкости бетона представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты определения коррозионной стойкости бетона

Состав	Прочность контрольных образцов, $R_k$ , МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе контрольных $R_k$ и образцов, выдержанных в агрессивных растворах, $R_{126}$ , МПа, и коэффициент коррозионной стойкости $K_C$			
		0,1н р-р HCl		5% р-р NaCl	
		$R_{126}$ , МПа	$K_C$	$R_{126}$ , МПа	$K_C$
1	6,9	5,1	0,73	6,7	0,97
2	9,7	14,1	1,45	15,4	1,58

**Вывод.** По результатам исследования можно сделать вывод, что электростатическое обогащение золы ТЭС с повышенным содержанием несгоревшего углерода может обеспечить получение золы, отвечающей техническим требованиям для высокого уровня замены цемента (до 50%) в бетонах. Обогащённая зола характеризуется повышенной дисперсностью и пониженным содержанием несгоревшего углерода.

Эффект повышения морозостойкости и коррозионной стойкости зависит от пуццолановой активности минеральных компонентов в составе вяжущего. Использование обогащенной золы ТЭС снижает пористость бетона за счет повышения степени гидратации цемента и заполнения порового пространства дисперсными новообразованиями.

#### **Библиографический список:**

1. Zaichenko, Nikolai. Beneficiated ponded fly ash for concretes with high volume mineral additions / Nikolai Zaichenko, Irina Petrik, Liudmila Zaichenko. – MATEC Web of Conferences. 315 (10): 07006. – 2020. – DOI: 10.1051 / mateconf / 202031507006. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/342620707\\_Beneficiated\\_ponded\\_fly\\_ash\\_for\\_concretes\\_with\\_high\\_volume\\_mineral\\_additions](https://www.researchgate.net/publication/342620707_Beneficiated_ponded_fly_ash_for_concretes_with_high_volume_mineral_additions).
2. Malhotra V.M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development [Текст] / V.M. Malhotra, P.K. Mehta. – Inc. – Ottawa, 2002. – 101 p.
3. Mehta P.K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development [Текст] / P.K. Mehta // Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 20-21 May 2004: Proc. / Edited by Kejin Wang. – Beijing (Chine): Iowa State University, 2004. – P. 3-13.
4. Beneficiated Fly Ash Versus Normal Fly Ash or Silica Fume [Текст] / M. Collepardi, S. Collepardi, J.J. Olagot Ogoumah, R. Troli // the 9th CANMET/ACI International Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 20-25 May 2007: Proc. – Warsaw (Poland), 2007. – P. 1-8.
5. Li G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> [Текст] / Gengying Li // Cem. Concr. Res. – 2004. – Vol. 34, No 6. – P. 1043-1049.
6. Петрик И. Ю. Высокофункциональные бетоны с обогащенной электрической сепарацией золой-уносом ТЭС [текст]/ И. Ю. Петрик, Н. М. Зайченко, А. И. Сердюк // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – Вып. 1. – С. 32-39.

## БЕЗОБЖИГОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ФОСФОГИПСА

**В.Б. Петропавловская**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

**К.В. Ефимов**<sup>1</sup>, магистрант

**Т.Б. Новиченкова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**К.С. Петропавловский**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, с.н.с.

**В.А. Данякин**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*Тверской государственный технический университет*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования безобжиговых модифицированных композиций повышенной водостойкости на основе техногенных отходов химической отрасли – фосфогипса. В настоящее время достаточно остро стоит проблема утилизации многотоннажных техногенных отходов фосфогипса. Как известно, фосфогипс является крупнотоннажным побочным продуктом динамично развивающегося в настоящее время производства минеральных фосфатных удобрений. Несмотря на существующие разработки, направленные на применение данного техногенного ресурса, сегодня утилизируется в производство товарной продукции лишь 1,5 % от его выхода, что требует срочного решения проблемы. В работе предложен новый ресурсо- и энергосберегающий способ утилизации фосфогипса в реальное строительное производство. Был получен водостойкий состав вяжущей композиции на основе фосфогипса с повышенным показателем водостойкости.

**Ключевые слова:** фосфогипс, техногенные отходы, шлакопортландцемент, композиционные материалы, водостойкость.

Фосфогипс, является крупнотоннажным отходом производства серной кислоты. Несмотря на значительное количество разработок по утилизации фосфогипса из 20 млн. т его, получаемого ежегодно, находит применение только 0,3 млн. т или 1,5 %, остальное удаляется с территории предприятий как отход, что связано со значительными затратами труда и финансовых средств [1]. Получение модифицированных композиций на основе двухводного гипса повышенной водостойкости с сохранением всех достоинств гипсовых материалов может позволить повысить производительность труда и снизить стоимость строительства [2].

Наряду с положительными свойствами гипсовым изделиям присуща невысокая водостойкость. Эти отрицательные свойства гипсовых изделий сокращают области и масштабы их применения в строительстве [3]. Во многом из-за этого недостатка, гипсовые изделия до сих пор не получили достаточно широкого распространения в строительстве [4]. Область применения гипсовых материалов и изделий ограничена относительной влажностью помещений до 60-75 % [5].

Водостойкостью считают степень снижения прочности материала при предельном его водонасыщении. Водостойкость численно характеризуется коэффициентом размягчения ( $K_p$ ). Коэффициент размягчения определяется

отношением прочности материала в насыщенном водой состоянии ( $R_H$ ), к прочности материала в абсолютно сухом состоянии ( $R_c$ ).

Принято считать, что природные и искусственные каменные строительные материалы, применяемые в подводных конструкциях или в конструкциях, находящихся в сырых местах, должны иметь коэффициент размягчения не ниже 0,8 [6], что в первую очередь определяется составом применяемой сырьевой смеси (дисперсной системы) и составом затворителя (дисперсионной среды). При твердении дисперсной системы двуводного гипса важную роль играет не только состав затворителя (дисперсионной среды), но и его количество. Это объясняется тем, что в условиях полусухого прессования смесей на основе двуводного гипса требуется обеспечить сближение частиц на расстояния, необходимые для образования первичных контактов, развивающихся в дальнейшем в кристаллизационную структуру. Достичь этого возможно только за счет низкого водосодержания смеси и высокого давления. Или при невысоком давлении, но при высоком пересыщении. Таким образом также выполняются условия образования кристаллизационных контактов [6-8].

Выявлено, что при давлении, равном 5 МПа не наблюдается заметного повышения прочности и водостойкости при изменении водородного показателя. Это связано, по-видимому, с тем, что в системе не происходит переупаковка частиц для формирования плотной упаковки зерен ввиду применения недостаточно высокого давления. При этом рост используемого давления в диапазоне от 15 до 30 МПа позволяет повысить прочность и водостойкость [8-9].

Известным эффективным приемом повышения водостойкости гипсовых вяжущих является введение активных минеральных добавок молотых гранулированных доменных шлаков, зол-уноса в сочетании с портландцементом или известью [10]. Наиболее высокими физико-механическими показателями обладают образцы, изготовленные из смесей, содержащих 10–15 % микрокремнезема: прочность на сжатие – 60–65 МПа, коэффициент размягчения – 0,78–0,84 [11].

Результаты других проведенных исследований [12] показывают, что комплексная модификация гипсового вяжущего карбонатсодержащим наполнителем и моноаммонийфосфатом тоже оказывает положительное влияние на структуру, прочность и водостойкость затвердевшего прессованного материала.

Повысить водо- и атмосферостойкость гипсового камня, кроме того, можно за счет его объемной или поверхностной гидрофобизации. Однако поверхностная обработка гидрофобизаторами имеет свойство терять свою эффективность со временем, поэтому для более продолжительного использования изделий ее необходимо периодически повторять [13-15].

Также существуют попытки повышения водостойкости гипсовых вяжущих модифицированием вяжущего полимерными добавками и поверхностной пропиткой образцов растворами [15, 16], что также не всегда рационально и технологично.



В данной работе необходимая для производства фасадной плитки водостойкость достигалась за счет введения в состав сырьевой смеси добавки шлакопортландцемента. Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния добавки шлакопортландцемента и влажности сырьевой смеси в составе композиции контактно-конденсационного твердения.

В качестве исходного компонента сырьевой смеси применялся техногенный фосфогипс – вторичный продукт завода минеральных удобрений. Влажность фосфогипса не превышала 3,5 %.

В качестве второго, дополнительного компонента использовался шлакопортландцемент класса ЦЕМ III/A 42,5Н.

Составы сухих композиций на основе фосфогипса и шлакопортландцемента приготавливались путем непрерывного перемешивания вручную в течение 2 минут. Затем в полученную однородную сухую смесь вливалось необходимое количество затворителя и производилось перемешивание пресс-массы в течение 3 минут. Готовой полусухой сырьевой смесью заполнялись формы-цилиндры ( $d=25$  мм,  $h=25$  мм). Образцы изготавливались полусухим прессованием с использованием гидравлического пресса. При полусухом способе формования прогретый и увлажненный порошок уплотнялся путем прессования под давлением 30 МПа. Образцы гипса твердели при нормальной температуре в эксикаторе при уровне влажности не менее 95 % в течение 7 суток. Испытания образцов на механическую прочность и плотность производились по стандартным методикам.

По результатам планированного эксперимента были получены зависимости средней плотности и предела прочности при сжатии от соотношения «Жидкость / Твердое» (Ж/Т).

Матрица планированного эксперимента и результаты исследования содержания шлакопортландцемента и затворителя представлены в таблице и на Рисунок 1,2.

Значения, приведенные в таблице 1, показали, что при увеличении содержания добавки шлакопортландцемента и содержания извести показатель прочности на сжатие вырос на 15 %, показатель плотности вырос на 10 %, показатель коэффициента размягчения увеличился примерно на 20 %.

Наилучшие результаты по пределу прочности при сжатии и коэффициенту размягчения среди исследованных показал состав №4 (при максимальных значениях по обоим переменным факторам)– 35,2 МПа и 0,94 соответственно. Кроме того, образец состава №4 обладает и наибольшей плотностью из полученных образцов – 2670 кг/м<sup>3</sup>, что не противоречит традиционным закономерностям.

По результатам, полученным в ходе эксперимента, можно обнаружить, что добавка шлакопортландцемента, несомненно, улучшает свойства фосфогипсовой вяжущей системы, что показывает проведенный сравнительный анализ полученных данных. Характер полученных зависимостей показывает, что необходимо продолжить исследования с целью установления оптимальных значений обоих соотношений – Ж/Т и Ш/Ф. Динамика набора показывает, что повышение влажности пресс-массы улучшает формовочные свойства сырьевой

смеси, а, следовательно, и физико-механические свойства прессованного материала.

Таблица 1. Матрица планирования и физико-механические свойства гипсоцементно-шлакового камня

№	Уровни факторов		Значения факторов,		Полученные результаты		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Ж/Т	Ш/Ф	Плотность образца, кг/м <sup>3</sup>	Средняя прочность при сжатии R, МПа	Коэффициент размягчения
1	-1	-1	0,05	0,10	2490	30,5	0,75
2	-1	+1	0,05	0,20	2520	31,2	0,92
3	+1	-1	0,09	0,10	2610	34,1	0,77
4	+1	+1	0,09	0,20	2670	35,2	0,94
5	0	-1	0,07	0,10	2550	32,4	0,80
6	0	+1	0,07	0,20	2590	32,8	0,93
7	-1	0	0,05	0,15	2500	30,7	0,83
8	+1	0	0,09	0,15	2650	34,4	0,86
9	0	0	0,07	0,15	2560	32,6	0,85

Таким образом, использование отходов фосфогипса, как доступного сырья, способствует достижению практического эффекта, как по экономическим соображениям, так и по прогнозным физико-механическим показателям. Учитывая относительно высокий коэффициент водостойкости полученных образцов, следует предположить возможность использования разработанного состава для изготовления фасадных плиток.

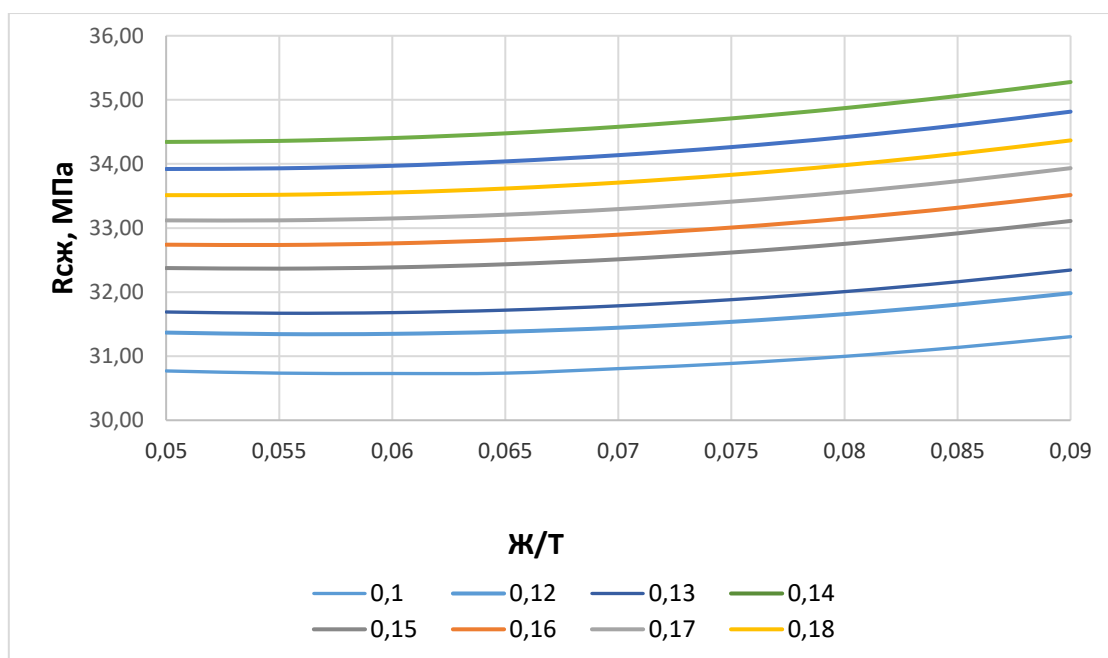


Рисунок 1. Зависимость прочности прессованного гипсового камня от Ж/Т

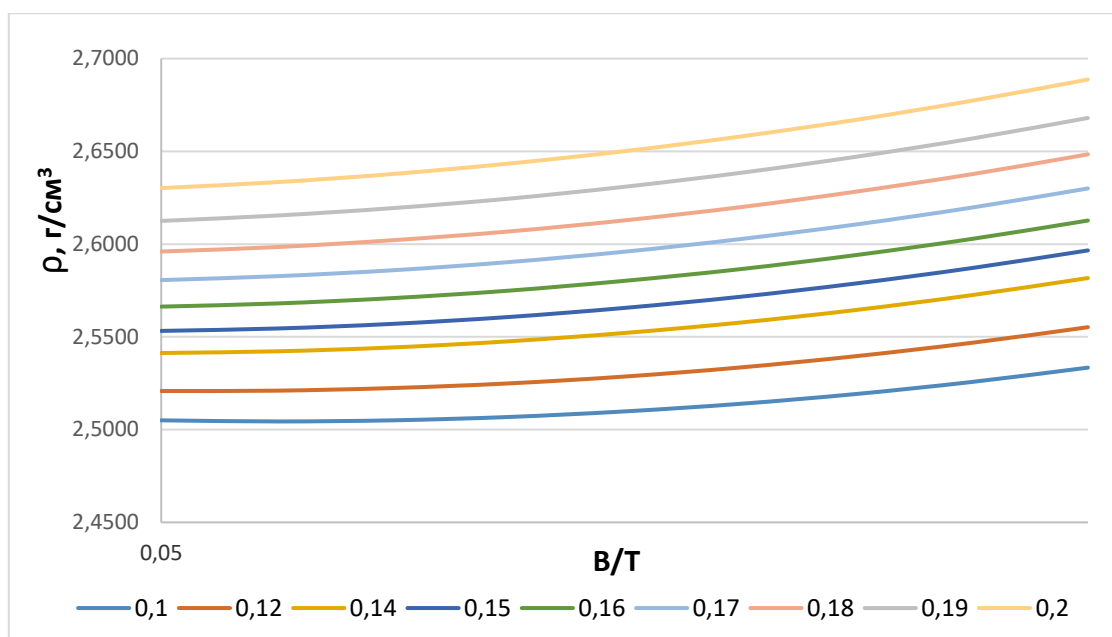


Рисунок 2. Зависимость плотности прессованного гипсового камня от Ж/Т

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

#### Библиографический список:

1. Золотухин С.Н., Кукина О.Б., Абраменко А.А. Эффективные безобжиговые строительные материалы на основе фосфогипса // Современное строительство и архитектура. 2016. №4. С. 8-14.
2. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 18–23.
3. Сопегин Г.В., Семейных Н.С., Рустамова Д.Ч. Энергосберегающая технология получения безобжиговых материалов с использованием техногенного сырья // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 129–138.
4. Шукина Е.Г., Щукин Е.А. Ресурсосберегающие безобжиговые гипсовые композиты // Вестник ВСГУТУ. 2022. № 2 (85). С. 87-92.
5. Ассакунова Б.Т., Байменова Г.Р., Аманкулов М.А. Композиционные безобжиговые гипсовые вяжущие вещества из местного сырья // Наука, Новые технологии и инновации Кыргызстана 2017, № 10 С. 26–28.
6. Самченко С.В., Марголис Б.И. Влияние условий структурообразования на свойства прессованных гипсовых материалов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 277-280.
7. Каклюгин А.В., Ступень Н.С., Касторных Л.И., Коваленко В.В. Гипсовые и магнезитовые прессованные композиты повышенной стойкости к попеременному увлажнению и высушиванию // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 1 (757). С. 31-43.
8. Михеенков М.А. Прессование как способ повышения водостойкости гипсового вяжущего // Вестник МГСУ 2016. № 4. С. 158-166.

9. Бебиа Г.А., Осянина Е.Э. Применение гипсовой плитки для наружной отделки зданий // Вузовская наука в современных условиях. сборник материалов 53-й научно-технической конференции, в 3 ч., Ульяновск, 2021. С. 100-103.
10. Панченко А.И., Бурьянов А.Ф., Соловьев В.Г., Козлов Н.В., Пашкевич С.А. Комплексная оценка эффективности применения гипсового, вяжущего повышенной водостойкости // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 72-75.
11. Старостина И.В. Ефремов Р.О., Порожнюк Е.В., Старостина Ю.Л. и др. Использование кремнеземсодержащих промышленных отходов в технологии композиционных гипсовых вяжущих // Вестник Казанского технологического университета. 2021. № 13. С. 178–181.
12. Барковская С.В., Пчельникова С.А. Разработка композиционных гипсовых вяжущих веществ с использованием керамзитовой пыли и стеклобоя // Эксперт: теория и практика. 2022. № 3. С. 34-38.
13. Жуков А.Д., Бессонов И.В., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Демисси Б.А. Материалы на основе модифицированного гипса для фасадных систем // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 3. – С. 144–149.
14. Белякова Н.А., Рубцова В.Н., Осипова Е.А. Повышение водостойкости строительного гипса // Оренбургский государственный университет, г. Оренбург С. 573–580.
15. Потапова Е.Н., Исаева И.В. Повышение водостойкости гипсового вяжущего // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 20–22.
16. Патент на изобретение RU 2342343 С1, 27.12.2008. Способ изготовления гипсовых изделий. Петропавловская В.Б., Пунегов С.В., Курков Н.Ю. Заявка № 2007118035/03 от 14.05.2007.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗОЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

**К.С. Петропавловский**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, с.н.с.

**Т.Б. Новиченкова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**В.Б. Петропавловская**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

**Х.А. Микаэлян**<sup>1</sup>, магистрант

**Д.А.Коровицын**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*Тверской государственной технической университет*

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию влияния алюмосиликатного компонента золошлаковой смеси – отхода гидроудаления тепловых электростанций на физико-механические характеристики композиционного вяжущего, получаемого на основе портландцемента. С целью сокращения цементоемкости строительного производства и решения экологических проблем исследовалась возможность замены части цемента техногенной алюмосиликатной добавкой. Показано, что введение сфероидальных частиц микроразмерного ряда отражается на показателях сырьевых смесей на основе портландцемента. По результатам проведенных исследований установлено, что применение зольных микросфер позволяет регулировать реологические свойства композиций, что дает возможность получать на их основе эффективные малоцементные композиции.

**Ключевые слова:** цемент, техногенные ресурсы, промышленные отходы, алюмосиликатная микросфера, нормальная густота, сроки схватывания.

Европейское производство строительных материалов ориентировано на увеличение в составе вяжущего объема техногенного сырья [1]. Сегодня это направление просматривается по отношению к крупнотоннажным запасам сырьевых ресурсов – зол-уноса и золошлаковых смесей ТЭС (ЗШС). Особенно это актуально для стран, где большая часть электроэнергии вырабатывается тепловыми электростанциями, сжигающими твердое топливо с образованием многотоннажных отходов [2-4].

Очевидно, что цемент и бетон как наиболее ресурсоемкие строительные материалы способны «поглотить» большую долю зол-уноса и ЗШС, и, следовательно, сберечь мировые энергоресурсы, потребляемая доля которых только цементной промышленностью составляет сегодня около 5 %. Данные отходы могут стать ценным сырьем, благоприятно воздействующим на технологические и эксплуатационно-технические показатели строительных материалов и изделий [5-6].

Вследствие высокой стоимости и энергоемкости процесса производства портландцемента целесообразно применять бесклинкерные алюмосиликатные вяжущие, т.е. использовать промышленные отходы алюмосиликатного состава в качестве основного сырьевого компонента для производства строительных материалов [7]. К таким вяжущим, в полной мере, способным конкурировать с портландцементом, относятся щелочные и щелочноземельные вяжущие [5].

Зольные алюмосиликатные наполнители, получаемые выделением их из состава золошлаковых смесей, позволяют улучшить эксплуатационные свойства цементных материалов [8, 9] и повысить их коррозионную стойкость [9].

В целях получения композиционного, вяжущего с высокими эксплуатационными свойствами на основе золошлаковых отходов (ЗШО) в работе исследовалось влияние алюмосиликатной добавки на технологические характеристики вяжущих композиций.

В данной работе в качестве основного вяжущего применялся портландцемент ExtraCEM 500 – ЦЕМ II/A-И 42.5Б производства ООО «Холсим (Рус) СМ», г. Коломна.

В качестве алюмосиликатной добавки в исследованиях использовался компонент золошлаковой смеси угольной ТЭС Московской области (рисунок 1), полученный в результате разделения ЗШО методом флотационного обогащения и магнитной сепарации на отдельные компоненты в заводских условиях (рисунок 2).

Основными компонентами, содержащимися в смеси, являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , которые в сумме составили 87 - 96 %. Содержание оксидов кальция и магния в сумме варьировалось в пределах 4 - 8 %. Сумма оксидов  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  невелика и не превысила 2 – 3 %. Содержание серы в золе находилось в пределах 0,1- 0,16 %. Содержание таких компонентов как  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  составляло менее 1 %, поэтому они не играли существенной роли при проведении флотации.

Алюмосиликатный компонент (АСК) представляет собой светло-серый порошкообразный материал (рисунок 2), содержащий 2-4 % мас. углерода. Алюмосиликатные зерна в большинстве своем имеют сферическую форму и представлены стеклофазой.

Характеристики цементного теста определялись по стандартным методикам в соответствии с требованиями ГОСТ.

В исследованиях содержание АСК изменяли в пределах от 0 % до 30 % от массы цемента (рисунок 1).

Начало схватывания цементного теста (рисунок 2) оценивалось по результатам, полученным при испытаниях по стандартной методике на приборе Вика со стальной иглой. Начало схватывания определяли как время от начала затворения цементного порошка жидкой фазой до момента, когда игла при проникновении в тесто не доходила до края пластинки на  $(4 \pm 1)$  мм.

Показано, что с увеличением содержания алюмосиликатного порошка (средний размер частиц в составе полидисперсной смеси 1,8 мкм) увеличивается водопотребность смеси. Водоцементное отношение растет от 0,28 до 0,4 при варьировании количества добавки – от 0 до 30 %.

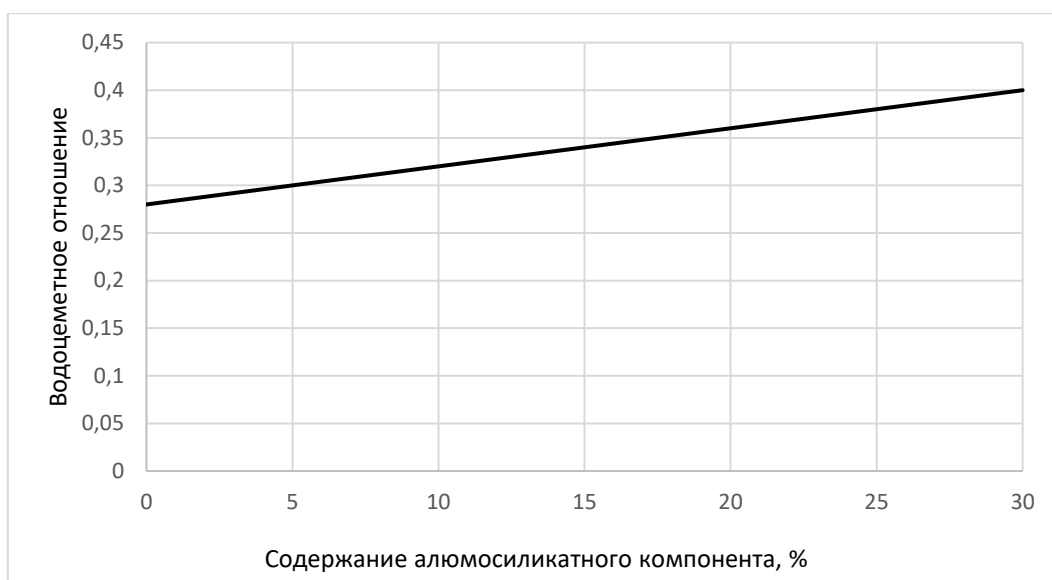


Рисунок 1. Зависимость водопотребности цементного теста от процентного содержания алюмосиликатной добавки

На втором этапе проводилось исследование влияние алюмосиликатной добавки на начало схватывания цементного теста.

Введение микросфер алюмосиликатной добавки отражается и на начале схватывания цементного теста (Рисунок 2). Что связано с изменением щелочности раствора. С увеличением содержания алюмосиликатного компонента в составе модифицированной композиции происходит замедление процессов твердения и структурообразования.

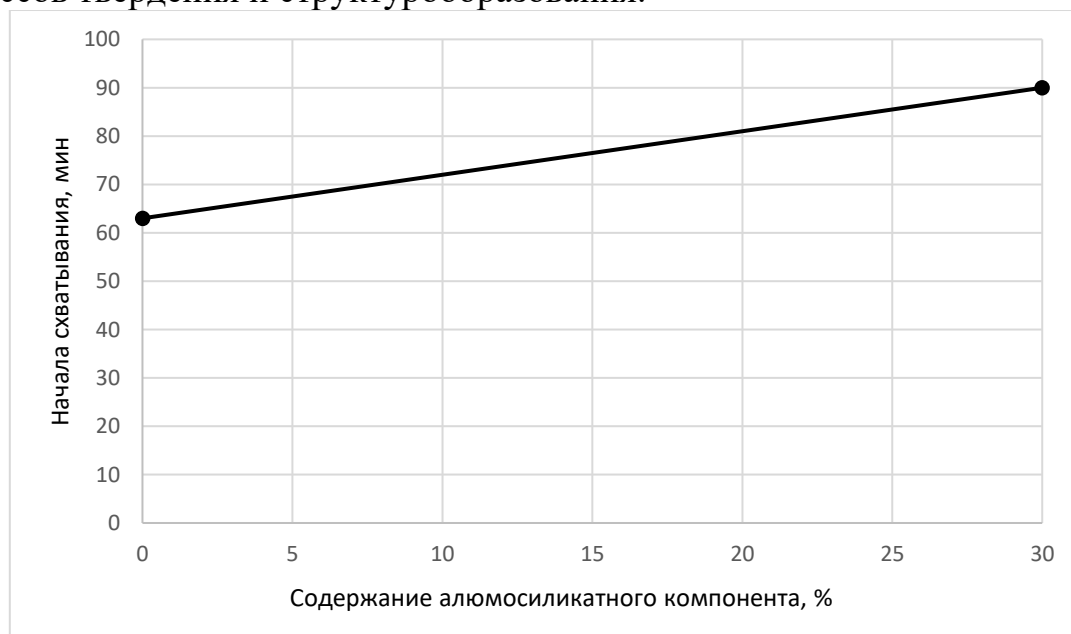


Рисунок 2. Зависимость начала схватывания модифицированного цементного теста от содержания алюмосиликатной добавки

Таким образом, введение алюмосиликатного компонента способствует изменению водопотребности цементных смесей, а также регулированию сроков, в первую очередь, начала схватывания цементного теста. Для эффективного использования алюмосиликатной добавки в составе цементов необходимо, по-

видимому, дополнительно вводить химические добавки, что требует проведения дополнительных исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

#### **Библиографический список:**

1. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4. С.16-21.
2. Fediuk, R., Makarova, N., Qader, D.N., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Sulman, M., Petropavlovskii, K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23, pp. 2642–2657
3. Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy / N. Makul, R. Fediuk, M. Amran [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 21. – DOI 10.3390/ma14216482. – EDN СВРNMP.
4. Макаренко С. В., Баишев Д. И., Хохлаков О. В., Хозин В. Г. Влияние зол-уноса и золошлаковых смесей ТЭС ОАО "Иркутскэнерго" на свойства цемента // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 4(30). С. 278-283.
5. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Zavadko M. Influence of acid-activated micro-dispersed additive on the properties of cement sulphate-resistant compositions *Materials Research Proceedings. Ser. "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment"* 2022. С. 285-292. Салиева М. Г. Некоторые аспекты использования золы гидроудаления в строительной индустрии // *Материаловедение*. – 2019. – № 2(30). – С. 101-103.
6. Ultra-Dispersed Ash Filler for Dispersed Binding Systems / V. Petropavlovskaya, M. Sulman, T. Novichenkova [et al.] // . – 2021. – Vol. 88. – P. 1003-1008. – DOI 10.3303/CET2188167. – EDN JYIHXC.
7. Corrosion resistant fine-grained ash concrete for repairs of constructions in the linen production / V. Petropavlovskaya, M. Sulman, T. Novichenkova, K. Petropavlovskii // *Journal of Physics: Conference Series, Belgorod*, 2021. Vol. 1926. – Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012045. – DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012045. – EDN ZPVVUI.
8. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Aleksandrova O., Fischer H.-B. Application of fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems. *Materials Science Forum*. 2021. T. 1037 MSF. С. 729-736.
9. Лебедев А.В., Петропавловская В.Б. Инъекционные составы с использованием алюмосиликатной добавки для цементации грунтов // *Инновации и моделирование в строительном материаловедении. Сборник научных трудов. Под редакцией В.В. Белова*. Тверь, 2022. С. 92-101.
10. Petropavlovskaya, V., Novichenkova, T., Petropavlovskii, K., Aleksandrova, O. V., & Fischer, H. B. (2021). Application of Fuel Ash as a Microfiller in Cement Dispersion Systems. In *Materials Science Forum* (Vol. 1037, pp. 729–736). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1037.729>.



## УГЛЕРОДГИПСОВЫЕ КОМПОЗИТЫ

**К.С. Петропавловский**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, с.н.с.

**Т.Б. Новиченкова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**В.Б. Петропавловская**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

**М. Аль-свейти**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*Тверской государственный технический университет*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования физико-механических свойств гипсового композита, модифицированного углеродной добавкой, выделенной из золошлаковой смеси гидроудаления – отхода ТЭС Московской области. Использованный золошлаковый отход образован в результате сжигания бурых углей, что отражается на его минералогическом и химическом составе. Разделение золошлаковой смеси на отдельные концентраты позволяет повысить однородность каждого из них и найти им эффективное применение в производстве строительных материалов. Данное исследование посвящено применению угольного концентрата в составе гипсовых композиций. Выбор вяжущего был обусловлен минеральным составом концентрата, его структурными особенностями, а также уникальными свойствами гипсового вяжущего. Отмечается влияние техногенного углерода на основные физико-механические показатели получаемого композита, что в первую очередь обусловлено внутренней структурой углеродных частиц. Облегченные углеродсодержащие гипсовые композиции могут быть востребованы в производстве конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов.

**Ключевые слова:** золошлаковый отход, углерод, модификатор, гипс, структура, плотность, пористость, прочность.

Хотя значение и использование гипса, как одного из наиболее экологически чистых вяжущих, в настоящее время возрастает, влияние углеродсодержащих наполнителей на структуру и свойства композиционных углеродгипсовых материалов изучено недостаточно [1].

Известно, что размер, форма и текстура частиц вводимых модификаторов нано-и микроразмерного ряда влияют на свойства минеральных вяжущих [1-4]. Прежде всего, на удобоукладываемость сырьевых смесей, механические и структурные характеристики строительных композитов [2]. Так, например, исследовано положительное влияние углеродных наномодификаторов на структуру и свойства гипсового камня [1]. Однако в случае использования углеродсодержащих модификаторов микроразмерного диапазона принято считать, что их роль в гипсовых композициях во многом схожа с их ролью в цементных составах [5-7]. Тем не менее необходимо учитывать, гипс химически является другим минеральным вяжущим. И физико-химические процессы, определяющие его схватывание и твердение, значительно отличаются от процессов, происходящих в других вяжущих системах [2-4]. Поэтому детальное исследование влияния техногенного углерода от сжигания бурых углей на свойства и структуру гипсовых композитов является актуальным.

В данной работе в качестве основного вяжущего применялось гипсовое вяжущее  $\alpha$ -модификации марки Г-16 Самарского гипсового комбината. В

качестве углеродной добавки был использован угольный концентрат, выделенный при обогащении золошлаковой смеси от сжигания бурых углей. Для достижения целей данного исследования техногенный углерод вводился в состав гипсового вяжущего в количестве от 0 до 30 %. Исследования физико-механических свойств гипсового камня с добавкой углеродного концентрата производились в полном соответствии с требованиями ГОСТ.

По данным проведенных исследований установлено, что прочность на сжатие снижается с увеличением концентрации углеродной добавки (Рисунок 1). Однако даже с учетом падения прочности получаемый композит имеет достаточную прочность на сжатие в возрасте 7 суток – 23 МПа при плотности 1350 кг/м<sup>3</sup>.

