



СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

настоящее и будущее

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

II Всероссийской научной конференции,
посвящённой столетнему юбилею МИСИ - МГСУ
18 - 19 ноября 2021 года
НИУ МГСУ, г. Москва



2021

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2021
ISBN 978-5-7264-2933-5

Москва
Издательство МИСИ – МГСУ
2021

УДК 691
ББК 38.3
С86

С86

Строительное материаловедение: настоящее и будущее [Электронный ресурс] : сборник материалов II Всероссийской научной конференции, посвящённой столетнему юбилею Московского государственного строительного университета МИСИ – МГСУ (г. Москва, 18–19 ноября 2021 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, институт строительства и архитектуры, кафедра строительного материаловедения. — Электрон. дан. и прогр. (20 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. — Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7264-2933-5

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, специалистов данной области, аспирантов и обучающихся строительных вузов.

Научное электронное издание

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

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2021

Подбор материала и ответственные за выпуск:

С.И. Баженова, А.С. Пилипенко

Кафедра строительного материаловедения,
институт строительства и архитектуры (ИСА НИУ МГСУ)

Тел . +7 (499) 183-32-29

E-mail: isa-confero@mgsu.ru , pilipenkoas@mgsu.ru

Сайт: 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 30.09.2021. Объем данных 20 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 II Всероссийской научной конференции «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», посвящённой 100-летию со дня основания Московского государственного строительного университета.

Вот уже почти целый век мы вместе причастны к миру знаний, современной техники и технологий нашей благородной профессии – строитель! НИУ Московский государственный строительный университет – ведущий строительный университет, с советских времён – союзного подчинения, головной университет отраслевого федерального учебно-методического объединения и Ассоциации строительных высших учебных заведений. Высокий статус ведущего национального университета – не исключительно наша заслуга, мы традиционно и системно вместе с нашими коллегами – архитектурно-строительными университетами России – формировали общий академический потенциал отрасли – каждый в своем городе, регионе, нократно более масштабный и эффективный в целом.

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!

ОГЛАВЛЕНИЕ

Теоретические основы получения строительных композитов.....	9
<i>А.Ф. Бурьянов, Х.-Б. Фишер, Ю.А. Соколова, Н.А. Гальцева, Е.Н. Булдыжова</i>	
Изучение влияния температуры обжига на природный гипсовый камень	9
<i>Е.С. Егоров, С.В. Самченко</i>	
Активация предварительно гидратированной цементной суспензии в роторно-пульсационном аппарате	12
<i>Т.А. Мацевич, А.А. Аскадский</i>	
Динамические модули упругости полимерных смесей	19
<i>И.В. Козлова, О.В. Земскова, М.О. Дударева</i>	
Биологическая коррозия цементного камня	25
<i>С.В. Самченко, М.А. Абрамов, А.О. Мурашов</i>	
Подбор состава бетонной смеси для технологии «белая ванна»	29
<i>С.В. Самченко, М.А. Абрамов, А.Б. Османов</i>	
К вопросу об активации цементного вяжущего с применением дезинтеграторной технологии.....	33
<i>С.В. Самченко, Н.В. Новиков</i>	
Изучение влияние тонкомолотой барийсодержащей добавки на свойства композиционного материала	38
<i>В.Н. Соков, Е.А. Рамазанов</i>	
Синтез теплоизоляционных огнеупоров нового класса в электрогидротеплосиловом поле	43
<i>В.Н. Соков, Н.С. Дмитриев, М.В. Глушкова, М.Б. Каддо</i>	
Самоуплотняющиеся массы на основе гидрогелевого расширяющегося заполнителя	50
<i>Н.Г. Стенина</i>	
Инновационное значение природоподобных технологий в строительном материаловедении	55
<i>А.А. Трещев, Ю.А. Завьялова, М.А. Латшина</i>	
Модель связи деформаций с напряжениями для структурно ортотропных и деформационно анизотропных материалов.....	62

Повышение эффективности и долговечности строительных изделий и конструкций, в том числе в суровых условиях эксплуатации	69
<i>О.В. Артамонова, М.А. Шведова</i>	
Особенности структурообразования наномодифицированных цементных систем при длительном твердении	69
<i>В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, Б.Е. Нармания</i>	
Коррозия стальной арматуры в гидрофобизированных бетонах	75
<i>Л.А. Урханова, А.И. Савенков</i>	
Применение неавтоклавного пенобетона с облегченным каркасом в сейсмических районах	80
<i>С.В. Черемных, С.А. Соколов</i>	
Повышение долговечности строительных конструкций на примере ледостойкой платформы.....	86
Технологии современных композиционных вяжущих веществ.....	91
<i>Л.А. Аниканова, О.В. Волкова, А.И. Кудряков</i>	
Способы модифицирования вторичного ангидритового сырья для производства стеновых и отделочных материалов.....	91
<i>О.В. Александрова, Нгуен Дык Винь Куанг</i>	
Исследование влияния мелкого заполнителя на механические свойства бетона	96
<i>К.А. Исрафилов, И.Я. Харченко, А.И. Харченко, Ю.И. Харин</i>	
Применение инъекционных смесей на основе коллоидного кремнезёма для стабилизации плавунных грунтов при строительстве подземных сооружений	102
<i>В.К. Козлова, Ю.С. Саркисов, А.А. Кишицкий, Е.В. Божок, А.М. Маноха</i>	
Коррозионностойкие композиционные портландцементы с золокарбонатными добавками	107
Ресурсо- и энергосберегающие технологии в производстве строительных материалов.....	112
<i>Р.А. Ибрагимов</i>	
Влияние активации на фазовый состав наномодифицированного цементного камня	112

А.М. Гарафиев, Р.Х. Мухаметрахимов

Исследование перколяции электрического тока в среде модифицированных цементных композитов для энергосбережения в технологии электродного прогрева 116

Танг Ван Лам, Ву Ким Зиен, Б.И. Булгаков, С.И. Баженова

Применение доменного шлака и золы-уноса в геополимерных бетонах для строительства сооружений во вьетнаме..... 120

С.Ю. Шеховцова, А.О. Карпунина

Проблема утилизации и применения микропластика, состояние вопроса 129

Современные полифункциональные строительные материалы..... 132

О.А. Ларсен, А.М. Бахрах

Влияние времени гомогенизации композиционного вяжущего на удельное электрическое сопротивление токопроводящего цементного камня 132

О.А. Ларсен, А.А. Солодов, С.В. Самченко

Современные способы повышения качества бетонных поверхностей 138

Бекеле Арега Демисси, А.Д. Жуков, А.А. Медведев, Д.А. Колесова

Оптимизация состава вяжущего на основе туфа-скория 141

Б.И. Булгаков, Нго Суан Хунг

Влияние минеральных добавок на проницаемость структуры бетонов для хлорид-ионов 147

Р.М. Дворников, А.К. Alobaidi Dheyaа, Е. Г. Величко

Комплексная химико-минеральная модификация состава и структуры пенобетона..... 153

А.С. Пилипенко, М.Б. Каддо, А.Р. Скаяев, Е.О. Безверхова

Разработка аэрогелевых материалов на основе конопляной наноцеллюлозы.. 159

Марк Содомон, И.В. Степина, А.Д. Жуков, А.М. Минаева

Теплоизоляционные материалы на основе модифицированного растительного сырья 162

Рави Сагар Поудел, А.Д. Жуков, И.В. Бессонов, В.М. Бесфамильная

Текстиль-бетон. Оптимизация состава 167

<i>К.Б. Шарафутдинов, Г.Г. Кашеварова, К.А. Сарайкина</i>	
Влияние суперабсорбирующего полимера на прочность бетона.....	173
Материалы для дорожного строительства	179
<i>Т.Ч. До, С.С. Иноземцев</i>	
Теоретические предпосылки самовосстановления в асфальтобетонах	179
<i>Н.И. Шестаков, Д.С. Алексеева, Д.В. Полосина</i>	
Фотокаталитические бетоны для дорожно-транспортного комплекса	184
<i>Н.И. Шестаков, В.Н. Пыстин, К.Л. Чертес</i>	
Возможности применения буровых шламов для получения укрепленного грунта в дорожном строительстве	187
<i>Н.В. Хохлова, Н.И. Шестаков</i>	
Рекуперационные битумы для дорожного строительства	192
Материалы и технологии для реконструкции и ремонта зданий и сооружений.....	196
<i>Е.В. Ткач, М.И. Бичаев</i>	
Модификация глиняного наполнителя для ремонтного состава на эпоксидной основе.....	196
<i>Е.С. Кецко, И.С. Кузина</i>	
Технология усиления железобетонных перекрытий с применением композитного углеволокна	205
<i>О.Б. Ляпидевская</i>	
Гидроизоляционный состав для защиты подвальных помещений от подтоплений	212
<i>О.Б. Рудаков, А.М. Хорохордин, Я.О. Рудаков, О.В. Черноусова</i>	
Совершенствование цветометрического способа контроля качества цементов с минеральными добавками и пигментами вне лаборатории.....	216
Современные строительные системы.....	222
<i>И.С. Игольников, Л.А. Пахомова</i>	
Анализ ангарных систем в столетнем промежутке времени	222

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА ПРИРОДНЫЙ ГИПСОВЫЙ КАМЕНЬ

А.Ф. Бурьянов¹, д-р. техн. наук, доцент

Х.-Б. Фишер², д-р-инженер

Ю.А. Соколова¹, д-р. техн. наук, проф.

Н.А. Гальцева¹, канд. техн. наук

Е.Н. Булдыжова¹, инженер

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Bauhaus-Universität*

Аннотация. Температура и время обжига сильно влияют на реакционную способность поверхности частиц. С увеличением термической нагрузки, т.е. при более длительной выдержке в зоне высоких температур, а также при более высокой температуре обжига, как и ожидалось реакционная способность [1-5] высокообжиговых вяжущих на основе сульфата кальция снижается. Вследствие обезвоживания гипса и перехода одной модификации [6-8] сульфата кальция в другую возникают дефекты в кристаллической решётке, которые обуславливают специфическую активность вяжущего по отношению к воде затворения.

Ключевые слова: вяжущее, сульфат кальция, гипс, ангидрит, обжиг.

Из-за повышенной термической нагрузки понижается количество дефектов в кристаллической решётке ангидрита [9-10] и таким образом уменьшается его реакционная способность. Доказательством этого служат результаты измерения электропроводности в суспензиях. Кривые, характеризующие процесс растворения вяжущего, изображены на рисунке 1.

Удельная электропроводность насыщенного раствора сульфата кальция составляет около 2,5 мСм/см. Если электропроводность превышает эту величину, в растворе возникают зародыши гипса, из которых при присоединении к ним ионов кальция и сульфат ионов вырастают кристаллы гипса. То есть, в этот момент в результате дальнейшего растворения исходного вещества в растворе находится больше сульфата кальция, чем в это же время превращается в двуводный сульфат кальция, образующий твердую фазу.

При гидратации вяжущего, обожженного при высокой температуре 600-900 °С, не достигаются концентрации насыщения сульфата кальция в течение 1 часа и за это время кристаллизация дигидрата сульфата кальция невозможна. Процесс гидратации таких проб замедлен.

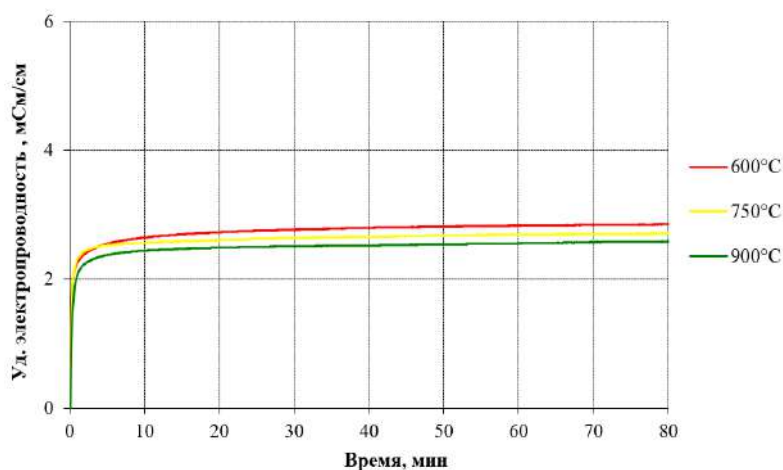
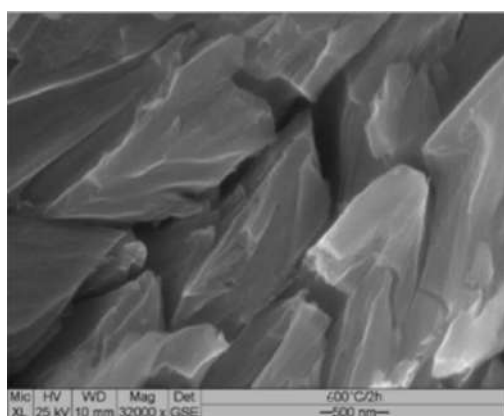
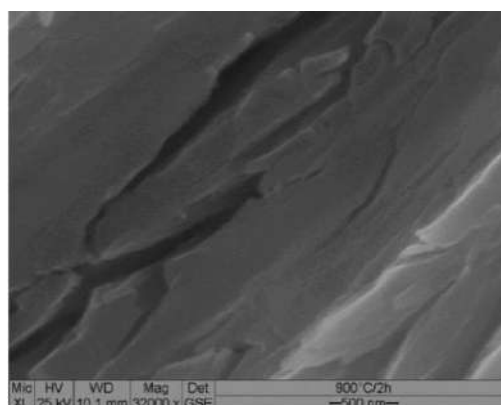


Рис. 1. Изменение удельной электропроводности суспензии при растворении вяжущих на основе сульфата кальция, полученных при обжиге в течение 1 часа при разных температурах

Дополнительно была изучена поверхность частиц после обжига с помощью микроскопа. Рисунок 2 показывает, что поверхность зёрен при более высоких температурах как будто спекается, величина дефектов поверхности уменьшается. Это в свою очередь также может препятствовать процессу гидратации.



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура поверхности частиц сульфата кальция, обожженных в течение 1 часа при: а) 600 С , б) 900°C

В рамках данной работы, была изучена реакционноспособность высокообжигового вяжущего на основе сульфата кальция, полученного в лабораторных условиях. Было доказано, что повышение термической нагрузки во время процесса обжига гипса приводит к уменьшению реакционноспособности полученного ангидрита. Помимо дефектов в кристаллической решётке существенное влияние на реакционноспособность высокообожжённого ангидрита имеет процесс уплотнения (спекания) его структуры. Этот факт необходимо учесть при производстве термического ангидрита. Он может быть (частично) скомпенсирован более тонким измельчением материала и введение активаторов твердения.

Библиографический список:

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magal-lanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. 2 International conference on Bio-based Building materials. 2017, pp. 1–5.
2. Клименко В.Г., Павленко В.И., Гасанов С.К. Влияние pH жидкости затворения на прочностные свойства гипсовых вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 16–20.
3. Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Дрохитка Р., Грахов В.П., Первушин Г.Н., Баженов К.А., Трошкова В.В. Реологическая активация фторангидритовых композиций эфирами поликарбоксилата // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47>
4. Клименко В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na⁺, K⁺, Ca²⁺, NH₄⁺ в технологии получения ангидритовых вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 119–125.
5. Клименко В.Г., Гасанов С.К., Кашин Г.А. Исследования физико-химических процессов в системе сульфат кальция – магнетит // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 134–139.
6. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17>
7. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 27–34.
8. Kodzoev M-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder. MATEC Web of Conferences. St. Petersburg. 2017, pp. 1–7. DOI: [10.1051/matecconf/201817003022](https://doi.org/10.1051/matecconf/201817003022)
9. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А. Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>
10. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Эльрефаи А.Э.М.М., Саидова З.С., Хазеев Д.Р. Модификация материалов на основе сульфата кальция комплексными минеральными добавками // Строительные материалы. 2021. № 1–2. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-13-21>

АКТИВАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ГИДРАТИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ СУСПЕНЗИИ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Е.С. Егоров^{1,2}, аспирант

С.В. Самченко¹, канд. техн. наук, доцент

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Ярославский государственный технический университет

Аннотация. Активирование гидратированных цементных суспензий позволит повысить экологичность производства бетона. Активацию суспензий рационально применять в роторно-пульсационных аппаратах совмещающих сразу нескольких типов воздействий на вещество в водной среде, таких как механическое, кавитационное, акустическое и др. На основе дисперсионного анализа проводимого с помощью оптического микроскопа подобрана рациональная продолжительность активации. Результаты измерения тепловыделения свидетельствуют об ускорении реакций гидратации цементных частиц после их активирования в роторно-пульсационном аппарате. Сделан вывод о возможности использования активированной гидратированной цементной суспензии в качестве ускорителя твердения.

Ключевые слова: гидродинамическая активация, роторно-пульсационный аппарат, гидратация цемента, дисперсионный анализ, тепловыделение.

Использование гидратированных цементных суспензий не является новой идеей. Она лежит в основе современных систем рециклинга — систем возврата отходов в производственный цикл, в которых некондиционный бетон или бетонные смывки проходят систему сит, разделяющую смесь на основные компоненты бетона (крупный, мелкий заполнитель и водную суспензию цемента) [1,2]. Заполнитель без проблем возвращается в производственный цикл, а цементная суспензия либо отстаивается до полной потери гидравлической активности, либо в малых, незначительных долях (во избежание негативных эффектов [3]) используется для затворения новых бетонных смесей.

Актуальной задачей является увеличение количества потребления этого отхода - гидратированной цементной суспензий [4]. Решить такую задачу можно путём её активации. Известно, что цементные частицы гидратируются достаточно продолжительное время, что подтверждается длительным набором прочности бетонных и железобетонных изделий. Активация гидратирующихся цементных частиц позволит высвободить их внутреннюю не прореагировавшую часть, заключенную в гидратную оболочку, препятствующую течению реакции внутрь за счёт высоко энергетического воздействия на частицу, приводящего к разрушению или сдиранию этой оболочки. Существует множество способов воздействия, к ним относятся механохимическое, электромагнитное, ультразвуковое, электрофизическое, микроволновое, гидродинамическое, термическое и др.

Интересной и логичной с точки зрения активации водных суспензий является гидродинамическая активация [5,6].

В испытаниях использовался цемент М500 Д0 производства АО «Подольск-цемент» (СЕМ I 42,5 Н). Химический и минералогический составы представлены в таблицах 1 и 2

Таблица 1. Химический состав клинкера АО «Подольск-Цемент»

Компоненты	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O	ППП
Клинкер	62,75	20,10	4,56	8,72	1,99	0,57	1,58	0,92

Таблица 2. Минералогический состав клинкера АО «Подольск-Цемент»

Содержание минералов, %			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
60,00	12,00	3,00	21,00

Приготовление предварительно-гидратированной суспензии осуществлялось путём затворения цементной навески водой при В/Ц отношении 0.7. Продолжительность предварительной гидратации для получения аналога цементных смывок с автобетоносмесителей составляла 6 часов. Такая суспензия далее именуется ПГД6.

Активация полученной цементной суспензии проводилась в роторно-пульсационном аппарате (РПА) марки РПА-0,33-5-0,75кВт (мощность электродвигателя 0,75кВт и производительность на воде 0,33 м³/час). Объём суспензий, загружаемых в РПА, составлял 500...600 мл. Для снижения нагрузки на аппарат и повышения эффективности, активация проводилась в присутствии суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров (DKG-604). Активированная ПГД6 далее именуется ПГДА6.

Для дисперсионного анализа ПГД6 сильно разбавлялась водой (соотношение добавка – вода составляла 1:10). Микропрепараты изготавливались из проб, которые отбирались через 1, 3, 5 и 7 минут активации. Использование суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров для дисперсионного анализа объясняется его принципом действия. В результате адсорбции добавки цементные частицы получают одноимённый заряд, что приводит к их взаимному отталкиванию друг от друга. Это явление позволяет более корректно анализировать дисперсность частиц с помощью оптических методов исследования снизив вероятность их агрегации.

Дисперсионный анализ проводился с помощью оптического микроскопа Levenhuk D740T, оснащённого ахроматическим объективом с увеличением x10 и окуляром с увеличением x10. Микрофотографии в градации серого создавались с помощью цифровой камеры 5.1 Мп. Для каждого микропрепарата создавалось по 6 снимков в случайно выбранных местах. Обработка микрофотографий проводилась с помощью программы с открытым исходным кодом для анализа и обработки изображений «Fiji». Обработка микрофотографий включала следующие этапы: первый – автоматическое регулирование порогового значения изображения (Image – Adjust – Threshold), второй – выполнение операции заполнения отверстий (Process – Binary – Fill Holes), третий – выполнение опе-

рации разделения слипшихся частиц (Process – Binary – Watershed) и последний – анализ частиц (Analyze – Analyze particles...). Вторая операция необходима для корректного определения размеров прозрачных частиц цемента. Предварительно перед выполнением анализа частиц был сделан калибровочный снимок для определения соотношения пиксель/мкм получаемых изображений.

На основе результатов, полученных в программе «Fiji», строились кривые распределения и определялся средний диаметр частиц для каждой пробы. Средний диаметр рассчитывался по следующей формуле:

$$\bar{d} = \sum_i \frac{n_i \cdot d_i}{\sum_i n_i}, \quad (1)$$

где \bar{d} – средний диаметр частиц, мкм;

d_i – диаметр -фракции, мкм;

n – число частиц -фракции диаметром d_i .

Исследования экзотермических процессов осуществлялось на простом калориметре. Простой калориметр собран из картонного цилиндра диаметром 70 мм, высотой 120 мм, закрывающегося пластиковой крышкой с отверстием для датчика (внутренние стенки цилиндра и крышки покрыты тонким слоем фольги), теплоизоляционной оболочки из пенопласта плотностью 9,55 кг/м³ толщиной 22 мм, USB термометра многоканального RODOS-5Z, подключаемого к компьютеру, и герметичного водонепроницаемого датчика температуры DS18B20. Значения регистрировались и записывались на компьютере в автоматическом режиме. Подъем температуры цементного определялся по формуле:

$$\Delta t = t_\tau - t_{\text{нач}}, \quad (2)$$

где Δt – подъем температуры, °С;

t_τ – температура в момент времени τ , °С;

$t_{\text{нач}}$ – начальная температура компонентов, принимаемая температуре окружающей среды в момент начала эксперимента, °С.

Для исследования экзотермических процессов приготавливалось несколько различных составов цементного теста. Исследовались контрольный состав (без добавления ПГДАб), а также составы с добавлением по сухому веществу 5%, 10%, 15% и 30% ПГДАб от массы цемента. Суммарная масса цементных частиц (исходного цемента и частиц в добавке) на образец принималось равным 100г. Количество воды соответствовало нормальной густоте. Полученное тесто помещалось в разборную пластиковую цилиндрическую форму диаметром 30 мм высотой 60 мм и закрывалось в калориметре на 24 часа.