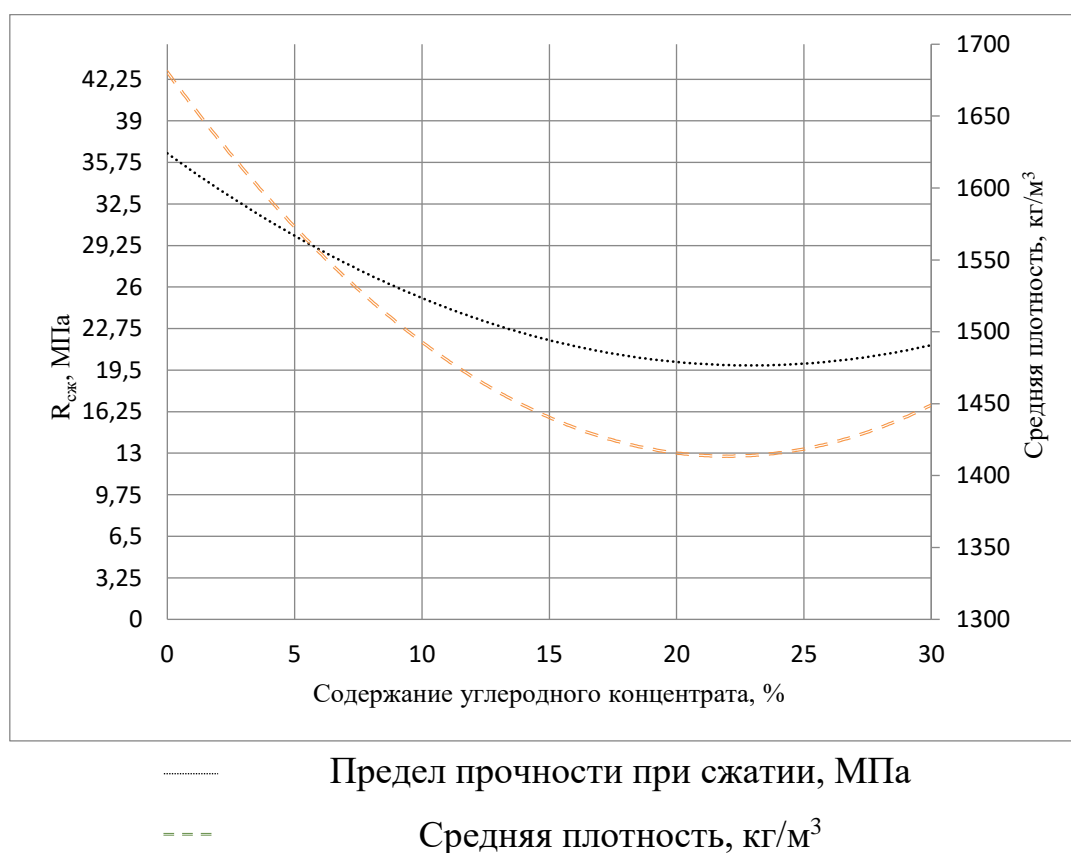


Рисунок 1. Зависимость прочности и средней плотности от содержания углеродного концентрата

Поскольку составляющими углеродного концентрата помимо самого углерода являются оксиды кремния и алюминия, это отражается на роли углеродного концентрата в структурообразовании гипсового камня. Необходимо учитывать, что захваченные углеродной сетчатой структурой силикатные частицы представляют собой активные центры кристаллизации гипсового композита, что подтверждается полученными данными по пористости (Рисунок 2) и данными микроструктурного анализа. Получаемый композит характеризуется формированием микропористой структуры, что может быть эффективно использовано при разработке облегченных строительных

материалов на его основе. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

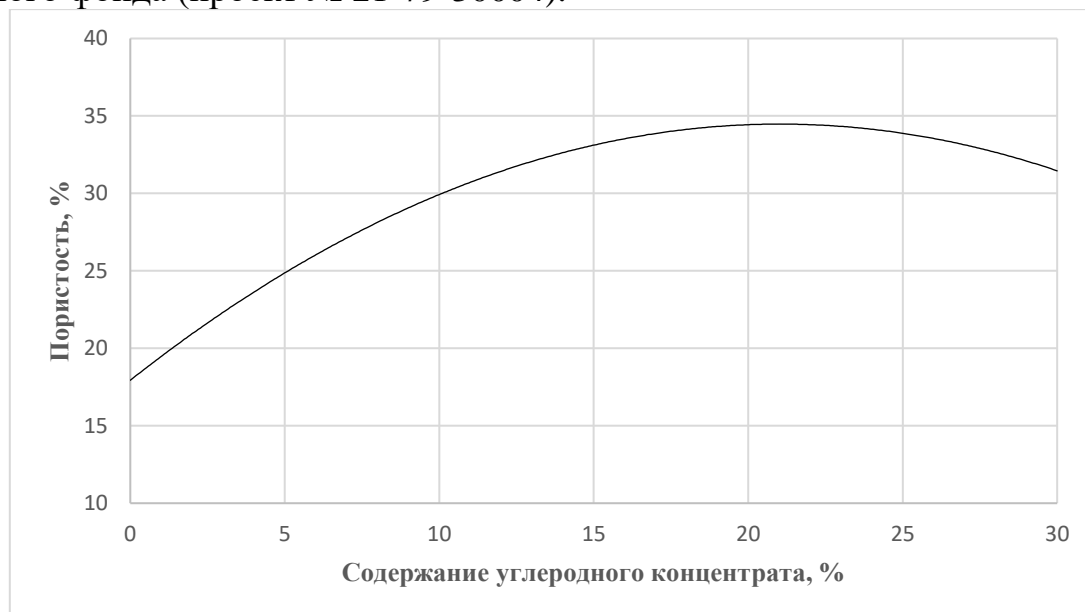


Рисунок 2. Зависимость пористости модифицированного гипсового камня от содержания углеродного концентрата

#### Библиографический список:

1. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры / А.Ф. Гордина, Г.И. Яковлев, И.С. Полянских [и др.] // Строительные материалы. 2016. № 1-2. С. 90–95.
2. Doleželova M., Krejsova J., Scheinherrova L., Vimmrova A. Comparison of structure and properties of gypsum mortars with different types of aggregates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. № 1039(1). С.012009.
3. Doleželová M., Scheinherrová L., Krejsová J., Vimmrová A. Effect of high temperatures on gypsum-based composites // Constr. Build. Mater. 2018.168 82.
4. Krejsová J., Doleželová M., Pernicová R., Svora P., Vimmrová A. The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars. Cem. Concr. Compos. 2018. №92. С.188.
5. Brand A., Roesler J. Interfacial transition zone of cement composites with steel furnace slag aggregates // Cement Concr. Compos. 2018. № 86. С. 117–129.
6. Piasta W., Góra J., Budzyński W. Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes // Construct. Build. Mater. 2017. №153. С.728–739.
7. Vishalakshi K., Revathi V., Sivamurthy Reddy S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete // Eng. Fract. Mech. 2018. №194. С. 52–60.
8. ASTM C. Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American Society for Testing and Materials. 2003. С. 618–03.
9. Shih P.H., Wu Z.Z., Chiang H.L. Characteristics of bricks made from waste steel slag // Waste Manage. 2004. №24. С. 1043–1047.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЕГКОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

**А.Л. Попов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, и.о. заведующего кафедрой «Прикладная механика и строительное материаловедение»

**А.В. Фёдоров**<sup>1</sup>, аспирант кафедры «Прикладная механика и строительное материаловедение»

**Н.А. Григорьев**<sup>1</sup>, аспирант кафедры «Прикладная механика и строительное материаловедение»

<sup>1</sup>*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова»*

**Аннотация.** В данной статье приведен расчет энергоэффективных решений наружных ограждающих конструкций малоэтажных домов из высокопористых легких бетонных конструкций для населенного пункта с. Оленек, расположенный в Арктической зоне РФ. Для определения температурных полей ограждающих конструкций проводился расчет двумерной задачи линейной теплопроводности, используя метод конечных элементов. В расчетах использовался программный комплекс «Elcut». Наблюдаются большие отклонения по показателю тепловой защиты зданий - нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренних поверхностей ограждающих конструкций  $\Delta t_{in}$ , °С. Применение легкого бетона в узловых решениях позволяет повысить теплотехнические характеристики ограждающих конструкций, а также уменьшить количество утеплителя для тепловой защиты.

**Ключевые слова:** Elcut, легкий бетон, тепловые потери, энергоэффективность, ограждающие конструкции

На сегодняшний день вектор стратегического развития Российской Федерации направлен на освоение и развитие Арктических территорий. Растущая доступность природных минерально-сырьевых ресурсов Арктики дает возможность развитию местного производства в строительной отрасли. Согласно [1-2], Северные территории Якутии располагают огромные запасы минерального сырья для производства строительных материалов. Заслуживают отдельное внимание цеолитсодержащие породы Сунтарского месторождения.

На базе лаборатории строительного материаловедения СВФУ имени М.К. Аммосова были созданы и испытаны лабораторные образцы легкого бетона из местного минерального сырья. Авторами был предложен теплоизоляционный легкий бетон естественного твердения с применением пористых заполнителей из алюмосиликатного сырья Якутии на основе экспериментального состава вяжущего из портландцемента марки I 32,5Б и термообработанного цеолита. В расчете в качестве несущего элемента используется легкобетонная плита перекрытия D1700 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda=0,5$  Вт/(м·°С). Основные характеристики материалов, используемые в расчетах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики материалов

№	Материал	Плотность, $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)
1.	Железобетон	2500	1,92
2.	Легкобетонная плита	1700	0,5
3.	Мелкие бетонные камни	1800	0,75
4.	Легкий бетон	600	0,15
5.	Легкий бетон (без теплопроводных включений)	1500	0,4
6.	Раствор цементно-песчаный	1800	0,8
7.	Штукатурка известковая	1800	1,2
8.	Плиты минераловатные из каменного волокна	40-60	0,04
9.	Облицовочные металлокассеты	-	40,9

Для различных конструктивно-технологических решений зданий на основе теплотехнического анализа с использованием отечественного сертифицированного программного комплекса Elcut, использующая метод конечных элементов, проработаны состав и конструкции наружных стен, покрытий и цокольных перекрытий.

ELCUT – это мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. В мировой практике метод конечных элементов – один из наиболее гибких и универсальных методов решения широкого круга задач механики сплошной среды, тепло- и массообмена, электро- и магнитостатики и многих других задач науки и техники [3-6].

Внимание уделено исследованию вариаций узлов соединений наружных ограждающих конструкций, которые были приняты при разработке проектной документации отдельных малоэтажных зданий в населенном пункте с. Оленек. Расчетные характеристики материалов, применяемых в наружной стене и узлах, приняты по СП 15.13330.2020 (с изменениями 2018 и 2021 гг.) [7] для условия эксплуатации А с учетом низкой влажности воздуха в арктических районах.

В результате теплотехнического расчета получены значения сопротивления теплопередаче стены из мелких бетонных камней/легкого бетона с наружной теплоизоляцией, отвечающей целевым показателям для арктических районов. При толщине теплоизоляции из минплиты 200 мм -  $R_0=5,972 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что превышает нормируемые показатели для населенных пунктов с. Оленек на 10%. Расчет производился без учета теплопроводных включений от перфорации фасадных дюбель-гвоздей. При следующем шаге толщины теплоизоляционного слоя в 250 мм -  $R_0=7,287 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что намного выше нормируемых значений сопротивления теплопередаче стены, которое удовлетворяет решению задачи.

При толщине теплоизоляции из минплиты 200 мм стеновой конструкции из кладки легкого бетона -  $R_0=6,789 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . При увеличении шага толщины минплиты на 50 мм значение  $R_0=8,105 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что превышает нормируемые показатели на 33,69%. Использование утеплителя с толщиной в 250 мм является экономически не целесообразным. Результаты расчетов приведены в таблице 2, таблице 3.

Следует отметить, что внутри стенового ограждения линия с отрицательной температурой и зона выпадения конденсата находится в теплоизоляционном слое.

Таблица 2. Теплотехнические характеристики узла примыкания стены к цокольному перекрытию

№	Температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92	Температура внутреннего воздуха, $t_{вн}$ , °С	Min температура на внутренней поверхности, $t_{min}$ , °С	Тепловые потери через узел Q, Вт
1	2	3	4	5
Типовое решение				
1	-55	+21	8,71	49,383
Предлагаемое решение				
	-55	+21	15,682	27,81

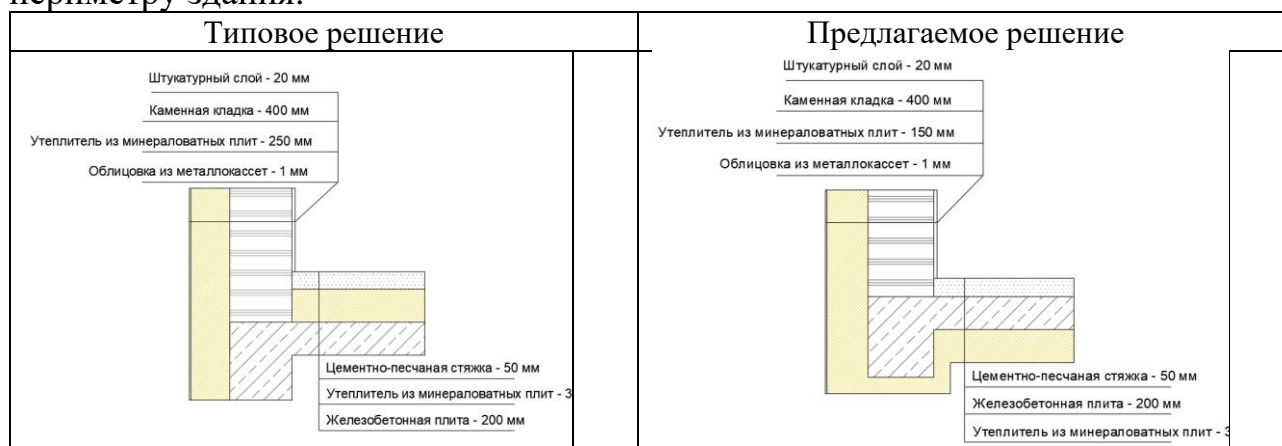
Рассмотрен узел между свайными пролетами по глади, без учета теплопроводных включений от железобетонной сваи.

В отличие от типового решения узла примыкания к цокольной плите, во втором варианте предлагается произвести стеновую кладку из легкого бетона, организовать легкобетонную плиту с утеплением снизу, как показано на рисунке 1. Теплотехнические характеристики значительно улучшаются по сравнению с типовым решением:

- минимальная температура на внутренней поверхности повышается на +6,972°С;

- тепловые потери на исследуемом фрагменте снижаются на 43,68%.

Если в типовом решении линия с нулевой температурой располагается близко к внутреннему углу, практически под стяжкой пола, то в предлагаемом решении смещается далеко наружу. Теплозащитная оболочка здания в предлагаемом конструктивном решении не прерывается – теплоизоляционные слои наружной стены и цокольного перекрытия соединяются по всему периметру здания.



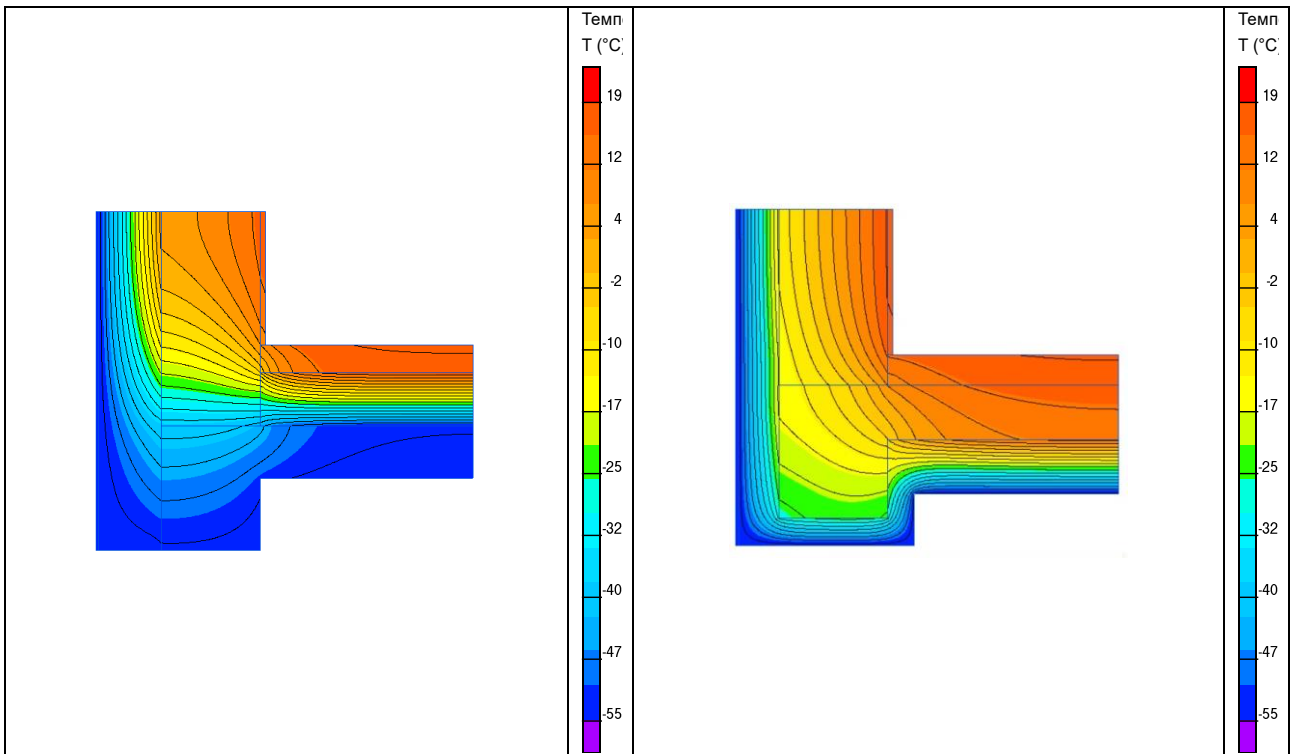


Рисунок 1. Распределение температурного поля в узле примыкания стены к цокольному перекрытию

Таблица 3. Теплотехнические характеристики узла опирания плиты перекрытия к наружной стене с парапетом

№	Температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92	Температура внутреннего воздуха, $t_{вн}$ , °С	Min температура на внутренней поверхности, $t_{min}$ , °С	Тепловые потери через узел Q, Вт
1	2	3	4	5
<b>Типовое решение</b>				
1	-55	+21	12,771	39,29
<b>Предлагаемое решение</b>				
	-55	+21	16,074	18,922
<b>Типовое решение</b>			<b>Предлагаемое решение</b>	
Штукатурный слой - 20 мм Каменная кладка - 400 мм Утеплитель из минераловатных плит - 250 мм Облицовка из металлокассет - 1 мм			Термовкладыш из легкого бетонного блока 300x200 Цементно-песчаная стяжка - 50 мм Утеплитель из минераловатных плит - 30 Железобетонная плита - 200 мм	
Цементно-песчаная стяжка - 50 мм Утеплитель из минераловатных плит - 3С Железобетонная плита - 200 мм			Штукатурный слой - 20 мм Каменная кладка - 400 мм Утеплитель из минераловатных плит - 150 мм Облицовка из металлокассет - 1 мм	

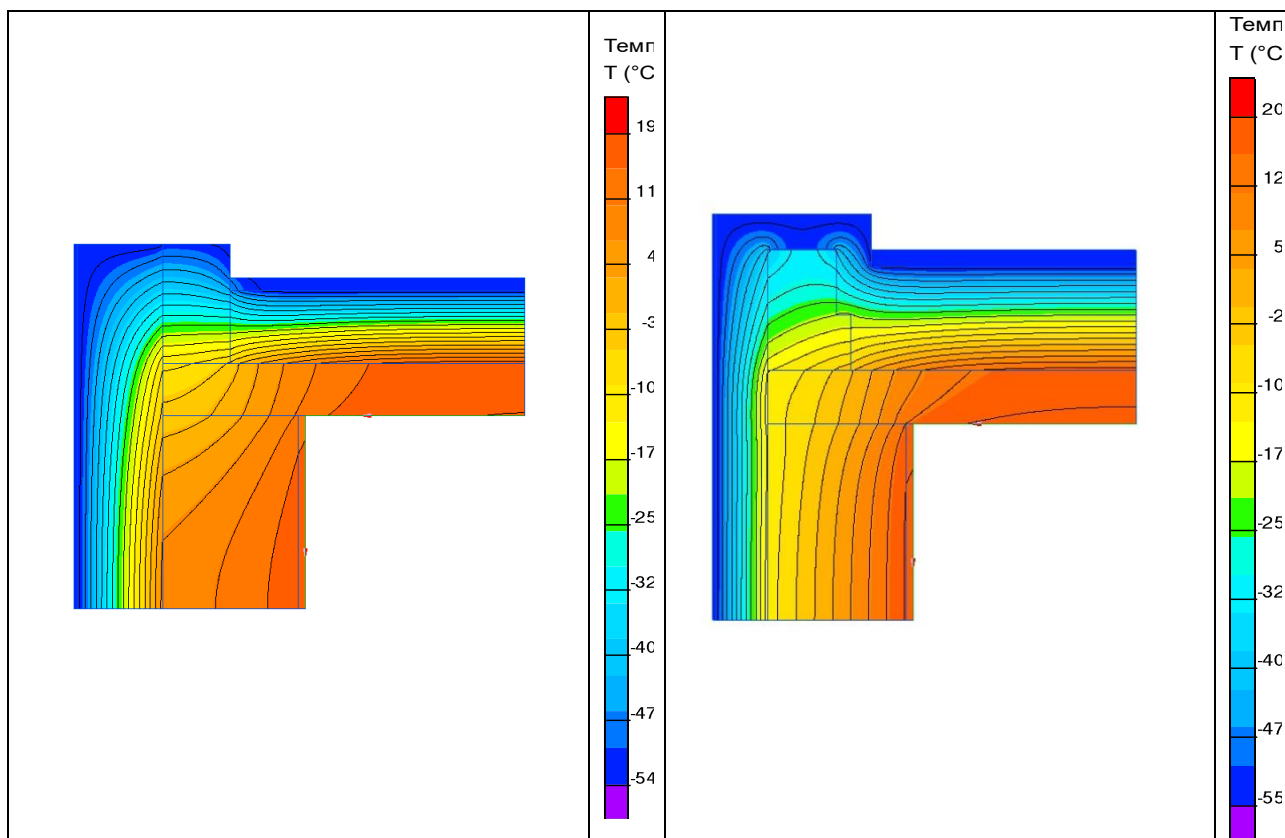


Рисунок 2. Распределение температурного поля узла опирания плиты перекрытия к наружной стене с парапетом

На участке узла опирания плиты покрытия на наружные несущие стены возникает термический мост – кладка из бетонных блоков парапета шириной 200 мм и ж/б плита покрытия (рисунок 2). Min температура на внутренней поверхности при рассматриваемом диапазоне температуры наружного воздуха составляет  $t_{\min} = +12,771^{\circ}\text{C}$ . Для улучшения тепловой защиты на этом участке можно первый ряд кладки парапета выполнить из легкого бетона, которые будут служить термовкладышем между бетонными блоками и плитой покрытия. Также возможно организовать закрытый тепловой контур, для препятствия влияния температуры наружного воздуха. В расчетной схеме стеновая кладка принимается из легкого бетона D600, перекрытие принимается из легкого бетонной плиты D1700. В результате расчетов температура на внутренней поверхности повышается на  $3,3^{\circ}\text{C}$ , а теплотери через данный фрагмент ограждения снижаются на 48,159%.

Таким образом, разработанные решения несущей стены из легкого бетона, легкого бетонной плиты на узлах опирания и цокольным перекрытием с наружной теплоизоляцией по теплотехническим характеристикам значительно лучше, чем типовые конструктивные решения, и отвечают нормативным требованиям СП 50.13330.2020 [8]. Проектирование малоэтажных домов с несущими стенами из легкого бетона с применением разработанных решений обеспечит нормальный температурный режим внутри помещений и приведет к снижению тепловых потерь, что немаловажно для арктических районов.



### **Библиографический список:**

1. Местников А.Е., Егорова А.Д., Абрамова П.С. Сырьевые ресурсы для производства строительных материалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 2. – С. 39–41.
2. Егорова А.Д., Местников А.Е., Абрамова П.С. Производство строительных материалов из местного минерального сырья для арктических районов северо-востока России // Горный журнал. – 2016. – №9. – С 65–68.
3. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
4. Лыков, А. В. Теория теплопроводности. – Москва: Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Карташов, Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел. – Москва: Высшая школа, 2001. – 550 с.
6. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов. – Москва: Мир, 1981. – 304 с.
7. СП 15.13330.2020 Каменные и армокаменные конструкции. – М.: Минстрой России, 2020. – 125 с
8. СП 50.13330.2020 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 96 с.

## КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Е.А. Репина<sup>1</sup>

Л.В. Закревская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых*

**Аннотация:** Статья посвящена исследованию композиционных материалов для реставрации белокаменной кладки памятников архитектуры XII-XIX веков. В работе изучены свойства каменных кладочных материалов карбонатных пород и разработаны составы с использованием известкового вяжущего и наполнителя: костры технической конопли в качестве армирующего компонента, позволяющего повысить биостойкость кладочных материалов. Полученные композиты обладают не только структурной схожестью с реставрируемым материалом, но и высокими эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими долговечность объекта реставрации, такими как прочность на сжатие-7,2-8,3 МПа, прочность на изгиб-3,1-4 МПа, адгезионная прочность-0,56-0,6 МПа и коэффициент морозостойкости-0,65.

**Ключевые слова:** костра технической конопли, известковое вяжущее, казеинат натрия, реставрация, белокаменная кладка, диоксид кремния.

Одной из приоритетных задач сохранения памятников архитектуры является применение при реставрации материалов повышенной эксплуатационной надежности, способствующих долговечности исторических сооружений. В настоящее время, в связи с неблагоприятной экологической обстановкой, сохраняется значительное число памятников архитектуры в аварийном состоянии, что обусловлено чаще всего разрушением кладки [1].

Реставрационные композиты должны соответствовать по структуре и фактуре реставрируемому слою, с которым они контактирует. Также важными характеристиками при подборе компонентов является воссоздание подлинного материала, имеющего аутентичное цветовое решение, с идентичными прочностными характеристиками [2,3].

Известковое тесто состоит из насыщенного водного раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и мельчайших не растворившихся частиц извести. По мере испарения из него воды образуется перенасыщенный раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Результатом твердения известкового раствора является испарение избыточной воды, кристаллизация гидроксида кальция и его карбонизация до образования  $\text{CaCO}_3$  и из гидроксида кальция и песка гидросиликатов кальция. в результате чего формируется плотная кристаллическая упаковка. [4] При этом происходит усадка твердеющей системы. Следует отметить большую первоначальную усадку известковых растворов, которая может приводить к образованию трещин. Данный факт обусловлен высокой водопотребностью известковых смесей, так как усадка прямопропорциональна влагосодержанию составов. Поэтому известь всегда используют с заполнителями или в смеси с другими вяжущими материалами для придания материалу пластичности.

Одной из важнейших задач, которая поставлена в данной работе является формирование аутентичной структуры белому камню, то есть с одинаковым соотношением кристаллической и аморфной фаз. Это достигается благодаря установлению связей между различными сырьевыми компонентами, формирующими композит.

Для создания долговечного контакта между поверхностями необходимо создать внутреннюю устойчивую связь. Поэтому принцип сродства структур заключается в минимизации физико-механических и структурных различий создаваемого докомпоновочного состава и реставрируемой поверхности. Контактная зона должна обладать схожестью по основным свойствам с матрицей материала. Структура основного и разработанного композита имеют особенности в своем строении, поэтому главной задачей контактного слоя является формирование такой структуры, которая создала бы единый монолитный слой, с учетом расположения пор и различных микротрещин кладки [5].

Особое место среди отходов агропромышленного комплекса занимает костра технической конопли, которая остается после использования всего кондиционного растения в прядильном производстве. Введение в состав композита костры технической конопли обеспечивает пористость, соответствующую известняку, за счет поглощения растительными волокнами избытка воды затворения, одновременно костра выполняет роль армирующей фибры, повышающей прочность. Как природный материал, конопля полностью биоразлагаема, что делает ее более экологически привлекательной по сравнению с многими природными синтезируемыми материалами. [6] Для синтеза композита в качестве вяжущего использовалась гидратная известь и казеинат натрия, который положительно влияет не только на прочностные характеристики, но и на адгезию коллоидно-дисперсных частиц нового состава со структурными составляющими реставрируемой поверхности. Также в качестве добавок использовались диоксид кремния БС-120, поликарбосилатный пластификатор для уменьшения усадки. Опытным путем определено, что оптимальное количество древесного заполнителя составляет 8-12%, так как, чем больше его доля в составе, тем меньше коэффициент теплопроводности, и тем более энергоемкий материал.

В таблице 1 представлена сетка композиционных составов для реставрации белокаменной кладки.

Таблица 1. Сетка композиционных составов

Марка состава	Компоненты, масс %								
	Гашенная известь	Кварцевый песок	Мраморная крошка М-500	Казеинат натрия	Поликарбосилатный Пластификатор П-17	Диоксид кремния	Костра технической конопли d=0,3-0,6мм	Диатомит	H <sub>2</sub> O
БК-1	24	17	18,7	5	0,4	4,8	8	4	18,1
БК-2	23	16,4	18	5	0,4	4,6	10	4	18,6

БК-3	22	15,7	16,5	5	0,4	4,4	12	4	20,0
БК-4	21	15	16	5	0,4	4,2	14	4	20,4
БК-5	20	14,3	14,6	5	0,4	4,0	16	4	21,7

Таблица 2. Основные свойства разработанного бесцементного композита в сравнении с белым камнем(историческим)

Марка состава	Наименование свойств					
	Водопоглощение, %	Коэффициент морозостойкости, 60 циклов	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа		Адгезионная прочность, R <sub>адг</sub> , МПа
				R <sub>сж</sub>	R <sub>из</sub>	
БК-1	10,2	0,65	2,1	8,9	3,4	0,6
БК-2	11,0	0,65	2,08	9,25	4,2	0,6
БК-3	13,0	0,65	1,95	9,3	4,5	0,6
БК-4	16,0	0,64	1,9	7,4	3,7	0,58
БК-5	17,0	0,63	1,9	7,2	3,1	0,56
Белый камень (исторический)	5-15	0,6-0,75	1,85-2,2	6-36	3-9	-

Из таблицы видно, что разработанные составы композитов БК-1, БК-2, БК-3 не уступают по своим физико-механическим свойствам реставрируемому материалу, а также имеют высокую степень адгезии.

Составы БК-4, БК-5 имеют высокое водопоглощение по сравнению с белым камнем, очевидно за счет высокого содержания костры технической конопли.

За счет введения в состав других химических добавок, таких как диоксид кремния и поликарбоксилатный пластификатор увеличивается адгезионная прочность, что повышает срок службы реставрируемого объекта. Подтверждением данных выводов является изучение микроструктуры исторического белого камня и разработанного бесцементного состава (рисунок 1; рисунок 2). Из рисунков видно, что составы имеют родственную структуру, что позволяет сделать вывод о возможности использования состава на объектах реставрации объектов культурного наследия.

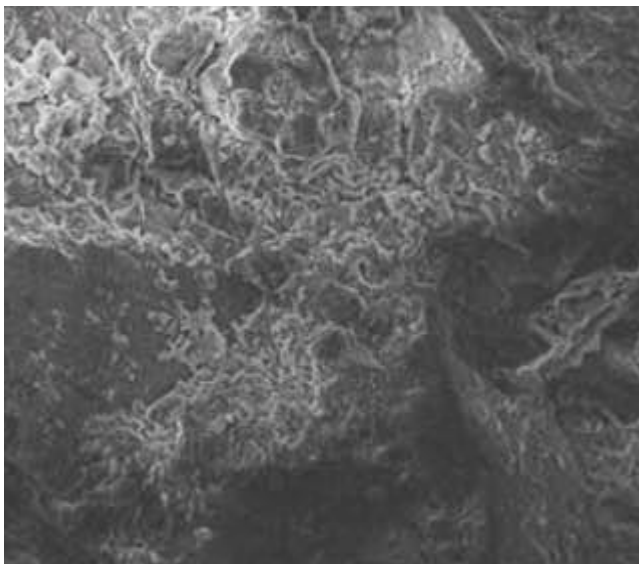


Рисунок 1. РЭМ образца  
белокаменной кладки

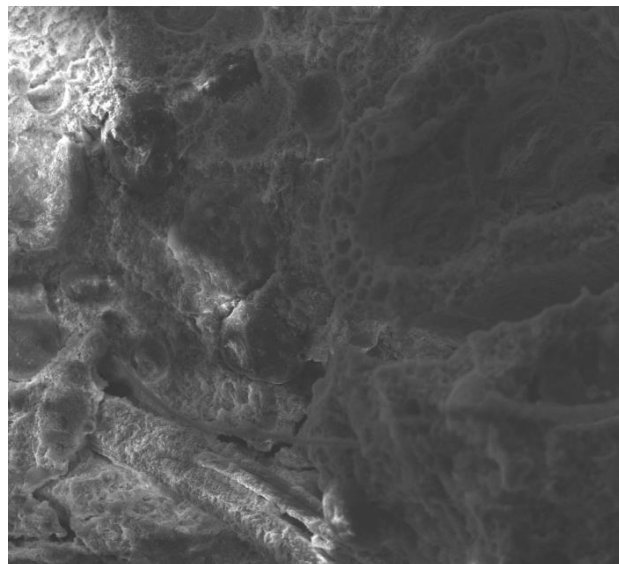


Рисунок 2. РЭМ разработанного  
композиата

В результате проделанной работы сделаны выводы о целесообразном введении костры технической конопли для получения легкого материала, идентичного по своей структуре и свойствам известняку с учетом оптимального соотношения вяжущего с кострой технической конопли. Доказано, что введения в состав аморфного кремнезема (белой сажи), казеината натрия и диатомит способствуют получению камнеподобной структуры на известковом вяжущем за счет интенсификации пуццолановой реакции между компонентами. Использован опыт древнерусских зодчих по достижению заданной белизны кладки за счет введения упрочняющих камнеподобных добавок, таких как скелетные останки панцирей животных, путем введения в состав предлагаемых докомпоновочных композитов- диатомита.

#### **Библиографический список:**

1. Л.Ш. Сайфуллина, История и методика реставраций. Некоторые проблемы современных теории и практики реставраций. Статья, 2014.8 с. Казань
2. Нестеров Л.Л. Стадии гидратации извести при различном водотвердом отношении. / Л.Л. Нестеров, Д.В. Леонтьев // Вестник Югорского государственного университета. – 2010. - №4 – с.33-38.
3. Нестеров Л.Л. Стадии гидратации извести при различном водотвердом отношении. / Л.Л. Нестеров, Д.В. Леонтьев // Вестник Югорского государственного университета. – 2010. - №4 – с.33-38.
4. Chen Y. X. Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation // Cement and Concrete Composites. 2020. 114p
5. Логанина В.И. Эффективность применения в отделочных известковых составах модифицированного диатомита. / В.И. Логанина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. - №2 – с.17-19.
6. Гавриленко А.А., Капуш И.Р., Любин П.А. Применение отходов сельскохозяйственной промышленности синтеза легкого бетона // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №4/2022

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИБРОБЕТОНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОБДЕЛОК В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**В.Е. Русанов**<sup>1</sup>, канд техн. наук

**В.А. Алексеев**<sup>1</sup>

**М.В. Маркин**<sup>1</sup>

**П.С. Мильчевский**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация.** Высокие темпы строительства, наблюдаемые в последние годы в крупных агломерациях Российской Федерации, ставят новые вызовы по соблюдению сроков строительства с учетом имеющихся и расширяемых производственных мощностей. Наблюдаемый некоторый кадровый дефицит трудовых ресурсов при потенциально растущих объемах строительства может в некоторый момент ставить под вопрос сроки реализации крупных строительных объектов. В последние годы наблюдается достаточно высокие темпы жилищного строительства в крупных мегаполисах, что требует опережающего темпа сооружения транспортной инфраструктуры. С учётом тех факторов что в большинстве мегаполисах имеется уже сложившиеся архитектурные ансамбли (особенно в центральных частях) и транспортные магистрали практически безальтернативным вариантом устройства новых транспортных артерий является строительство метрополитена. Использование фибробетона в подземных конструкциях позволяет резко оптимизировать потребность в трудовых ресурсах, производственных площадях, исключит ряд трудоемких арматурных работ.

**Ключевые слова:** Транспортное строительство, подземное строительство, фибробетон, сооружение тоннелей, высокоточная обделка, строительство метрополитена.

Рост строительного производства после завершения коронавирусного локдауна показал неизбежное совокупное увеличение объёмов подземного строительства особенно в крупных городских агломерациях с плотной городской застройкой. Так в период пандемии был сделан большой задел по строительству Большая Кольцевая Линия Московского метрополитена, общей длиной порядка 69 км [1]. Однако значительные сложности в условиях ограничения движения трудовых ресурсов часто ставили под сомнения выдержку реализации инвестиционных проектов в заданные сроки [1, 2].

Наличие таких факторов несёт значительные финансовые затраты, не только существенное увеличение продолжительности строительных работ, но и как следствие отложенный запуск объекта в эксплуатацию, что несет политические и инфраструктурные риски [3].

Одним из самых трудоемких переделов в подземном строительстве является непосредственно сооружение транспортных тоннелей, зачастую в сложных инженерно-геологических условиях, тяжёлых условиях эксплуатации, высоких динамических и статических нагрузках [3, 4]. Также часто возникают

ситуации, требующие учета наличия в зоне влияния зданий и сооружений, что также может увеличить сроки запуска объектов [5].

Перспективными направлениями совершенствования проектирования и строительства тоннельных конструкций могут выступать совершенствование методов инженерных изысканий и расчетов конструкций, применение прогрессивных материалов, оптимизация процессов строительства и производства элементов конструкций. Так, например применение в качестве материалов обделки, композитов с увеличенными показателями деформативных характеристик и трещиностойкости, которые могут минимизировать или исключить возникновение дефектов в подземных конструкциях и параллельно улучшить эксплуатационные надежность (долговечность, огнестойкость, коррозионную стойкость и др.) [6, 7, 8].

Анализ опыта мировой практики сооружения тоннелей выявляет значительно перспективным и интенсивно развиваемым направлением методы оптимизации тоннельных сооружений с применением фибробетонов (ФБ) – специального композитного основе бетона, где роль арматуры в растянутых зонах играет металлическая или полимерная фибра, дисперсно агрегированная в объеме цементного теста и заполнителей (бетонной матрицы) [6, 8].

Европейская практика строительства тоннелей показывает значительные результаты внедрения фибробетонных обделок в качестве основного материала тоннелей. Как наиболее значительные, можно выделить такие проекты строительства как сеть железнодорожной магистрали, соединяющей Лондон и Париж (High Speed 1). В данном проекте армирование бетонной обделки с диаметром  $D_1$  (внешний) составляющей 7,85 м произведено стальной фиброй без использования традиционной арматуры  $\varnothing 12-32$  мм. (см. рисунок 1.). Железнодорожная линия между Великобританией и Францией с двухпутными тоннелями общей длиной в 42 км эксплуатируется с ноября 2007 г.

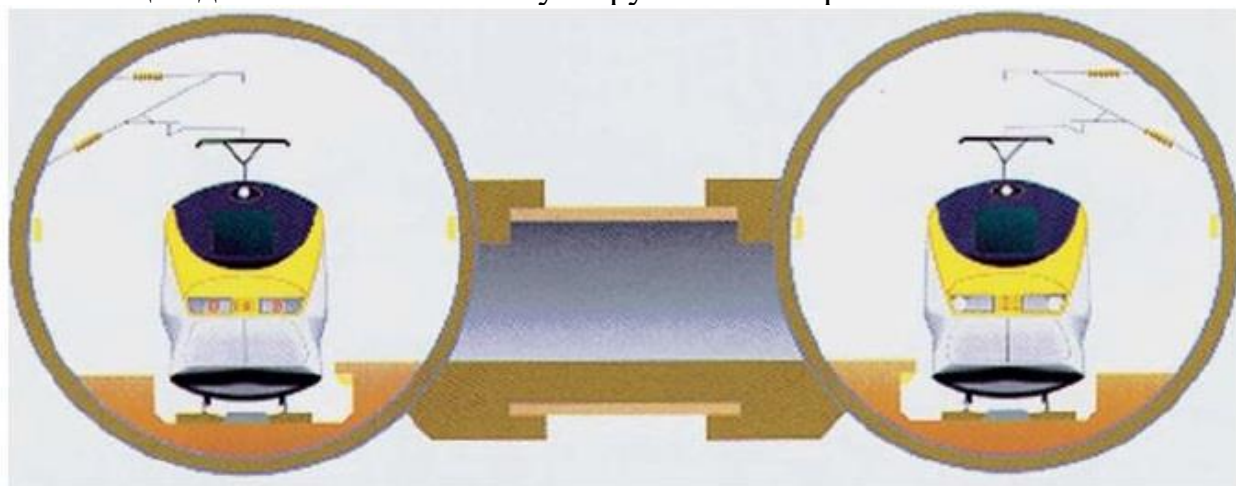


Рисунок 1. Использование обделок из фибробетона для однопутных тоннелей на примере скоростной железной дороги Лондон - Париж

Использование фибробетона в сборных тоннельных обделках имеет следующие положительные стороны:

- исключение из производственного процесса создания и установки арматурных каркасов, снижение удельных трудозатрат на армирование блоков и их бетонирование в оснастке;

- значительное увеличение уровня механизации и автоматизации производства обделок, что позволяеткратно (вплоть до 10...30 раз) повысить удельную производительность, а соответственно оптимизировать экономическую составляющую производства;

- отсутствие необходимости в значительных заводских площадях (арматурных цехов, площадок вязки арматурных каркасов, площадей складирования арматуры, сварочных постов)

- значительное сокращение потребности в трудовых ресурсах что особенно актуально в условиях дефицита трудовых ресурсов, при удаленном расположении производств, гибкость при переналадке на другие технологические режимы.

В строительстве при разработке основных проектных документов, расчетных обоснованиях и последующем строительстве руководствуются нормативной документацией, основные положения которых прямо определяют исполнение тех или иных решений. Поэтому возможность проектирования, внедрения и строительство любых конструкций зависит от соответствующей нормативной базы, полноты и качественного состава в рассматриваемой области внедрения инновационных решений.

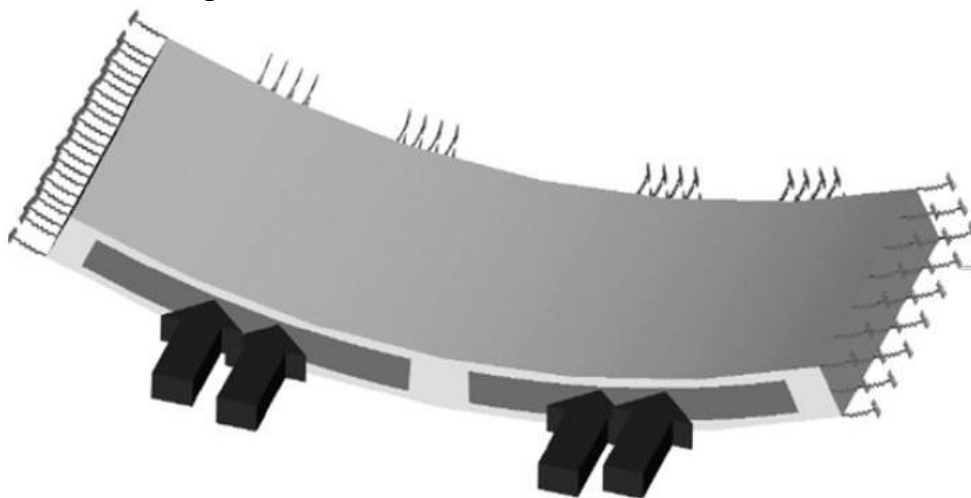


Рисунок 2. Пример расчетной схемы блока.

Так для фибробетонных конструкций исторически сложилось, что в нормативной базе Российской Федерации стандарты рассматривают сталефибробетон (СФБ) как структурную модель, рассматривающей и определяющей физико-механические свойства каждой составляющей материала без учета его зачастую уникальных свойств. Для фибробетона используется тот же стандартный подход, как и для бетонных и железобетонных конструкций, не принимая во внимание его абсолютно другие свойства и деформативные характеристики. Так, например, стандарт СП 52-104 аналитически определяет физико-механические параметры СФБ на основе параметров входящих в его состав материалов – бетона и фибры, испытанных в независимых испытаниях.



Такая парадигма, с одной стороны, отличается удобством и простотой с возможностью быстрого подбора критериев сталефибробетона на основе аналитических зависимостей, а также благоприятен при подборе проектных решений по оптимизации конструкционных узлов подземных конструкций.

Однако для обделок из сталефибробетона необходимо учитывать механизм физической нелинейности работы материала, особенно на этапе определения внутренних усилий, т.к. необходимость учета работы материала конструкций как до, так и после трещинообразования по различным сечениям элементов конструкции, так и на стадии перераспределения внутренних напряжений и усилий, оптимизирует расход фибры и дает более эффективный коэффициент использования материала фибробетона.

Работы конструкций может моделироваться конечно-элементным анализом (КЭА) современными программными комплексами, в.т.ч. учитывающих природу нелинейной механики разрушения, что дает с высокой степенью достоверности прогноз трещинообразования в конструкции. В результате моделирования напряженного-деформированного состояния (НДС) обделки прогнозируется с высокой степенью корреляции ширина и расположение потенциально образуемых трещин.

Так при проектировании сталефибробетонных конструкций тоннельных конструкций метро «Line 9» (Барселона, Испания) расчетная задача при подборе проектных решений для конструкционной обделки решалась на основе конечно-элементного анализа нелинейной механики разрушения. Для корреляции параметров трещинообразования сталефибробетона в расчетной схеме, были испытаны различные образцы балок с моделированием их работы (в.т.ч на изгиб). На основе данных фактических испытаний были построены графики динамики «Напряжение – Раскрытие трещины» а также затем рассчитаны параметры диаграммы состояния материала « $\sigma - \varepsilon$ » согласно параметрам нагружения.

На базе НИУ МГСУ в рамках функционирования научно-образовательного центра «Подземное строительство» (НОЦ «ПС») готовится научная и производственная база для проектирования, испытания и внедрения фибробетонных блоков для тоннелей. Учитывая, что в отечественной практике строительства тоннельных сооружений и подземных конструкций недостаточен опыт корректных расчётных обоснований, внедрения и строительства тоннелей с обделкой из сталефибробетонных блоков, анализ методик расчета тоннельных обделок показывает, что наиболее надежными расчетами являются произведенные как с учетом зарубежных источников, так и с применением авторских методик [1, 5, 8].

Также даже с учетом имеющегося отечественного опыта строительства подземных конструкций из сталефибробетона, а также наличия ряда методик в нормативных документах по конструкциям из СФБ, нельзя игнорировать спектр вопросов, не дающих однозначно интерпретировать использование фибробетона как основного конструкционного материала для несущих конструкций в общем и тоннельных обделок, в частности. Значительная часть вопросов состоят в таких пунктах как:

1. Критерии подбора параметров фибры, наиболее эффективных для работы подземных конструкций с учетом включения в работу всего массива композиционного материала (сталефибробетона) с учетом окружающего грунтового массива.

2. Отсутствие в отечественной нормативной базе расчетных предпосылок проектирования конструкций из фибробетона с учетом характера работы ФБ как композиционного материала.

3. Отсутствие четко прописанных методов и средств контроля качества сформированных фибробетонных конструкций (в.т.ч. неразрушающими методами), подтверждения гомогенности или отклонения при распределении фибры в изделиях на всех этапах производства.

Основные пункты действующей российской нормативной базы по проектированию и строительству фибробетонных конструкций не дают возможности игнорировать вышеуказанные вопросы, без проработки которых затруднительно однозначно задавать критерии при расчетах и эффективно использовать фибробетон в подземных конструкциях. При этом имеющаяся зарубежная нормативная база могла бы быть эффективно использована, но данное обстоятельство требует гармонизации базы и соответствующую адаптацию к отечественной нормативной базе и требованиям законодательства российской строительной отрасли.

Решение таких сложных задач должно реализовываться постепенно, на научной основе с учетом всех факторов производства, внедрения и эксплуатации. НОЦ «ПС» НИУ МГСУ разработало план мероприятий как в части как разработки нормативной документации на проектирование и внедрение фибробетонных обделок, так и исследования их работы в лабораторных и натуральных условиях.

#### **Библиографический список:**

1. Меркин В.Е. Возможные направления использования подземного пространства для решения транспортных проблем в Москве // Транспортное строительство. 2022. № 2. С. 7-9.
2. Олейник Е.Б. Оценка дефицита трудовых ресурсов в России на фоне пандемии // Экономические науки. 2020. № 193. С. 361-366.
3. Меркин В.Е., Космин В.В., Зерцалов М.Г., Чунюк Д.Ю. Зарубежная практика управления рисками в тоннелестроении // Транспортное строительство. 2021. № 1. С. 28-32.
4. Osokin A.I., Kalach F.N., Diakonov I.P., Remizova N.V. Value of additional vertical deformations of foundations depending on injection grouting conditions // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies, CAEST 2019. 2020. С. 012144.
5. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., 2021. Учет жесткости сооружений при оценке напряженно-деформированного состояния системы "сооружение - грунтовый массив". Транспортное строительство, № 2, с. 18-21.
6. Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Журнал Academia. Архитектура и строительство., РААСН. М., 2015. С. 3-18.
7. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. - М.: НИИСФ РААСН. 2004. — 333 с.

8. Русанов В.Е. Эффективность применения фибронабрызгбетона в мосто - и тоннелестроении // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2012. № 5 (27). С. 65-68.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО

С.В. Самченко<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор

П.Д. Тоболев<sup>1</sup>, аспирант 2-го года обучения

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В статье представлено влияние полимерной добавки на прочностные свойства бетона. Определено влияние концентрации введенной добавки на предел прочности при сжатии, что позволяет определить оптимальную дозировку.

**Ключевые слова:** бетон, портландцемент, уплотнение структуры, химические добавки, гидротехнические сооружения

## Введение

В процессе эксплуатации бетоны гидротехнических сооружений подвергаются воздействию многочисленных факторов, поэтому его долговечности уделяется очень большое значение. Известно, что к основным положениям при проектировании состава бетона можно отнести минимальное содержание портландцемента для различных частей сооружений [1]. В бетонах можно выделить зоны, которые наиболее подвержены внешним воздействиям. Так, например, к бетонам наружных зон предъявляются требования сопротивления внешним факторам и водонепроницаемости. Гидротехнический бетон, предназначенный для эксплуатации в облицовке каналов, будет подвергаться систематическому увлажнению и высыханию, поэтому эти факторы будут оказывать воздействие на долговечность и прочность бетона [2-3]. Главными свойствами гидротехнического бетона являются его высокая водонепроницаемость, сопротивляемость воздействию внешней среды, прочность и истираемость [4]. Получение бетонов с такими показателями возможно при использовании рационально подобранной смеси вяжущего, заполнителей и комплекса добавок, модифицирующих структуру бетона.

Для уплотнения структуры бетона применяются: нитрат кальция, сульфат алюминия, хлорид железа, нитрат железа, сульфат железа, диэтиленгликолевая смола и триэтиленгликолевая смола. Все эти добавки вводятся в небольших количествах от массы цемента (1-2%) и по-разному отражаются на свойствах бетона. Механизм действия таких добавок заключается в образовании тонкой полимерной пленки, которая способствует более прочному соединению компонентов бетонной смеси. На основании вышеизложенного, можно сделать вывод, что применение полимерных добавок для уплотнения структуры является актуальным, поэтому целесообразно исследование влияния этих добавок на свойства портландцемента.

## Материалы и методы

В данном исследовании для оценки влияния полимерных добавок применялись следующие материалы: портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н

производства АО «Мальцовский портландцемент», пластифицирующая и упрочняющая добавка на основе высокомолекулярного поли-N-винилпирролидона производства ООО «ТД ОРГПОЛИМЕРСИНТЕЗ».

Для исследования прочностных свойств приготовлены образцы-кубы размером 20×20 мм на тесте нормальной густоты, которая составила 25%. Далее готовились образцы с содержанием полимерной добавки в количестве 0,4; 0,6 и 0,8% от массы цемента. Время перемешивания в растворе-смесителе составило 3 минуты. Отформованные образцы хранились в камере нормального твердения в течение суток, а далее помещались в воду до достижения 28 суток при температуре 20±2°C. Определение прочностных показателей проводилось в возрасте 2,7,14,21 и 28 суток.

Результаты исследований

Кинетика набора прочности образцов представлена на рисунке 1.

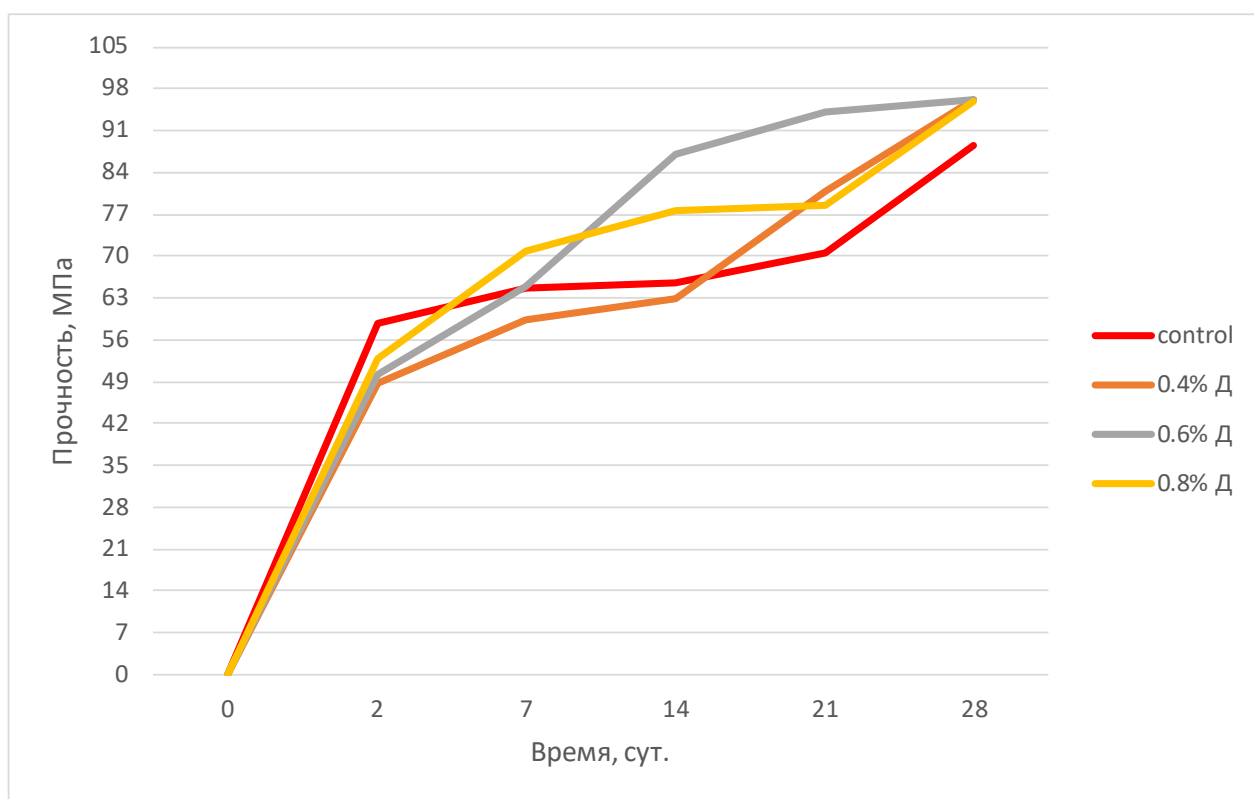


Рисунок 1. График набора прочности исследуемых образцов.

Анализ данных по набору прочности показал, что введение полимерного компонента способствует повышению прочности, что соответствует данным других исследований [5-7].

В возрасте 2-х суток контрольный образец имеет большую прочность, чем образцы с добавкой. Но в возрасте 28 суток контрольный образец показал самую низкую прочность – 88,56 МПа, в то время, как среди образцов с добавкой лучшая прочность – 96,22 МПа, при дозировке добавки 0,4%.

Выводы

Повышение долговечности наружных частей гидротехнических сооружений востребовано при применении полимерных добавок. Исследуемая добавка пластифицирует смесь, что позволяет снизить количество воды

затворения и снизить расход цемента. Использование добавки позволило повысить прочностные показатели по сравнению с контрольным составом. Также определена оптимальная дозировка использования добавки, она равна 0,4%. Но также необходимо продолжить изучать другие свойства гидротехнического бетона для получения оптимального состава с высокими показателями по предъявляемым параметрам.

#### **Библиографический список:**

1. Ерахтин Б.М., Ерахтин В.М. Строительство гидроэлектростанций в России. Учебно-справочное пособие для вузов и инженеров гидростроителей // Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007.
2. Гришин М.М., Розанов Н.П., Белый Л.Д. Бетонные плотины на скальных основаниях. Учебное пособие для вузов // Москва: Стройиздат, 1975.
3. Анискин Н.А., Шайтанов А.М. Строительство, конструкции и инновации плотин из малоцементного бетона // Вестник МГСУ. 2020. № 7. С. 1018-1029.
4. Кондратьева Н.В., Алфименкова А.Ю. Исследование способов повышения коррозионной стойкости железобетонных конструкций. Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. №1(38). С. 16-23. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.3.
5. Шарафутдинов К., Сарайкина К., Кашеварова Г., Санягина У., Ерофеев В., & Ватин Н. (2023). Прочность и долговечность бетонов с супервпитывающей полимерной добавкой. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 19(2), 120–135. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2023-19-2-120-135>.
6. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
7. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. – 2016. – № 10. – С.4-7

# ПРИМЕНЕНИЕ МАСЛА КАУЧУКОВОГО ДЕРЕВА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Г. Соколова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** В данной работе изучается модифицирующий эффект масла каучукового дерева (МКД) и его производных на эксплуатационные и технологические свойства полимерных материалов. Установлено, что оптимальное количество МКД в рецептуре поливинилхлоридных линолеумов должно составлять 3 масс.ч. Модификатор оказывает положительное влияние на деформационно-прочностные свойства получаемых материалов. В случае модификации эпоксидных полимерных материалов, свойства полимера, модифицированного эпоксидированным МКД выше, чем при модификации эпоксидированным соевым маслом.

**Ключевые слова:** масло каучукового дерева, эпоксидированные масла, жирные кислоты, поливинилхлоридные композиции.

Исследования, посвящённые применению масла каучукового дерева (МКД) и его производных в композициях полимерных материалов, весьма обширны. Так, изучено влияние МКД и эпоксидированного масла каучукового дерева (ЭМКД), а также бариевых, кадмиевых и свинцовых солей жирных кислот на основе МКД на процесс термического дегидрохлорирования поливинилхлорида в атмосфере при большом содержании газообразного азота [1, 2].

Процесс термического дегидрохлорирования состоял в следующем: масло получали из семян путём выдавливания, далее проводили эпоксидирование масла пероксиуксусной кислотой при температуре 29°C. Чтобы получить соли жирных кислот (ЖК), производили кипячение МКД в присутствии соляной кислоты в течение двух часов, после чего смесь подвергали охлаждению, полученный масляный слой удаляли горячей водой и просушивали сульфатом натрия.

Таблица 1. Показатели деструкции ПВХ-композиций в присутствии добавок

Добавка	Массовая доля, добавки	Время деструкции, мин. (до достижения 1%-ной глубины превращения)	Температура деструкции, °C	Скорость деструкции, моль HCl г <sup>-1</sup> ПВХ мин <sup>-1</sup>
Соль жирных кислот	3%	35	190	$6,08 \times 10^{-3}$
МКД	10%	86	170	$2,5 \times 10^{-3}$
ЭМКД	10%	56	180	$4,0 \times 10^{-3}$

В горячем этиловом спирте жирная кислота МКД растворялась и подвергалась обработке гидроксидом натрия (массовая доля 20%). К полученной смеси, постоянно помешивая, добавлялся раствор хлорида бария (массовая доля 30%). Далее соли ЖК, осаждённые таким образом, смывались горячей водой, и

производилась воздушная сушка. В полученных солях содержались следующие металлы: свинец – массовая доля 46%, барий – 24% и кадмий – 9%.

В начале процесса деструкции хлороводород выделялся не интенсивно, при этом видимый период индукции отсутствовал. Далее интенсивность выделения HCl постепенно увеличивалась и достигала постоянной величины спустя 40 минут от начала реакции, что свидетельствует об оптимальной концентрации хлороводорода при относительно высоких температурах на начальной стадии деструкции. Можно сделать вывод о стабилизирующем эффекте ЭМКД, зависящем от степени эпоксидирования МКД. Таким образом, протекающая реакция эпоксидных групп ЭМКД с выделяющимся при деструкции хлороводородом стабилизирует процесс деструкции и уменьшает каталитический эффект хлороводорода. Величина стабилизирующего эффекта зависит от типа добавки и может быть продемонстрирована следующим образом по степени увеличения эффекта:

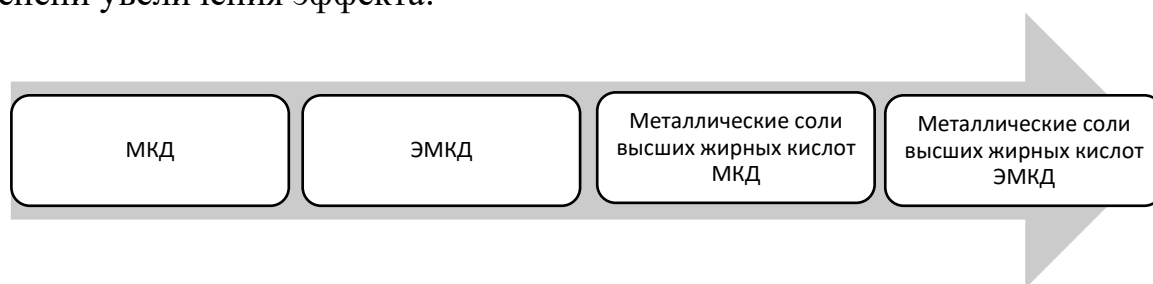


Рисунок 1. Стабилизирующий эффект добавок

Бариевые соли показывают меньшую эффективность по сравнению со свинцовыми и кадмиевыми.

Поливинилхлоридные композиции, используемые для производства линолеума, возможно модифицировать МКД с целью улучшения их технологических параметров, например, снижения начальной вязкости ПВХ-паст и влияния на скорость набухания ПВХ в пластификаторе. Независимо от состава композиции вязкость ПВХ-паст планомерно растёт с увеличением времени их выдержки при комнатной температуре. В случае модификации ПВХ-паст МКД наблюдается более низкая скорость изменения вязкости, что объясняется эффектом разбавления. При этом, технологический процесс производства ПВХ-линолеума практически на замедляется.

Увеличение содержания МКД в композиции производимого линолеума несколько снижает прочность связь между его слоями, не выходя за допустимые пределы. Также наблюдается закономерный рост миграции легколетучих добавок, содержащихся в ПВХ-пасте, при концентрациях добавок, превышающих оптимальные значения (3 масс.ч.). При этом линейные размеры линолеума несколько изменяются, усадка растёт.

МКД, увеличивая пластичность ПВХ-пасты, положительно влияет на деформационно-прочностные показатели получаемых материалов при добавлении небольшого количества олеиновой кислоты.

Можно сделать вывод о положительном эффекте МКД на технологические и экологические показатели линолеума. При этом эксплуатационные свойства получаемого напольного покрытия не уступают не модифицированным



составам, а оптимальное количество МКД в рецептуре должно составлять 3 масс.ч.

ЭМКД может применяться как модификатор эпоксидно-диановых полимеров, а также с целью синтеза новых видов эпоксидных смол. Последнее направление относится к так называемой «зелёной» химии [3]. Так, например, известны работы по получению эпоксидных полимеров за счёт взаимодействия ЭМКД с триэтилентетраамином (ТЭТА) при температуре 100°C в течение 30 минут, при этом молярное соотношение первичных аминных и эпоксидных групп составляет 1:1. Сшивание происходит при скорости смешивания 100 об/мин., далее в течение 21 часа смесь отливают при 180°C и давлении 20 МПа [4].

Эпоксидирование осуществляли при скорости смешивания 400 об./мин. и температуре 60°C, при этом молярное соотношение С=С связей, муравьиной кислоты и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> составляло 1:4:25. Полученное ЭМКД имело кислотное число 9 мг КОН/г и СЭК 18,1 масс.%.

Помимо эпоксидных групп эпоксидированные РМ содержат в своём состав реакционноспособные эфирные группы, вступающие во взаимодействие с аминами. Формируется сетчатая структура, одновременно протекают реакции амидирования эфирных связей и аминолиза эпоксигрупп. Амидирование способствует появлению дефектов в пространственной сетке, негативно влияющих на степень сшивки полимера и его эксплуатационные характеристики [5].

Придерживаясь молярного соотношения С=С связей и первичных аминогрупп, составляющего 1:1, МКД смешивали с ТЭТА. Проведя исследования смеси ЭМКД-ТЭТА методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), в спектре при 3,19÷3,80 ppm зафиксирован сигнал, указывающий на образование амидных групп С(=O)-NH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-. При значении 2,89 ppm в ТЭТА зафиксирован сигнал для групп -NH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-; сигнал для -CH<sub>2</sub>-групп триглицеридов интенсивен в интервале 4,09÷4,28 ppm и затухает со временем. В процессе амидирования прилегающий к углероду карбоксильной группы протон водорода издаёт сигнал, смещающийся с 2,3 до 2,10 ppm. Амидирование происходит даже при комнатной температуре. Если условия эксперимента достаточно жёсткие, т.е. температура 150°C, время проведения 2 часа, можно добиться 100%-ного превращения эфирных групп в амидные, что подтверждает исчезновение сигналов при 172,9 и 173,4 ppm. Появление амидов зафиксировано новым сигналом при 173,7 ppm.

Можно прийти к заключению, что процесс амидирования важен для формирования сетки полимера с добавлением ЭМКД и влияет на скорость аминолиза. Реакции амидирования и аминолиза конкурируют друг с другом и зависимость их скоростей влияет на формирование сетчатой структуры и её характеристики. На одновременность протекания данных реакций при отверждении ЭМКД ТЭТА указывают также ИК-спектры, а именно в спектре сшитого полимера полосы поглощения двух амидных групп (1635 и 1560 см<sup>-1</sup>) появляются, а полоса С=О (1735 см<sup>-1</sup>) становится менее интенсивной. Вторичный амид образуется при 3350 см<sup>-1</sup>, на что указывает исчезновение пика у ТЭТА.

Важной характеристикой полимера является температура его стеклования  $T_g$ , максимальное значение которой можно достичь в течение 24 часов при температуре 200°C, давлении 20 МПа и молярном соотношении первичных аминных и эпоксидных групп, равном 1:1. Чем выше величина  $T_g$ , тем выше прочность полимера на растяжение, максимально достигающая 1,77 МПа. Повышение прочности полимера на растяжении объясняется увеличением густоты пространственной сетки. Если время отверждения увеличить вдвое до 48 часов, температура стеклования снижается при 150°C ввиду термической деструкции полимера. При молярном соотношении эпоксидных и первичных аминных групп, превышающем 1:1, начинается реакция аминов с эфирными группами, приводящая к образованию амидов и глицерина. Глицерин обладает пластифицирующим действием на эпоксидные материалы и понижает их температуру стеклования.

Повышенные значения температуры стеклования и улучшенная прочность эпоксидного полимера могут быть достигнуты, если молярное соотношение эпоксидных и первичных аминных групп ЭМКД и ТЭТА составит 1:1. Сетчатая структура формируется в течение 21 часа при давлении 200 бар и температуре процесса 180°C. Для полученного таким образом эпоксидного полимера начало термической деструкции наступит при 361°C, а показатель относительного растяжения составит 182%.

Если сравнить свойства полимера, модифицированного ЭМКД, они окажутся выше, чем в случае модификации эпоксидированным соевым маслом. Так, при модификации последним прочность модифицированного материала составляет 1,11 МПа, температура стеклования 6,98°C, а величина относительного удлинения равна 145,7%, что объясняется большей, чем у соевого масла, долей ненасыщенных ЖК в составе МКД.

Таким образом, можно сделать вывод о положительном эффекте модификатора МКД на технологические и экологические параметры композитных материалов на основе поливинилхлорида и эпоксидной смолы.

#### **Библиографический список:**

1. Готлиб Е.М., Нгуен А., Милославский Д.Г., Садыкова Д.Ф. Экологические аспекты использования производных растительных масел в полимерной химии // Вестник технологического университета. - 2017. - Т.20. - №4. - Сс. 17-20.
2. Hill K. Fats and oils as oleochemical raw materials / K. Hill // Pure Appl. Chem. - 2000. - Vol. 72. - №7. - Pp. 1255-1264.
3. Sharma, V. Addition polymers from natural oils – A review / V. Sharma, P.P. Kundu // Prog. Polym. Sci. - 2006. - Vol. 31. - Is. 11. - Pp. 983-1008.
4. Софина С.Ю. Технология полимеров: учебно-методическое пособие / С. Ю. Софина, Н. Е. Темникова, С. Н. Русанова; Минобрнауки России, КНИТУ. Казань: Изд-во КНИТУ. - 2018. - 140 с.
5. Bentley, R.W. Global oil & gas depletion: an overview / R.W. Bentley // Energy Policy. – 2002. – Vol. 30. – P. 189-205.

## ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВОВ МАТЕРИАЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ю.А. Соколова<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН

В.И. Кондращенко<sup>2</sup>, д-р техн. наук, с.н.с.

Ван Чжуан<sup>2</sup>, аспирант

Чан Тхи Монг Тху<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>2</sup>Российский университет транспорта

**Аннотация.** Сформулирован интегрированный подход к назначению оптимальных составов материалов строительных конструкций, заключающийся в назначении составов с учетом требований, предъявляемых как к свойствам материала, так и свойствам конструкций, для изготовления которых он предназначен.

**Ключевые слова:** оптимальный состав, дифференцированный и интегрированный подходы

Современные тенденции в строительном материаловедении отличают возросшие требования к качеству применяемых сырьевых материалов, технологии производства строительных композитов и эксплуатационным свойствам изделий. В основе этих требований должен быть положен принцип устойчивого развития цивилизации, предполагающий учет интересов, как современников, так и последующих поколений. Применительно к строительному материаловедению доминантой такого принципа выступает приоритетное обеспечение экологической эффективности принимаемых решений на всех стадиях жизненного цикла изделия – от воздействия на окружающую среду используемого сырья, технологических процессов производства изделий и готовой продукции, до стадии утилизации последней. Тем самым получение экологически безопасного и в то же время экономичного композиционного строительного материала представляет собой сложную многоцелевую и многопараметрическую задачу. Успех в ее решении определяется применяемой методологией.

В настоящее время в строительной науке и практике в основе такой методологии применяется *дифференцированный подход*, при котором задача расчленяется на «технологическую» (для определения рецептуры и технологических параметров) и «конструкторскую» (для определения геометрических параметров и свойств материала конструкций) составляющие. В первом случае рецептурно-технологические параметры назначают технологи без учета особенностей работы материала в конструкции («на марку»), а во втором расчет изделий производят конструкторы, не принимая во внимание уже рецептуру и технологические параметры изготовления изделий («по нормам»). Такая иерархия обусловлена рядом объективных причин и, не в последнюю очередь, отсутствием объединяющей триады «материал – технология – изделие»

аналитического подхода, формализованного в виде некоей приемлемой для инженерных расчетов математической модели. Поэтому основным инструментом при решении материаловедческих задач остается натуральный эксперимент, который не только удлиняет путь от идеи до конечного результата, но и не всегда приводит к поставленной цели, особенно при многовариантном проектировании.

Более перспективным в этом отношении представляется сочетание натурального и численного экспериментов. Численные эксперименты проводят на ЭВМ с использованием математических моделей, адекватно описывающих свойства композиционных материалов, конструкций и технологических процессов их изготовления. С этой целью в строительном материаловедении преимущественное применение нашли экспериментально-статистические модели, не раскрывающие «физику» описываемых процессов, и, в значительно меньшей степени, физические модели в виде уравнений математической физики, полученные, в противоположность экспериментально-статистическим моделям, на основании физических законов. Из-за принципиально различных подходов, такие модели используют в сочетании с натурным экспериментом разрозненно, чем снижается достигаемый эффект от их применения.