В результате дисперсионного анализа установлено, что активация цементной суспензии в РПА приводит к изменению распределения цементных частиц. Графики распределения представлены на рисунке 1. Оптический метод позволил определить частицы размерностью от 1 до 700 мкм. ПГДб представляла собой наиболее низкодисперсную систему по отношению к другим исследуемым

составам. Визуально это представляется в виде самой пологой кривой распределения, пик значения количества частиц которой не превышал значения 8.7%. Активация ПГД6 в РПА в течение 1 минуты позволил снизить количество частиц фракцией более 15 мкм за счёт комбинации из механического гидродинамического, гидроакустического воздействий на суспензию [7,8]. В результате диспергации очевидно увеличилось содержание более мелкой фракции, что выражается в увеличении количества частиц фракцией 1...15 мкм и снижением среднего диаметра частиц на 44% по отношению к ПГД6 (таблица 3).

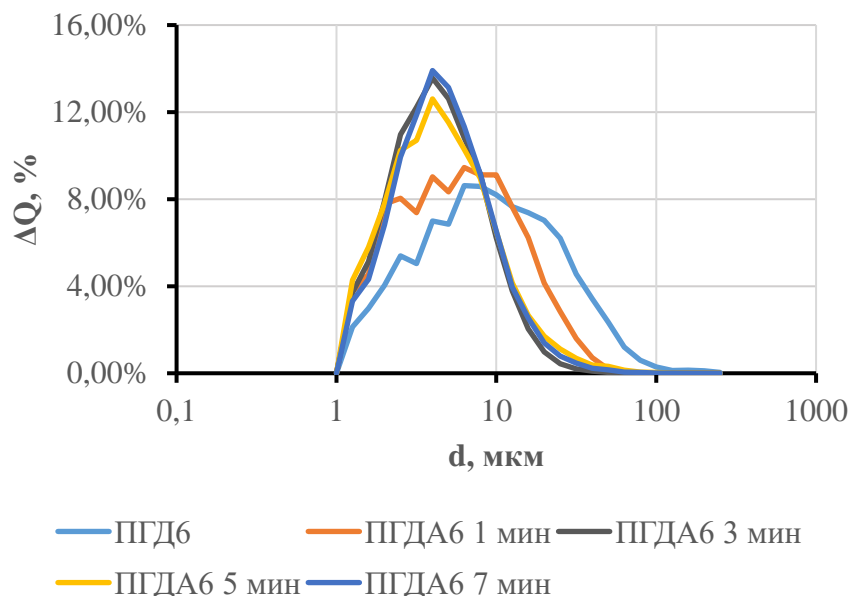


Рис. 1. Кривые распределения частиц

При активации в течение 3 минут эффект диспергации усиливается. Это выражается в более крутой кривой распределения частиц, а также в значительном увеличении количества частиц фракцией 1...9 мкм и уменьшения частиц фракцией свыше 9 мкм. Снижение среднего диаметра частиц по отношению к ПГД6 составляло около 66%.

Более длительная активация не приводила к существенным изменениям кривой распределения и среднем диаметре частиц. Эти незначительные колебания можно объяснить погрешностью измерений. В связи с этим активация более 3 минут не рациональна с точки зрения получения более тонкодисперсного продукта и логично приводит к повышению износа рабочих органов.

Использование тонкодисперсных частиц цемента позволяет получить более плотную структуру цементного камня за счёт регулирования капиллярно-пористой структуры [9,10], а также приводит к ускорению происходящих реакций гидратации [11,12].

Таблица 3. Средний диаметр частиц

Продолжительность Активации ПГД6, мин	0	1	3	5	7
\bar{d} , мкм	15,40	8,62	5,29	6,56	5,90

В результате измерения тепловыделения (Рис. 2) установлено, что добавление ПГДА6 в цементное тесто приводит к интенсификации тепловыделения,

которое выражается в более быстром повышении температуры, изменении кинетики тепловыделения. Этот эффект усиливается с увеличением количества добавки. Увеличение пикового значения составило 1,9°C, 2,4°C, 4,1°C, 5,2°C для составов ПГДА6 5%, ПГДА6 10%, ПГДА6 15%, ПГДА6 30%, соответственно. Помимо интенсификации тепловыделения пиковое значение температуры сдвигается во времени на более ранний срок. Смещение составляет 2, 4, 5 и 6 для составов ПГДА6 5%, ПГДА6 10%, ПГДА6 15%, ПГДА6 30%, соответственно

Изменение кинетики тепловыделения в первые сутки свидетельствует об изменении кинетики твердения цементных композиций [13,14]. Тепловыделение является отражением течения реакций гидратации. Согласно результатам, добавление ПГДА6 вызывает сокращение индукционного периода, которое выразится в сокращении сроков схватывания, что отрицательно скажется на технологических характеристиках, а именно пригодности к транспортировке. Использование добавки для производства товарного бетона целесообразно совместно с замедлителями схватывания.

Необходимо так же выразить опасения, связанные с возникновением внутренних напряжений [15], которые увеличиваются при ускоренном росте кристаллизационной структуры цементного камня.

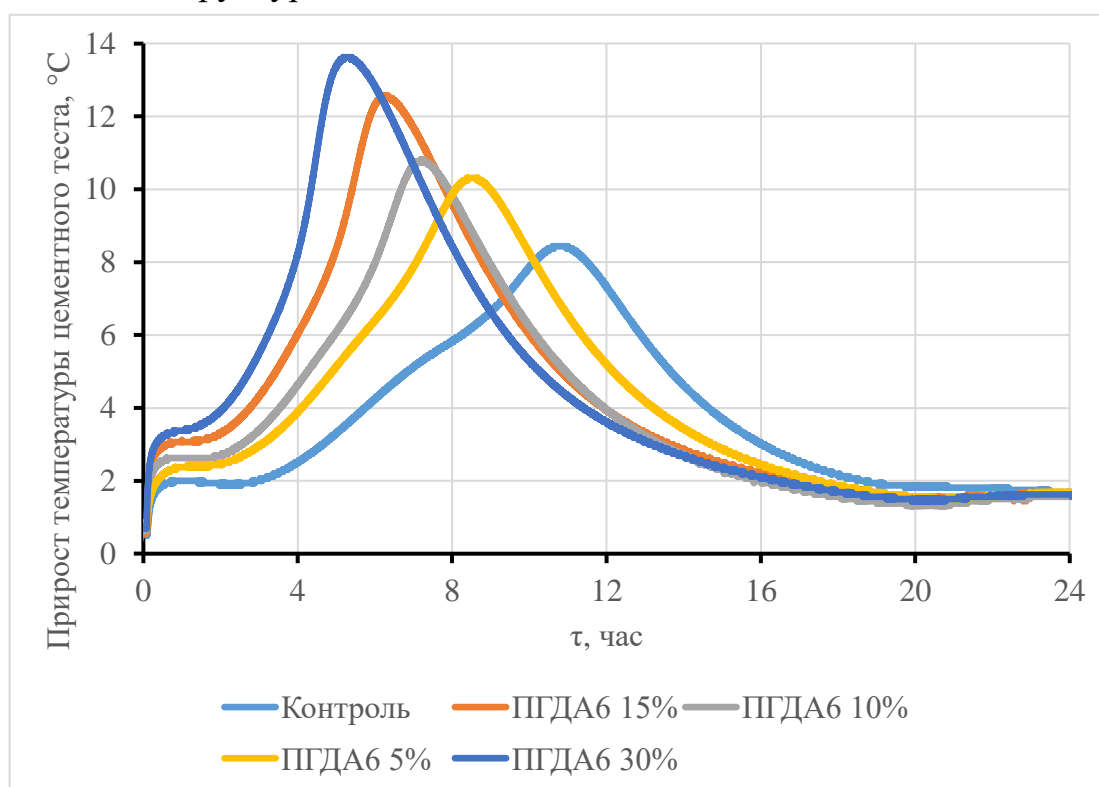


Рис. 2. Прирост температуры образцов из цементного теста во времени

В результате испытаний установлено:

1) Рациональная с точки зрения получения тонкодисперсных цементных суспензий и износа рабочих органов РПА-0,33-5-0,75кВт продолжительность активации составляет 3 минуты.

2) В результате активации в течение 3 минут увеличивается количество частиц фракцией 1...9 мкм и снижается количество частиц более 9 мкм. Средний диаметр частиц снижается с 15.40 до 5.29 мкм

3) Использование ПГДА приводит к интенсификации тепловыделения цементных паст. Увеличение пикового значения составило 1,9 °С, 2,4 °С, 4,1 °С, 5,2 °С для составов ПГДА6 5%, ПГДА6 10%, ПГДА6 15%, ПГДА6 30%, соответственно. Смещение пикового значения температуры составляет 2, 4, 5 и 6 часов для составов ПГДА6 5%, ПГДА6 10%, ПГДА6 15%, ПГДА6 30%, соответственно.

Таким образом аппараты типа РПА показывают высокую эффективность при активировании гидратированного цемента. Получаемый продукт рационально использовать в качестве добавки интенсификатора гидратации, т.е. ускорителя твердения.

Библиографический список:

1. Остроух А.В., Суркова Н.Е. Система рециклинга товарного бетона // Лучшая научная статья. 2017. С. 21–24.
2. Гуринович В.Ю., Карпович С.Л., Леонович С.Н. Башенная бетоносмесительная установка с системами подачи, распределения и рециклинга бетонной смеси для «Минскметростроя» // Вестник БНТУ. 2011. Т. 6. С. 39–42.
3. Корниенко П.В., Горшкова Л.В., Гакштетер Г.В. К вопросу применения отходов переработки бетонных смесей в рециклинговых установках // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Экибастуз: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2016. С. 135–137.
4. Касторных Л.И., Гикало М.А. Эффективность системы рециклинга на заводах товарного бетона и сборного железобетона // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 36–39.
5. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидротацию и твердение цементного камня // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30, № 7. С. 36–38.
6. Шаманов В.А., Радыгин Р.В., Корякова К.С. Активация цемента при помощи гидродинамического генераторов.
7. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика [Монография] / М.А. Промтов. Москва: Издательство Машиностроение-1, 2001. 260 с.
8. Гуринович Л.С., Усов Б.А. Механохимическая обработка строительных материалов // Экология и строительство. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction, 2015. Т. 3, № 3. С. 22.
9. Пшеничный Г.Н. О механизме действия высокодисперсных минеральных добавок // Технологии Бетонов. 2014. Т. 11. С. 41–45.
10. Явруян Х.С., Филонов И.А., Фесенко Д.А. К вопросу о применении нанотехнологий в производстве строительных материалов. 2005. С. 801–804.
11. Рыбакова М.В., Барбаныгрэ В.Д. Интенсификация процесса твердения цементного камня на основе механоактивированной суспензии // II Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей: сборник докладов. Санкт-Петербург: Издательство

«АлитИнформ», 2011. С. 140.

12. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 3–12.

13. Фомина Н.Н., Кебедов М.Б. Применение методов калориметрии в исследовании процессов гидратации портландцемента // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. Т. 1, № 15. С. 26–28.

14. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения // Инженерно-строительный журнал. 2013. Т. 38, № 3. С. 36–42.

15. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня: монография / С. В. Самченко. Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 284 с.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДУЛИ УПРУГОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ

Т.А. Мацевич¹, д-р. физ.-мат. наук, зав. кафедрой

А.А. Аскадский^{1,2}, д-р. хим. наук, профессор

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова Российской академии наук

Аннотация. Предложен способ прогноза модулей накопления и потерь для совместимых полимерных смесей. Прогноз делается на основании приближения Максвелла, согласно которому частотные зависимости модуля накопления и потерь описываются уравнениями с одним временем релаксации. С учетом неэкспоненциальной функции релаксации использовано выражение, содержащее гамма-функцию Эйлера. Для описания модуля накопления смеси предложено соотношение, в которое входят ван-дерваальсовы объемы повторяющихся звеньев полимеров, образующих смесь, а также их молярные доли в смеси. Сами модули накопления компонентов смеси рассчитаны по методике, предложенной авторами работы ранее. Получены частотные зависимости компонентов комплексного модуля упругости при разных температурах, молекулярных массах и составов смесей. Проведенная работа важна для прогнозирования отклика полимерных материалов при динамических воздействиях.