В тоже время сложность и многообразие задач строительного материаловедения делают целесообразным объединение этих зарекомендовавших себя методологических приемов, которое должно быть проведено на иной «идеологической платформе». В ее основу могут быть положены два принципа: первый – выделение в качестве центрального связующего звена в цепи «исходные компоненты – технологические воздействия – структура материала – свойства материала – свойства конструкций» *структуры материала*, и второй – применение методов *структурно-имитационного моделирования* (СИМ). Методология СИМ предусматривает дополнение экспериментальных методов изучения структуры материала методами ее имитации на ЭВМ и перенос акцентов с натурального на численный эксперимент с использованием средств и методов вычислительной техники. При этом адекватность имитационной модели устанавливается соответствием результатов вычислительных экспериментов на модели данным натуральных экспериментов, а основными компонентами СИМ-технологии являются структурные, кибернетические и физические модели.

СИМ-технология относится к такому новому и интенсивно развивающемуся направлению в строительной науке, как компьютерное материаловедение [1, 2] и может служить методологической основой *интегрированного подхода* к постановке и решению строительнотехнологических задач по оптимизации рецептуры и технологии получения композиционного материала с учетом его работы в строительной конструкции. Иными словами, интегрированный подход, в отличие от дифференцированного, предусматривает проведение оптимизации рецептурно-технологических параметров получения строительных материалов и изделий по комплексу требований, предъявляемых не только к материалу, но и самой конструкции, для изготовления которой этот материал предназначен.

Рассмотрим методологию интегрированного подхода на примере оптимизации состава бетона железобетонной конструкции.

В общем случае (интегрированный подход) при оптимизации состава бетона целесообразно принять в качестве целевой функции стоимость единицы объема железобетонной конструкции

$$C_{bc}(\mathbf{x}) = \sum c_i + (\sum T_{ja} c_{ja})/V_b \quad (1)$$

где  $V_b$  – объем бетона в конструкции, м<sup>3</sup>;  $c_i$  – стоимость  $i$ -й ( $i = 1, \dots, I$ ) составляющей бетонной смеси в единице объема бетона, руб./ м<sup>3</sup>;  $T_{ja}$  – масса арматуры  $j$ -го класса ( $j = 1, \dots, J$ ) в изделии, т;  $c_{ja}$  – стоимость единицы массы арматуры  $j$ -го класса, руб./т;  $\mathbf{x}$  – варьируемые параметры (в формуле (1) и далее в символе  $\sum$  индекс суммирования опущен).

Отметим, что в частных случаях решения сформулированной оптимизационной задачи (дифференцированный подход) с «технологической точки зрения» целевая функция (1) примет вид

$$C_b(\mathbf{x}) = \sum c_i \quad (2)$$

а с чисто «конструкторской» –

$$C_c(\mathbf{x}) = (\sum T_{ja} c_{ja})/V_b \quad (3)$$

Задачу оптимизации состава бетона с учетом требований, предъявляемых как к свойствам бетонной смеси (например, по подвижности, нерасслаиваемости, объему межзерновых пустот и др.) и бетону (например, по средней плотности, прочности, морозостойкости и др.), так и железобетонной конструкции, для изготовления которой этот бетон предназначен (например, по прочности, жесткости, трещиностойкости и др.), сформулируем следующим образом: найти расходы составляющих бетонной смеси  $x_i$ , при которых обеспечивается минимальная стоимость материалов в единице объема железобетонной конструкции  $C_{bc}(x)$  при выполнении требований, предъявляемых как к свойствам бетонной смеси и бетона, так и конструкции, изготавливаемой из этого бетона, или, в математической постановке:

найти значения

$$x(x_1, \dots, x_I) \quad (4)$$

при которых

$$C_{bc}(x) \Rightarrow \min \quad (5)$$

и одновременно выполняются требования, предъявляемые к:

– свойствам бетонной смеси и бетона

$$\varphi_{mb}(x_i) \mathcal{R} [\varphi_{mb}(x_i)] \quad (6)$$

– свойствам железобетонной конструкции

$$\varphi_c(x_i, x_p, x_j) \mathcal{R} [\varphi_c(x_i, x_p, x_j)] \quad (7)$$

– расходам составляющих бетонной смеси

$$x_i \mathcal{R} [x_i] \quad (8)$$

– размерам конструкции

$$x_p \mathcal{R} [x_p] \quad (9)$$

– ее армированию

$$x_j \mathcal{R} [x_j] \quad (10)$$

где  $x_i$  – варьируемые параметры, представляющие собой расходы составляющих бетонной смеси в 1 м<sup>3</sup> бетона;  $x_p$  и  $x_j$  – то же, характеризующие соответственно размеры и армирование конструкции;  $\varphi_{mb}(x_i)$  – функции отклика, представляющие собой свойства бетонной смеси и бетона, зависящие от составляющих бетонной смеси  $x_i$ ;  $\varphi_c(x_i, x_p, x_j)$  – то же, являющиеся свойствами конструкции и зависящими от составляющих бетонной смеси  $x_i$ , ее размеров  $x_p$  и армирования  $x_j$ ;  $[\varphi_{mb}(x_i)]$ ,  $[\varphi_c(x_i, x_p, x_j)]$  – допустимые значения функций отклика  $\varphi_{mb}(x_i)$  и  $\varphi_c(x_i, x_p, x_j)$ ;  $[x_i]$ ,  $[x_p]$  и  $[x_j]$  – допустимые значения варьируемых параметров  $x_i$ ,  $x_p$  и  $x_j$ ; символ  $\mathcal{R}$  обозначает соответственно знаки  $<$ ,  $=$ ,  $>$ ,  $\leq$  или  $\geq$ , используемые в одно- (например, вида  $x_i \geq [x_i]$ ) и двусторонних (например, вида  $[x_i'] \leq x_i \leq [x_i'']$ ) ограничениях.

Решение задачи оптимизации состава бетона в приведенной выше формулировке может быть выполнено различными методами, в том числе на основе принципа разделения переменных параметров, предназначенного для оптимизации железобетонных конструкций [3]. В соответствии с этим принципом из всех варьируемых параметров  $\mathbf{x}(x_1, \dots, x_I, \dots, x_J)$ , от которых зависит целевая функция  $C_{bc}(\mathbf{x})$ , выделим переменные параметры, определяющие соответственно состав бетонной смеси  $x_1, \dots, x_I$ , размеры железобетонной конструкции  $x_{I+1}, \dots, x_P$  и характеристики ее армирования  $x_{P+1}, \dots, x_J$ . Далее переменные параметры, характеризующие состав бетонной смеси  $x_i$ , отнесем к 1-й группе, размеры конструкции  $x_p$  – ко 2-й группе внешних переменных параметров, а параметры, характеризующие ее армирование  $x_j$  – к группе внутренних переменных параметров.

В свою очередь, ограничения, накладываемые на допустимые значения свойств бетонной смеси, бетона и конструкции также подразделим на внешние  $[x_i]$  (если они содержат только внешние переменные параметры 1-й группы) и внутренние  $[x_p, x_j]$  (если они содержат 2-ю группу внешних и внутренние параметры или только внутренние переменные параметры). Тогда поиск значений переменных  $\mathbf{x}$ , обеспечивающих достижение целевой функцией  $C_{bc}(\mathbf{x})$  минимального значения, будем называть процессом оптимизации, а полученный при этом результат – решением внутренней задачи оптимизации, если процесс оптимизации проводится при фиксированных внешних переменных параметрах, и решением внешней задачи оптимизации, если внешние и внутренние или только внешние переменные параметры могут изменяться.

Внешнюю задачу оптимизации решают проведением опытов, каждый из которых включает фиксирование внешних переменных параметров, проверку

внешних ограничений, решение внутренней задачи оптимизации и вычисление целевой функции. Опыты отличаются значениями внешних переменных параметров, которые изменяют от опыта к опыту в соответствии с определенным правилом – алгоритмом. Решение же внутренней задачи оптимизации при этом сводится к расчету железобетонной конструкции по СНиП при фиксированных внешних переменных параметрах.

На основании вышеизложенного будем различать следующие задачи оптимизации состава бетона:

– *задача 1*: варьируют только 1-ю группу внешних переменных параметров  $x_i$ ; такая ситуация возникает при традиционном (“с позиций технологов”) решении рецептурной задачи “на марку”, т.е. с учетом требований, предъявляемых только к свойствам бетонной смеси и бетона;

– *задача 2*: варьируют 1-ю группу внешних переменных параметров  $x_i$  при фиксированных размерах конструкции  $x_p$  и ее армировании  $x_j$ ; в этом случае состав бетона оптимизируют для типовой конструкции, размеры и армирование которой не изменяются;

– *задача 3*: варьируют как 1-ю, так и 2-ю группы внешних переменных параметров  $x_i$  и  $x_p$  при фиксированном армировании конструкции  $x_j$ ; такая ситуация возникает, например, при повышении несущей способности конструкции за счет изменения ее размеров;

– *задача 4*: варьируют внешние (состав)  $x_i$  и внутренние (армирование)  $x_j$  переменные параметры при фиксированных размерах конструкции  $x_p$ ; в этом случае наряду с оптимизацией состава бетона проводится и оптимизация армирования конструкции;

– *задача 5*: варьируют как внешние  $x_i$  и  $x_p$ , так и внутренние переменные параметры  $x_j$ ; такая постановка задачи возникает в общем случае интегрированного подхода к оптимизации расходов составляющих бетона  $x_i$ .

В заключение отметим, что идея назначения составов бетона по комплексу требований, предъявляемых не только к свойствам бетонной смеси, технологическим параметрам изготовления железобетонных изделий, свойствам бетона, но и конструкций была, по-видимому, впервые не только сформулирована, дано методическое обоснование путей ее решения, но и практически реализована в работе [4]. В дальнейшем идея объединения задач строительного материаловедения и строительных конструкций была сформулирована в виде интегрированного подхода к решению оптимизационных задач бетоноведения в работе [5] и получила развитие в диссертационных исследованиях по определению оптимальных составов композиционных (аспирант Ван Чжуан, Китай) и железобетонных (аспирантка Чан Тхи Монг Тху, Вьетнам) шпал.

#### **Библиографический список:**

1. Ляшенко, Т.В. Поля свойств строительных материалов (концепция, анализ, оптимизация) / Т.В. Ляшенко. – Автореферат. дисс....докт.техн.наук. – Одесса: ОГАСА, 2003. – 34 с.

2. Аскадский, А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень / А.А. Аскадский, В.И. Кондращенко. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.
3. Краковский, М.Б. Методы оптимизации железобетонных конструкций на основе принципа разделения параметров / М.Б. Краковский. – Автореферат дисс....докт.техн.наук. – М.: НИИЖБ, 1980. – 49 с.
4. Кондращенко, В.И. Применение методов оптимизации составов бетона с целью повышения эффективности железобетонных изделий / В.И. Кондращенко. – Харьков: ХИИТ, 1990. –189с.
5. Кондращенко, В.И. Интегрированный подход к оптимизации составов материалов строительных конструкций / В.И. Кондращенко. // Труды межд. научно-практ. конф. «Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее. Т. V» – М.: РХТУ, 2003, с. 123-128.



## ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ И ВИДА СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ НА ПРОЧНОСТЬ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ СЖАТИИ

**В.Г. Соловьев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Е.В. Матюшин**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация.** В работе приведены результаты определения предела прочности при сжатии сверхвысокопрочных сталефибробетонов. В качестве дисперсного армирования использовались следующие виды фибры: анкерная с соотношением  $l/d=60$ , волновая с соотношением  $l/d=50$  и  $l/d=73$ , а также прямая с  $l/d=43$ . Объемное содержание фибры составляло 1, 2 и 3%. Наибольшей прочностью при сжатии обладали фибробетоны с волновой фиброй, наименьшей – с прямой.

**Ключевые слова:** сверхвысокопрочный фибробетон, сталефибробетон, анкерная фибра, волновая фибра, прочность при сжатии.

Сверхвысокопрочный бетон (СВБ) относится к наиболее современным и эффективным типам бетонов, который одновременно сочетает в себе технологию высокопрочных (HSC), высокофункциональных (HPC) и самоуплотняющихся бетонов (SCC) [1,2]. Минимальная прочность при сжатии СВБ  $>120$  МПа, а также в разы более высокие показатели долговечности по сравнению с бетонами рядовых классов привлекают все большее внимание архитекторов и проектировщиков по всему миру. Подтверждением этому является ряд нормативных документов, опубликованных в последние десятилетия в таких странах как Германия, Франция, Швейцария, Испания, Австралия, Канада, Китай, Япония и Корея.

Во избежание хрупкого разрушения СВБ армируется стальной фиброй диаметром  $0,175...0,3$  мм и длиной  $6...30$  мм, в результате чего материал приобретает новое название – сверхвысокопрочный фибробетон (СВФБ). Обычно СВФБ содержит в своем составе  $1...3\%$  стальной фибры. В отдельных случаях ее содержание может достигать  $6-11\%$  [3,4]. Введение в состав стальной фибры приводит к улучшению физико-механических и деформационных характеристик материала, таких как: прочность при сжатии, растяжении, изгибе, а также модуль упругости.

На сегодняшний день налажен промышленный выпуск стальной фибры различного профиля – прямой, волновой, анкерной, спиральной. В подавляющем большинстве случаев СВФБ армируется волокнами прямого профиля длиной до 20 мм, что позволяет получать самоуплотняющиеся бетонные смеси с большим процентом объемного армирования. На территории Российской Федерации наибольшее распространение получила волновая и анкерная. Целью данной работы было изучение влияния объемного содержания и вида стальной фибры, доступной на территории нашей страны, на прочность сверхвысокопрочного фибробетона при сжатии.

## Материалы и методы

Для приготовления сталефибробетонных смесей в качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2020 производства АО «ЦЕМРОС». В качестве минеральных добавок применялся уплотненный микрокремнезем МКУ-85 по ГОСТ Р 58894-2020, а также кварцевая мука с удельной поверхностью 360 м<sup>2</sup>/кг. В качестве заполнителя использовался фракционированный кварцевый песок фракций 0,1-0,4 и 0,4-0,8 в соотношении 30:70, обеспечивающем наибольшую плотность упаковки частиц. Регулирование удобоукладываемости смесей осуществлялось при помощи суперпластифицирующей добавки на основе эфиров поликарбоксилатов MasterGlenium 115 с концентрацией сухого вещества 30%. Содержание минеральных добавок составляло 20% от массы цемента. Водоцементное соотношение (с учетом воды, содержащейся в суперпластифицирующей добавке) составляло 0,265.

Была использована стальная фибра трех видов – анкерная, волновая и прямая (рисунок 1). Длина и диаметр волокон составляли: анкерной фибры – 30/0,5 мм, волновой – 15/0,3 и 22/0,3 и прямой – 13/0,3 мм. Объемное содержание фибры составляло 1, 2 и 3%.

Приготовление смесей осуществлялось в автоматическом растворосмесителе. Содержание суперпластификатора в фибробетонных смесях, содержащих анкерную фибру, подбиралось таким образом, чтобы обеспечить диаметр расплыва на конусе Хегерманна (без механического воздействия) в диапазоне 170...200 мм, в смесях с волновой и прямой фиброй – 260...290 мм. Указанные диапазоны были выбраны, с одной стороны, с целью получения достаточно удобоукладываемой смеси, а с другой – предотвращения осаждения компонентов смеси под действием силы тяжести, что наблюдается при более высоких значениях диаметра расплыва. Из свежеприготовленной смеси изготавливались образцы-кубы размером 50×50×50 мм, которые в течение 2 суток хранились в нормальных температурно-влажностных условиях, а после подвергались тепловлажностной обработке при температуре 80 °С в течение 48 часов. После тепловой обработки образцы хранились в помещении лаборатории в течение еще 72 часов, после чего подвергались испытанию на сжатие.

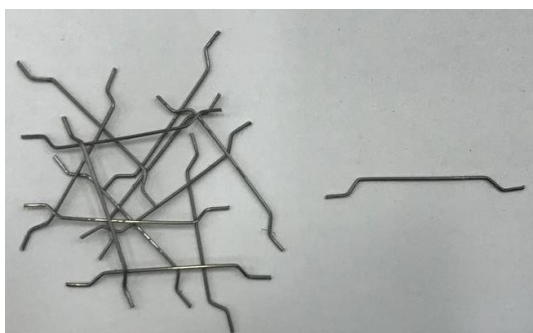
Скорость нагружения образцов составляла 2 МПа/с. Значение прочности серии образцов определялось как среднеарифметическое результатов трех параллельных испытаний.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1. Внешний вид стальной фибры: а) волновая фибра 15/0,3 мм; б) волновая фибра 22/0,3 мм; в) анкерная фибра 30/0,5 мм; г) прямая фибра 13/0,3 мм.

### Результаты и обсуждение

На графиках рисунка 2 приведены зависимости предела прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания стальной фибры.

Наибольшие значения прочности наблюдались у составов с волновой фиброй: при объемном содержании фибры 1, 2 и 3% прочность при сжатии составляет 161,1, 169,5 и 191,1 МПа для волокон с размерами 15/0,3 мм и 166,4, 178,3 и 193,2 МПа для волокон с размерами 22/0,3 мм. Прочность при сжатии составов с анкерной фиброй составила 169, 181,1 и 191 МПа при содержании фибры 1, 2 и 3%, соответственно. Наименьшая прочность была получена у составов с прямой фиброй: вне зависимости от ее объемного содержания прочность при сжатии находилась в пределах 165-166 МПа.

Известно, что разрушение бетона при сжатии происходит вследствие роста наиболее опасных микротрещин, расположенных под углом  $45^\circ$  к оси действия сжимающей нагрузки [5,6]. При этом образуются вертикальные трещины нормального отрыва, в результате развития и объединения которых образуются магистральные трещины, приводящие к разрушению материала. Предел прочности бетона при сжатии определяется пределом прочности на растяжение цементного камня, а также крупностью и объемным содержанием заполнителя, при увеличении количества которого происходит торможение развития трещины. В фибробетонах развитию трещины препятствуют волокна, расположенные на пути ее роста и соединяющие ее берега. В этом случае для разрушения материала необходимо приложить дополнительное усилие, которое, в зависимости от ориентации фибры в пространстве, затрачивается либо на выдергивание волокна, либо на местное смятие бетонной матрицы, что в результате приводит к повышению предела прочности.

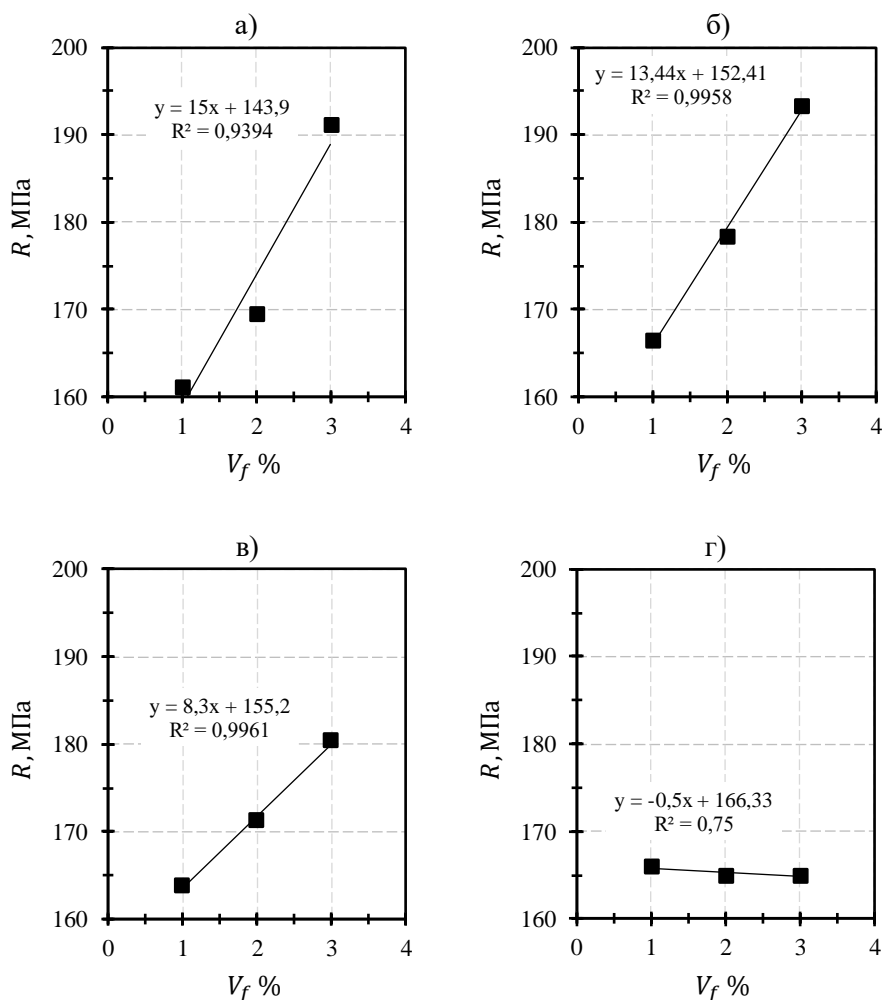


Рисунок 2. Зависимость предела прочности СВФБ от объемного содержания стальной фибры различного профиля: а) волновая фибра 15/0,3 мм; б) волновая фибра 22/0,3 мм; в) анкерная фибра 30/0,5 мм; г) прямая фибра 13/0,3 мм.

Прочность сцепления волокон с деформированным профилем определяется не только адгезией окружающего бетона к поверхности фибры, но также и механическим зацеплением. Волновая фибра имеет 5-6 волн, расположенных по всей ее длине, что, вероятнее всего, обуславливает ее большую прочность сцепления с бетоном среди всех испытанных типов фибры. Анкерная фибра имеет только два изгиба по концам волокна, что обуславливает ее меньшую эффективность по сравнению с волновой.

#### Заключение

В работе рассмотрено влияние анкерной и волновой стальной фибры на прочность при сжатии сверхвысокопрочного сталефибробетона. При содержании фибры 1...3% по объему предел прочности при сжатии составил: 161,1-193,2 МПа у составов с волновой фиброй, 163,8-180,4 МПа у составов с анкерной фиброй и 165-166 МПа у составов с прямой фиброй. Фактический класс фибробетонов составил  $B_{\phi} = 129 \dots 155$ .

### **Библиографический список:**

1. Bajaber, M.A., Hakeem, I.Y. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. №10. С. 1058–1074.
2. Azmee, N.M., Shafiq, N. Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. № 9.
3. Rossi, P.; Arca, A.; Parant, E.; Fakhri, P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite // *Cement and Concrete Research*. 2005. №35. С. 27–33,
4. Benson, S.D.P.; Karihaloo, B.L. CARDIFRC® - Development and Mechanical Properties. Part I: Development and Workability // *Magazine of Concrete Research*. 2005. № 57. С. 347–352.
5. Faber, K. T., Evans, A. G., Drory, M. D. A Statistical Analysis of Crack Deflection as a Toughening Mechanism in Ceramic Materials // *Fracture mechanics of ceramics*. 1983. №6. С. 77-91.
6. Faber, K. T., Evans, A. G. Crack-Growth Resistance of Microcracking Brittle Materials // *Journal of the American Ceramic Society*. 1983. №4. С. 255-260.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ СО СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ФИБРОЙ

В.Г. Соловьев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

И.Д. Сизяков<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотации.** В работе проведен сравнительный анализ различных видов стеклопластиковой фибры, а также сравнивалась стальная анкерная фибра. Освещены результаты испытаний по вытягиванию фибры из бетонной матрицы и трещиностойкости дисперсно-армированного бетона со стеклопластиковыми волокнами. При испытании на трещиностойкость на графиках видно упрочнение бетонной матрицы после образования первых трещин, лучше всего это видно при сравнении с образцами, не армированными фиброй. Лучшим образом себя проявила прямая стеклопластиковая фибра (Ф1) как и по стабильности результатов, так и по их значениям. На прочностях бетонной матрицы ниже 50 МПа стальная анкерная фибра, проявила себя хуже, чем композитная. В результате работы получили бетоны по классу на трещиностойкость: Vft3 бс – для Ф-1, Vft3 4d – Ф-2, Vft3 3,5b – Ф-3.

**Ключевые слова:** стеклопластиковая фибра, композит, вырыв из бетона, трещиностойкость бетона, фибробетон, сравнительный анализ.

Композитные материалы все чаще стали появляться в качестве конструкционных материалов в строительной сфере это: и стеклопластиковое армирование [1], различные усиления для ослабленных конструкций [2,3]. Сейчас все больше встречаются статьи об объемно-дисперсном армировании бетона с использованием композитных фибр [4]. Отличительная черта композитов – это получения новых повышенных свойств материала состоящего из двух и более различных по своим свойствам материалов, но не имеющие такие же высокие характеристики, как при их совместной работе. Сложностью в получении материалов с повышенными характеристиками является отсутствие технологии и оптимальных объемов компонентов для получения композитов с повышенными характеристиками.

На данный момент создана экспериментальная партия высокомодульной стеклопластиковой фибры различного профиля, способной сравниться со стальной фиброй таблица 1.

Таблица 1. Примерные характеристики фибры из различных материалов

Вид фибры	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, МПа	Величина адгезии с бетоном, МПа	Модуль упругости, ГПа
Стальная	7,89	800 - 3150	5–15	200
Базальтовая	2,7	3500	-	80
Стеклопластиковая	2,6	1050-3150	-	70-80
Стеклопластиковая	2,5	1200	8–10	30

Вид фибры	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, МПа	Величина адгезии с бетоном, МПа	Модуль упругости, ГПа
Углеродная	2,0	2000	-	245

Для испытаний были использованы три вида композитной фибры приведенные на рисунке 1.

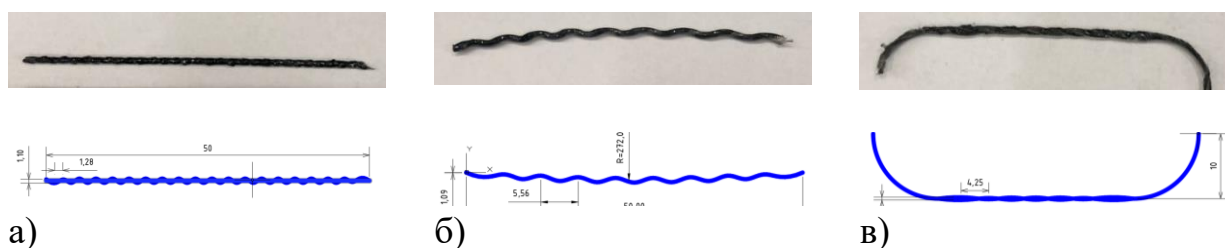


Рисунок 1. Три типа композитной фибры: а-прямая (Ф-1), б – волнистая (Ф-2), в – прямая с отгибами (Ф-3)

Размеры и плотности композитной фибры (определенные для каждого вида по 5 образцам) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Размеры и плотность композитной фибры

№	Тип фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Длина отгиба, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>
1	Ф-1	52,5	1,10	-	2,41
2	Ф-2	50,4	1,09	-	2,50
3	Ф-3	49,4	1,27	7,63	2,63

Физико-механические характеристики стеклопластиковой фибры (определенных по 5 образцам) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические характеристики и состав стеклопластика

№	Физико-механические		Состав, % масс	
	1	Прочность при растяжении, МПа	1269,85	Стекловолокно
2	Модуль упругости, ГПа	31,91	Связующее	16,150
3	Относительное удлинение, %	4,20	Обмоточная нить	9,912

Для испытаний использовался мелкозернистый бетон (МЗБ) прочностью  $R_{сж} = 32,2$  МПа и плотностью  $2189,5$  кг/м<sup>3</sup>, а также тяжелый бетон (ТБ)  $R_{сж} = 37,5$  МПа плотностью  $2189,5$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 4. Состав мелкозернистого бетона

Компоненты	Маркировка	Цемент ЦЕМ II 42.5Н	Вода	Песок, Мк=2,6	Гранитный щебень фракции 5–20 мм	Пластификатор MG115
Расход, кг	МЗБ	540	305	1410	-	3,8
Расход, кг	ТБ	330	180	850	1150	2,3

Прочность сцепления с бетоном определялась путем испытания отдельных фибр, заделанных в бетонный образец. Подготовленные образцы и процедура

испытаний приведена на рисунке 2. Состав бетона, в который заделывались отдельные фибры, приведен в таблице 4.

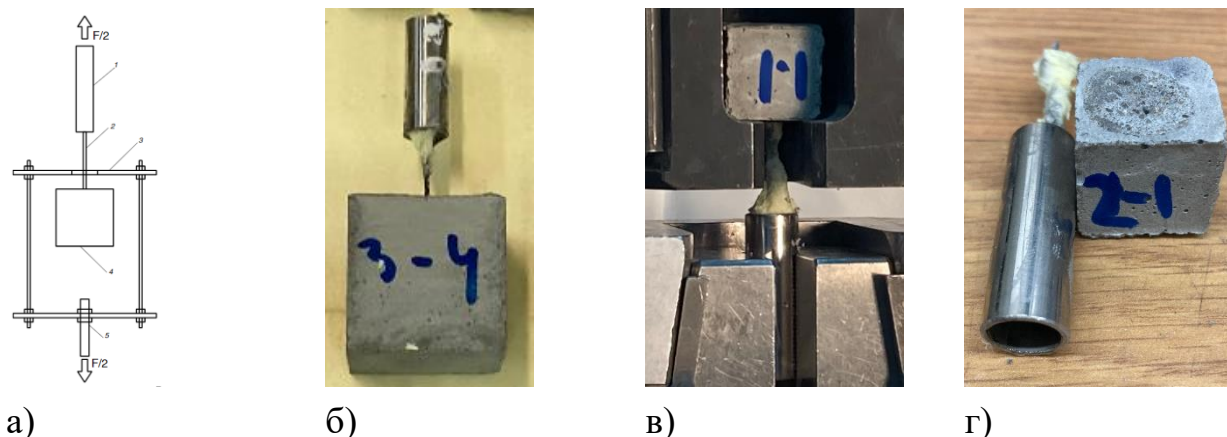


Рисунок 2. Испытание на вырыв из бетона: а – схема испытания [5], б – подготовленный образец, в – момент испытания, г – образец после испытания

Результаты проведенных испытаний по определению прочности сцепления с бетоном приведены в таблице 5 и на рисунках 3,4.

Таблица 5. Результаты испытаний по определению прочности сцепления с бетоном

Тип фибры	Максимальная нагрузка при вытягивании фибры из бетонного образца №, кН										F <sub>max</sub> , кН	F <sub>min</sub> , кН	F <sub>ср</sub> , кН	S
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Ф-1	0,29	0,32	0,37	0,50	0,43	0,31	0,43	0,37	0,46	0,34	0,50	0,29	0,38	0,07
Ф-2	0,27	0,27	0,38	0,27	0,28	0,34	0,29	0,28	0,44	0,30	0,44	0,27	0,31	0,06
Ф-3	0,18	0,56	0,46	0,29	0,43	0,47	0,18	0,53	0,21	0,33	0,56	0,18	0,36	0,14

Стеклопластиковая фибра на данный момент может сравниться по характеристикам со стальной анкерной фиброй, сравнительный анализ по адгезионной прочности стальной фибры и стеклопластиковой представлен на графике рисунок 4. Сравнения на выдергивание фибры проводилось на бетонах от В45 до В25, в качестве сравнения использовалась анкерная стальная фибра длиной  $L_f = 60$  мм и диаметром  $d_f = 0,763$  мм. Данные взяты из современных источников [6–10].

В сравнительном анализе стальной фибры со стеклопластиковой последняя показала более высокий результат на адгезионную прочность с бетоном, так как выборка сделана на рядовых бетонах, у которых модуль упругости находится около  $E_b = 30$  ГПа, что близко со значениями модуля упругости  $E_{fg}$  – указан в таблице 3, что говорит о более эффективной совместной работе фибры с бетоном.



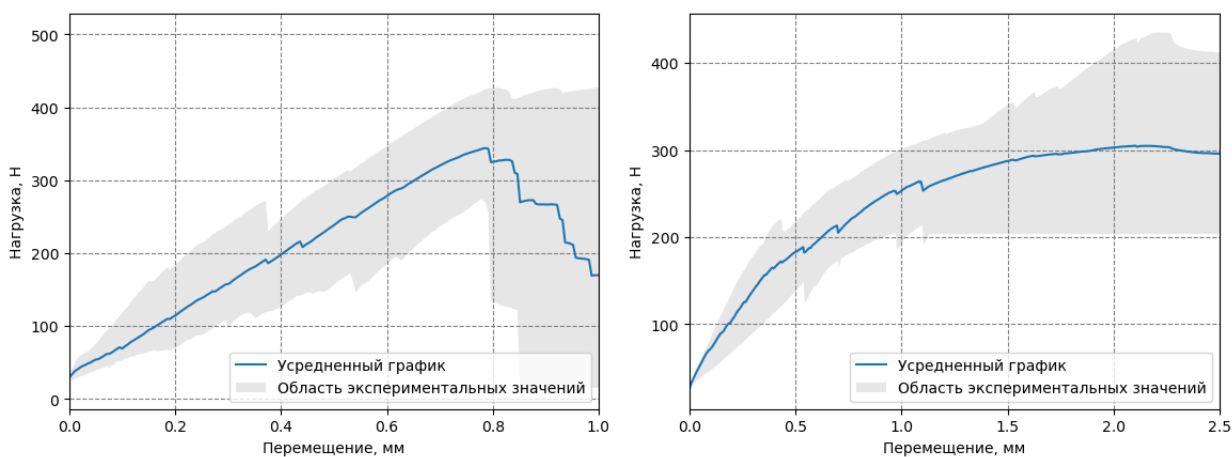


Рисунок 3. Диаграммы испытаний фибры Ф-1 и Ф-2 соответственно

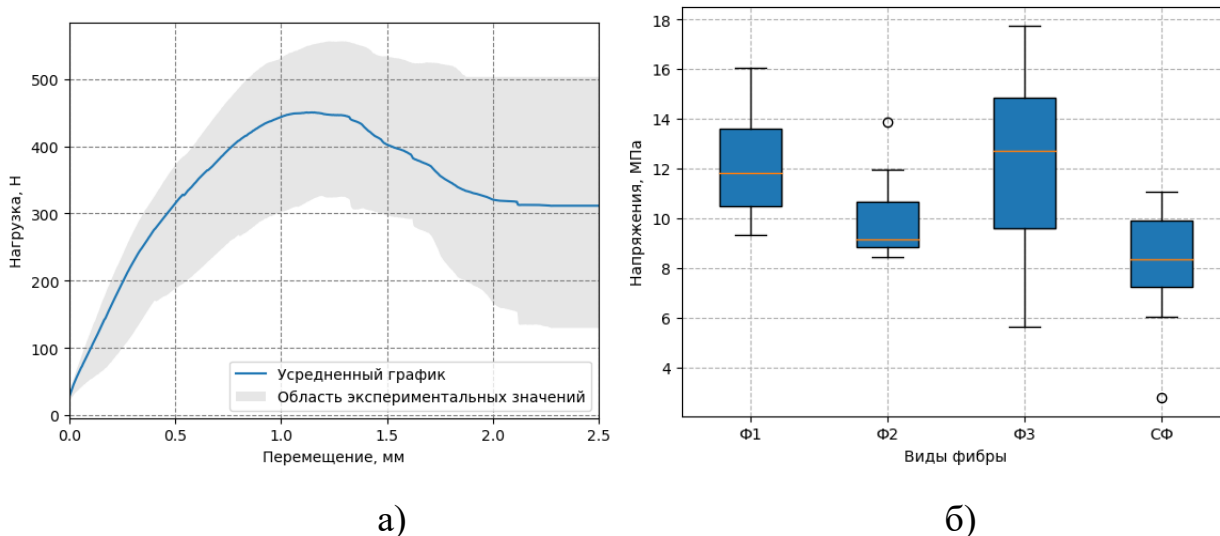


Рисунок 4. Диаграммы испытаний фибры: а – фибра Ф-3, б – сравнение фибр Ф1, Ф2, Ф3 со стальной анкерной фиброй (СФ)

Трещиностойкость бетонов с тремя видами композитной фибры определялась на образцах размером  $100 \times 100 \times 400$  мм с пропилом в средней части глубиной 17 мм. Состав тяжелого бетона, применяемый для изготовления образцов приведен в таблице 4.

При изготовлении образцов фибробетона в состав бетонной смеси вводилось дополнительно 40 кг фибры каждого вида (или 1,6% по объему).

Результаты проведенных испытаний приведены в таблице 6 и на рисунке 5. Образцы с маркировкой «К» изготовлены без введения фибры.

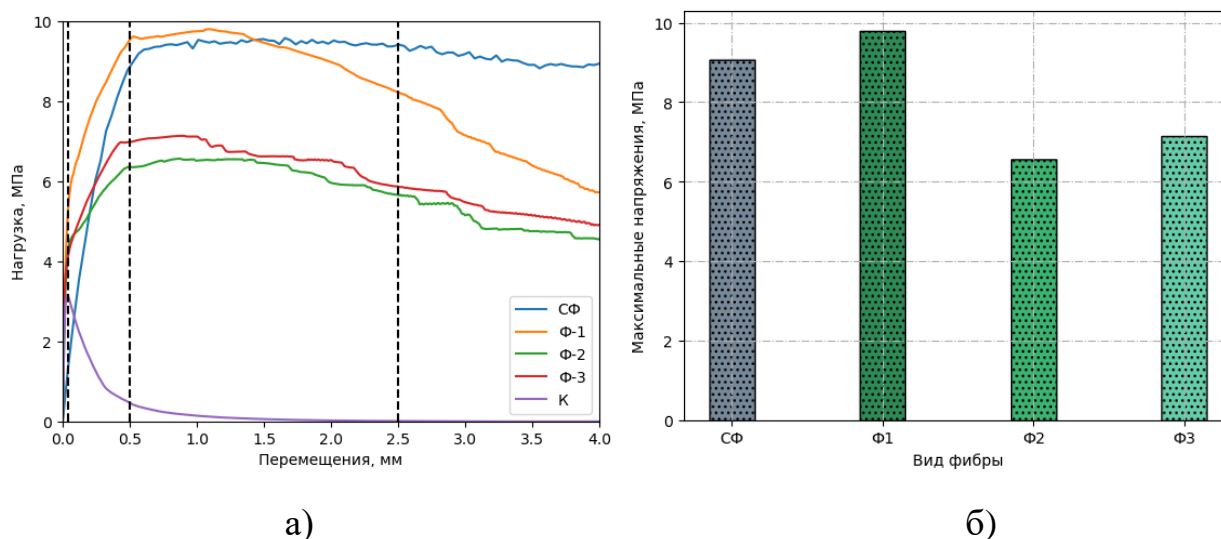


Рисунок 5. Сравнительные диаграммы испытаний: а – график НДС при определении трещиностойкости, б – максимальные нагрузки при различных видах фибры

Испытание на трещиностойкость является хорошим показателем качества фибробетон, выполнено большое количество работ [11–17]. Данные по трещиностойкости сталефибробетона брались из источников [18–20].

Таблица 6. Результаты испытаний по определению трещиностойкости

№		R <sub>Fel</sub> , МПа	R <sub>0,5</sub> , МПа	R <sub>2,5</sub> , МПа	R <sub>fbt2,n</sub> , МПа	R <sub>fbt3,n</sub> , МПа	R <sub>fbt,n</sub> , МПа	B <sub>ft3</sub>
1	К	3,29	-	-	-	-	-	-
2		3,26						
3		2,98						
1	Ф-1	5,58	9,87	8,61	8,3	6,3	5,0	6с
2		5,31	8,67	6,92				
3		6,14	10,08	9,15				
1	Ф-2	4,46	7,75	6,57	4,4	4,4	4,4	4d
2		4,47	5,66	5,24				
3		4,44	5,67	5,18				
1	Ф-3	4,96	7,69	7,02	5,1	3,6	3,3	3,5b
2		4,16	7,62	6,25				
3		3,78	5,68	4,33				
1	СФ	5,4	6,53	7,06	4,27	5,05	3,50	5e
2		4,05	8,09	8,94				
3		6,04	11,96	12,35				

#### Библиографический список:

1. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. Vol. 86.
2. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. Москва: Стройиздат, 1980. 104 с.
3. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. Т. 3. С. 33–37.

4. Рабинович Ф. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Москва: АСВ, 2011. 642 с.
5. Нуртдинов М.Р., Бурьянов А.Ф., Соловьёв В.Г. Повышение эффективности применения композитной стеклопластиковой фибры в бетонах // Строительные материалы, 2017. Т. 4. С. 68–71.
6. Mineiro M.L.R. et al. An integrated experimental and multiscale numerical methodology for modeling pullout of hooked-end steel fiber from cementitious matrix // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2022. Vol. 344. P. 128-215.
7. Zhang K. et al. Pullout behavior of steel fiber embedded into cement matrix under low humidity curing // *Cem Concr Res.* Pergamon, 2023. Vol. 172. P. 107217.
8. Kim J.J. et al. Influence of sand to coarse aggregate ratio on the interfacial bond strength of steel fibers in concrete for nuclear power plant // *Nuclear Engineering and Design.* North-Holland, 2012. Vol. 252. P. 1–10.
9. Dehghani A., Aslani F., Liu Y. Pullout behaviour of shape memory alloy fibres in self-compacting concrete and its relation to fibre surface microtopography in comparison to steel fibres // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2022. Vol. 323. P. 126570.
10. Lee H., Choi M.K., Kim B.J. Structural and functional properties of fiber reinforced concrete composites for construction applications // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* Elsevier, 2023. Vol. 125. P. 38–49.
11. Abadel A. et al. Experimental and analytical investigation of fiber alignment on fracture properties of concrete // *Structures.* Elsevier, 2020. Vol. 28. P. 2572–2581.
12. Bencardino F. et al. Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete // *Compos B Eng.* Elsevier, 2013. Vol. 46. P. 31–38.
13. Zhang X.X. et al. Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates // *Int J Impact Eng.* Pergamon, 2014. Vol. 71. P. 89–96.
14. Gao D. et al. Experimental investigation on the flexural performance and damage process of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete // *Structures.* Elsevier, 2023. Vol. 51. P. 1205–1218.
15. Shi F. et al. Comparative performance analysis of ground slabs and beams reinforced with macro polypropylene fibre, steel fibre, and steel mesh // *Structures.* Elsevier, 2023. Vol. 56. P. 104920.
16. Liu J. et al. Fracture properties of steel fibre reinforced high-volume fly ash self-compacting concrete // *Case Studies in Construction Materials.* Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e02110.
17. Fu C. et al. Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC) // *Compos B Eng.* Elsevier, 2019. Vol. 160. P. 158–166.
18. Gondokusumo G.S. et al. Residual flexural tensile strength of normal-weight and lightweight steel fibre-reinforced concrete at elevated temperatures // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2023. Vol. 367. P. 130221.
19. Pająk M., Ponikiewski T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2013. Vol. 47. P. 397–408.
20. Bhosale A. et al. A study on the efficiency of steel vs. synthetic vs. hybrid fibers on fracture behavior of concrete in flexure using acoustic emission // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2019. Vol. 199. P. 256–268.

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ГЛИНОЗЕМИСТОГО ЦЕМЕНТА

**В.Г. Соловьев<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**В.А. Швецова<sup>1</sup>**, преподаватель

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация.** Исследовано влияние пластифицирующих добавок различного состава на свойства глиноземистого цемента. Для определения начала схватывания и подвижности цементного теста были изготовлены равноподвижные цементные суспензии. В качестве добавок были использованы добавки на основе эфиров поликарбоксилатов и формальдегидов. В результате проведенных исследований установлено, что пластификаторы на основе нафталин- и меламинформальдегида (С-3 и Melment 245) позволяют снизить водопотребность глиноземистого цемента с 43 до 23 % при дозировке 1 и 3 % от массы цемента соответственно, а также обеспечивают снижение подвижности через 30 минут на 17,5 и 6,5 % и увеличение начала схватывания с 250 до 780 и 420 минут. Пластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов Sika 226 P, Melflux 5581 f и Melflux select 5691 f снижают водопотребность глиноземистого цемента с 43 до 20 % при дозировках 0,1, 0,12 и 0,14 % соответственно, а также обеспечивают снижение подвижности через 30 минут на 17,3, 51,6 и 24,2 % и увеличение начала схватывания с 250 до 560, 580 и 420 минут.

**Ключевые слова:** глиноземистый цемент, цементное тесто, пластификатор, начало схватывания, подвижность

Строительное материаловедение является областью знания, тесно взаимодействующей с химической промышленностью. Постоянное развитие химической отрасли обуславливает появление новых химических добавок, которые используются для улучшения свойств бетонных смесей и бетонов. Портландцемент - наиболее распространенный вяжущий компонент в бетонных смесях, взаимодействие которого с различными добавками широко изучено [1–5]. Взаимодействие специальных цементов с различными добавками исследовано в гораздо меньшей степени в связи с узкой областью их применения. Тем не менее, в отдельных видах работ применение специальных цементов необходимо. Глиноземистые цементы целесообразно применять при ремонтных работах, при которых необходимо обеспечение проектных свойств бетона в минимальное время. Также глиноземистые цементы применяются при зимнем бетонировании [6], т.к. высокое тепловыделение, которым сопровождаются процессы гидратации глиноземистого цемента, позволяет проводить работы при отрицательных температурах окружающей среды. Преимущество глиноземистого цемента перед другим представителем специальных цементов – сульфаталюминатным цементом – в том, что он обладает нормальными сроками схватывания при ускоренной динамике набора прочности [7,8].

Применение пластифицирующих добавок позволяет увеличить подвижность бетонной смеси, снизить усадочные деформации, увеличить

прочность бетона и другие характеристики. В зависимости от основного полимера в составе добавки различают меламина-формальдегидные, нафталин-формальдегидные, поликарбоксилатные и полиарилатные. Влияние этих добавок на свойства глиноземистых цементов изучены не в полном объеме [9-11]. Данная работа направлена на изучение влияния пластифицирующих добавок на подвижность и начало схватывания глиноземистого цемента.

В работе был использован глиноземистый цемент SRB-400 (Франция) и пластифицирующие добавки: С-3, Melment 245, Sika 226 P, Melflux select 5691 f, Melflux 5581 f. Все добавки вводились в порошкообразном виде вместе с цементом. Все компоненты, включая воду затворения, имели комнатную температуру +23 °С. Получение цементных суспензий осуществлялось в лабораторном лопастном смесителе при скорости перемешивания 60 об/мин.

Для определения подвижного цементного теста использован цилиндр с внутренним диаметром 30 мм и высотой 50 мм. В таблице 1 представлены составы цементных тест с распылом цилиндра равным 12 - 12,5 см (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены установленные зависимости расплыва цилиндра в зависимости от типа и вида добавки. Для пластифицирующих добавок на основе формальдегидов по результатам предварительных испытаний было установлено минимальное водоцементное отношение (водопотребность цементного теста) равное 0,23, для добавок на основе эфиров поликарбоксилатов 0,2.



Рисунок 1. Определение расплыва цементного теста

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее эффективной добавкой на основе эфиров поликарбоксилатов является Sika 226 P, которая при минимальной дозировке равной 0,1 % от массы цемента, обеспечивает расплыв цементного теста равный 12,1 см. Наиболее эффективной добавкой на основе формальдегидов является С-3, которая при минимальной

дозировке равной 1 % от массы цемента, обеспечивает расплыв цементного теста на 12 см.

Таблица 1. Свойства цементного теста с пластификаторами

Вид добавки	Без добавок	Sika 226 P	Melflux 5581 f	Melflux select 5691 f	C-3	Melment 245
Глиноземистый цемент, г	500	500	500	500	500	500
Соотношение В/Ц	0,43	0,2	0,2	0,2	0,23	0,23
Пластифицирующая добавка, % от массы цемента	0	0,1	0,12	0,14	1	3
Начало схватывания, мин	250	560	580	780	780	420
Расплыв цилиндра d, см	12	12,1	12,4	12,4	12	12,4
Расплыв цилиндра d через 30 минут, см	-*	10	6	9,4	9,9	11,6
Снижение подвижности через 30 мин, %	-	17,3	51,6	24,2	17,5	6,5

Примечание: \* - цементное тесто потеряло подвижность

В результате проведенных исследований установлено, что пластификаторы на основе нафталин- и меламинформальдегида (С-3 и Melment 245) позволяют снизить водопотребность глиноземистого цемента с 43 до 23 % при дозировке 1 и 3 % от массы цемента соответственно, а также обеспечивают снижение подвижности через 30 минут на 17,5 и 6,5 % и увеличение начала схватывания с 250 до 780 и 420 минут.

Пластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов Sika 226 P, Melflux 5581 f и Melflux select 5691 f снижают водопотребность глиноземистого цемента с 43 до 20 % при дозировках 0,1, 0,12 и 0,14 % соответственно, а также обеспечивают снижение подвижности через 30 минут на 17,3, 51,6 и 24,2 % и увеличение начала схватывания с 250 до 560, 580 и 420 минут.

В результате проведенных исследований определено, что все пластифицирующие добавки значительно повысили начало схватывания цементного теста с 250 до 420...780 минут, а также повысили сохраняемость подвижности через 30 минут, что позволит существенно увеличить сроки выполнения работ с бетонами и растворами на основе глиноземистого цемента. Снижение водопотребности цементного теста с 43 до 20...23 % при применении пластифицирующих добавок позволит увеличить динамику набора прочности в ранние сроки и повысить прочностные характеристики в возрасте 28 суток, однако, требуются дальнейшие исследования.

Анализ полученных результатов указывает на то, что пластифицирующие добавки, как на основе формальдегидов, так и эфиров поликарбоксилатов влияют на свойства цементного теста из глиноземистого цемента с различной эффективностью и, соответственно, выбор пластифицирующей добавки для строительных материалов на основе глиноземистого цемента должен производиться индивидуально для каждого конкретного случая.

### Библиографический список:

1. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Орлов А.А., Шулдяков К.В. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // Строительные материалы. – 2016. С. 21-25.
  2. J. Plank, E. Sakai, C.W. Miao, C. Yu, J.X. Hong. Chemical admixtures — Chemistry, applications, and their impact on concrete microstructure and durability // Cement and concrete research. – 2015. - V. 78. Part A. – P. 81-99.
  3. Ansari Sh., Parikh R. Effect of different percentage of plasticizers on properties of concrete // Open access international journal of science and engineering. – 2018. – V.3. – I. 5. – P. 11-13.
  4. Geert De Schutter, Metwally Ezzat, Karel Lesage, Richard Hoogenboom/ Responsive superplasticizers for active rheology control of cementitious materials // Cement and concrete research. – 2023. - V. 165.
  5. Polozhiy K., Siddique J.A., Reiterman P. Influence of Plasticizer on Properties of Blended Cement Concrete // Trans Tech Publications. – 2015. - V. 824. – P. 61-64.
  6. Соловьев В.Г., Швецова В.А., Нгуен З.Т.Л. Исследование свойств смешанного вяжущего на основе портландцемента // Техника и технология силикатов. – 2022. - Т. 29. - №4. С.369-379.
  7. Авлезова А.Э., Кривобородов Ю.Р. Свойства тампонажных цементов с добавкой сульфоалюминатного клинкера // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т.32. - №2. – С.8-9.
  8. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с.
  9. Koňáková D., Pommer V., Šádková K., Keppert M., Černý R., Vejmelková E. Impact of plasticizers' types on the performance of calcium aluminate cement // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – V.20. – P. 1512-1523.
  10. Akhlaghi O., Menciloglu Y.Z., Akbulut O. Poly(carboxylate ether)-based superplasticizer achieves workability retention in calcium aluminate cement. Sci Rep. – 2017. V.7
- Коровкин М.О., Ерошкина Н.А. Влияние вида и дозировки суперпластификатора на свойства цементных напольных смесей // Инженерный вестник Дона. – 2015. - №2.

# ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА УСАДКУ СМЕШАННОГО ВЯЖУЩЕГО

А.А. Солодов<sup>1</sup>, аспирант

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Аннотация.** Доменный гранулированный шлак получил широкое применение в качестве микронаполнителя в самоуплотняющихся бетонах. Применение микронаполнителей препятствует водоотделению бетонных смесей, позволяет снизить количество порландцемента, а также способствует снижению тепловыделения в бетонах, предназначенных для возведения массивных и гидротехнических сооружений. В данной работе проведены исследования по определению усадочных деформаций смешанного вяжущего, включающего в себя 10, 25 и 40% молотого доменного гранулированного шлака. Установлено влияние содержания шлака на показатели усадки твердеющих образцов в условиях 50% относительной влажности.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в гражданском строительстве преобладают цементы с различными тонкодисперсными добавками [1]. Их используют для увеличения объемов выпуска цемента, так как чаще всего они ограничены мощностью клинкерных печей. Также, применение тонкодисперсных добавок позволяет снизить выборсы  $CO_2$  на единицу выпускаемой продукции.

Применение наполнителей в бетоне позволяет получать литые и самоуплотняющиеся смеси требуемых классов без перерасхода дорогостоящего вяжущего вещества, снизить экзотермию, а в случае применения активных минеральных добавок, получать высокопрочные бетоны [2].

Как известно, достижение высоких классов цемента связано с высококачественной материальной базой или высокой тонкостью помола. Бездобавочные цементы класса ЦЕМ 52,5 могут достигать удельной поверхности свыше  $4000 \text{ г/см}^3$ , а цементы класса ЦЕМ 42,5 порядка  $3500 \text{ г/см}^3$ , в зависимости от качества клинкера. Для достижения требуемой активности в классах ЦЕМ II, в которых количество добавок варьируется от 6 до 35% от общей массы цемента, необходимо увеличивать тонкость помола [3].

Увеличение удельной поверхности цементов имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам можно отнести большую связывающую способность, что позволяет получать смеси марок П4 и выше с меньшим количеством вяжущего чем ранее. Известны случаи у производителей товарного бетона, где для достижения класса В25 с маркой по подвижности П4 использовалось 280 кг вяжущего. Также это позволяет вводить большее количество мелкого заполнителя, что положительно влияет на качество поверхности бетонных конструкций. К недостаткам композиционного вяжущего в первую очередь относится повышенная усадка [4].

В работе рассматривается проектирование самоуплотняющегося бетона с улучшенными характеристиками поверхности готового изделия, поэтому



введение наполнителей необходимо, также как и контроль усадки, которая влияет на внешние данные объекта.

Ранее было установлено, что наилучшими характеристиками обладает молотый доменный гранулированный шлак производства компании «Мечел-материалы» и порландцемент класса ЦЕМ 0 52,5Н производства ОАО «Щуровский цемент», который имел наименьшую водопотребность из исследуемых цементов.

#### Материалы и методы

В работе применялись следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н производства ОАО «Щуровский цемент»;
- молотый доменный гранулированный шлак GGBS 4500 ОАО «Мечел»;
- песок полифракционный «ЦеМСэнд» по ГОСТ 6139-2020;
- лазерный гранулометр Sympatec HELOS H4312;
- линейный измеритель Testing Schwindmessgerat Typ C;
- стальные реперы.

Перед испытанием композиционного вяжущего на усадку были произведены исследования гранулометрического состава дисперсных компонентов.

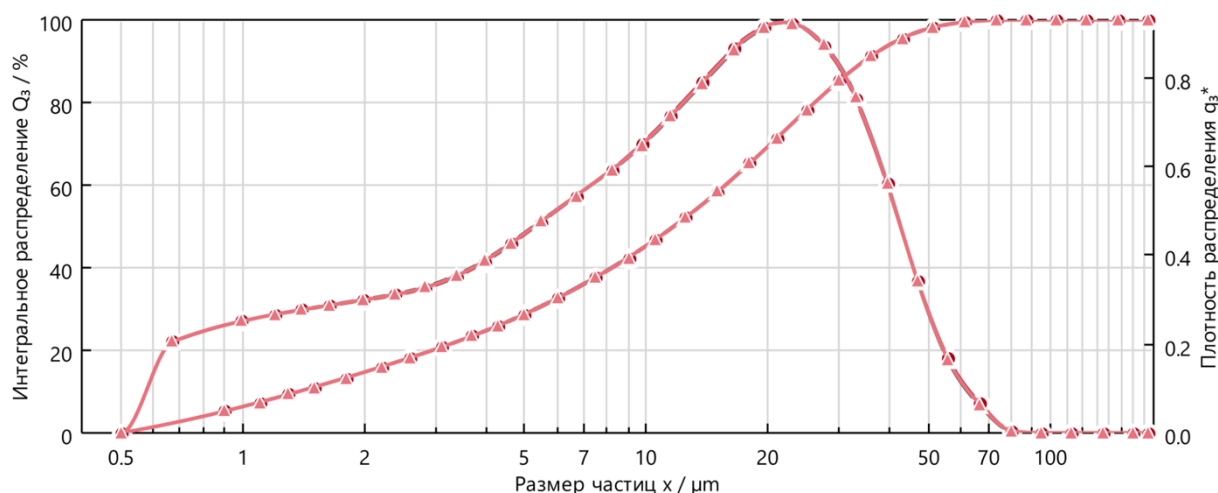


Рисунок 1. Распределение частиц по размерам портландцемента ЦЕМ 0 52,5Н производства ОАО «Щуровский цемент»

Анализ данных гранулометрического состава позволяет сделать вывод, что преимущественно в шлаке содержится фракция 13,69 мкм, а в портландцементе ЦЕМ 0 52,5Н - 22,91 мкм. При этом удельная поверхность шлака составляет 487,4 м<sup>2</sup>/кг, а удельная поверхность портландцемента ЦЕМ 0 52,5Н составляет 371,1 м<sup>2</sup>/кг.

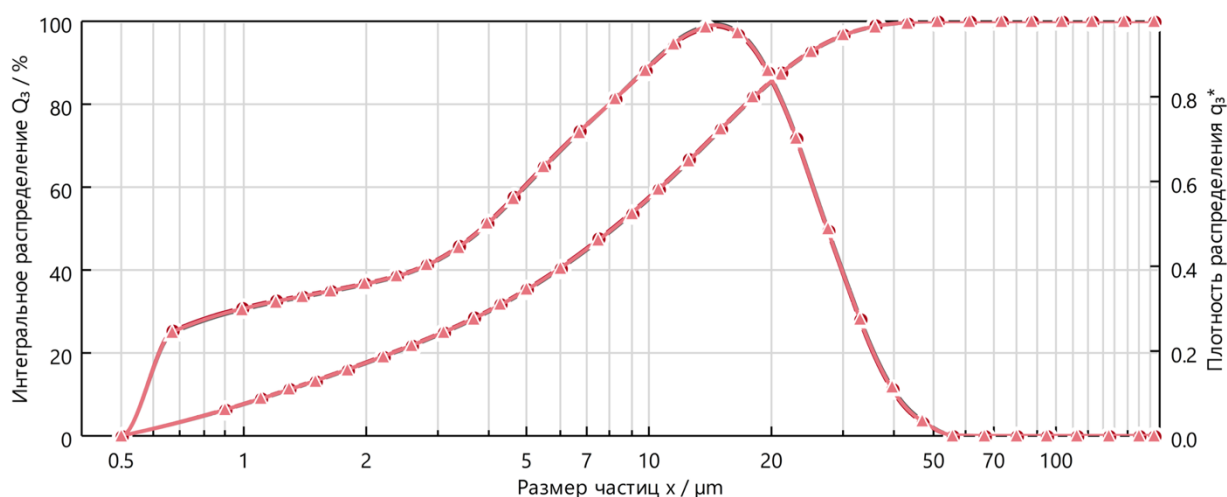


Рисунок 2. Распределение частиц по размерам молотого доменного гранулированного шлака «Мечел»

Совместное использование портландцемента доменного шлака приводит к тому, что частицы последнего будут находиться между более крупными частицами цемента. В отличие от добавочных цементов, в которых шлак измельчается совместно с цементом, частицы шлака имеют больший размер, что объясняется худшей размолоспособностью.

Определение усадочных деформаций осуществлялось в соответствии с ГОСТ 56727-2015 «Цементы напрягающие. Технические условия». Для этого были изготовлены составы с 1 частью вяжущего 1 частью полифракционного песка при водоцементном отношении, равном 0,3. Для определения влияния наполнителя на усадку, было выбраны 4 различных соотношения портландцемента и молотого шлака: 90:10, 80:20, 75:25, 60:40.

Таблица 2. Исследуемые составы

Состав	ЦЕМ 0 52,5Н	Шлак доменный гранулированный молотый «Мечел»	Песок полифракционный	Вода
1	1350	0	1350	405
2	1215	135	1350	405
3	1014,5	337,5	1350	405
4	810	540	1350	405

После изготовления образцов, формы хранились в камере нормального твердения, затем через 24 часа после распалубки производилось первое измерение и они помещались в камеру с поддержанием влажности 50%. Для измерений образцы не выносились из камеры, каждый раз перед измерением использовался эталон для калибровки прибора.



Рисунок 2. Оборудование для линейных измерений с эталоном

#### Анализ результатов

В результате проведённых исследований можно сделать вывод об эффективности введения тонкодисперсных наполнителей. Анализ данных, представленных на Рисунок 3 показал, что введение шлака в смешанное вяжущее до 40% не способствует увеличению усадочных деформаций по сравнению с контрольным составом.

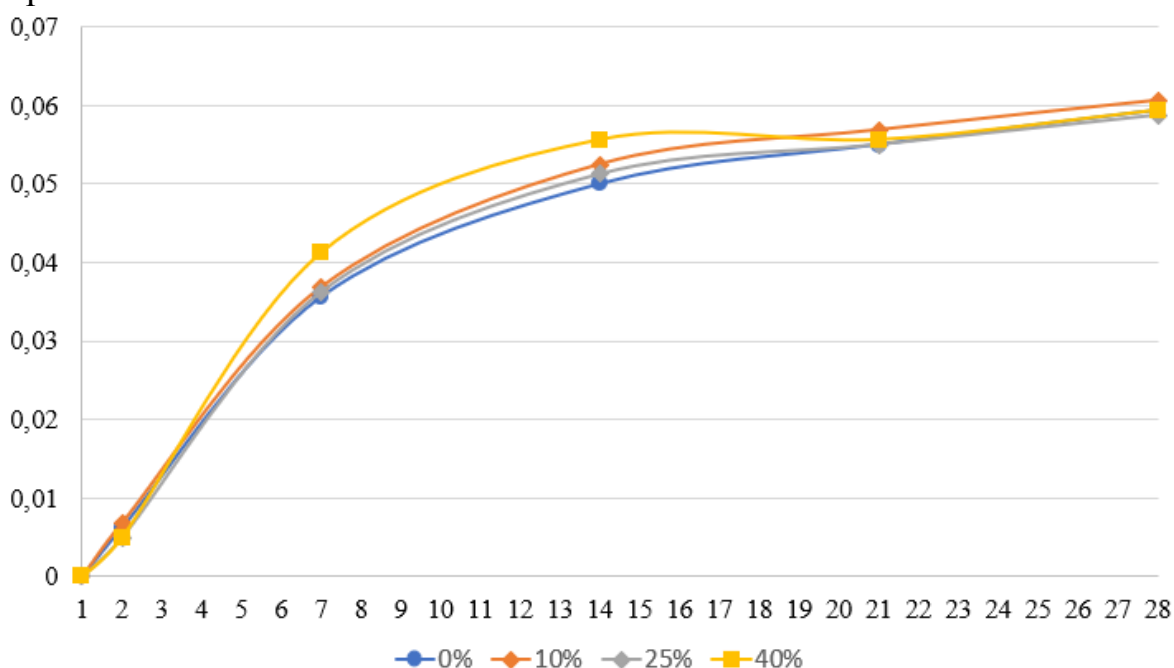


Рисунок 3. Исследование усадочных деформаций в %

#### Выводы

Было установлено, что замещение части цемента молотым доменным шлаком не привело к увеличению усадочных деформаций. Следовательно, применение этого вида наполнителя в бетоне не приведёт к повышенным деформациям и позволит улучшить качество лицевой поверхности.

### **Библиографический список:**

1. Samchenko, S.V.; Larsen, O.A.; Kozlova, I.V.; Alpackiy, D.G.; Alobaidi, D.A.N. Concrete. Modification for Hot Weather Using Crushed Dolomite Stone. Buildings 2023, 11, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>
2. Ларсен О. А., Альобаиди Д. А. Н., Наруть В.В., Матюшин Е.В., Бутенко К. А., Веселов В.К. Получение доломитового микронаполнителя для бетонов, эксплуатируемых в условиях сухого жаркого климата // Техника и технология силикатов. 2023. Т.30. No 1. С. 56 – 65
3. Самченко С.В., Воронин В.В., Ларсен О.А., Наруть В.В. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2021. № 2 (746). С. 71-78.
4. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.

# ПРИРОДНЫЙ РЕСУРС ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Н.Г. Стенина<sup>1</sup>, д-р геол.-мин. наук, профессор

<sup>1</sup>Новосибирский архитектурно-строительный университет

**Аннотация.** Природа является основой инновационного развития строительного материаловедения. Это имеет как физический (материально-ресурсный), так и теоретический аспекты. Последний – относится к геологическому процессу литификации, в результате которого рыхлые осадочные породы превращаются в скальный монолит. Поэтому литификация является природной моделью твердения при получении бетонного монолита. Показано, что аква-комплекс  $[2\text{SiO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{M}^{n+}2\text{M}^{m+}\text{O}^4]$  как решение проблемы водно-минерального единства в процессе минералообразования, раскрывает природу схватывания, твердения и упрочнения в технологической системе С–S–Н. Концепция аква-комплекса служит теоретической основой для сбережения сырья и энергии при производстве бетона с заданными свойствами и композитов на его основе. Одним из многих практических подтверждений данной концепции является возможность использования современных геофизических явлений для развития бесцементных технологий.

**Ключевые слова.** Природа твердения, литификация, аква-комплекс, инновации, бесцементные технологии

## Введение

Природа обеспечивает существование строительства и одновременно является фундаментальной основой строительного материаловедения как науки. Осадочные породы, во-первых, служат поставщиком сырья (глины, песка, извести, щебня и других) для получения строительных материалов. Во-вторых, геологический процесс литификации (окаменения) является моделью твердения в технологической системе С–S–Н (рисунок 1).



Рисунок 1. Литификация – природная модель твердения в технологии получения бетона

В результате литификации рыхлые осадочные породы превращаются в скальные (гранит, базальт и др.). Аналогичные процессы происходят в технологической системе С–S–Н. Однако, природный процесс длится миллионы лет, при этом природа не использует цемент (система С–S) как искусственное вяжущее. Прочность природного скального монолита, в результате, превосходит почти на порядок прочность даже самого прочного бетона (рисунок 1). Этот факт является основанием для использования природной литификации как модели при решении проблемы твердения в системе бетона.

Инновационное значение решения проблемы твердения

Физико-химическая природа твердения имеет ключевое значение для развития строительного материаловедения, от ее решения непосредственно зависит переход от эмпирического уровня в технологиях к целенаправленному. Этим определяется стоимость, ресурс- и энергосбережение при производстве бетона и композитов на его основе и, как следствие, достижение по-настоящему, инновационного уровня всего технологического процесса.

Проблема твердения оставалась открытой около 150 лет. Наиболее известными идеями в этой области являются кристаллизационная теория Ле-Шателье и коллоидная теория Михаэлиса конца 19-го века [1, 2]. Позже, на основе объединения этих представлений, ак. А.А. Байковым была предложена протонная теория цементации [3]. Однако, строгого решения этой проблемы, способной объяснить процессы схватывания, твердения и упрочнения при гидратации минерально-цементных компонентов (система С–S–Н) до настоящего времени не существовало.

Природа водно-минерального единства

Вода является неотъемлемым участником как геологической литификации, так и процесса консолидации гетерогенной водно-минеральной системы. Именно она запускает механизм твердения в технологиях получения строительного монолита. Общеизвестна основополагающая роль воды также и в эволюции природных минеральных систем. Поэтому вопрос о природе взаимодействия воды с минеральным веществом оставался в фокусе геологии во время всей ее истории как науки. Существует много различных идей о характере водно-минерального единства. Среди них, наиболее близким к реальности является представление С.Л. Шварцева о единой водно-минеральной системе, имеющей синергетическую природу [4].

Следовательно, методологической основой решения проблемы твердения в производстве строительного монолита является природа связывания воды (гидратации) с твердым минеральным веществом. Ключевое значение при этом является получение ответа на три главных вопроса:

Каков источник энергии, способный обеспечить твердение, схватывание и упрочнение в системе С–S–Н? Ведь консолидация твердых минеральных компонентов в процессе их гидратации является энергоемкой, тогда как производственный процесс происходит при обычной температуре, давлении и отсутствии каких-либо иных внешних источников энергии.

Каков, конкретно, механизм консолидации? В процессах, происходящих в С–S–Н системе, главную роль играют три главных «игрока»: Ca, Si и Н (H<sub>2</sub>O). Поэтому, в контексте первых двух, возникает третий вопрос:

Какова природа вяжущих свойств цемента? Силикаты кальция (система С–S), получают при высоких температурах. Именно этот материал играет ключевую роль в том, что гетерогенная водно-минеральная система преобразуется в скальный монолит в течение времени от часов до нескольких дней. Поэтому он получил название «носителя вяжущих свойств» и стал неизменным компонентом технологий производства бетона и композитов.

Ответы на эти вопросы являются основой для качественно нового, инновационного, уровня в строительном материаловедении.

Аква-комплекс [2SiO<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>O – M<sup>n+</sup>2M<sup>m+</sup>O<sup>`</sup><sub>4</sub>] – решение проблемы водно-минерального единства

В истории исследований механизма связывания воды в минеральном континууме были испробованы возможности всех новых инструментальных методов, они дали огромный объем данных о состоянии невидимой (структурно-связанной) воды в минеральном веществе. Однако прорыв в этом направлении – точный вид водно-минерального комплекса, принесли два, подсказанные природой, момента: 1) молекула воды имеет структуру заряженного тетраэдра [5] (рисунок 2а); 2) такой же вид имеют и тетраэдры [(Si,Al)O<sub>4</sub>] (рисунок 2б), из которых строятся минералы породообразующих алюмосиликатов, составляющих около 75% массы Земной коры. Эти структурные блоки имеют близкие размеры в ангстремы, поэтому прямым методом обнаружения водно-силикатных комплексов, захваченных из минералообразующей среды во время роста минералов, является ПЭМ (просвечивающая электронная микроскопия) (Рисунок 2в и г).