Ключевые слова: модуль накопления, модуль потерь, полиэтиленоксид, полиметилметакрилат, время релаксации, смеси полимеров.

Перед тем, как перейти к изложению данной работы, отметим, что экспериментально величины модулей накопления и потерь были определены в ряде работ. Значение модуля накопления при высоких частотах для линейного поли(ϵ -капролактона) приведено в работе [1], для полистирола – в работе [2], для полипропилена – в работе [3]. В более старых работах приведены значения модуля накопления для полиэтилена [4], полибутадиена [5], полиизопрена [6], гидrogenированного полибутадиена [7].

В данной работе рассмотрим расчет частотных зависимостей модулей накопления и потерь $G'(\omega), G''(\omega)$ полимерных смесей. Практически все полимерные материалы, применяемые в строительстве, состоят из смесей полимерных связующих. Хорошо известно, что в приближении Максвелла (т.е. когда имеется одно время релаксации τ) модули накопления и потерь описываются следующими формулами

$$G'(\omega) = G \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1)$$

$$G''(\omega) = G \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2)$$

где G – предельный модуль накопления при частоте $\omega \rightarrow \infty$; τ – время релаксации, которое описывается следующим соотношением

$$\tau = \frac{\eta}{G\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция Эйлера; параметр k обусловлен неэкспоненциальной функцией релаксации в полимерных системах. Когда $k = 1/2$, гамма-функция $\Gamma(1+1/k)=2$.

В качестве примера расчета рассмотрим смесь полиэтиленоксида (ПЭО) и полиметилметакрилата (ПММА). При высокой частоте модуль накопления смеси дается соотношением

$$G = G_1 G_2 \frac{\alpha_1 \left(\sum_i \Delta V_i \right)_1 + \alpha_2 \left(\sum_i \Delta V_i \right)_2}{\alpha_1 \left(\sum_i \Delta V_i \right)_1 G_2 + \alpha_2 \left(\sum_i \Delta V_i \right)_2 G_1} \quad (4)$$

где $G_{1,2}$ – модули накопления исходных компонентов 1 и 2; $\alpha_{1,2}$ – их молярные доли, $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1$ и $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_2$ – ван-дер-ваальсовы объемы компонентов 1 и 2.

Для ПЭО $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{\text{ПЭО}} = 43.7 \text{ \AA}^3$ (компьютерная программа «Каскад», ИНЭОС

РАН); $G_{\text{ПЭО}} = 0.112 \text{ кг/см}^2 = 11200 \text{ Н/м}^2$, а для ПММА $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{\text{ПММА}} = 96.4 \text{ \AA}^3$,

$G_{\text{ПММА}} = 0.08 \text{ кг/см}^2 = 8000 \text{ Н/м}^2$. Расчеты величин $G_{\text{ПЭО}}$ и $G_{\text{ПММА}}$ проведены по соотношениям, полученным в работе [8].

Зависимости G от концентрации ПЭО в смеси помещены в таблицу 1.

Таблица 1. Величины модуля G для смесей ПММА и ПЭО.

$\alpha_{\text{ПЭО}}, \%$	$\alpha_{\text{ПММА}}, \%$	$G, \text{ Н/м}^2$
0	100	8000
20	80	8240
40	60	8570
60	40	9050
80	20	9810
100	0	11200

Рассмотрим сначала температурные зависимости модуля накопления и модуля потерь. Положим для определенности, что $\alpha_{\text{ПЭО}} = 40\%$, $\alpha_{\text{ПММА}} = 60\%$, и средневесовая молекулярная масса $M_w = 40000 \text{ г/моль}$. Тогда, модуль накопления при высокой частоте равен $G = 8570 \text{ Н/м}^2$, и время релаксации как функции температуры и вязкости дано в таблице 2:

Таблица 2. Величины η_0 и τ при различных молекулярных массах.

$T, \text{ К}$	400К	415К	430К	445К	460К	475К
----------------	------	------	------	------	------	------

$h_0, \text{Н} \times \text{сек} / \text{м}^2$	1387974	105633,1	283,394	146,5121	79,3779	44,8478
$\tau, \text{сек}$	81.0	6.16	0.0165	0.00855	0.00463	0.00262

Соответствующие частотные зависимости модуля накопления и модуля потерь представлены на рисунке 1. Модуль накопления отложен сплошными линиями, а модуль потерь – пунктирными линиями.

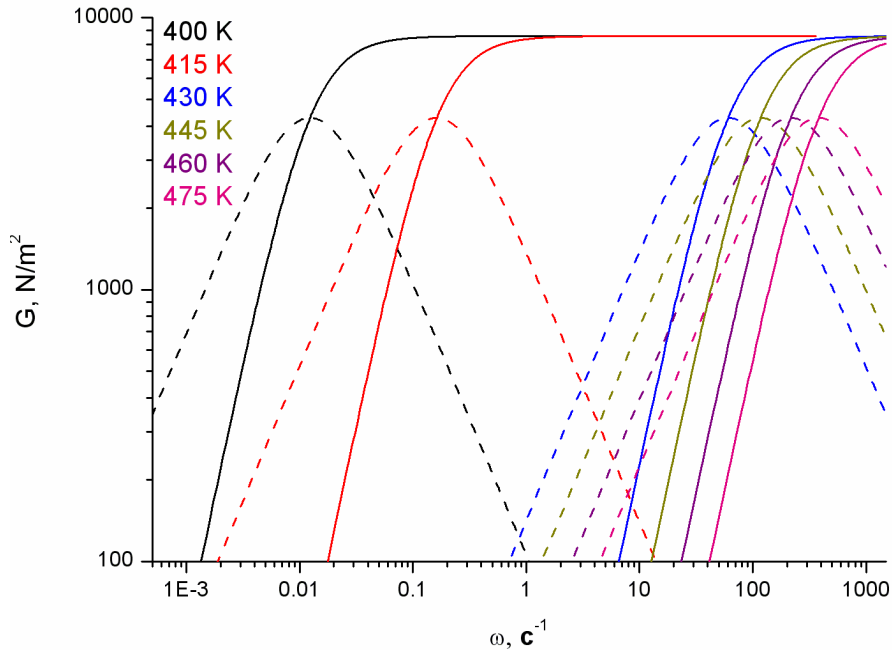


Рис. 1. Зависимости модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') от частоты при различных температурах.

Для того чтобы изучить концентрационную зависимость модулей положим $T = 445 \text{ K}$, и, снова примем $M_w = 40000 \text{ г/моль}$. Тогда, получим следующие зависимости от состава композиции при высокой частоте модуля накопления, вязкости и времени релаксации:

Таблица 3. Величины η_0 и τ при различных молекулярных массах.

$\alpha_{\text{ПЭО}}, \%$	0	20	40	60	80	100
$G, \text{Н} / \text{м}^2$	8000	8240	8570	9050	9810	11200
$h_0, \text{Н} \times \text{сек} / \text{м}^2$	130.4	125.0	146.5	245.8	447.7	419.3
$\tau, \text{сек}$	0.0082	0.0076	0.0086	0.0136	0.0228	0.0187

Соответствующие частотные зависимости модуля накопления и модуля потерь показаны на рисунках 2 и 3. Модули накопления отложены в виде сплошных линий и модули потерь – в виде пунктирных линий.

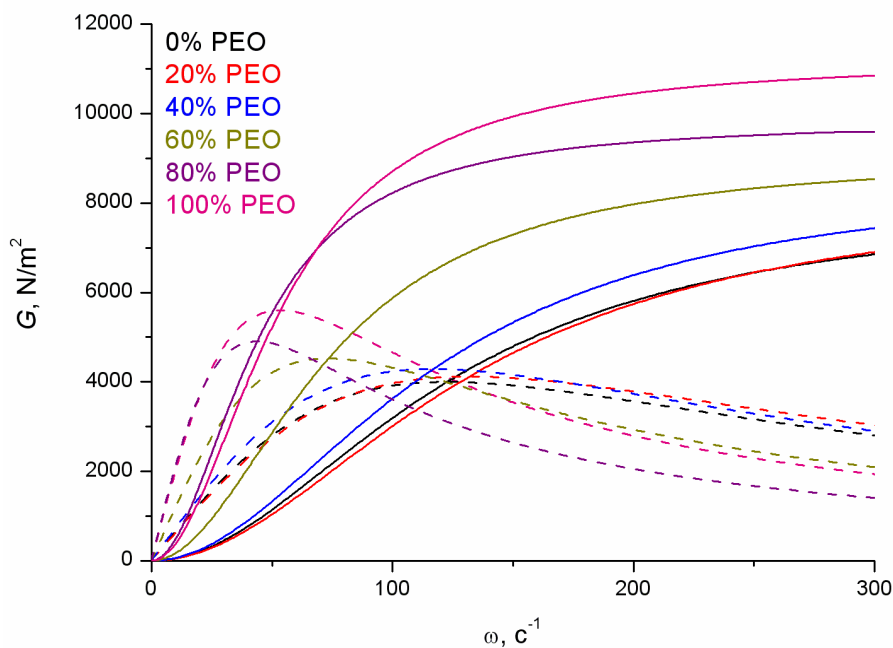


Рис. 2. Зависимости модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') при различном содержании ПЭО.

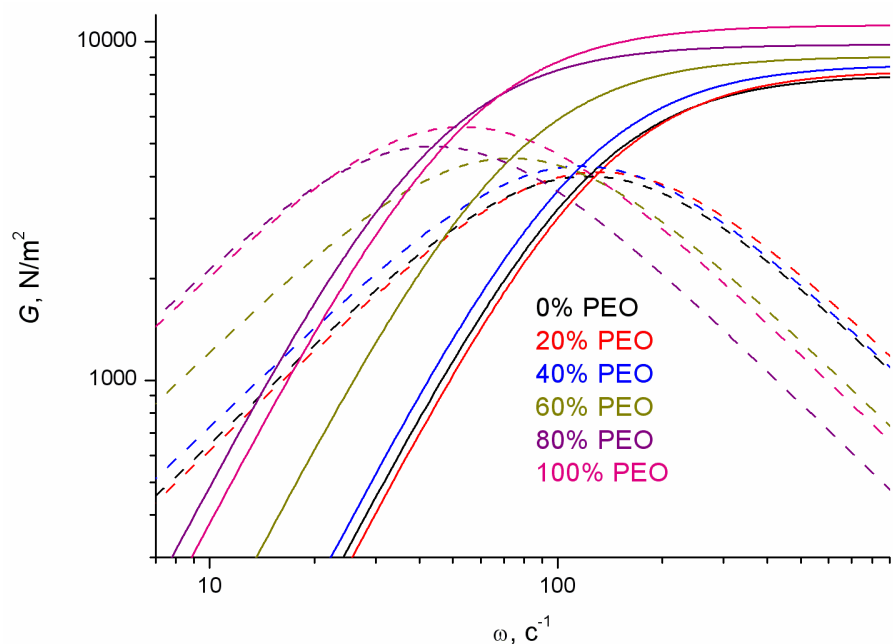


Рис. 3. Зависимости модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') при различном содержании ПЭО.

Окончательно, чтобы проанализировать зависимость от молекулярной массы, положим $T = 445 \text{ K}$, и $\alpha_{\text{ПЭО}} = 40\%$, $\alpha_{\text{ПММА}} = 60\%$. Тогда $G = 8560 \text{ Н/м}^2$, а время релаксации в функции молекулярной массы дано в таблице 4:

Таблица 4. Величины η_0 и τ при различных молекулярных массах.