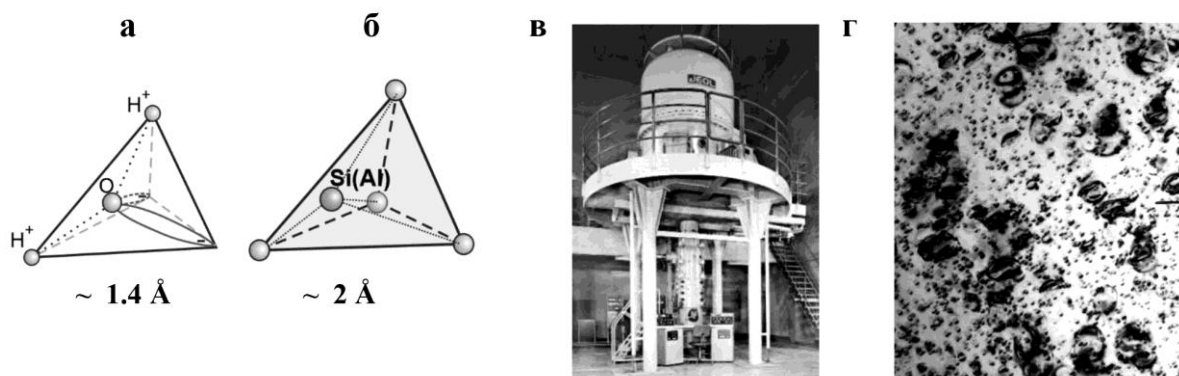
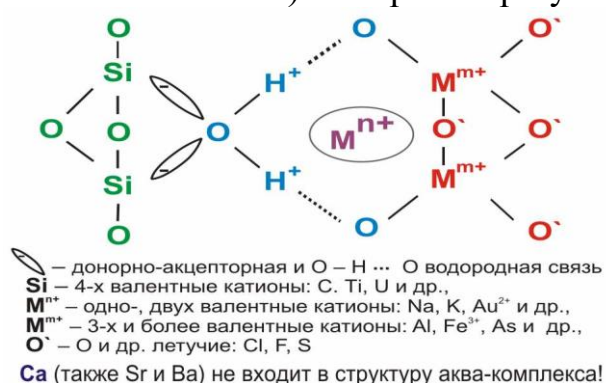


Рисунок 2. Водный [  $\bar{\text{O}}\text{—}2\text{H}^+$  ] и [Si(Al)O<sub>4</sub>] тетраэдры (а, б), высоковольтный электронный микроскоп JEM-1000 (в), снимок ПЭМ водных дефектов в кварце (г),

Данный подход, а также использование ПЭМ в комплексе с другими методами, постановка специальных экспериментов позволили установить аква-комплекс [2ТО<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>O – M<sup>n+</sup>M<sup>m+</sup>O<sup>`</sup><sub>4</sub>] (где Т–Si и другие 4-х валентные катионы: С, Тi..., M<sup>n+</sup> одно- и двухвалентные катионы: Na, Fe<sup>2+</sup>..., M<sup>m+</sup> –многовалентные катионы: Al, Fe<sup>3+</sup>..., O<sup>`</sup>–O и другие летучие: Cl, S...) (Рисунок 3а), как формы

(механизма) структурно-химического связывания воды в силикат - (алюмосиликатной) минералообразующей среде [6, 7].



а



б



в

Рисунок 3. Модель аква-комплекса (а); геологические (б) и биологические (в) доказательства невозможности вхождения Ca в его структуру

Аква-комплекс состоит из пяти тетраэдров и имеет  $\text{O}_x$  — Red (кислотно-основную) структуру. Принципиальным моментом является то, что позиция мостикового кислорода является одновременно и позицией кислорода центральной молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ . Благодаря этому, левая и правая части аква-комплекса, представленные двумя тетраэдрами  $[\text{SiO}_3\Box]$  ( $\Box$  — вакансия кислорода) и двумя тетраэдрами  $[\text{M}^{m+}\text{O}_4]$  ( $\text{M}^{m+}$  —  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ...), являются кислыми и основными, т.к. имеют, соответственно, недостаток и избыток отрицательного заряда. Центральная молекула воды, имеющая структуру заряженного тетраэдра (рисунок 2а), [5], как самый короткий природный окислительно-восстановительный мостик, объединяет обе части в единое целое.

Аква-комплекс, впервые установленный как форма структурно-химического связывания воды в твердом минеральном веществе, в результате исследований механизма эволюции минерального вещества пород [8], а также анализа всей совокупности геолого-минералогических данных приобрел, в дальнейшем, статус «концепции аква-комплекса». Было показано, что аква-комплекс является универсальной кристаллохимической ячейкой, ответственной за эволюцию пород, т.е. аналогом ДНК для минерального вещества [9], а также за происхождение воды [10].

Образование бетонного монолита

В приложении к строительному материаловедению принципиально важным является следующее. В структурные позиции аква-кмплекса (рисунок 3а) могут входить практически все элементы Таблицы Менделеева, кроме Ca (Sr, Ba...). Это обусловлено строением внешних электронных оболочек этих элементов, вследствие чего они не могут давать электроны для связи с другими элементами внутри единой структуры аква-комплекса. Поэтому Ca-содержащие породы (мраморы, известняки и др.) всегда находятся в ассоциации со свободной водой. Это доказывается как геологическими (рисунок 3б), так и биологическими (рисунок 3в) фактами. Концепция аква-комплекса раскрывает природу твердения, давая ответы на три поставленных выше вопроса.



Ca и Si, с этой точки зрения, являются антагонистами по отношению к связыванию с водой: кремний связывается с ней идеально (силикагель), а кальций совсем не связывается (рисунок 3). Поэтому искусственное соединение этих двух элементов является высоко энергоемким т.к. происходит при T от 1300 до 1350°C. В результате получают клинкерные минералы цемента (система C–S). Природу их вяжущих свойств и механизм твердения иллюстрирует Рисунок 4.



Рисунок 4. Образование строительного монолита как природоподобная модель литификации

В процессе гидратации клинкерных минералов (на примере алита) происходит внедрение атомов водорода [3] в твердые микрочастицы. Центрами их миграции являются атомы кальция, т.к. водород – донор электронов, а кальций может принять 10 свободных электронов. В результате вокруг его атомов образуется атмосфера водородных Н—О связей. Данные связи обладают энергетическим потенциалом [9, 11] Поэтому в процессе гидратации происходит генерирование энергии в C–S–H системе. Эта энергия тратится «in situ» из-за невозможности Ca образовать аква-комплекс. Поэтому данная энергия Redox'a тратится на упорядочение структурных фрагментов и их связывание в гетерогенной водно-минеральной системе (пасте). В результате образуется 3D-структура, подобная граниту. Данный механизм объясняет усадку и упрочнение при производстве бетона, эффект эндогенного тепла, а также другие необычные свойства бетона при эксплуатации его сооружений.

Природная верификация концепции аква-комплекса

Наряду с известным геологическим процессом литификации, современные необычные геологические явления служат дальнейшей проверке и практическому применению концепции аква-комплекса. К таким явлениям относится недавнее событие на р. Буря (рисунок 5а). В результате спонтанного взрыва произошел выброс огромной массы береговой породы и ее мгновенная цементация в русле реки. Исследования комплексом методов [12] документально доказали, что резкое упрочнение исходно рыхлой осадочной породы (светло-серая фракция на рисунке 5б) произошло за счет энергии Redox'a, выделившейся во время взрыва. Настоящий факт имеет, во-первых, теоретическое значение как прямое доказательство природы твердения с т. з. концепции аква-комплекса, во-

вторых, перспективу практического использования новообразованного природного материала в бесцементных технологиях.

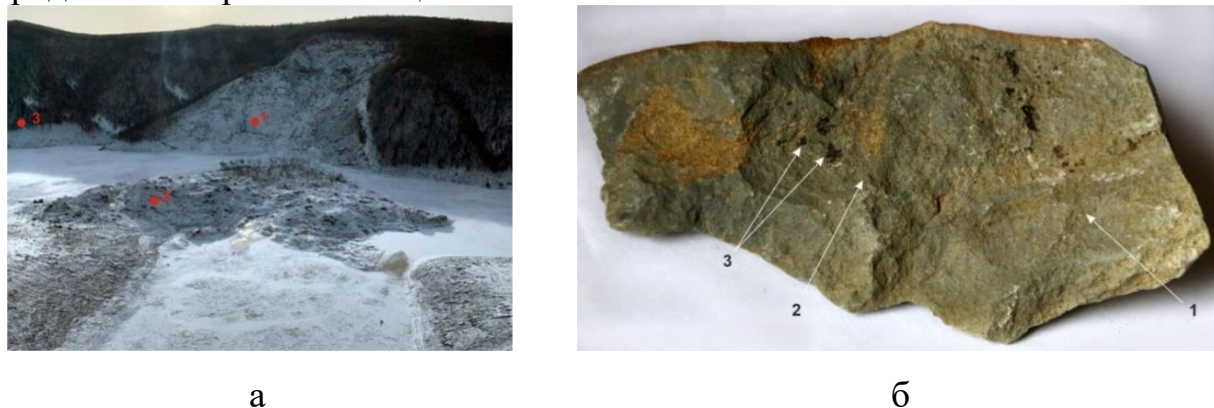


Рисунок 5. Событие на р. Буря (11.12. 2018 г.) и схема отбора образцов (а); материал выброса (точка 2 на рисунке светло-серая низкопробная (1), темно-серая высокопрочная (2) фракции и черные выделения свободного углерода  $C_0$  в темно-серой (3) (б)

Таким образом, концепция аква-комплекса раскрывает природный ресурс для инновационного развития строительного материаловедения.

#### Библиографический список:

1. Le Chatelier, H. L. Recherches experimentales sur la Constitution des Mortiers hydrauliques 2nd ed. /H.L/ Le Chatelier.–Paris: Ive Ch. Dunod, 1904. 198 p.
2. Michaelis, W. / W. Michaelis // Chem. Ztg, 1893, P. 982
3. Байков, А. А. Портландцемент и теория твердения гидравлических цементов / А.А. Байков //Техн-экон. Вестник. 1923. Т. 3. № 6-7. С. 206–215
4. Шварцев, С.Л. Гидрогеохимия зон гипергенеза / С.Л. Шварцев.–М.: Недра, 1998. 366 с.
5. Bernal, J.D., Fowler, R.H A theory of water and ionic solutions with particular reference to hydrogen and hydrogen ions / J.D. Bernal, R.H, Fowler // J. Chem. Phys. 1933. №10 (8). P. 515-548
6. Stenina N.G., Bazarov L.Sh., Scherbakova M.Ya., Mashkovtsev R.I. Structural state and diffusion of impurities in natural quartz of different genesis/ N/G/ Stenina et al. // Phys. Chem. Miner. 1984. N 10, P. 180-187.
7. Stenina N.G..Water-related defects in quartz // Bull.of Geosc. 2004. V.79, N4, P.251-268.
8. Стенина, Н.Г., Дистанова, А.Н. Структурно-химические преобразования силикатных минералов как индикатор их генезиса (на примере пород Каахемского плутона, Тува) / Н.Г. Стенина, А.Н. Дистанова,–Новосибирск: Изд-во ОИГГиМ СОРАН, 1991. 75с.
9. Stenina, N.G. Evolution of the Mineral Matter of the Earth: Theory and Implications. Energy paradigm of geological processes. [Scientific electron book: [www.steninageo.com](http://www.steninageo.com)] / Stenina N.G.–Novosibirsk: Academic Publishing House “GEO”, 2013. 414 p.
10. Стенина, Н.Г. Происхождение минеральной воды / Н.Г. Стенина –Новосибирск, Изд-во СОРАН, 2017. 128с.
11. Stenina, N.G. 2003. REDOX as a link between organic and inorganic matter: its role in mineralization. In: D.G. Eliopoulos et al. (Eds.) Mineral Exploration and Sustainable Development.–Rotterdam Netherlands: Millpress, P. 857 – 860.
12. Стенина Н.Г. Природный ресурс для разработки новых строительных технологий.

13. В: Смирнова О.Е. и др. (ред) «Качество. Технологии. Инновации.» Материалы Международной научно-практической конференции. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2022. с.11 –18

## ВОПРОСЫ АКТУАЛИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

**В.А. Титаев**<sup>1, 2</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Б.С. Соколов**<sup>2</sup>, канд. техн. наук

**И.А. Черный**, магистрант<sup>1</sup>, инженер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

<sup>2</sup>*АО НИЦ Строительство, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы, возникшие при выполнении работ по актуализации межгосударственных стандартов: ГОСТ 6665 «Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия»; ГОСТ 19231 «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей. Технические условия»; ГОСТ 21924 «Плиты железобетонные для покрытия городских дорог. Технические условия». Обоснована необходимость пересмотра стандартов установлением более строгих требований к бетону и расширением выбора классов арматуры для армирования изделий.

**Ключевые слова:** Железобетон, конструирование, железобетонные изделия, дорожное строительство, стандартизация, актуализация стандартов.

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена актуализация ГОСТ 19231 «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей. Технические условия», ГОСТ 21924 «Плиты железобетонные для покрытий городских дорог. Технические условия» и ГОСТ 6665 «Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия».

Межгосударственные стандарты актуализированы с учетом требований Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Цель поправок – актуализация положений соответствующих технических условий на производство железобетонных изделий в связи с обновлением нормативных актов по их производству.

При пересмотре в общем случае решены следующие задачи:

- в связи с изменением требований базового стандарта ГОСТ Р 1.5, изменены структура и положения норм;
- уточнены требования нормативных документов по обеспечению единства измерений в Российской Федерации, установленных Федеральным законом от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ.

Общим для актуализированных нами стандартов явился вопрос обеспечения долговечности изделий. Для дорожных плит и бортовых камней класс бетона по прочности на сжатие назначался только в зависимости от автомобильной нагрузки, а для трамвайных плит – классы прочности бетона присваивались только для условия обеспечения несущей способности. Что в принципе недостаточно для эксплуатации изделий в различных грунтовых условиях, оказывающих различные коррозионные воздействия на бетон.

Стандарты распространяются на всю территорию России с различными климатическими условиями, в частности в грунтах, где расчётная температура наружного воздуха опускается до минус 40 °С. Для обеспечения долговечности этих изделий в данных условиях назначены требования по водопроницаемости и морозостойкости. При актуализации стандартов установлены классы бетона, обеспечивающие заданную морозостойкость и водопроницаемость.

Значения нормируемых параметров для железобетонных дорожных изделий приведены в таблице.

Таблица 1. Минимальные значения нормируемых параметров для изделий

Параметр	Плиты для покрытия		Бортовые камни для	
	городских дорог	трамвайных путей	дорожного строительства	благоустройства территорий
Класс бетона по прочности на сжатие	В30		В25	
Класс бетона по прочности на растяжение при изгибе	В <sub>тб</sub> 4,0		В <sub>тб</sub> 4,0	
Марка бетона по морозостойкости	F <sub>2</sub> 200		F <sub>2</sub> 150	
Марка по водонепроницаемости	W8		-	-
Примечание – Морозостойкость плит, эксплуатируемых при температурах воздуха наиболее холодной пятидневки ниже –20°С до –40°С, следует принимать F <sub>2</sub> 300.				

Кроме того, в процессе пересмотра межгосударственных стандартов:

- приведены в соответствие с действующим ГОСТ 34028 [10] обозначения арматурного проката;
- введено требование расчёта железобетонных изделий на выносливость (требования к расчёту выносливости см. СП 63.13330 [11]);
- приведены в соответствие с ГОСТ 32960 [9] нагрузки на изделия.

В разработанной редакции стандартов структура изменена на основании ГОСТ 1.5-2001. Ряд пунктов пересмотрены или исключены. Также, стандарты актуализированы в обеспечение требований актуализированных: ГОСТ 13015 [3], ГОСТ 26633 [4], ГОСТ 31384 [6].

В предыдущих редакциях стандартов требования к армированию изделий были жестко нормированными, обязательными к исполнению. В период действия стандартов процесс совершенствования норм и методов расчета и проектирования не прекращается, поэтому, чтобы реализовать возможность использования современных норм и правил проектирования, спецификация и выбор арматуры из текстов стандартов исключены. Расчет и проектирование каркасов, сеток и отдельных арматурных элементов изделий должна выполнять проектная организация, основываясь на требованиях актуальных нормативных документов.

Введению требований выносливости, влияющих на долговечность изделий, способствовали ряд исследований, в частности работы [18, 19], по совершенствованию расчётов трамвайных и дорожных плит.

Примером учета одного из ключевых требований, связанных с расчетом железобетонных изделий для дорожного строительства, может служить исследование [17], в котором продемонстрирован и описан метод расчета железобетонных конструкций на предельные усталостные состояния. В обновленном стандарте введены требования к расчету железобетонных изделий на долговечность. Нормативные положения по данному расчету приведены в разделе 13 СП 63.13330 [11].

Подробно актуализированная редакция стандарта для трамвайных плит описана в работе [20].

При публичном обсуждении актуализированных стандартов наибольшее количество предложений поступило от Федерального дорожного агентства (РОСАВТОДОР). Основной блок предложений о внесении изменений в актуализированный ГОСТ 21924 касался замены стандартов ГОСТ 8267 [1] на ГОСТ 32703 [7]; ГОСТ 8736 [2] на ГОСТ 32824 и ГОСТ 32730 [8]. Данные предложения были отклонены в связи с тем, что в стандартах [7; 8] отсутствует ряд требований к материалам, гарантирующим обеспечение долговечности бетонных изделий, отвечающей требованиям ГОСТ 27751 [5].

Требования к горным породам отражены в п. 4.8.2 ГОСТ 8267 [1]. Щебень и гравий, согласно нормативному акту, должны быть устойчивы к воздействию окружающей среды, а при использовании в качестве заполнителя бетона должны быть устойчивы к химическому воздействию цемента и щелочи.

В ГОСТ 32703 [7] присутствуют ссылки на ГОСТ 33031-2014 и ГОСТ 33050-2014, в которых представлены указания в виде выборочных цитирований из ГОСТ 8269.0-97, не раскрывающих полноту требований в области оценки реакционной способности горной породы и щебня.

В стандарте на песок ГОСТ 8736 [2] есть указание п.4.2.14 «Песок, обогащенный песок и фракционированный песок, предназначенные для применения в качестве заполнителей для бетонов, должны обладать стойкостью к химическому воздействию щелочей цемента». В ГОСТ 32730 [0] и ГОСТ 32824 этих требований нет.

В работе [15] дана характеристика процесса внутренней коррозии бетона, возникающего в результате взаимодействия компонентов бетона без обменных реакций с внешней средой. Наиболее распространенным процессом внутренней коррозии является взаимодействие цементной щелочи и химических добавок с диоксидом кремния, полученным из состава заполнителя. Данная работа подтверждает необходимость соблюдения требований к заполнителю, не нормируемых по ГОСТ [7; 8].

В НИИЖБ им А.А. Гвоздева проведены исследования с целью оценки возможности использования щебня по ГОСТ 32703 [7] для производства бетонов общегражданского строительства. Авторы работы [16] отмечают, что включение в состав бетонных смесей излишних зерен размером менее 5 мм наряду с крупным песком может быть потенциальной проблемой не только при использовании щебня по ГОСТ 32703 [7], но и по ГОСТ 8267 [1]. Следует подчеркнуть, что результаты настоящего исследования были получены при сравнении бетонов на щебне с примерно равным содержанием пластинчатых и

игловатых зерен. Мониторинг вышеупомянутого показателя при использовании щебня по ГОСТ 32703 [70] должен осуществляться с бóльшим вниманием, с учетом рисков недооценки показателя при использовании метода рассева на щелевидных ситах, особенно фракций с малым размером зерен.

Вопросу влияния крупного заполнителя на модуль упругости бетона уделено внимание в работе Павловой И.П. [14]. Экспериментальным исследованиям закономерности влияния размеров и геометрических параметров щебня на сопротивление бетона посвящена работа Макеева А.И. и Чернышова Е.М. [13].

В НИИЖБ им А.А. Гвоздева проведены экспериментальные исследования оценки влияния крупного заполнителя по ГОСТ 32703 [7] на прочностные и деформативные свойства железобетонных конструкций в сравнении с железобетонными конструкциями, выполненными из бетона на крупном заполнителе по ГОСТ 8267 [1]. Авторы статьи [12] Зенин С.А., Кудяков К.Л. и Кудинов О.В. пришли к выводу, что замена крупного заполнителя по ГОСТ 8267 [1] на щебень по ГОСТ 32703 [7] в изгибаемых железобетонных конструкциях не влияет на прочность как по нормальным, так и наклонным сечениям балок. При нагрузках, близких к разрушающим, расхождение экспериментальных значений прогибов составляет  $13\div 23\%$ , а прогибы образцов балок со щебнем по ГОСТ 32703 [7] не превышают прогибов образцов, выполненных с применением заполнителя по ГОСТ 8267 [1]. Авторами сделан вывод о необходимости выполнения НИР и НИОКР для определения влияния инертных заполнителей бетона на его прочностные и деформативные свойства, а также долговечность. По результатам НИОКР следует сделать вывод о приоритете в применении щебня и гравия по ГОСТ 8267 [1] или ГОСТ 32703 [7], песка по ГОСТ 8736 [2] или ГОСТ 32730 [8].

От Ассоциации «Производителей мелкоштучных бетонных изделий» поступили ряд предложений о внесении в актуализированный ГОСТ 6665 положений о применении: минеральных пигментов белых (по ГОСТ 965) и цветных (по ГОСТ 15825) портландцементов, песка и щебня декоративного по ГОСТ 22856. Данные предложения были отклонены по причине недостаточности экспериментальных данных о влиянии пигмента и цветных портландцементов на эксплуатационные характеристики и долговечность бетона изделий.

Предложения об увеличении стандартизуемой номенклатуры изделий бортовых камней, в частности, применение камней длиной 800, 600, 500 и 250 мм, применение камней с разными радиусами лицевой и тыльной поверхностей и т.д., были отклонены по причине невозможности нормировать всё многообразие размеров и форм, которые могут потребоваться строителям.

### **Заключение**

Процесс развития и совершенствования нормирования и стандартизации в области производства железобетонных изделий для городского дорожного строительства является необходимым для возможности производить долговечные, экономически обоснованные, безопасные при эксплуатации изделия и конструкции. Актуализация регламентируемых данными стандартами

требований обеспечит расширение их области применения в рамках действующей нормативной базы и позволит производить бетонные и железобетонные изделия, обеспечивающие требуемый уровень их долговечности.

#### **Библиографический список:**

1. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – М.: Стандартинформ. 2018.
2. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия. – М.: Стандартинформ. 2019.
3. ГОСТ 13015-2012 Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения. – М.: Стандартинформ. 2018.
4. ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – М.: Стандартинформ. 2019.
5. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ. 2019.
6. ГОСТ 31384-2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ. 2018.
7. ГОСТ 32703-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования. – М.: Стандартинформ. 2019.
8. ГОСТ 32730-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок дробленый. Технические требования. – М.: Стандартинформ. 2019.
9. ГОСТ 32960-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения. – М.: Стандартинформ, 2019.
10. ГОСТ 34028-2016 Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019.
11. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Минстрой России, 2021. 154 с.
12. Зенин С.А., Кудяков К.Л., Кудинов О.В. Оценка влияния бетонов на заполнителях по ГОСТ 32703-2014 на прочностные и деформативные свойства изгибаемых железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2022. № 1 (609). С. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-10-16>.
13. Макеев А.И., Чернышов Е.М. Экспериментальные исследования закономерностей влияния размерно-геометрических параметров щебня на потенциал сопротивления бетонов разрушению // Строительство и реконструкция. 2018. №2. С.122-132.
14. Павлова И.П. О влиянии заполнителей на модуль упругости бетона // Международная научно-практическая конференция «Напрягающие цементы, бетоны и самонапряжённые конструкции». – Брест: БГТУ, 2000. С.164-170.
15. Розенталь Н.К., Любарская Г.В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя // Бетон и железобетон. 2012. № 1 (609). С. 50–60.
16. Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Оценка возможности использования щебня по ГОСТ 32703 для производства бетонов общегражданского строительства. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;33(2):194–212. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-194-212](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-194-212).
17. Шарипов Р.Ш., Зенин С.А., Крылов С.Б., Волков Ю.С. Оценка методов расчёта железобетонных конструкций для предельных состояний по усталости. Вестник НИЦ «Строительство». 2020;4(27). С.148-159. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-148-159](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-148-159).



18. Захаров В.Б. Разработка и исследование работоспособности конструкции железобетонного подрельсового основания для пути городского наземного рельсового транспорта. Дис. ... канд. техн. наук / Владислав Борисович Захаров, С-Пб. 2002. 154 с.
19. Султанов Н.Н. Технико-экономическое обоснование перспективных конструкций трамвайных путей. Дис. ... канд. техн. наук / Нариман Надимбекович Султанов, С-Пб. 2015. 270 с.
20. Соколов Б.С., Титаев В.А., Черный И.А. Актуализация межгосударственного стандарта «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей». Вестник НИЦ «Строительство». 2023;37(2):116-124. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-116-124](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-116-124). EDN: SYGJCS.

## КЛИНКЕРНЫЕ КРУПНОФОРМАТНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КАМНИ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АРГИЛЛИТОВ

**К.М. Ужахов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, профессор

**А.В. Котляр**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>*Донской государственный технический университет*

**Аннотация.** Клинкерный кирпич становится в последние годы всё более востребованным у потребителей и строителей. Этому способствуют его свойства, обеспечивающие долговечность зданий и практически полное отсутствие затрат на ремонты и обновление фасадов зданий. Благодаря определённым усилиям геологов, технологов и машиностроителей в России появилась возможность широкого производства стеновых клинкерных изделий. Одним из перспективных направлений в этом плане является производство клинкерных крупноформатных керамических камней с повышенной пустотностью – 60-80%, которые имеют среднюю плотность 450-700 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 0,8-0,11 Вт/(м · °С) и предел прочности при сжатии 10-30 МПа. При таких технических показателях и соответствующей стоимости, что вполне достижимо, клинкерные крупноформатные керамические камни вполне могут составить конкуренцию блокам из автоклавного газобетона. При определённых технологических приёмах керамические камни могут выполнять и функцию лицевого кирпича.

**Ключевые слова:** Клинкерный кирпич, клинкерные камни, прочность, пустотность, теплопроводность.

Клинкерный кирпич является всё более востребованным в современном строительстве. Работа по организации его производства началась в России всего около 10 лет назад и в последние годы наблюдается бурный рост его производства и применения [1]. Связано это, с одной стороны, со свойствами клинкерного кирпича, которые как нельзя лучше подходят для климатических условий большей части России. С другой, это появление новых производственных возможностей. Появилось специальное массоподготовительное и формовочное оборудование, печи, позволяющие вести обжиг в узком интервале температур. Это существенно расширяет сырьевую базу для производства клинкерной керамики. Однако планомерному увеличению объёмов производства и применения стеновых клинкерных изделий, несмотря на огромный потенциал, мешают многие непроработанные вопросы – отсутствие нормативных и рекомендательных документов, накопленные статистические данные о свойствах изделий в кладке, отсутствие единой терминологии, а также отсутствие общепринятых технических решений в плане применения изделий в строительстве. Согласно ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» клинкерным является кирпич, имеющий предел прочности при сжатии от 30 до 100 МПа, водопоглощение по массе от 0 до 6 %. Следует отметить, что диапазон по водопоглощению весьма широк для керамических изделий и изделия с водопоглощением 0-0,5; 0,5-3,0 и 3,0-6,0 % будут весьма существенно отличаться по своим свойствам.

В настоящее время специалистами Донского государственного университета разработана технология производства клинкерной керамики на

основе камневидного глинистого сырья, к которому относятся аргиллиты, глинистые сланцы, слюдястые сланцы и др., запасы которых безграничны с водопоглощением от 0,1 до 3,0 %, пределом прочности при сжатии от 100 до 250 МПа и пределом прочности при изгибе от 40 до 70 МПа [2,3]. Керамика как материал с такими свойствами позволяет получать на её основе новые перспективные виды изделий стеновой керамики.

Таковыми перспективными видами изделий могут стать клинкерные крупноразмерные керамические камни с повышенной вертикальной пустотностью – 55-80%, которые имеют среднюю плотность 450-700 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 0,8-0,11 Вт/(м · °С) и предел прочности при сжатии от 10 до 30 МПа. Повышенная пустотность с многочисленными мелкими пустотами обеспечивает низкую теплопроводность изделий, а прочность самой клинкерной керамики обеспечивает достаточно высокую прочность изделий. Проведённые нами натурные эксперименты и расчёты показали, что при размере пустот с диаметром от 5 до 10 мм прочность при сжатии образцов зависит прямо пропорционально от их пустотности. При этом желательно, чтобы форма пустот приближалась к окружности или была шестигранной. На рисунке 1 показана зависимость прочности образцов от их пустотности при прочности самой керамики как материала 148 МПа.

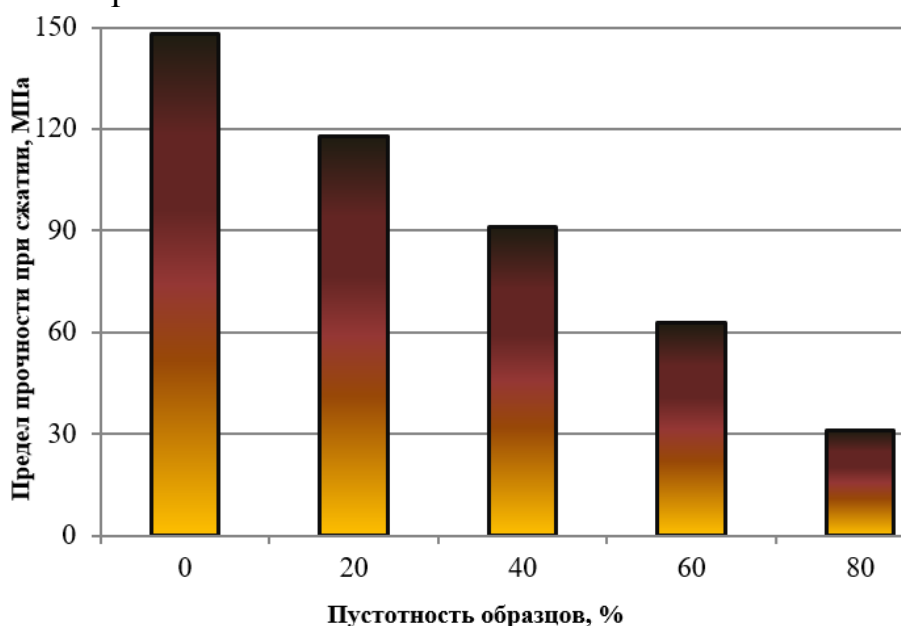


Рисунок 1. Зависимость предела прочности при сжатии образцов от их пустотности

Примерно такие же зависимости наблюдаются и по снижению теплопроводности в зависимости от пустотности. На рисунке 2 показана зависимость теплопроводности образцов от их пустотности.

В настоящее время в некоторых странах (Турция, Египет, Тунисе и др.) широко производятся керамические высоко пустотные камни с горизонтальными пустотами (рисунок 3). Однако в России они не получили распространения из-за низкой прочности, недостаточной низкой

теплопроводности, в виду наличия крупных пустот, и проблемой прокладки коммуникаций в стенах зданий.

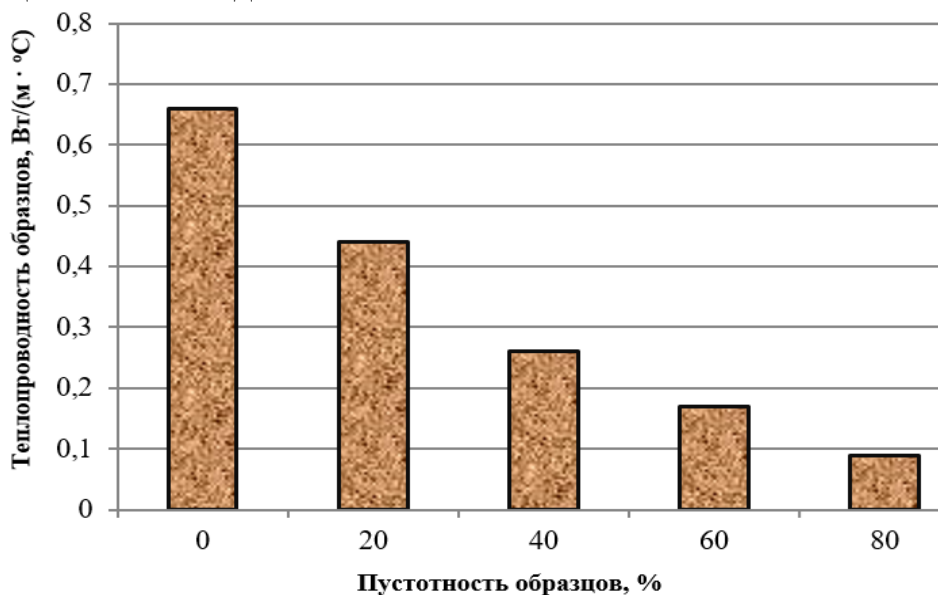


Рисунок 2. Зависимость теплопроводности образцов от их пустотности

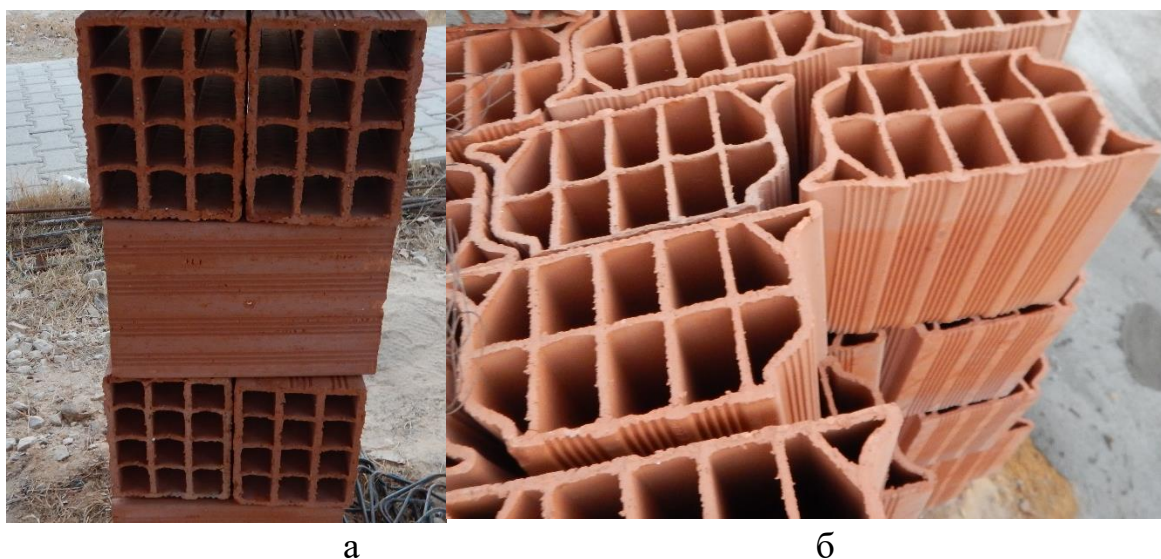


Рисунок 3. Высоко пустотные керамические камни с горизонтальными пустотами: а – для стеновой кладки; б – межэтажных перекрытий

Нами, с учётом достигнутых результатов предлагается к организации производства другие форматы клинкерных высокопустотных камней показанные на рисунке 4 с характеристиками керамики как материала: предел прочности при сжатии – 110-230 МПа; предел прочности при изгибе – 40-65 МПа; водопоглощение – 0,2-2,4 %. Ширина таких камней может составлять 250 и 380 мм в зависимости от требуемых показателей по теплозащите ограждающих конструкций или сопротивлению теплопередаче фасадов зданий. Теплопроводность самих изделий при пустотности 60-80 % составляет 0,8-0,12 Вт/(м · °С), что существенно ниже теплопроводность выпускаемых в настоящее время керамических камней [3]. Сотовая структура таких камней, отсутствие гигроскопичности у клинкерной керамики, весьма низкая паро- и

газопроницаемость исключают условия для образования точки росы в кладке и гарантировано обеспечивают долговечность кладки.

Производятся такие камни могут по традиционной для стеновой керамики экструзионной технологии формования изделий. Особенностью является то, что при формовании изделий на фильере оказывается ультразвуковое воздействие для снижения внутреннего и внешнего трения. Низкая стоимость камневидного глинистого сырья, низкий расход сырья, упрощённая технологическая схема производства с непосредственной садкой изделий на печные вагонетки, возможность использовать в качестве топлива попутные продукты угледобычи и углеобогащения позволят производить изделия с низкой себестоимостью, что составит серьёзную конкуренцию блокам из газобетона автоклавного твердения, которые несмотря на многие отрицательные свойства, но относительно низкую стоимость в настоящее время широко применяются в строительстве.

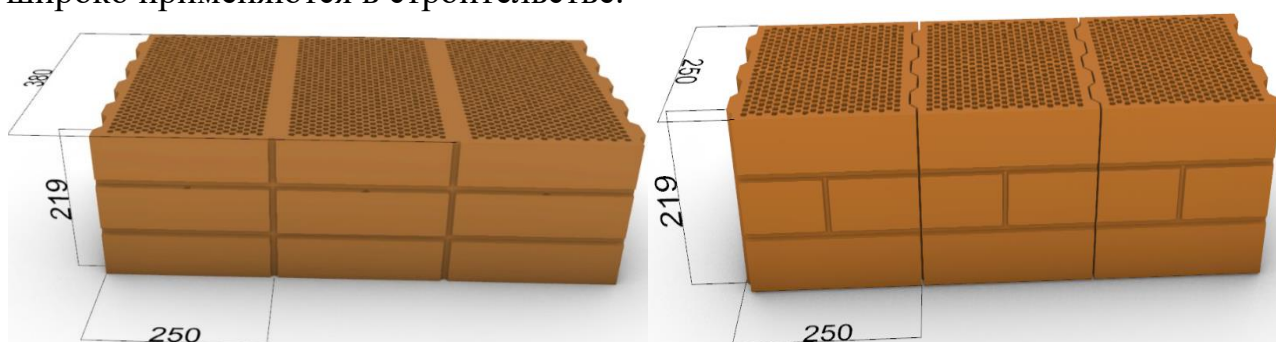


Рисунок 4. Высоко пустотные клинкерные камни сотовой структуры

При нанесении в процессе формования изделий пазов на лицевую поверхность керамического камня имитирующих кладочные швы и которые при кладке заполняются раствором, нанесение ангобов, применение флэш-обжига, позволят получать керамические камни могут выполнять роль и облицовочных изделий, что существенно удешевляет стоимость возведения кладки. Таким образом, предлагаемые нами разработки позволят получать облицовочные высоко пустотные клинкерные блоки для однослойной кладки со средней плотностью 450-700 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводностью 0,8-0,11 Вт/(м · °С) и пределом прочности при сжатии от 10 до 25 МПа.

#### Библиографический список:

1. Котляр, В.Д. Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу / В.Д. Котляр, Ю.В. Терехина, А.В. Котляр // «Строительные материалы». 2015. № 4. С. 72-74.
2. Ужахов, К.М. Сырьевая база Республики Ингушетия для производства клинкерного кирпича. Труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России» / К.М. Ужахов, А.В. Котляр // Новокузнецк, СГИУ-АСИ. 2022. С. 225-228
3. Котляр, В.Д. Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение / В.Д. Котляр, К.М. Ужахов, А.В. Котляр, Ю.В. Терехина // «Строительные материалы». 2023. № 5. С. 4-8.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА ПЕНОСТЕКЛА С ГЕТЕРОГЕННОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

**С.В. Федосов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

**М.О. Баканов**<sup>2</sup>, д-р. техн. наук, доцент

**И.С. Грушко**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

<sup>2</sup>*Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России*

<sup>3</sup>*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова*

**Аннотация.** Теплоизоляционные материалы, включая пеностекло, применяются для снижения теплопотерь в зданиях. Пеностекло обладает низкой теплопроводностью, высокой прочностью и экологической безопасностью. Исследования ученых направлены на контроль процесса синтеза пеностекла и регулирование процесса кристаллизации. Снижение стоимости пеностекла возможно через использование отходов промышленного производства. На примере золошлаковых отходов электрической станции в Ростовской области исследована возможность их повторного использования при получении пеностекла. Сырьевые материалы для пеностекла включают стеклобой, золошлаковую смесь и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ . Синтез пеностекла осуществлялся с использованием антрацита, диоксида циркония, оксида хрома и оксида магния. Все полученные образцы обладают равномерно распределенной пористостью по всему объему, Показано образование кристаллических фаз в аморфном каркасе пеностекла, которые расположены равномерно. Проведены испытания свойств образцов пеностекла, таких как теплопроводность, прочность, плотность и воздействие нагрузки.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, пеностекло, теплопроводность, кристаллизация, золошлаковые отходы, сырьевые материалы, прочность.

Основным направлением решения проблемы тепловых потерь зданий является увеличение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций за счет применения эффективных теплоизоляционных материалов. Актуальным является как создание новых теплоизоляционных материалов с необходимым набором эксплуатационных характеристик, так и совершенствование, оптимизация отдельных свойств существующих материалов, их грамотное применение и использование при проектировании и строительстве новых, а также при реконструкции существующих зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения. Строительный пеностеклянный материал (пеностекло) обладает низкой теплопроводностью, высокой прочностью, морозостойкостью, низкой плотностью. Физические свойства пеностекла зависят, в том числе, и от его макро- и микроструктуры, которые регулируются изменением температурного режима синтеза и модификацией состава путем введения добавок. Основы производства пеностекла были заложены в работах научной школы профессора И.И. Китайгородского и обобщены в монографии [1]. Исследования Демидовича Б.К. также являются важным вкладом в

организацию производства пеностекла [2]. В последующие годы множество отечественных [3-6] и зарубежных [7, 8] ученых провели исследования, которые раскрыли особенности физико-химических процессов получения пеностекла. Если формированию макроструктуры пеностекла посвящено достаточно большое количество работ, то микроструктура межпоровой перегородки пеностекла изучена недостаточно. Ее основу составляет стеклофаза, которая может быть модифицирована различными добавками, и образовывать стеклокристаллическую форму. Известно, что кристаллическая фаза неоднозначно влияет на синтез пеностекла: при вспенивании затормаживает рост ячеек, при стабилизации увеличивает структурно-механическую прочность образовавшейся пены в пиропластичном состоянии. Понимание механизмов воздействия особенностей строения материала на его эксплуатационные свойства позволит создать теоретическую основу для проектирования новых структур материалов и способов их создания, изначально задавая им необходимые значения ключевых физико-механических свойств.

Одной из проблем практического применения пеностекла является его высокая цена. Для решения этой проблемы большинство исследователей ставит целью снижение себестоимости путем использования отходов промышленного производства различной природы в качестве сырьевой базы.

В данном исследовании сырьевые материалы шихты включают стеклобой, золошлаковую смесь (ЗШС) и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ . ЗШС используется для замены стеклобоя и снижения стоимости продукта, а также снижения воздействия на окружающую среду.  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  добавляется для уменьшения температуры плавления из-за высокого содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в ЗШС. В процессе синтеза пеностекла используется антрацит в качестве газообразователя. Для инициации процесса кристаллизации применяются диоксид циркония  $\text{ZrO}_2$  и оксид хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , а в качестве модификатора используется оксид магния  $\text{MgO}$ .

В результате исследования разработан оптимальный температурно-временной режим синтеза пеностекла. Этот режим обеспечивает получение равномерной пористой структуры и различной доли кристаллических фаз в аморфном материале. Температурный режим синтеза: холодные образцы загружены в печь при температуре 25 °С, далее со скоростью 20 °С/мин выполнен нагрев до 500 °С. Выдержка при 500 °С составила 40 мин. Далее со скоростью 20 °С/мин осуществлен нагрев до 825 °С, выдержка при 825 °С - 40 мин. Далее термоударом температура снижена до 600 °С, выдержка при 600 °С – 40 мин. Далее со скоростью 20 °С/мин осуществлен отжиг до температуры 25 °С.

Получены результаты микроструктурных модификаций пеностекла, включая анализ фазового состава (как качественного, так и количественного), а также анализ пространственной макро- и микроструктуры. Микроструктура полученных образцов пеностекла изучена методом растровой электронной микроскопии на примере нулевого состава. Обнаружено образование кристаллических фаз в аморфном каркасе пеностекла в различной пропорции. Стеклофаза имеет относительно однородное строение с преобладанием высоконатриевого стекла при подчиненной роли «блоков» более

низконатриевого богатого алюминием. Присутствуют участки, обогащенные железом или легкими элементами. По границам «блоков» стекла и на внутренних поверхностях пор наблюдаются кристаллы по составу близкие к пироксенам (Рисунок 1,а), кремнезема (Рисунок 1,б).

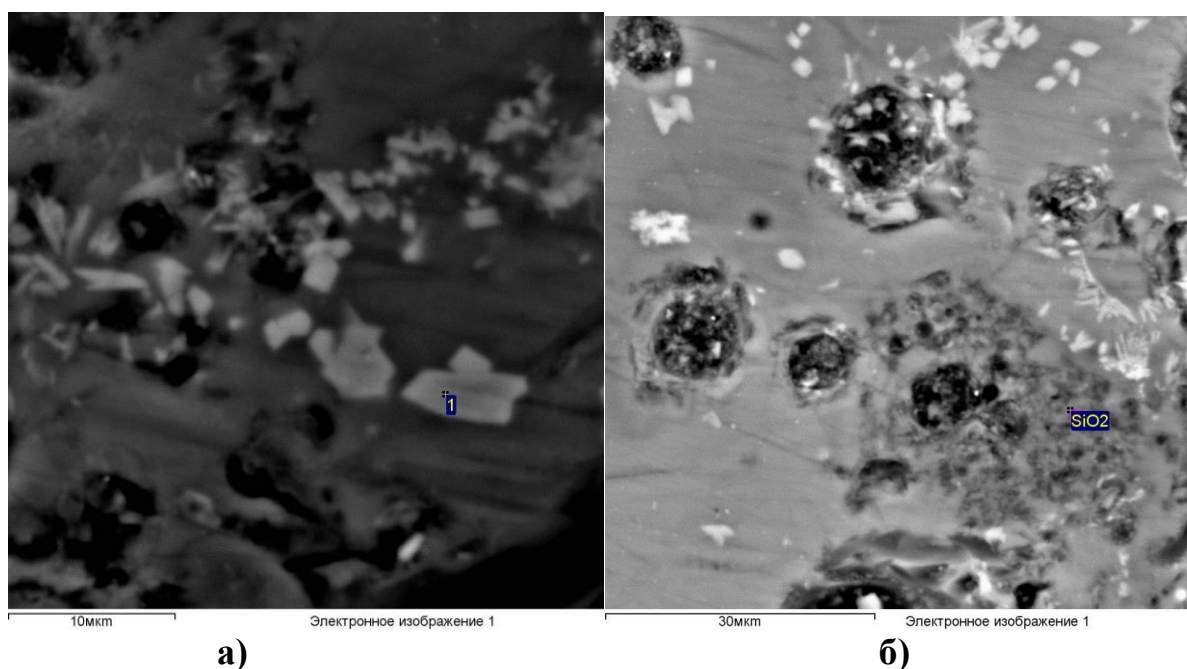


Рисунок 1. Кристаллические фазы пеностекла: а) фаза пироксенового состава, б) фаза кремнеземового состава

Микроструктура дополнительно изучена методом рентгенофазового анализа с целью определения качественного и количественного фазового состава (табл. 1). Результаты подтвердили данные, полученные методом растровой электронной микроскопии: обнаружено присутствие пироксена и кварца.

Таблица 1. Количественный фазовый анализ образцов (мас. %) по данным полнопрофильного анализа методом Ритвельда

Наименование фазы	Состав								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Кварц SiO <sub>2</sub>	10.8	7.7	7.6	8.9	6.1	9.7	5.3	6.2	6.0
Пироксен (диопсид) Ca(Mg,Fe)(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	72.4	69.9	67.9	66.6	49.1	67.5	53.8	66.3	44.8
Кристобалит SiO <sub>2</sub>	15.5	9.2	12.4	5.1	2.2	4.0	1.9	3.8	3.2
Нефелин Na <sub>3</sub> K(AlSiO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>	1.3	5.3	2.0	1.3	6.7	5.0	6.1	5.1	5.8
Эсколаит Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	7.9	10.1	—	—	—	—	4.3	2.3
Волластонит Ca(SiO <sub>3</sub> )	—	—	—	18.0	36.0	13.8	32.9	13.9	37.7

В соответствии с требованиями ГОСТ 33949-2016 «Изделия из стекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия» определены теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки образцов пеностекла. Исследования проведены для девяти серий образцов пеностекла с



целью оценки их эксплуатационных свойств. Получены значения следующих параметров в указанных диапазонах: эффективная теплопроводность составляет от 0,1121 до 0,1694 Вт/м·К, плотность – от 658,502 до 900,134 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии – от 7,52 до 29,70 МПа, прочность на растяжение при изгибе – от 0,34 до 0,90 МПа, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям – от 9,78 до 19,44 МПа, прочность при действии сосредоточенной нагрузки (коэффициент упругости) – от 6637,97 до 27314,43 кН/м, водопоглощение – от 0,746 до 28,127 %, адсорбционная влажность – от 0,011 до 0,059 %.

В ходе проведенного исследования выявлен механизм объемной кристаллизации стекла, который основывается на химической дифференциации стекла и приводит к неоднородности его структуры. В роли центров кристаллизации выступали как уже присутствующие в сырьевых компонентах кристаллические фазы (в составе золошлака), так и дополнительные инициаторы кристаллизации, такие как оксид хрома, диоксид циркония и оксид магния. Для создания дополнительных кристаллических фаз и получения равномерной пористой структуры в состав пеностекла был введен технический мел в качестве источника кальция.

Все образцы пеностекла, рассмотренные в данном исследовании, обладают равномерно распределенной пористостью по всему объему. Кроме того, в аморфной матрице материала присутствуют кристаллические включения, которые расположены равномерно. Обнаружено, что поры имеют размеры в нанометровом диапазоне, а межпоровые перегородки имеют толщину, составляющую несколько десятков нанометров. Таким образом, проведенные микротомографические исследования подтверждают, что разработанный теплоизоляционный материал обладает необходимыми характеристиками равномерной пористой структуры и кристаллическими включениями в аморфной матрице.

Результаты исследования позволяют оценить эксплуатационные свойства пеностекла для различных серий образцов и выбрать оптимальные параметры в соответствии с конкретными требованиями и условиями применения.

#### **Библиографический список:**

1. Китайгородский, И.И. Пеностекло / И.И. Китайгородский, Т.Н. Кешишян. – М.: Промстройиздат, 1953. 80 с.
2. Демидович, Б. К. Производство и применение пеностекла / Б. К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1972. 301 с.
3. Кетов, А.А. Тенденции развития технологии пеностекла / А.А. Кетов, А.В. Конев, И.С. Пузанов, Д.В. Саулин // Строительные материалы. 2007. № 9. С. 28-31.
4. Минько, Н.И., Основные направления развития технологии производства и применения пеностекла / Н.И. Минько, О.В. Пучка // Строительные материалы. 2007. № 9. С. 17-20.
5. Федосов, С. В. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, С. Н. Никишов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 110-116.

6. Федосов, С. В. Пеностекло: особенности производства, моделирование процессов теплопереноса и газообразования / С. В. Федосов, М. О. Баканов // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 108-113.
7. Sha, B. Analysis of the Temperature Field and Deformation Characteristics of Foam Glass Thermal Insulating Decorative Integrated Board System / B. Sha, H. Xiong, H. Zheng, K. Yuan, M. Wen, Y. Zhang // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 38. An. 102299.
8. M'ear, F. O. Effect of the process atmosphere on glass foam synthesis: A high-temperature environmental scanning electron microscopy (HT-ESEM) study / F. O. M'ear, R. Podor, J. Lautru, S. Genty, R. Lebullenger // Ceramics International. 2021. Vol. 47. pp. 26042-26049.

## ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ АНТИПИРЕНАМИ ПРИ АКТОКЛАВИРОВАНИИ

**С.В. Федосов**<sup>1,2</sup>, д-р тех. наук, академик РААСН, профессор

**А.А. Лазарев**<sup>3</sup>, канд. пед. наук, кан. тех. наук, доцент

**Д.Е. Цветков**<sup>3</sup>, соискатель ученой степени кан. тех. наук

**В.Г. Котлов**<sup>2</sup>, д-р тех. наук, профессор

**А.Ю. Комлёв**<sup>3</sup>, соискатель ученой степени кан. тех. наук

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

<sup>3</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

**Аннотация.** Авторами статьи предлагается способ определения изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины при пропитке девятипроцентным раствором этой соли при различных условиях обработки в автоклаве. Проведен эксперимент, результаты которого позволили получить уравнение динамики изменения массовой доли гидрокарбоната натрия в смыве со слоя древесины в продольном срезе с образца. Определена величина коэффициента детерминации для полученного уравнения. При послойном рассмотрении глубины пропитки древесины водным раствором гидрокарбоната натрия в спилах слоев вдоль и поперек волокон наблюдалась анизотропия.

**Ключевые слова.** Древесина, огнезащита, антипирен, методика, концентрация, гидрокарбонат натрия.

Древесина состоит из органических веществ, химический состав у разных пород одинаков. Абсолютно сухая древесина содержит 49% углерода, 44% кислорода, 6% водорода и 0,1-0,3% азота. После сжигания древесины остается зола, содержащая кальций, калий, магний и другие элементы. В древесине содержится 45-60% целлюлозы, 15-35% лигнина и 15-25% гемицеллюлозы. Использование древесины в качестве строительного материала имеет ряд достоинств: низкая теплопроводность, высокая прочность, упругость, удобство для обработки, долговечность. Однако существенным недостатком древесины является её горючесть. При её нагревании до 110°C происходит удаление влаги и начинается выделение газообразных продуктов термической деструкции. При нагреве до 150°C поверхность древесины со стороны теплового воздействия становится желтого цвета, увеличивается выделение количества летучих веществ. При температуре 250-300°C воспламеняются продукты разложения древесины. Температура самовоспламенения древесины находится в диапазоне

350...450 °С. Горение включает два периода: горение газов и горение древесного угля [1]. Огнезащита древесины осуществляется разными способами. Наиболее доступным способом является покрытие огнезащитными красками и обмазками. Огнезащитные краски включают связующее вещество, наполнитель и пигмент. Антипирен является наполнителем в огнезащитных красках. Понимание химического состава древесины важно для оценки качества пропитки антипиренами. Результаты исследований могут быть использованы при планировании экспериментов.

Проблемы изучения свойств конструкций из древесины были рассмотрены в исследованиях многих ученых [2-13]. При этом вопрос определения глубины пропитки древесины растворами неорганических солей не был должным образом рассмотрен.

Объектом исследования является древесина сосны с влажностью до 12%. Предметом исследования является динамика изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины. Исследование проводилось при различных условиях автоклавирования.

Задачи исследования:

- подтвердить рабочую гипотезу о анизотропии древесины, описать методику проведения исследования образцов слоев древесины.
- установить закономерность изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины.
- получить уравнение, описывающие динамику изменения концентрации гидрокарбоната натрия в срезах с образцов.

Использовались сосновые бруски с сечением 0,05×0,05 м и длиной 0,25 м. Бруски были радиальными, то есть из сердцевинной и центральной части бревна. Влажность древесины измерялась прибором ЕМТ 01 и не превышала 12%. Древесина с более высокими показателями влажности не допускалась к исследованию. Использовались три бруска для исследования. Автоклавирование проводилось в течение 6 часов при 4 атмосфере и 120°С. Испытания проводились в 2 этапа: распиливание вдоль волокон и поперек волокон. Средняя толщина срезаемых слоев составляла 1,5 мм. Смыв с каждого слоя осуществлялся дистиллированной водой. Время погружения слоя в воду варьировалось от 20 минут до 24 часов. Концентрация гидрокарбоната натрия определялась при помощи рефрактометра.

В результате проведенного исследования:

- подтверждена анизотропия древесины при послойном рассмотрении глубины пропитки раствором гидрокарбоната натрия.
- предложена методика исследования слоев древесины, пропитанной раствором гидрокарбоната натрия при автоклавировании.
- установлена закономерность изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины после огнезащитной обработки.
- получено уравнение позволяет рассчитать динамику изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины.

Из рисунка 1 видно, что зависимость  $M_d = f(N)$  носит логарифмический характер. По итогам аппроксимации данных получено уравнение (1):

$$M_d(N) = -0,515 \ln(N) + 1,433 \quad (1)$$

где  $M_d$  – массовая доля гидрокарбоната натрия в водном растворе на первом этапе эксперимента после нахождения исследуемого образца в течение 24 часов, %,

$N$  – номер среза слоя древесины размером 1,5 мм, ед.,  $1 \leq N \leq 5$ . Коэффициент детерминации для уравнения (1)  $R^2 = 0,946$ .

На втором этапе исследования послойной динамики в смывах спилов в течение 24 часов наблюдений не установлено. Массовая доля соли в смыве с каждого из пяти спилов с образца была равна 0,2 % через 20 минут и 0,8 % через 24 часа.

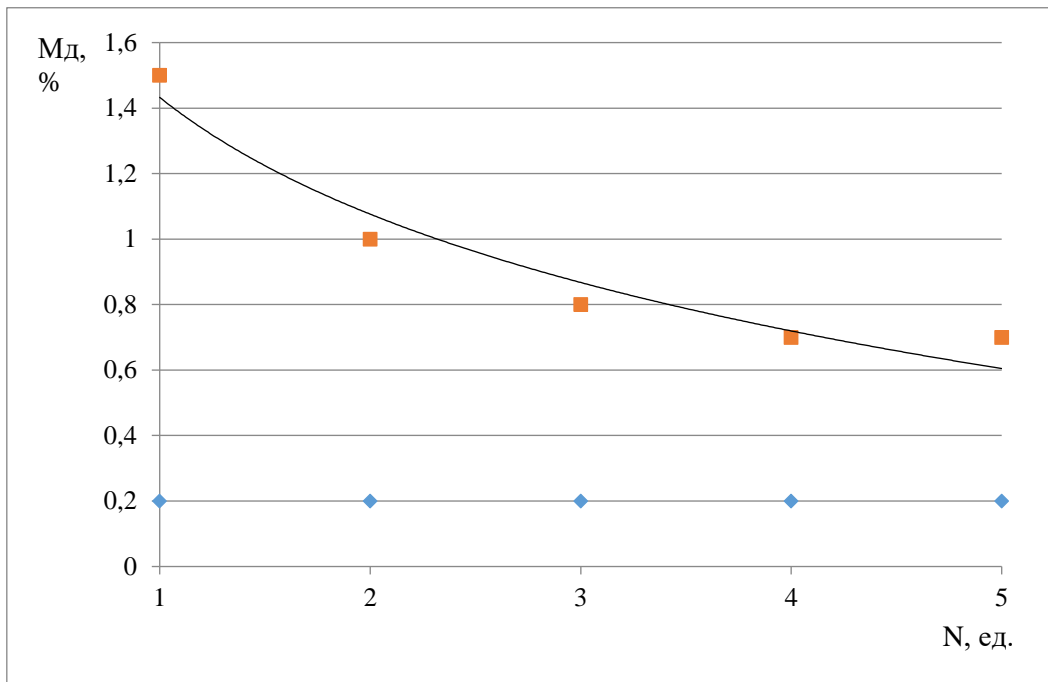


Рисунок 1. Распределение величины массовой доли гидрокарбоната натрия в смыве по слоям древесины

Полученные результаты объясняются взаимодействием компонентов твердой и жидкой фаз. Отвод от поверхности спилов образцов древесины в объем жидкости молекул (ионов), переходящих в раствор соли.

Величину диффузионного потока ( $\Pi$ ) для гетерогенного процесса описывает уравнение [8, 9]:

$$\Pi = \beta (C_1 - C_\tau) \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи;

$C_1$  – максимальная концентрация гидрокарбоната натрия, соответствующая его растворимости при данной температуре;

$C_\tau$  – переменная концентрация гидрокарбоната натрия, которая зависит от момента её определения  $\tau$  (через 20 минут и 24 часа).

При сопоставлении результатов эксперимента можно прийти к выводу об их непротиворечивости с описанными в уравнениях гетерогенными процессами внешнего массопереноса [7, 9].

### **Библиографический список:**

1. Chemical properties of wood <http://www.drevesinas.ru/woodstructura/chemical/1.html>.
2. S. Roshchina, M. Lukin, M. Lisyatnikov, Compressed-bent reinforced wooden elements with long-term load, in Proceedings of the Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE 2019, 19-20 November 2019, St. Petersburg, Russia (2020)
3. S.V. Fedosov, A. A. Lazarev, V.G. Kotlov, V.G. Malichenko, D.E.Tsvetkov, Suspended ceiling safety for firefighters in case of fire in the attic, in Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere. ICCATS 2022, 4-10 September 2022, Sochi, Russia (2022)
4. E.Yu. Polishchuk, A.B. Sivenkov, S.K. Kenzhehan, Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection. Magazine of Civil Engineering. № 5, 81. (2018)
5. M.V. Gravit, D. Serdjuks, N. Vatin, Y.G. Lazarev, M.O. Yuminova, Magazine of Civil Engineering. № 3, 95 (2020)
6. D. Kasymov, M. Agafontsev, V. Perminov, P. Martynov, E. Loboda, V. Reyno, Fire, 3, 4 (2020).
7. С.В. Федосов, В.Ф. Степанова, В.Е. Румянцева и др., Коррозия строительных материалов: проблемы, пути решения: монография (2022)
8. С.А. Бороздин, Г.А. Гитцович, В.В. Ветров, С.С. Морозов, Современные проблемы гражданской защиты, 3, 36 (2020)
9. В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов, Химия в строительстве (1969)
10. D. Ioannidou, G. Sonnemann, R. Pommier, G. Resources Habert, Conservation and Recycling, 146, (2019)
11. J. Guo, H. Zhou, M. Dong, M. Yu, Y. Yin, J.S. Stevanic, L. Salmén, Wood Science and Technology, 52, 1 (2018)
12. О.А. Vladimirova, V.V. Sopilov, A.V. Bobyleva, B.V. Labudin, E.V. Popov, Construction of Unique Buildings and Structures, 4, 97 (2021)
13. E.V. Popov, A.V. Ruslanova, V.V. Sopilov, N. Zdralovic, S.M. Mamedov, B.V. Labudin, Russian Forestry Journal, 4, 376 (2020)

# ИНЪЕКЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОСАДОЧНОСТИ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.И. Харченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук

И.Я. Харченко<sup>2</sup>, д-р техн. наук

А.И. Панченко<sup>2</sup>, д-р техн. наук

В.Г. Хозин<sup>3</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр подземных сооружений

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>3</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Аннотация.** Показано, что устройство противofильтрационных завес (ПФЗ) с использованием различных буро-инъекционных технологий следует рассматривать как наиболее эффективный метод по защите от развития карстово-суффозионной опасности при строительстве и эксплуатации транспортных и других сооружений. Для устройства ПФЗ и ликвидации карстовых разуплотнений, в зависимости от инженерно-геологических и гидрогеологических условий на участке будущего строительства, возможно применение технологии струйной цементации, манжетной технологии или их комбинации. Специальные инъекционные смеси на минеральной основе целесообразно применять для уплотнения и упрочнения карстовых горных пород. Эти минеральные специальные инъекционные смеси являются более технологичными, а грунтобетон ПФЗ и уплотненных карстовых пород является более долговечным по сравнению с грунтом, уплотненным инъекционными смесями на полимерной основе или на основе жидкого стекла. Эффективной инъекционной смесью для устройства ПФЗ при защите от карстово-суффозионной опасности, является инъекционная смесь «ПФС+», которую следует рассматривать в качестве альтернативы инъекционным смесям на основе бентонита, полимеров или жидких стёкл. Учитывая высокую вероятность развития сульфатной коррозии при инъектировании трещиноватых гипсовых пород, показана эффективность применения минерального тонкодисперсного вяжущего - микроцемента «Интроцем» на шлаковой основе в манжетной технологии. С целью ликвидации карстовых разуплотнений наиболее предпочтительным является применение специальной закладочной инъекционной смеси «ЗИС», которая изготавливается на основе минерального композиционного вяжущего. Опыт использования технологии «Super-Jet» при различных геотехнических условиях и проектных решениях показал, что прочность грунтобетонного массива, сформированного по данной технологии, может достигать 15 МПа, а при устройстве противofильтрационных завес обеспечивается их полная водонепроницаемость.

**Ключевые слова:** инъекционные технологии, инъекционные минеральные вяжущие, карстовые разуплотнения, противofильтрационные завесы.

## 1. Введение

Значительная часть территории России, включая районы западного Приуралья, Русской равнины, Приангарья и многие другие районы Сибири,

Кавказа и Дальнего Востока находится в условиях развития карстово-суффозионной опасности [1,2,3]. В этой связи, проектирование и строительство транспортных сооружений различного назначения, включая мостовые и дорожные сооружения, необходимо выполнять с учётом реализации соответствующих защитных мероприятий. Степень развития карстов определяется склонностью горных пород к растворению, гидрогеологическими условиями и геологическим строением участка, рельефом местности, степенью трещиноватости пород, климатическими условиями, а также другими природными и техногенными факторами [4,5,6]. Различают два вида суффозии — механическую и химическую. При механической суффозии фильтрующаяся вода размывает горные породы и перемещает глинистые, илистые или песчаные частицы во взвешенном состоянии по руслу подземных или надземных рек; при химической коррозии грунтовая вода растворяет горные породы (гипс, соли, карбонаты) вплоть до их полного исчезновения. При одновременном действии этих двух видов суффозии применяют термин — механохимическая суффозия [9,10,11]. Этот вид суффозии развивается породах, где растворяется цементирующее вещество с одновременным выносом глинистых или иловых частиц.

Установлено, что наиболее интенсивному развитию подвержены горные породы, содержащие растворимые водой соли, гипс, известняки, доломиты и магнезиты. Одним из главных факторов, ускоряющих развитие карстовых процессов, является повышение интенсивности фильтрационных процессов при увеличении степени трещинообразования и обводнённости горных пород [12,13]. Наиболее интенсивно развиваются карстовые процессы в трещиноватых породах при наличии трещин шириной раскрытия более 1мм, что обеспечивает интенсивную и свободную циркуляцию воды, сопровождающуюся преобразованием трещин в крупные каналы и пещеры. Этот процесс, получивший название коррозии, развивается до уровня естественного водоупора [14,15]. При разработке и реализации мероприятий по защите транспортных сооружений в условиях карстово-суффозионной опасности (КСО), первоочередным является устройство противофильтрационных завес (ПФЗ), а также защитных экранов.

## **2. Уплотнение и упрочнение грунтов для защиты от карстово-суффозионной опасности**

Способы уплотнения и упрочнения грунтов, применяемые для защиты от КСО, назначаются исходя из геотехнических задач, направленных на формирование противофильтрационных завес в структуре трещиноватых горных пород, а также для упрочнения грунта и ликвидации уже сформировавшихся карстовых полостей [16,17]. В отдельных случаях достаточным и экономически обоснованным мероприятием является устройство защитных или разгружающих экранов, размещаемых между транспортным сооружением и сформировавшимися карстовыми породами [18,19]. Кроме того, эффективным решением может быть устройство грунтобетонной опорной пяты для свайного фундамента, которая обеспечит необходимую несущую



способность свай даже в случае развития карстово-суффозионных процессов в основании сооружения [6,7,20].

Геотехнические противокарстовые мероприятия осуществляются путем преобразования свойств грунтового массива в зоне фундаментов или в грунтах покрывающей толще. Геотехнические мероприятия выполняются несколькими способами (или их комбинацией):

- ликвидация карстовых полостей по технологии струйной цементации, по манжетной или комбинированной технологии;
- инъекционное закрепление трещиноватых закарстованных пород по манжетной технологии восходящими заходками;
- закрепление грунтов покрывающей толщи по технологии струйной цементации, манжетной или комбинированной технологии.

Геотехнические противокарстовые мероприятия разделяют на два типа:

- мероприятия 1-го типа направлены на исключение условий образования, развития и проявления карста;
- мероприятия 2-го типа направлены на обеспечение прочности и устойчивости сооружения при возможном развитии карстовых процессов.

Геотехнические мероприятия типа 1 предполагают сплошное закрепление толщи карстовых пород в результате заполнения инъекционными смесями трещин и каналов в зоне трещиноватых грунтов. Геотехнические мероприятия типа 2 предполагают закрепление грунтов в толще над карстовыми породами, в основании сооружения, упрочнение поверхностных карстовых слоёв или сочетание указанных мероприятий. В случае применения свайных фундаментов, наиболее эффективным решением является устройство грунтобетонной опорной пяты в основании свай [20].

Исходя из имеющегося опыта и в зависимости от конструктивного исполнения фундаментов, особенностей инженерно-геологических условий площадки строительства, предполагаемого характера развития карстовых процессов и т.д., цементация закарстованных пород (геотехнические мероприятия типа 1) и закрепление грунтов покровной толщи (геотехнические мероприятия типа 2) могут выполняться по площадной или локальной схемам.

Площадная схема предусматривает выполнение противокарстовых мероприятий в границах всего объекта или участка (а при необходимости - за его границами). Локальная схема предусматривает выполнение работ в границах отдельных участков или в отношении отдельных конструктивных элементов (например, цементация основания под пятой свай-стоек). При проектировании противокарстовых мероприятий по площадной схеме скважины рекомендуется располагать по сетке с регулярным шагом.

### **3. Инъекционные смеси для защиты от КСО**

Составы и свойства инъекционных смесей, предназначенных для уплотнения и упрочнения закарстованных пород, необходимо назначать с учетом характера и степени их трещиноватости, а также и гидрогеологических условий участка производства работ. Оптимальные составы растворов следует

подбирать по результатам лабораторных исследований и уточнять в рамках выполнения опытно-производственных работ.

### 3.1. Инъекционные смеси для устройства противофильтрационных завес

Уплотнение и упрочнение трещиноватой породы заключается в нагнетании под давлением через инъекционные скважины специальных смесей, которые после затвердевания формируют сплошной защитный экран в качестве ПФЗ, с заданной водонепроницаемостью, что исключает развитие процесса растворения горных пород и обеспечивает надёжную эксплуатацию транспортного или иного сооружения.

Эффективной инъекционной смесью для устройства ПФЗ при защите от КСО, является инъекционная смесь «ПФС+», которую следует рассматривать в качестве альтернативы инъекционным смесям на основе бентонита, полимеров или жидких стёкл. На основании выполненных исследований установлены прочностные (Рисунок 1) и реологические (Рисунок 2) характеристики «ПФС+», которые определяют эффективные области его применения. Из Рисунок 1 видно, что инъекционная смесь «ПФС+» является быстротвердеющей. На третьи сутки она набирает около 80-90% прочности от прочности в возрасте 28 суток.