M_w , г/моль	2000	6000	12000	20000	40000	80000
h_0 , Н×сек/м ²	5.849	17.546	35.09	57.06	146.5	1546.55
τ , сек	0.00034	0.00102	0.00205	0.0033	0.0085	0.0902

Соответствующие частотные зависимости модуля накопления и модуля потерь представлены на рисунках 4 и 5. Модули накопления отложены в виде сплошных линий и модули потерь – виде пунктирных линий.

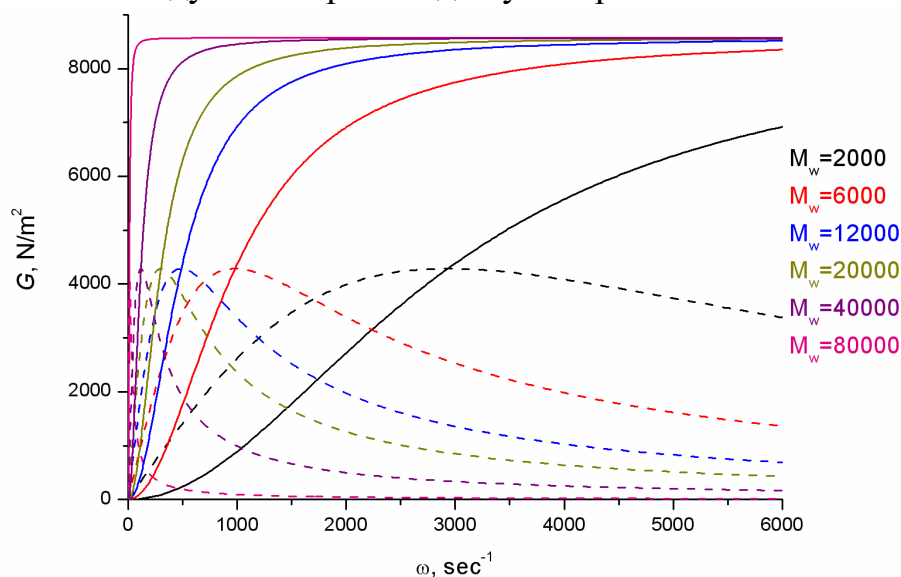


Рис. 4. Зависимости модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') при различных молекулярных массах.

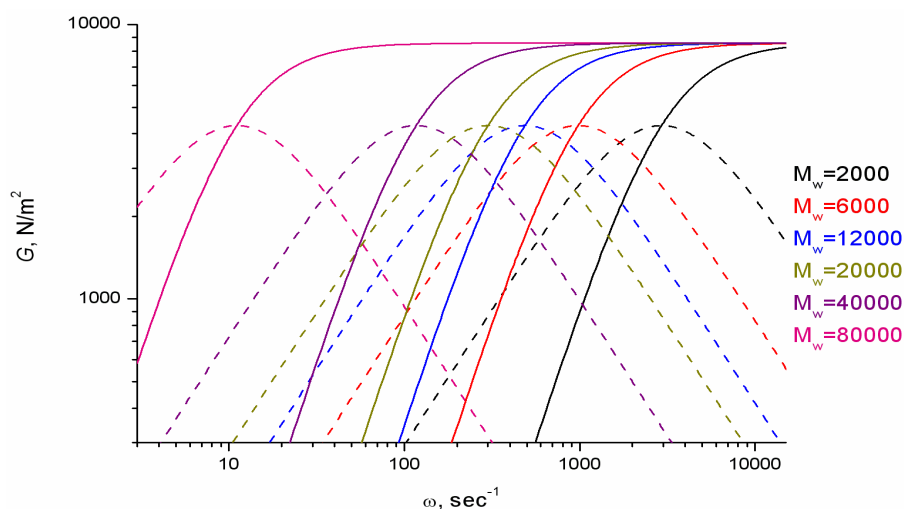


Рис. 5. Зависимости модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') при различных молекулярных массах.

Заклучение.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность прогнозирования частотных зависимостей составляющих комплексного модуля упругости для смесей полимеров. Эти зависимости получены на основании химического строения повторяющихся звеньев полимеров, находящихся в совместимой смеси. При разных температурах опыта ход зависимостей меняется: с ростом температуры зависимости смещаются в область более высоких частот. С ростом содержания компонента с более низкой температурой стеклования эти зависимости смещаются в сторону низких частот. Наконец, с ростом молекулярной массы смесей полимеров анализируемые зависимости смещаются к

более низким частотам. Проведенная работа позволяет прогнозировать поведение полимерных материалов при динамических воздействиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретико - экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007.

Библиографический список:

1. Seung-Yeop Kwak, Jeongsoo Choi, Hee Jae Song. Viscoelastic Relaxation and Molecular Mobility of Hyperbranched Poly(ϵ -caprolactone)s in Their Melt State. / Seung-Yeop Kwak // Chem. Mater. 2005. 17/5. p. 1148-1156.
2. Pattamaprom C., Larson R.G., Sirivat A. Determining polymer molecular weight distributions from rheological properties using the dual-constraint model. / Pattamaprom C. // Rheol. Acta. 2008. 47/7. P. 689-700.
3. Chenyang Liu, Jian Yu, Jiasong He, Wei Liu, Chunyan Sun, and Zhenhua Jing. A Reexamination of G_N^0 and M_e of Syndiotactic Polypropylenes with Metallocene Catalysts. / Chenyang Liu // Macromolecules. 2004. 37/24. P. 9279-9282.
4. Raju V.R., Smith G.G., Marin G., Knox J.R., Graessley W.W. Properties of amorphous and crystallizable hydrocarbon polymers. II. Rheology of linear and star-branched polybutadiene. / Raju V.R. // J. of Pol. Sci., Polymer Physics Edition. 1979. 17/7. P. 1183-1195.
5. Rochefort W.E., Smith G.G., Rachapudy H., Raju V.R., Graessley W.W. Properties of amorphous and crystallizable hydrocarbon polymers. I. Melt rheology of fractions of linear polyethylene. / Rochefort W.E. // J. of Pol. Sci., Polymer Physics Edition. 1972. 17/7, p. 1197-1210.
6. Виноградов Г.В., Малкин А.Я., Яновский Ю.Г., Борисенкова Е.К., Ярлыков Б.В., Бережная Г.В., Шаталов В.П., Шалганова В.Г., Юдин В.П. Вязкоупругие свойства и течение полибутадиенов и полиизопренов. / Виноградов Г.В. // Высокомолек. Соед. 1972. 14А. № 11. С. 2425-2442.
7. Raju V.R., Rachapudy H., Graessley W.W. Properties of amorphous and crystallizable hydrocarbon polymers. IV. Melt rheology of linear and star-branched hydrogenated polybutadiene / V.R. Raju // J. of Pol. Sci., Polymer Physics Edition. 1979. 17/7. P.1223-1235.
8. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А., Петунова М.Д., Коврига О.В., Попова М.Н.. Расчетная схема для оценки модулей накопления и потерь в зависимости от химического строения полимера и состава смеси / Т.А. Мацеевич // Пластические массы. 2017. № 1-2. С. 25-27.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

И.В. Козлова¹, канд. техн. наук, доцент

О.В. Земскова¹, канд. хим. наук, доцент

М.О. Дударева¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. В статье приведен обзор литературных источников, касающийся биологического повреждения цементного камня, рассмотрены основные факторы бактериальной и микологической коррозии искусственного каменного материала. Приведен обзор методов борьбы с биоповреждением, которые подразумевают использование биоцидных модификаторов в виде пропиток, различного состава добавок минерального и органического происхождения. Рассмотрена возможность введения в состав цементного композита экологически безопасной и нетоксичной для человека фотокаталитически активной добавки титаната висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, обладающего способностью к минерализации некоторых органических и неорганических загрязнителей в видимой части спектра, что, вероятно, могло бы снизить концентрацию продуктов жизнедеятельности микроорганизмов-биодеструкторов и повысить биокоррозионную стойкость цементных строительных материалов.

Ключевые слова. Цементный камень, биоповреждение, микроорганизмы, карбоновые кислоты, фотокатализатор

Коррозия цементного камня может протекать под воздействием ряда агрессивных газовых и жидких сред, содержащих растворы кислот, щелочей, солей, некоторых органических соединений. Проникая в поры искусственного каменного материала, они активно вступают во взаимодействие с его компонентами: гидроксидом кальция и другими продуктами гидратации минералов цементного клинкера.

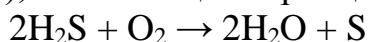
Однако, на сегодняшний момент недостаточно внимания уделяется процессу разрушения цементного камня в результате воздействия на него продуктов жизнедеятельности живых микроорганизмов: бактерий и грибов, которые проникают в толщу цементного камня даже в отсутствие крупных трещин через поры и капилляры, снижая эксплуатационные и декоративные характеристики материала, а также ухудшая экологическую обстановку пространства. Некоторые микроорганизмы выделяют в окружающую среду токсичные вещества и аллергены, которые могут вызвать у человека так называемый «синдром больного здания» - появление болезненности, проблем с дыхательной системой без видимых причин [1,2].

К распространенным видам микроорганизмов, провоцирующих деструкцию цементного камня, относятся литотрофные бактерии, которые в процессе метаболизма используют энергию окисления минеральных веществ:

- нитрифицирующие, окисляющие аммиак до азотной кислоты:



- тионовые (серобактерии), окисляющие сероводород до серной кислоты:





Образующиеся кислоты взаимодействуют с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который является продуктом гидратации минералов цементного клинкера, приводя к его вымыванию и провоцируя нарушение целостности материала, порообразование и появление трещин на его поверхности.

- железобактерии, окисляющие катионы железа (II) до катионов железа (III):

$4\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{CO}_2$, а также многочисленные группы грибов [3,4].

Широко распространенные разнообразные микроскопические грибы, поселяясь на поверхности бетонных конструкций, вызывают их обрастание и окрашивание, ухудшая прочностные, эксплуатационные и эстетические характеристики. Наиболее агрессивными по отношению к конструкционным материалам продуктами жизнедеятельности грибов являются одно-, двух-, трехосновные карбоновые кислоты (уксусная, лимонная, винная, яблочная, фумаровая, янтарная, щавелевая), которые уже в небольших концентрациях они способны приводить к разрушению цементного материала [5].

Защита цементных вяжущих от микроорганизмов предполагает, как правило, нанесение на поверхность, пропитку или введение в состав цементного композита биоцидных добавок (бактерицидных и фунгицидных), способных улучшить санитарно-гигиенические показатели поверхности: оксиды, соли и комплексные соединения бора, меди, хрома, цинка, мышьяка, карбоновые и оксикарбоновые соединения, фенолы, хлорфенолы, карбаминовые и тиокарбаминовые кислоты [6,7,8]. К наиболее современному варианту модификаторов можно отнести фотокаталитически активные соединения, способные обеспечивать долгосрочную биозащиту и не обладающие токсичными свойствами. Применение фотокатализаторов в различных областях науки и народного хозяйства можно причислить к передовым «зеленым» технологиям в условиях стратегии экологически ориентированного роста [9,10].

Известным фотокатализатором, применяемым в строительной индустрии является оксид титана (IV) TiO_2 , который является химически устойчивым, нетоксичным и недорогим. Его применяют в качестве белого пигмента, а также вводят в состав цементных смесей для достижения эффекта самоочищающейся поверхности с повышенной гидрофильностью [11,12]. Частицы оксида титана в модификации анатаза способны окислять некоторые летучие органические соединения, а также участвовать в процессе минерализации оксидов азота, что способствует очищению воздушного бассейна мегаполисов. Однако, недостатком оксида титана служит тот факт, что свои фотокаталитические свойства он может проявлять только под действием ультрафиолетового излучения. Известно, что титанат висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ обладает фотокаталитической активностью в видимом диапазоне спектра и проявляет активность в реакциях разложения некоторых органических соединений: органических красителей (метилоранж, родамин Б), фенола, бисфенола А [13,14].