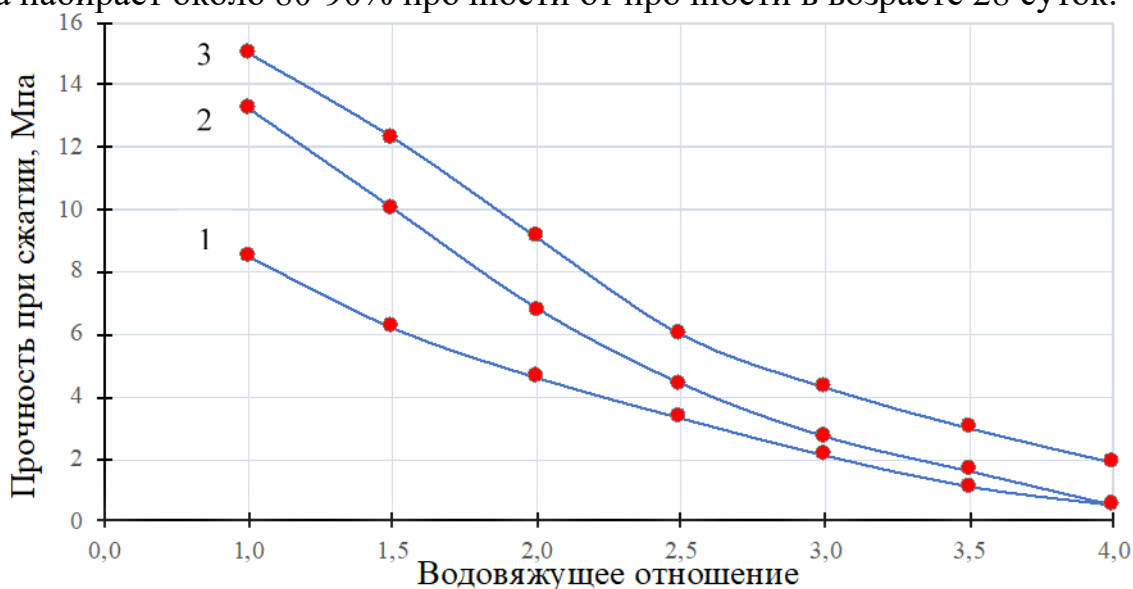


Рисунок 1. Влияние водовязущего отношения на прочность при сжатии смеси «ПФС+», соответственно через 24 часа (1); 3сут. (2); 28сут. (3)

При устройстве ПФЗ в трещиноватых породах и песчаных грунтах применяются растворы с водовязущим отношением В/В = 1,0...2,5, в зависимости от проектной прочности. На основании экспериментальных исследований установлено, что «ПФС+» с водовязущим отношением В/В = 2,5 и более обладает условной вязкостью по воронке Марша сопоставимой с условной вязкостью воды (Рисунок 2).

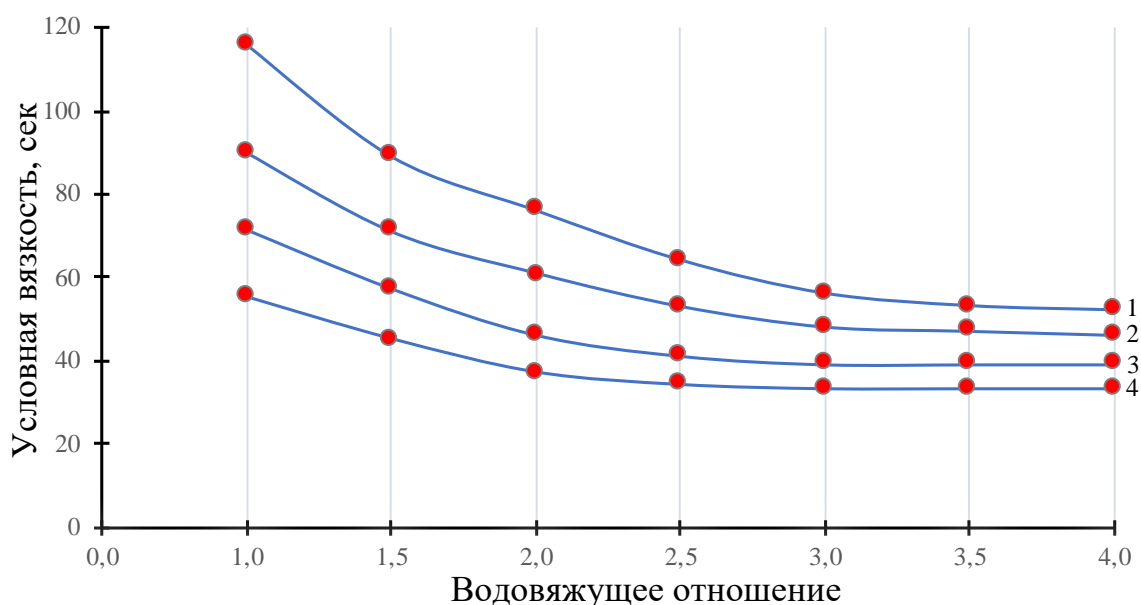


Рисунок 2. Влияние водовяжущего отношения на условную вязкость «ПФС+»: 1,2,3,4 вязкость соответственно через 90мин; 60мин; 30мин и после приготовления.

Это обеспечивает её равномерное распределение в структуре трещиноватых пород с последующим затвердеванием и надёжной кольматацией трещин с шириной раскрытия до 0,5 мм. Этим обеспечивается практически полная водонепроницаемость трещиноватых пород, что исключает дальнейшее развитие суффозионных процессов и образование карстовых полостей в основании сооружений.

Инъекционная смесь на основе «ПФС+» может нагнетаться как с применением односторонних, так и двусторонних разжимных пакеров по манжетной технологии с целью формирования грунтобетонных массивов диаметром до 1,2 м и более в зависимости от вида грунта.

### 3.2. Инъекционные смеси для уплотнения и упрочнения песчаных грунтов и трещиноватых горных пород

В случае необходимости формирования ПФЗ в зоне песчаных грунтов и трещиноватых пород с шириной раскрытия трещин менее 0,5мм применяется инъекционное закрепление по манжетной технологии с применением особо тонкодисперсных минеральных, как правило композиционных [21], вяжущих или микроцементов в режиме пропитки.

Учитывая высокую вероятность развития сульфатной коррозии при инъектировании трещиноватых гипсовых пород, был применен микроцемент «Интроцем» на шлаковой основе и с использованием манжетной технологии. При этом, весь расчетный объем инъекционной смеси после окончания процесса инъектирования размещался в капиллярно-пористой структуре грунта, обеспечивая её уплотнение, упрочнение и полную водонепроницаемость. Инъектирование выполнялось при низком давлении до 8-10 бар, в режиме пропитки, с сохранением природной структуры грунта, что исключает вероятность каких-либо неконтролируемых потерь инъекционной смеси.

Гарантируемое формирование сплошности грунтобетонного массива, а также достижение его проектных характеристик обеспечивается управляемым процессом инъектирования, при строгом соблюдении расчетных параметров технологического регламента.

Технология предусматривает формирование водонепроницаемого массива грунта с прочностью при сжатии не менее 2 МПа, глубиной пропитки до 1,2...1,8 м (Рисунок 3). Для обеспечения сплошности ПФЗ необходимо выполнять инъекцию структуры грунта в режиме пропитки с применением раствора низкой вязкости на основе особо тонкодисперсных минеральных вяжущих или микроцементов с дисперсностью не более  $D_{95} < 6$  мкм. Инъекционная смесь приготавливалась с В/В=1,5...2,5, с вязкостью по воронке Марша 32...34с и седиментацией не более 5%, со сроком загустевания после завершения инъекционных работ в период до 90 мин.

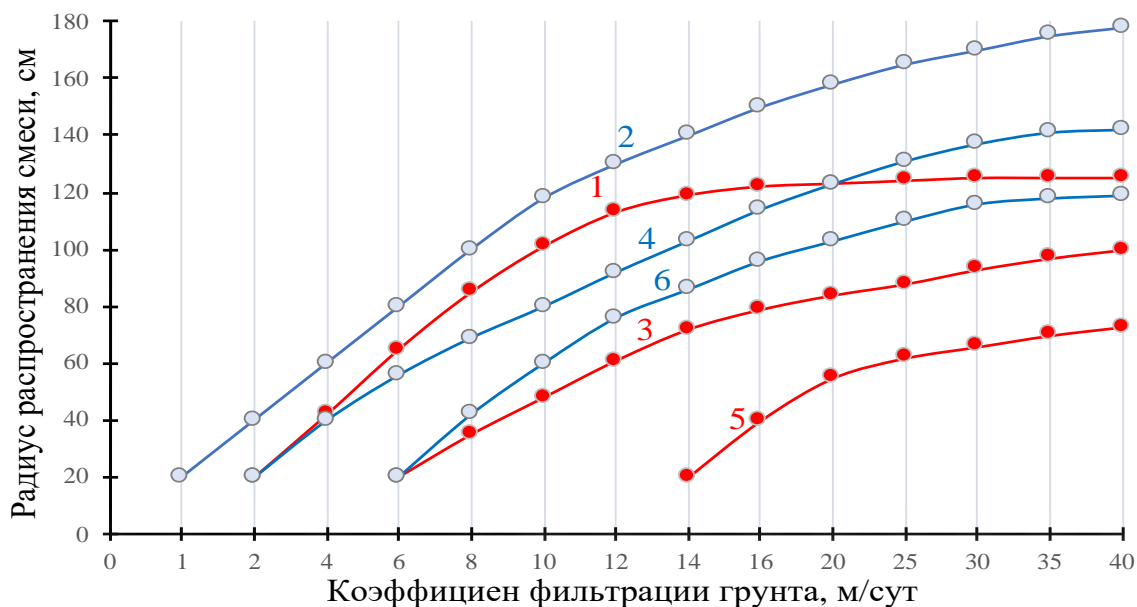


Рисунок 3. Распределение инъекционной смеси «Интроцем» в структуре грунта в зависимости от его фильтрационной способности и дисперсности вяжущего:

1,3,5 - без предварительной обработки грунта; 2,4,6 - с предварительной обработкой грунта инъекцией воды с ПАВ; инъекционная смесь при В/В=3,0; 1,2 - Интроцем-экстра; 3,4 - Интроцем-ультра; 5,6 - Интроцем-стандарт.

«Интроцем» является экологически чистым продуктом, совместимым по минеральному составу с грунтом. В зависимости от дисперсности частиц, содержащихся в количестве 95 % от массы вяжущего, «Интроцем» классифицируется на 3 вида: «Интроцем-Экстра» при  $d_{95} \leq 5,5$ ; «Интроцем-Ультра» при  $d_{95} \leq 9,0$ ; «Интроцем-Стандарт» при  $d_{95} \leq 15,5$ .

На основании комплексных лабораторных исследований определены эффективные области применения инъекционных смесей на основе микроцемента «Интроцем», которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Применение инъекционных смесей на основе микроцемента «Интроцем» для устранения фильтрации воды через трещиноватые породы

Ширина раскрытия трещин, мм	Интроцем-Экстра	Интроцем-Ультра	Интроцем-Стандарт
0,1... 0,7 мм	В/Ц = 1,0÷2,5 Р <sub>н</sub> ≤ 1,5 МПа	Нет	Нет
0,8...1,5 мм	В/Ц = 1,0÷2,5 Р <sub>н</sub> ≤ 1,2 МПа	В/Ц = 1,0÷2,5 Р <sub>н</sub> ≤ 1,2 МПа	Нет
1,5... 3,0 мм	Нет	Нет	В/Ц = 1,0÷2,5 Р <sub>н</sub> ≤ 1,0 МПа

Комбинация технологии 2-х компонентной струйной цементации (Jet-2) с манжетной инъекционной технологией цементации грунтов, получившей название «Super-Jet», имеет целью совместить высокую интенсивность производства работ, являющейся существенным преимуществом двухкомпонентной струйной цементации, с необходимостью придать закрепляемому массиву повышенную прочность и непроницаемость, которая гарантированно достигается применением манжетной технологии с использованием инъекционных смесей на основе микроцементов.

Результаты полевых испытаний, а также опыт практического применения технологии. «Super-Jet», при различных геотехнических условиях и проектных решениях показал, что прочность грунтобетонного массива, сформированного по данной технологии, может достигать 15 МПа, а при устройстве противофильтрационных завес обеспечивается их полная водонепроницаемость. Причём, усиленная таким образом противофильтрационная завеса, может рассматриваться в качестве опорного элемента для для различного вида фундаментов надземных конструкций.

### 3.3. Инъекционные смеси для ликвидации карстовых полостей

С целью ликвидации карстовых разуплощений эффективным является применение специальной закладочной инъекционной смеси «ЗИС», которая изготавливается на основе минерального композиционного вяжущего и имеет следующие отличительные свойства:

- инъекционная смесь легко перекачивается и сохраняет свою подвижность в период до 120 мин;
- после завершения инъекционных работ быстро загустевает и приобретает структурную прочность через 24 ч около 0,1...0,15 Мпа;
- при твердении во влажных условиях в период до 6 мес.. прочность увеличивается до 1,5...2,0 Мпа и приобретает свойства тугопластичной глины.

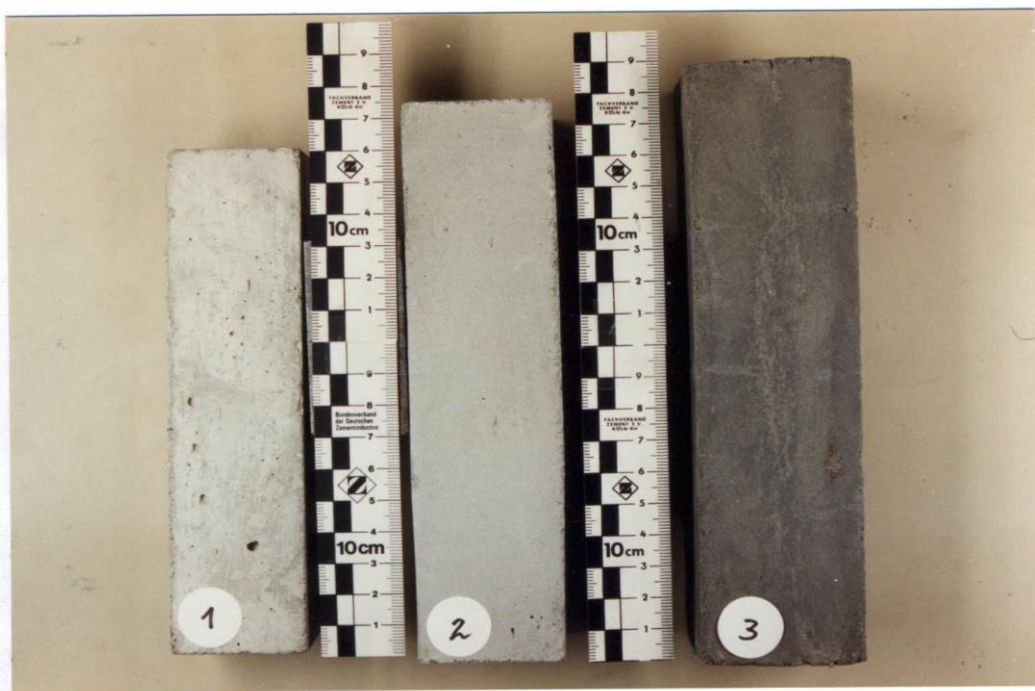


Рисунок 4. Инъекционные смеси для ликвидации карстовых разуплотнений: 1-инъекционная смесь на основе композиционного вяжущего без расширяющейся добавки с плотной структурой (ЗИС-П); 2 – инъекционная смесь на основе композиционного вяжущего с расширяющейся добавкой с плотной структурой (ЗИС-ПР). Объёмное расширение 7-10%; 3- – лёгкая инъекционная смесь на основе композиционного вяжущего с расширяющейся добавкой и мелкопористой структурой (ЗИС-ЛР). Объёмное расширение до 15-20%.

Подбор состава инъекционной смеси «ЗИС» смеси выполняется в лабораторных условиях в соответствии с проектными требованиями. В процессе производства работ определяется прочность, реологические параметры смеси, седиментационная устойчивость, величина усадки и расширения. Контроль соответствия фактического состояния заполненного карстового пространства проектным требованиям выполняется с применением методов прямого отбора проб и кернов, а также с применением геофизических и сейсмоакустических методов определения сплошности сформированного массива.

Для сплошного закрепления массива, шаг скважин следует назначать исходя из условия взаимного пересечения зон закрепления смежных скважин на величину не менее 10% расчетного радиуса закрепления. Нагнетание инъекционного раствора проводят непрерывно до наступления отказа, за который следует принимать либо полное прекращение поглощения раствора, либо снижение удельного расхода раствора до установленной проектом величины при проектном давлении отказа. При отсутствии особых требований в проекте, за отказ в поглощении раствора рекомендуется принимать снижение расхода раствора до 2 л/мин при проектном давлении до 15 бар.

### Библиографический список:

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. Аникеев А. В. Провалы и оседания земной поверхности в карстовых районах: моделирование и прогноз. Дисс... канд. геолого-минералогических наук. М. 2014. 142 с.
3. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л. и др. Методика и результаты комплексного изучения карстово-суффозионных процессов в г. Москве // Инженерная геология. 1989. № 6. С.77–94.
4. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 217–228.
5. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
6. Лыкошин А.Г., Молоков Л.А., Парабучев И.А. Карст и строительство гидротехнических сооружений. М.: Гидропроект, 1992. 323 с.
7. Меркин В.Е, Маковский Л.В., Гарбер В.А. Проектирование и строительство тоннелей в закарстованных грунтах// М., ТИМР, Вып. 3, 1994, 61с.
8. Рагозин А.Л., Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33–52.
9. Родионов Н.В. Карст Европейской части СССР, Урала и Кавказа. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 174 с.
10. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: Изд-во ПНИИС Госстроя России, 1995. 167 с..
11. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
12. Толмачев В.В. О допустимых рисках строительства в карстовых районах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 19–21.
13. Толмачев В. В. Методы оценки карстовой опасности для строительных целей: состояние и перспективы // Геоэкология. 2012. № 4. С. 354–363.
14. Толмачев В. В., Ройтер Ф. Инженерное карстование. М.: Недра, 1990. 152 с.
15. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
16. Clayton, C. R. I. Managing Geotechnical Risk. The Institution of Civil Engineers, London, United Kingdom. 2001.
17. Fell Robin, Ho Ken, Lacasse Suzanne, Leroi E. A. Framework for landslide risk assessment and management. 2005.
18. Milanović P.T. Geological Engineering in Karst: dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling. Belgrade: Zebra, 2000. 347 p.
19. Tolmachev V, Leonenko M. Experience in collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia // Karst management / Editor Van Beynen P. Dordrecht-Heidelberg - London-New York, Springer, 2011. P. 75-102
20. Панченко А. И., Харченко И. Я., Алексеев С. В. Микроцементы. М.: Издательство АСВ, 2014. 76 с.
21. Panchenko A. I, Kharchenko I. Ya and Mirzojan M. Soil strengthening using fine composite binder based on carbide slurry. ICMTMTE 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 032032 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/971/3/032032.

## ИЗМЕНЕНИЕ ГРУППОВОГО СОСТАВА БИТУМА ПРИ ЕГО РЕКУПЕРАЦИИ

**Н.И. Шестаков**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

**Н.В. Хохлова**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность извлечения битума из кровельных материалов химическим методом, с применением органических. Среди которых: технический керосин, трихлорэтилен, хлороформ и тетрахлорметан. Технологическая схема процесса химической рекуперации состоит из подготовительного и основного этапа. Для определения степени воздействия различных органических растворителей был определен групповой химический состав полученных битумов, методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением. Установлено, что минимальное воздействие на состав и количество групповых элементов происходит при рекуперации в среде трихлорэтилена.

**Ключевые слова:** рекуперационный битум, растворители, асфальтены, хроматографический анализ, групповой химический состав, кровельный материал.

Многие битумосодержащие материалы содержат в своем составе высокое количество битума, что является потенциально высоким сырьем и дает возможность его извлечения. Существуют такие способы как химический, термический и ультразвуковой. Более подробно рассмотрен способ с помощью химических компонентов, которые могут растворять и извлекать битум. В качестве растворителей используются составы, представленные в Таблице 1. и анализируем как они влияют на групповой химический состав. Определение группового состава битума позволяет получить информацию об углеводородных соединениях, а также для определения его технологических и эксплуатационных свойств и характеристик [1, 2].

Контрольный образец – битум, извлеченный механическим способом при нагревании кровельного материала, без применения растворителей.

Таблица 1. Исследуемые составы

Условное обозначение	Состав
К	Контрольный образец
1	Технический керосин КТ-1
2	Трихлорэтилен (C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> )
3	Хлороформ (CHCl <sub>3</sub> )
4	Тетрахлорметан (CCl <sub>4</sub> )

В данной работе описывается технологическая схема для извлечения битумов, которая включает в себя два этапа: подготовительный и основной. На подготовительном этапе происходит изменение размеров и состояния материала путем его механического измельчения и насыщения органическими



растворителями. На основном этапе происходят процессы отделения битума от материала основы, которые осуществляются за счет нагрева растворителей.

Таким образом, предложенная технологическая схема (рисунок 1.) позволяет эффективно извлекать битумы из материалов основы. Механическое измельчение и насыщение органическими растворителями на подготовительном этапе обеспечивают более равномерное распределение битумов в материале, что способствует более эффективному отделению битумов на основном этапе. Нагрев также увеличивает эффективность процесса отделения битумов от материала основы.



Рисунок 1. Технологическая схема получения рекуперационных битумов

Групповой химический состав тяжелых нефтепродуктов определялся методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением с помощью лабораторной установки «Градиент-М» с детектором теплопроводности (рисунок 2).

Сущность метода заключается в ступенчатом градиентно-вытеснительном разделении высококипящих нефтепродуктов на 7 групп с последующей их регистрацией с детектором по теплопроводности.

Продолжительность анализа составляет 2-3 часа.

Проба отбирается в количестве 5-10 г. в фарфоровые тигли [3]. Отобранные пробы хранят в вытяжном шкафу. Анализ проводят после отбора пробы в течение 1-2 дней в несколько этапов:



Рисунок 2. Лабораторная установка «Градиент-М» с детектором теплопроводности

Подготовка хроматографической колонки:

- Промытую колонку спирто-хлороформной смесью (2-3 раза) ставят сушить в сушильный шкаф при 150 °С в течение 5 мин. В сухую колонку вставляют тампон из стекловолокна и с помощью очищенного сжатого воздуха помещают тампон непосредственно в носик колонки. Колонку с тампоном необходимо ещё 2-3 раза промыть спирто-хлороформной смесью. Промытую колонку ставят в сушильный шкаф и сушат при 150 °С в течение 15 мин.

Подготовка пробы:

- Анализируемую пробу нагревают, берут на аналитических весах навеску 0,1 г. продукта. Навеску пробы насыщают смесью бензола и циклогексана в соотношении 1:7.

Набивка колонок.

- В чистую хроматографическую колонку через воронку засыпают силикагель и уплотняют с помощью вибратора.

Ввод пробы

- Пробу в колонку вводят микрошприцем, который обрабатывают бензолом, спиртобензольной смесью и продувают очищенным воздухом.

- Микрошприцем осторожно вводят в верхний слой силикагеля 2 мкл раствора пробы. Приготовленную колонку помещают в фиксатор колонок лабораторной установки.

- При выполнении измерений должны соблюдаться следующие условия хроматографического анализа (представлены в таблице 2).

Таблица 2. Условия хроматографического анализа

Температура реактора, °С	Расход воздуха в катарометре, см <sup>3</sup> /мин	Расход воздуха в испарителе, дм <sup>3</sup> /мин	Рабочее давление в пределах, Мпа
750	11	9	0,-1,2

Во время процесса измерения важно обеспечить равномерное увлажнение транспортной цепи элюатом, без заливки или оставления сухих звеньев. После

того как шесть компонентов мальтеновой фракции вышли из колонки, давление аккуратно снижается. Колонка удаляется, а любой оставшийся растворитель удаляется шприцем. После выхода асфальтенов (7 группа) колонка удаляется, высушивается, и с нее удаляется кремнезем. [4, 5] Порядок выхода групп с использованием различных растворителей представлен в таблице 3.

Таблица 3. Групповой химический состав тяжелых нефтепродуктов методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением

Групповые элементы	К	1	2	3	4
Парафино-нафтеновые углеводороды	12,7	12,6	15,5	10,0	15,4
Ароматика легкая	7,4	7,1	7,1	4,1	4,1
Ароматика средняя	2,1	2	4,1	2,4	0,6
Ароматика тяжелая	7,1	6,9	4,7	7,5	6,3
Смолы бензольные	5,1	6,0	7,3	6,3	7,1
Смолы спирто - бензольные	28,2	28,2	32,5	37,0	34,4
Асфальтены	37,4	37,2	28,8	32,7	32,1
ИТОГО:	100	100	100	100	100

В процессе рекуперации все 4 растворителя влияют на количество асфальтенов, снижая их содержание на 12-23%, наибольшее воздействие на содержание асфальтенов оказывает трихлорэтилен, но в то же время увеличивается содержание смол бензольных и спирто-бензольных. При влиянии трихлорэтилена наблюдается снижение количества тяжелой и средней ароматики относительно контрольного образца. Влияние трихлорэтилена и тетрахлорметана ведет к увеличению парафино-нафтеновых углеводородов. В процессе рекуперации воздействие трихлорэтилена ведет не только к извлечению битума из кровельных материалов, но и к его омоложению за счет изменения группового состава.

#### Библиографический список:

1. Шеховцова С.Ю., Королев Е.В. Исследование фрактальной структуры межфазного слоя битума на поверхности минерального порошка // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 86-92.
2. Shekhovtsova S.Y. Features of the formation of properties of stone-mastic asphalt concrete based on a warm polymer modified binder // Materials Science Forum. 2020. Т. 992. С. 200-205.
3. ГОСТ 2517-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб».
4. Привалов В. Е., Степаненко М. А. О составе и структуре каменноугольных песков // Химия твердого топлива. 1984. № 3. С. 71–74.
5. Поконова Ю. Г. Нефтяные асфальтены. Л.: Химия, 1980.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ ГЕОПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

Е.А. Яценко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор

И.А. Изварин<sup>1</sup>, аспирант

В.М. Курдашов<sup>1</sup>, аспирант

Н.А. Вильбицкая<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

В.С. Яценко<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

**Аннотация.** В данной работе исследована теплоизоляция зданий и представлен новый класс строительных материалов – Геополимеры. Представлены свойства и основные виды сырья пористого геополимера. Рассмотрены проблемы образования высолов и способ их предотвращения. Изучены вспенивающие агенты для получения пористого геополимера. В качестве вспенивающего агента был выбран 30 % раствор перекиси водорода. Были получены пористые геополимеры для теплоизоляции зданий без гидроксида щелочного металла для предотвращения высолов. Исследованы физико-механические свойства полученных составов. Рассмотрена макроструктура полученных образцов. Результаты показали, что после процесса сушки на образцах не наблюдаются высолы, что позволяет использовать пористый геополимер в теплоизоляции зданий. Установлено, что оптимальным является состав, содержащий 1,5 % перекиси водорода.

**Ключевые слова:** теплоизоляция зданий, пористый геополимер, золошлаковый отход, перекись водорода и высолы.

Во всем мире в зданиях и сооружениях потребляется большое количество энергии. В регионах с суровыми климатическими условиями значительная доля энергии идет на обогрев и охлаждение зданий. Для экономии энергии, используют теплоизоляцию, которая обеспечивает уменьшение потерь тепла. К теплоизоляционным относят материалы и изделия, имеющие плотность до 500 кг/м<sup>3</sup>.

Пористые геополимеры – это новый класс строительных материалов, которые обладают превосходной механической прочностью и высокой огнестойкостью [1].

В качестве основного сырья для синтеза пористых геополимеров могут выступать материалы, которые в своем составе содержат алюмосиликаты, такие как зола, шлак, микрокремнезем, рисовая шелуха или смесь этих материалов [2-4].

Принципиальным отличием получения вспененных геополимеров от известных пористых материалов является высокое содержание в сырьевой смеси щелочного компонента – активатора, способствующего синтезу в продуктах гидратации низкоосновных фаз гидросиликатного и щелочного алюмосиликатного состава, обладающих высокой связующей способностью и низкой растворимостью [5,6].

Высолы рассматриваются как одни из важных проблем, возникающих при использовании пористых геополимеров в качестве теплоизоляции зданий. Они приводят к потере прочности при сжатии, увеличению водопоглощения и разрушению структуры пор в геополимере [7]. Высолы образуются при высыхании пористого геополимера с использованием высокой концентрации гидроксида щелочного металла в качестве активатора. Избыточное количество непрореагировавших щелочных веществ в геополимере диффундирует на поверхность образцов и вступает в реакцию с  $\text{CO}_2$  в воздухе, образуя на поверхности белые карбонатные отложения (высолы) [8].

Для изготовления пористого геополимера используют различные вспенивающие агенты, такие как – перекись водорода, гипохлорит натрия, перборат натрия, алюминий, кремний и т.д. Перекись водорода является наиболее распространенным вспенивающим агентом, используемым для создания макропор в геополимерных материалах [9-10]. При использовании перекиси водорода, по сравнению с другими вспенивающими агентами, увеличивается пористость композитных пен и образуются более равномерные поры.

Целью данной работы является получение пористых геополимеров для теплоизоляции зданий без гидроксида щелочного металла для предотвращения высолов и исследование различного количества перекиси водорода для получения равномерной пористой структуры.

Пористые геополимеры получали путем смешивания предварительно измельченных золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС, с добавлением активирующего вещества – жидкого стекла. Далее в полученную смесь вводили вспенивающий агент – 30% раствор перекиси водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Эту смесь тщательно перемешали, разлили по формам и подвергли процессу отверждения при температуре  $80^\circ\text{C}$  в течение 12 часов. В таблице 1 представлены компонентные составы пористых геополимеров и их физико-механические свойства.

Таблица 1. Компонентные составы пористых геополимеров и их физико-механические свойства

№ состава	Массовое содержание, %				
	Золошлак	Жидкое стекло	Перекись водорода $\text{H}_2\text{O}_2$ , % сверх 100 %	Плотность $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	Прочность, МПа
1	60,0	40,0	1,0	586,55	1,39
2	60,0	40,0	1,5	464,27	0,78
3	60,0	40,0	2,0	638,32	1,55

Исследования по определению оптимального количества перекиси водорода для синтеза пористого геополимера показали, что наилучшими свойствами обладает состав №2, имеющий плотность  $464,27 \text{ кг/м}^3$  и прочность  $0,78 \text{ МПа}$ . При использовании 1% (состав №1) перекиси водорода в образце процесс порообразования происходит не в полном объеме (недостаточное количество вспенивающего агента), из-за чего он имеет высокую плотность и прочность. При использовании 2% (состав №3), в образце избыточное количество вспенивающего агента, тем самым происходит выделения газа с

большой скоростью, которая приводит к оседанию пены, из-за чего образец так же имеет высокую плотность и прочность.

Далее была рассмотрена макроструктура полученных образцов, представленная на рисунке 1.

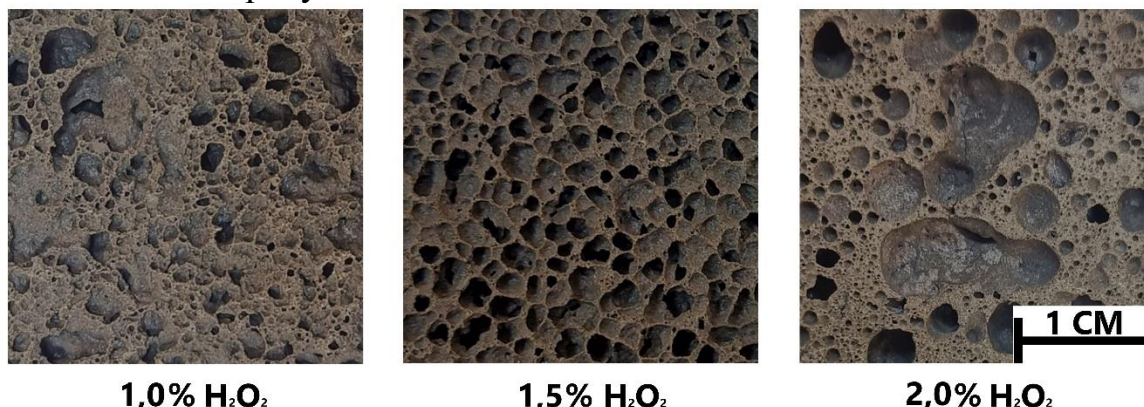


Рисунок 1. Макроструктура синтезированных образцов

Рисунок 1 наглядно показывает, что при добавлении 1% перекиси водорода, образуется неравномерная пористая структура, из-за его недостаточного количества. При избытке перекиси водорода (2%) происходит чрезмерное пенообразование, приводящее к неравномерной пористой структуре с порами разного размера. При добавлении 1,5% перекиси водорода, наблюдается наиболее однородная пористая структура. Также из макроструктуры видно, что у всех исследуемых образцах отсутствуют высолы.

Результаты исследования, показали возможность получения пористых геополимеров с помощью жидкого стекла и перекиси водорода, без использования гидроксидов щелочных металлов. Разработан оптимальный состав пористого геополимера для теплоизоляции зданий. Состав с использованием 1,5% перекиси водорода, обладает плотностью 464,27 кг/м<sup>3</sup> и прочностью 0,78 МПа. Рассмотрена макроструктура разработанных образцов. Результаты показали, что после отверждения на образцах не наблюдаются высолы, что позволяет использовать пористый геополимер в теплоизоляции зданий.

Работа выполнена в рамках реализации проекта по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации «Углеродно-нейтральные технологии рециклинга крупнотоннажных отходов топливной энергетики с получением функциональных геополимерных материалов» от «29» июня 2022 г., № 075-15-2022-1111.

#### Библиографический список:

1. Łach, M. et al. Geopolymer foam as a passive fire protection / M. Łach et al. // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences. 2018. Т. 247. С. 00031.
2. Longos, Jr A. et al. Optimization of the mix formulation of geopolymer using nickel-laterite mine waste and coal fly ash / A. Longos et al. // Minerals. 2020. Т. 10. №. 12. С. 1144.

3. Ferdous, M. W. et al. A detailed procedure of mix design for fly ash based geopolymer concrete / M.W. Ferdous et al. // Proceedings of the fourth Asia-Pacific conference on FRP in structures (APFIS 2013), Melbourne, Australia. 2013. С. 11-13.
4. Изварин, А.И., Яценко, Е.А., Чаудхари, С. и др. Исследование отходов угольной энергетики в качестве прекурсора для синтеза геополимеров / А.И. Изварин, Е.А. Яценко, С. Чаудхари и др. // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: сб. докл. Междунар. науч. конф., г. Алушта-Белгород, 5-9 июня 2023 г. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). – Белгород: Изд-во БГТУ. 2023. С. 214-219.
5. Ерошкина, Н.А., Коровкин, М.О. Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов на основе минерально-щелочных и геополимерных вяжущих / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин М.О // Учебное пособие. – Пенза: ПГУАС, 2013. 156 с.
6. Яценко, Е.А. и др. Влияние порообразующих добавок на технологические свойства функциональных геополимерных материалов строительного назначения / Е.А. Яценко и др. // *Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2023 (ICMSSTE 2023)*. 2023. С. 14-17.
7. Zhou, S. et al. Relationship between moisture transportation, efflorescence and structure degradation in fly ash/slag geopolymer / S. Zhou et al. // *Materials*. 2020. Т. 13. №. 23. С. 5550.
8. Ghosh, R. et al. Leaching and efflorescence effects in geopolymer concrete / R. Ghosh et al. // *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2018. Т. 60. №. 2. С. 79-88.
9. Bai, C., Colombo, P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review / C. Bai, P. Colombo // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. №. 14. P. 16103-16118.
10. Яценко, Е.А., Гольцман, Б.М., Яценко, Л.А., Изварин, А.И. Конструкционные геополимерные материалы на основе отходов угольной энергетики / Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, Л. А. Яценко, А. И. Изварин // XII Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу : сборник статей, Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2022 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс. 2022. С. 90-92.



*Спасибо Вам за участие в нашей конференции!*

Секретариат конференции:

129337, г. Москва, Ярославское ш., 26

Баженова Софья Ильдаровна, к.т.н., доцент кафедры СМ НИУ МГСУ

e-mail: [BazhenovaSI@mgsu.ru](mailto:BazhenovaSI@mgsu.ru)

Пилипенко Антон Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры СМ НИУ МГСУ

e-mail: [PilipenkoAS@mgsu.ru](mailto:PilipenkoAS@mgsu.ru)

Агафонова Наталья Зиновьевна, преподаватель кафедры СМ НИУ МГСУ

e-mail: [AgafonovaNZ@mgsu.ru](mailto:AgafonovaNZ@mgsu.ru)