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ относится к фазам Ауривиллиуса со слоистым строением, в котором висмуткислородные слои $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ чередуются с перовскитными слоями $(\text{Bi}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10})^{2-}$. Фотокаталитический процесс начинается со стадии переноса элек-

тронов из валентной зоны в зону проводимости под воздействием света с энергией равной или большей, чем энергия запрещенной зоны. Затем электроны перемещаются на поверхность полупроводникового фотокатализатора, где они в свою очередь могут окислять адсорбированные органические молекулы [15].

Существует ряд исследований [16,17,18], согласно результатам которых слоистый титанат висмута и подобные ему фотокаталитически активные полупроводники находят применение при производстве фильтров очистки воды и воздуха. Предположительно, модифицирование цементных композитов титанатом висмута способно уменьшить концентрацию образованных грибами карбоновых кислот в приповерхностном слое цементного материала, тем самым обеспечивая длительную защиту от биокоррозии.

Библиографический список:

1. Sick building syndrome. Encyclopedia of Environmental health (Second Edition), 2019.
2. Фомичев В. Т. Повышение биостойкости строительных материалов / В. Т. Фомичев, С. В. Камкова, Н. А. Филимонова. // Вестник ВолгГАСУ. Сер.:Строительство и архитектура. - 2012. 27(46).
3. Строганов. В.Ф. Биоповреждение строительных материалов / В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев. Учебное пособие. Казань, 2018.
4. Камалян Р.С. Исследование влияния органических кислот на наполненное цементное вяжущее. / Грищенко Д. И., Камалян Р. С., Лаврентьев О. В. Исследование влияния органических кислот на наполненное цементное вяжущее [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2014. – Спецвыпуск.
5. Строганов В.Ф. Биоповреждение строительных материалов / В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев. // Строительные материалы. Научно-технический и производственный журнал. 2015.
6. Гаврильчик А.В. К вопросу о применении биоцидных добавок при изготовлении эффективных бетонных смесей и бетонов. / А.В. Гаврильчик.
7. Wei Shiping. Microbiologically induced deterioration of concrete. – A review. Shiping Wei, Zhenglong Jiang, Hao Liu, Dongsheng Zhou, Mauricio Sanchez-Silva // Brazilian Journal of Microbiology. 2013. Vol. 44(4). P. 1001-1007 .
8. Сураева Е.Н. Исследование биостойких сухих строительных смесей, модифицированных углеродными нанотрубками / Е.Н Сураева, В.Т. Ерофеева, Е.В. Королев. // Вестник МГСУ. № 4 2015. С.104-114
9. Фиговский О. Зелёные технологии. Обзор новых научно-технических разработок. / О. Фиговский, В. Гумаров. // Научно-культурологический журнал RELGA 12.03.2018.
10. Yongyu Li. Iodine-sensitized Bi₄Ti₃O₁₂/TiO₂ photocatalyst with enhanced photocatalytic activity on degradation of phenol. Y. Li, L. Dang, L. Han, P. Li, J. Wang, Z. Li. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical Vol. 379. - 2013. P.146-151.
11. Hanson Sh. Evaluation of concrete containing photocatalytic titanium dioxide. / Sh. Hanson. A dissertation Doctor of philosophy. University of Utah, 2014.
12. Патент на изобретение №2522370 С2. ИТАЛЧЕМЕНТИ. Авторы А. Ренато, Б. Массимо, М.М. Илер. Поиск по базе данных ФИПС.
13. Y. Liua. Enhanced photocatalytic activity of Bi₄Ti₃O₁₂ nanosheets by Fe³⁺-doping and the addition of Au nanoparticles: Photodegradation of Phenol and bisphenol A. / Y. Liua,

G. Zhua, J. Gaoa, M. Hojamberdieva, R. Zhub, X. Wei, Q. Guoc, P. Liua. Applied catalysis B: Environmental. 200(217) 72-82.

14. А.Г. Краснов, М.С. Королева, И.В. Пийр, Т.Е. Короткова. Синтез катионсодержащих титанатов висмута и их фотокаталитические свойства. Известия Коми научного центра УрО РАН выпуск 2(18). Сыктывкар, 2014.

15. И.А. Родионов, И.А. Зверева. Фотокаталитическая активность слоистых перовскитоподобных оксидов в практически значимых химических реакциях. Успехи химии 85(3) 248-279 (2016).

16. Hojamberdiev M. layered bismuth Tungstate – heterogeneous photocatalyst for environmental remediation. / M. Hojamberdiev, Z. Kadirova, Sh. Daminova, Kh. Sharipov. N. Matsushita. // Химия и химическая технология. S2(72). - 2021. – p. 3-11.

17. Kallawar G.A. Bismuth titanate based photocatalyst for degradadion of persistent organic compounds in wastewater: A comprehensive review on synthesis methods, performance as photocatalyst and challenges. / G.A. Kawallar, D.P. Barai, B.A. Bhanvase. // Journal of Cleaner production. 318. - 2021.

18. Zhang Y. A facile method for the preparation of colored Bi₄Ti₃O_{12-x} nanosheets with enganced visible light photocatalytic hydrogen evolution activity. / Y. Zhang, Zh. Chen, Zh. Lu. // Nanomaterials (Basel). 8(4)/ - 2018.

ПОДБОР СОСТАВА БЕТОННОЙ СМЕСИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ «БЕЛАЯ ВАННА»

С.В. Самченко¹, д-р техн. наук, профессор

М.А. Абрамов², канд. техн. наук, доцент

А.О. Мурашов¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Ярославский государственный технический университет*

Аннотация. В работе рассмотрен способ подбор состава бетонной смеси для реализации технологии «белая ванна». В качестве микронаполнителей применяются микрокремнезем и кварцевая мука. Водонепроницаемость бетона оценивается по величине водопоглощения по массе, а также по ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» на стандартных образцах-цилиндрах высотой и диаметром 150 мм. По результатам экспериментов установлено, что применение микрокремнезема и кварцевой муки снижает проницаемость бетона, кроме того, при применении микронаполнителей требуется введение поправки на дозировку пластификатора.

Ключевые слова: бетон высокой водонепроницаемости, технология «белая ванна», гидрозащита, предыстория компонентов.

Одним из ключевых направлений развития городов является освоение подземного пространства. Для обеспечения долговечности подземных конструкций зданий требуются мероприятия по гидрозащите.

В России и за рубежом существует классификация способов гидроизоляции, основанная на «цвете» гидроизоляционного материала, которая выделяет три основных способа гидрозащиты: технология «белая ванна» или первичная защита, «черная ванна» (вторичная защита) и коричневая ванна, которая основана на применении бентонитовых глин [1,2].

При реализации технологии «белая ванна» требуются дополнительные затраты на арматуру (для повышения трещиностойкости конструкций) и модифицированный бетон. В то время как сметная стоимость конструкций, выполненных по технологии «белая ванна» остается неизменной в течение всего срока эксплуатации здания, в то время как стоимость технологии «черная ванна» со временем увеличивается за счет периодических ремонтов гидроизоляционного контура. Однако экономическая эффективность технологии «белая ванна» достигается в период эксплуатации конструкций, который, на основании анализа литературных источников, может наступить уже через несколько лет эксплуатации объекта [3,4].

Одним из ключевых аспектов технологии «белая ванна» является подбор состава бетонной смеси, обеспечивающий высокие показатели водонепроницаемости бетона. В литературе представлено большое количество вариантов составов как добавок, повышающих водонепроницаемость бетона, так и составов

бетонных смесей для получения конструкций высокой водонепроницаемости, кроме того существует большое количество патентов.

На основании анализа литературных источников [5-11] был выбран состав бетонной смеси с высоким показателем водонепроницаемости и воспроизведен на трех различных песках (табл. 1, 2):

- на речном песке с модулем крупности 1,3;
- на карьерном песке с модулем крупности 2,2;
- и на комбинированном отсеве с модулем крупности 3.

В качестве микронаполнителей применялись метакаолин (МТК) и микрокремнезем (МК-85).

Таблица 1. Экспериментальный состав бетона

№ состава	Модуль крупности песка	Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³	В, кг/м ³	С-3, % от Ц	МТК, % от Ц	МК-85, % от Ц	В/Ц
1/1	3,01	322	850	1150	210	1,0	2,5	8,0	0,65
1/2	2,22	322	850	1150	220	1,0	2,5	8,0	0,68
1/3	1,40	322	850	1150	260	1,0	2,5	8,0	0,81

Водонепроницаемость бетона оценивалась косвенным методом по величине водопоглощения по массе в соответствии с приложением Е СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии»

Таблица 2. Результаты испытаний контрольных образцов

№ состава	Модуль крупности песка	Прочность на изгиб, МПа	Прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение по массе, %	Коэффициент трещиностойкости	Плотность, кг/м ³
1/1	3,01	4,97	23,15	5,94	0,21	2223
1/2	2,22	6,53	17,88	5,69	0,36	2236
1/3	1,40	4,77	14,72	6,44	0,32	2129

По результатам испытаний контрольных образцов минимальное водопоглощение по массе составило 5,69%, что соответствует марке бетона по водонепроницаемости менее W4, в то время как авторами состава бетонной смеси был получен бетон марки W16. Для дальнейшей работы был выбран песок с модулем крупности 2,22, так как изготовленные на нем образцы отличаются минимальным водопоглощением по массе и наибольшим коэффициентом трещиностойкости.

Одной из возможных причин подобного результата является различная предыстория компонентов бетонной смеси, когда вследствие их большого разнообразия происходят непрогнозируемые химические реакции. Такие реакции, возможно, оказывают существенное влияние на формирование структуры бетона и его конечные свойства.

На основании анализа исходного экспериментального состава бетонной смеси метакаолин, состоящий в основном из силикатов алюминия, был заменен на кварцевую муку с массовой долей кремнезема более 98%. Кроме того, суперпластификатор С-3 был заменен гиперпластификатором MasterGlenium 115,

дозировка которого (1,5% от массы цемента) была назначена в соответствии с рекомендациями производителя (табл. 3).

Контрольные образцы-цилиндры диаметром 150 мм, изготовленные из равноподвижных бетонных смесей, были испытаны по ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» (табл. 4).

Таблица 3. Скорректированный экспериментальный состав бетона

№ состава	Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³	Пластификатор, % от Ц	МК-85, % от Ц	Кварцевая мука, % от Ц	В/Ц
2/1	350	750	1150	MasterGlenium 115, 1,5	12,0	5,0	0,47
2/2	350	750	1150	MasterGlenium 115, 2	12,0	15,0	0,45

Таблица 4. Результаты испытания контрольных образцов скорректированного состава бетона

№ состава	Прочность на изгиб, МПа	Прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение по массе, %	Коэффициент трещиностойкости	Плотность, кг/м ³	Глубина проникновения воды под давлением 0,5 МПа, мм	Марка бетона по водонепроницаемости
2/1	6,61	36,80	4,65	0,18	2371	110-120	W6
2/2	6,09	44,20	4,16	0,14	2454	34-40	W8

По результатам испытаний контрольных образцов установлено, что марке бетона по водонепроницаемости W8 соответствует водопоглощение по массе 4,16%, W6 – 4,65%, что соответствует приложению Е СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии», где сказано, что марке бетона по водонепроницаемости W8 соответствует водопоглощение по массе 3,7...4,2%, W6 – 4,2...4,7%. Следовательно, возможно использование показателя водопоглощения по массе для предварительной оценки водонепроницаемости бетона.

При увеличении расхода кварцевой муки и пластификатора возможно получение равноподвижных бетонных смесей с почти равным водоцементным отношением, однако отличающихся по физико-механическим характеристикам (плотности, прочности, водонепроницаемости). Данные результаты свидетельствуют об эффективности применения кварцевой муки в качестве микронаполнителя для изготовления бетонов для технологии «белая ванна».

Выводы:

- увеличение дозировки кварцевой муки на 10% от массы цемента и суперпластификатора MasterGlenium 115 0,5% от массы цемента позволяет повысить водонепроницаемость бетона на 1 ступень со снижением водопоглощения по массе на 0,49% и увеличением плотности бетона на 3,5%;

- при введении микронаполнителей в состав бетона требуется введение поправки к расходу пластификатора сверх рекомендаций производителя.

Таким образом, показана принципиальная возможность получения водонепроницаемого бетона для технологии «белая ванна», реализация которой в про-

изводстве может быть как при освоении подземных пространств городов, так и для гидротехнического строительства и устройстве сооружений санации территорий.

Библиографический список:

1. Фурманов Н.Е. Благоприятный состав бетона для изготовления конструкций по системе «Белая ванна» // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3 (77). С. 11-16.
2. Moosbauer H. Schwarze Wannen – Weiße Wannen – Braune Wannen. Abdichtung von Bauwerken gegen Wasserbelastungen // Tiefbau.- 2000. - Vol. 112. No. 4. pp. 221–227. ISSN 0944-8780
3. Кардунян Г.С., Иванов С.И. Система защиты железобетонных конструкций от подземных вод «белая ванна» // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-21-26>
4. Кардунян Г.С. Низкотермичные бетоны с компенсированной усадкой, модифицированные комплексной добавкой «ЭМБЭЛИТ», для водонепроницаемых конструкций по системе «Белая ванна»// Строительные материалы. 2012. №11. С. 49-55.
5. Морозов Н.М., Боровских И.В., Галеев А.Ф. Влияние вида песка на свойства мелкозернистого бетона // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 370-375.
6. Базоев О.К. Универсальная добавка Д-5 для бетонов нового поколения // Вестник Владикавказского научного центра. 2006. Т.17, №3. С. 41-44.
7. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С. Разработка составов водонепроницаемых бетонов с использованием комплексной полифункциональной добавки // Системные технологии. 2018. № 26. С. 93-97.
8. Бутакова, М.Д. Влияние кремний содержащих добавок на свойство водонепроницаемости бетонных образцов / М.Д. Бутакова, А.В. Михайлов, С.С. Сарибекян // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 34–41.
9. Холин С. Применение микрокремнезема на бетонных производствах// Популярное бетоноведение. 2004. № 2. С. 65–69.
10. Naruehansapong S., Pulngern T., Chucheepsakul S. Effect of Nanosilica Particle Size on the Water Permeability, Abrasion Resistance, Drying Shrinkage, and Repair Work Properties of Cement Mortar Containing Nano-SiO₂// Advances in Materials Science and Engineering/ 2017. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/4213690>
11. Bohus S., Rostislav Drochytka R., L Taranza L. Fly-ash usage in new cement-based material for concrete waterproofing// Advanced Materials Research. 2012. Vols. 535-537. pp 1902-1906. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1902

К ВОПРОСУ ОБ АКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.В. Самченко¹, д-р техн. наук, профессор

М.А. Абрамов², канд. техн. наук, доцент

А.Б. Османов¹, аспирант

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Ярославский Государственный Технический Университет

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с активацией цементного вяжущего путем измельчения в дезинтеграторной установке. Выяснено увеличение удельной поверхности цемента после первого пропуска вещества через дезинтеграторный аппарат на 17,7%. Проведены микроскопические исследования частиц цементного вяжущего после активации в дезинтеграторе. Показано образование трещин на частицах цемента, что обусловлено ударным методом их разрушения. Выполнена математическая обработка результатов измельчения цементного вяжущего, построена интегральная и дифференциальная кривая распределения частиц цемента по размерам. Установлено, что увеличение минимальной фракции 0 – 1 мкм в активированном цементе составляет 88%.

Ключевые слова: Активация цемента, дезинтегратор, измельчение цементного вяжущего.

Бурное развитие и изучение бетонной смеси и содержащихся в ней компонентов продолжается более семидесяти лет. Одним из основных компонентов бетонной смеси является вяжущее вещество – цемент. Над изменением характеристик цементного вяжущего занимались и занимаются большинство ученых. Одним из способов улучшения характеристик вяжущего вещества является предварительная подготовка, иными словами – его активация. Активационные методы приводят к получению более тонкодисперсных частиц, модификации поверхностной структуры частиц, созданию физических дефектов в подрешетках и решетках минералов [1].

Современная активация вяжущего вещества насчитывает более 10 способов, среди которых: ультразвуковая обработка [2,3], жидкофазная активация, или механохимическая активация цементной суспензии [4,5]. Простым и эффективным способом предварительной подготовки вещества является его измельчение в специальных энергонапряженных аппаратах, одним из которых является дезинтегратор [6-8].

Дезинтеграторы являются мельницами ударного действия, имеющие широкий диапазон производительности, а также позволяющие измельчать материалы широкого диапазона твердости, варьировать удельную энергию обработки измельчаемого материала путем смены роторов и изменением числа оборотов двигателя [8-11].

В данной работе для исследования физико-химических закономерностей твердения цементного вяжущего использовался цемент М500 Д0 (СЕМ I 42, Н), «Подольск-Цемент». Химический состав клинкера представлен в таблицах 1.

Для активации цементного клинкера использовался дезинтегратор ДСЛ-94. При определении удельной поверхности использовался метод воздухопроницаемости с использованием прибора Товарова Т-3.

Таблица 1. Химический состав клинкера

Компоненты	ППП	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O
Клинкер	0,92	62,75	20,10	4,56	8,72	1,99	0,57	1,58

За один проход цемента в дезинтеграторной установке, удельная поверхность цементного порошка увеличилась на 17,7 % (Рис.1), что обусловливается измельчением частиц цемента в дезинтеграторной установке.

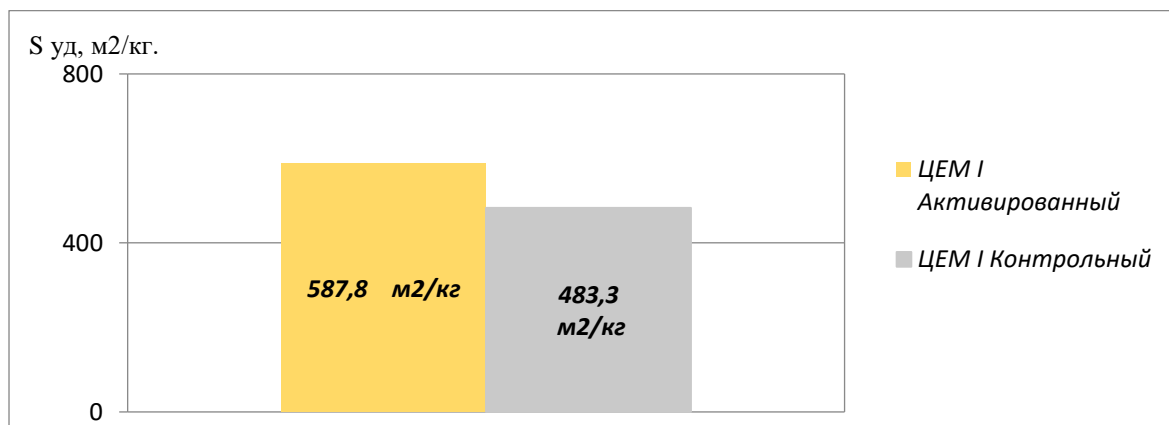
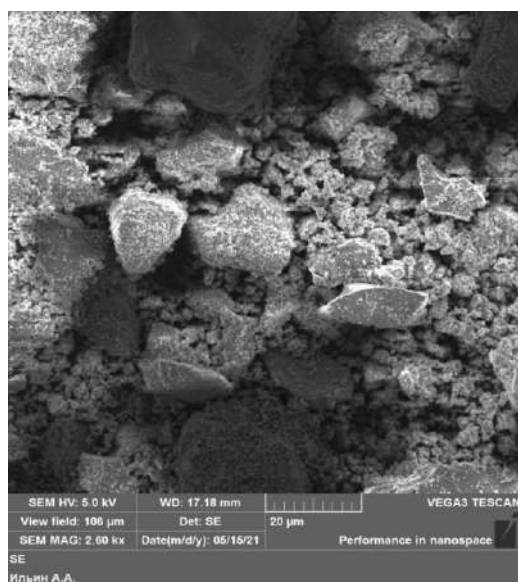
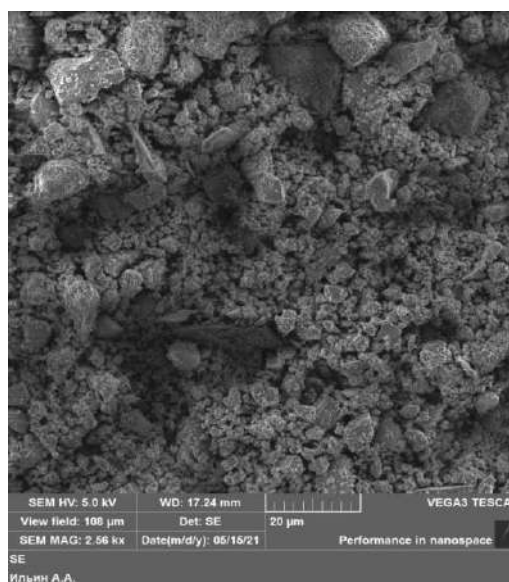


Рис. 1. Изменение удельной поверхности активированного цементного клинкера в сравнении с контрольным образцом.



Контрольный ЦЕМ I



Активированный ЦЕМ I

Рис. 2. Микрофотографии цементного клинкера до и после измельчения в дезинтеграторе (увеличение 20 мкм)

Проведенный микроскопический анализ отчетливо показал разрушение, а также изменение размеров цементных частиц. Иллюстрирующие это микрофотографии представлены на рис.2. При сравнении размеров частиц до и после активации можно сделать вывод, что частицы цемента после первого измельче-

ния в дезинтеграторе примерно в 3 раза меньше контрольных частиц. Стоит отметить, что образование трещины на частице цемента подтверждают ударный метод разрушения частиц, а нарушение кристаллической структуры поверхностных слоев твердых тел приводит к переходу их в квазиаморфное метастабильное состояние с повышенным значением свободной энергии, что сопровождается налипанием материала на активированную частицу цемента (Рис.3.).

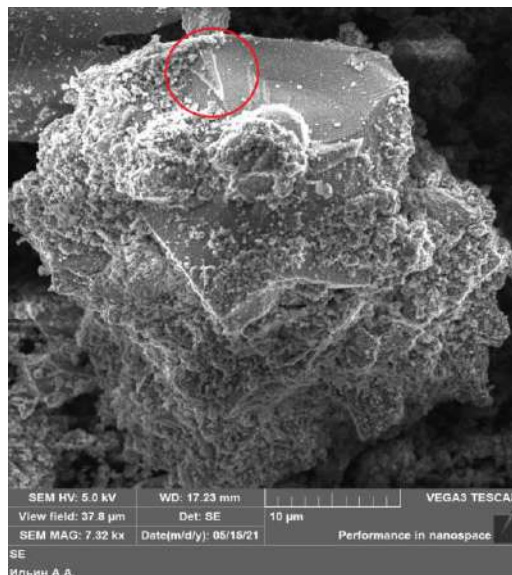


Рис. 3. Образование трещины на частице цемента и аморфизация ее поверхности при активации.

В результате математической обработки определения размеров частиц (до 20 мкм) цементного вяжущего по данным микроскопического анализа [12] получены графики (Рис. 4., Рис. 5.) интегральной и дифференциальной кривой распределения частиц активированного и контрольного цемента, где:

Q_n – Интегральное распределение частиц по размерам;

$\Delta Q_n / \Delta d$ - Дифференциальное распределение частиц по размерам;

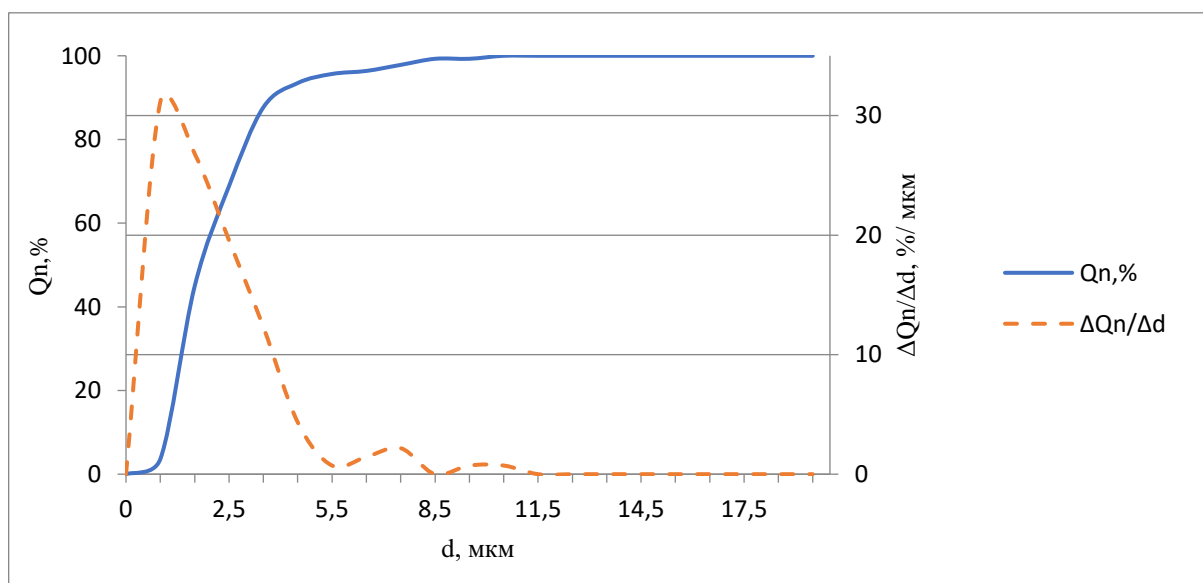


Рис. 4. Интегральная и дифференциальная кривая распределения активированных частиц цемента по размерам.

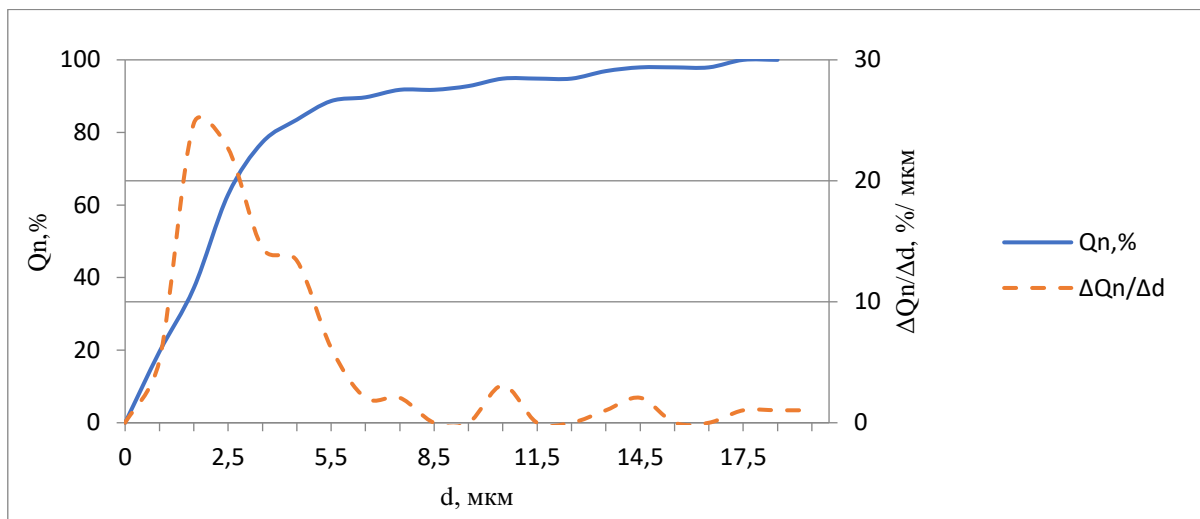


Рис.5. Интегральная и дифференциальная кривая распределения контрольных частиц цемента по размерам.

В результате определения и сравнения интегральных и дифференциальных кривых распределения частиц контрольного и активированного цемента по размерам (до 20 мкм), можно сделать вывод, что средний размер преобладающих частиц (1-2 мкм) в контрольном цементе в 1,54 раза меньше, чем частиц данной фракции в активированном цементе. Преобладающая фракция частиц в активированном цементе, после первого пропуска через дезинтеграторную установку составляет 0-1 мкм – 31,1 %.

При подведении итогов, в работе установлено:

1. Увеличение удельной поверхности цементного клинкера после одного пропуска через дезинтеграторную установку составляет 17,7%.
2. Представленные микрофотографии иллюстрируют ударный метод разрушения частиц цемента, а также характер образования трещин на частицах. Налипание различных фракций материала говорит о активности поверхности частиц.
3. Увеличение минимальной фракции 0 – 1 мкм в активированном цементе составляет 88%.

Библиографический список:

1. Федюк Р.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор)/ Р.С. Федюк, А.В. Мочалов, В.С. Лесовик// Вестник инженерной школы ДВФУ, 2018, №4(37). – С.85-99
2. Samchenko, S., I. Kozlova, O. Zemskova, E. Baskakova Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound //(2019) E3S Web of Conferences, 110, статья № 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061
3. Samchenko, S., Kozlova, I., Zemskova, O., Zamelin, D., Pepelyaeva, A. Complex Method of Stabilizing Slag Suspension // (2019) Advances in Intelligent Systems and Computing 983, с. 817-827. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_80
4. Самченко С.В. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты / Самченко С.В., Егоров Е.С.// Техника и технология силикатов. Международный журнал по вяжущим, керамике, стеклу и эмалям. 2019, Том 26, №2 -С.52-57.

5. Рыбакова М.В., Барбанягрэ В.Д. Интенсификация процесса твердения цементного камня на основе механоактивированной суспензии // II Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей: сборник докладов. Санкт-Петербург: Издательство «АлитИнформ», 2011. С. 140.
6. Кривобородов Ю.Р., Ясько Д.А. Активация цемента для улучшения свойств бетона / Новая наука: проблемы и перспективы. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: РИЦА МИ, - 2015, №3. – С. 105-108
7. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидратацию и твердение цементного камня / Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXX, №7. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016, С. 36-38.
8. Гуринович Л.С., Усов Б.А. Механохимическая обработка строительных материалов // Экология и строительство. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction, 2015. Т. 3, № 3. С. 22.
9. Ставров С.В. Механохимическое получение микронаполнителей для «умных» и многофункциональных бетонов/ С.В. Ставров, М.А. Абрамов.// Молодые ученые – Развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК), 2020 - С.635-638
10. Шаманов В.А., Радыгин Р.В., Корякова К.С. Активация цемента при помощи гидродинамического генераторов.
11. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика [Монография] / М.А. Промтов. Москва: Издательство Машиностроение-1, 2001. 260 с.
12. Гаврилова Н.Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов/Н.Н. Гаврилова, В.В. Назаров, О.В. Яровая – М.: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2012. 56 с.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОНКОМОЛОТОЙ БАРИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

С.В. Самченко¹, д-р техн. наук, профессор

Н.В. Новиков¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Активное развитие ядерных технологий в нашей стране обуславливает необходимость изучения и внедрения новых строительных материалов, эффективно экранирующих потоки ядерных частиц и фотонов. Целью данной работы является исследование влияния разрабатываемой тонкомолотой барийсодержащей добавки для радиационно-защитных композиционных материалов на физико-механические свойства цемента. В работе определено количество и тонкость помола барийсодержащей добавки, которая может быть применена для создания композиционного материала специального назначения. Установлено, что при увеличении количества барийсодержащей добавки возрастает водопотребность материала и сроки схватывания цементного теста. Плотность материала возрастает с увеличением содержания и тонкости помола добавки. Получена зависимость прочности цемента от процентного содержания и тонкости помола барийсодержащей добавки

Ключевые слова: Тонкомолотая барийсодержащая добавка, баритовый цемент, радиационно-защитные строительные материалы.

Введение

На текущем этапе развития ядерных технологий, неоспорима перспективность их развития и широкий спектр применения, что подтверждается программой развития атомного комплекса Российской Федерации [1], согласно которой прирост объемов реализации гражданской продукции атомного энергопромышленного комплекса к 2027г. должен составить 163,2% по отношению к аналогичным показателям в 2019г.

Этим продиктована необходимость развития строительного материаловедения в области создания надёжных и эффективных радиационно-защитных строительных материалов и изделий, для обеспечения безопасных условий эксплуатации ядерных технологий.

В качестве таких материалов активно применяются барийсодержащие бетоны. Наличие в составе портландцемента тяжелого элемента бария позволяет значительно улучшить радиационно-защитные свойства [2]. Согласно данным [3] баритовый бетон с объемным весом 3,49-3,6 т/м³ уменьшает на одну треть толщину защиты от гамма-излучения по сравнению с обычным бетоном. Кроме того, барийсодержащие бетоны обладают высоким макроскопическим сечением выведения быстрых нейтронов 0,105см⁻¹, что обеспечивает большую эффективность баритового бетона для защиты от нейтронного потока [3-5].

Экспериментальная часть

В данной работе исследуется влияние тонкомолотой добавки на основе минерального сырья барита на физико-механические свойства композиционного материала, в зависимости то её количества и тонкости помола.

В качестве сырья для исследования использовался цемент Евроцемент М500 Д0 ЦЕМ I 42,5 в соответствии с ГОСТ 30515-2013 и баритовый концентрат КБ-3 в соответствии ГОСТ 4682-84, ГОСТ 30240-95, производства ООО «Богградский ГОК» с долей сернистого бария 90%, измельчённый на шаровой мельнице до достижения удельной поверхности 310 м²/кг, 570 м²/кг и 830 м²/кг. Величина удельной поверхности измерялась при помощи прибора ПСХ согласно ГОСТ 21043-87.

Были изготовлены 10 партий образцов с использованием бездобавочного портландцемента и тонкомолотой барийсодержащей добавки (далее – ТБД) в количестве 10, 20 и 30% от массы вяжущего. Количество и удельная поверхность ТБД в составе образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составы испытываемых образцов.

Состав	Количество ТБД от массы вяжущего, %	Удельная поверхность ТБД, м ² /кг
1 (Контрольный)	-	-
2	10	310
3	20	310
4	30	310
5	10	570
6	20	570
7	30	570
8	10	830
9	20	830
10	30	830

Исследовалось влияние ТБД на такие свойства цемента, как нормальная густота и сроки начала схватывания цементного теста, плотность и прочность на сжатие цементного камня.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением количества добавки, возрастает водоцементное отношение необходимое, для получения цементного теста нормальной густоты и сроки начала схватывания цементного теста, увеличение тонкости помола приводит к незначительному снижению необходимого водоцементного отношения (Рис.1, Рис.2).

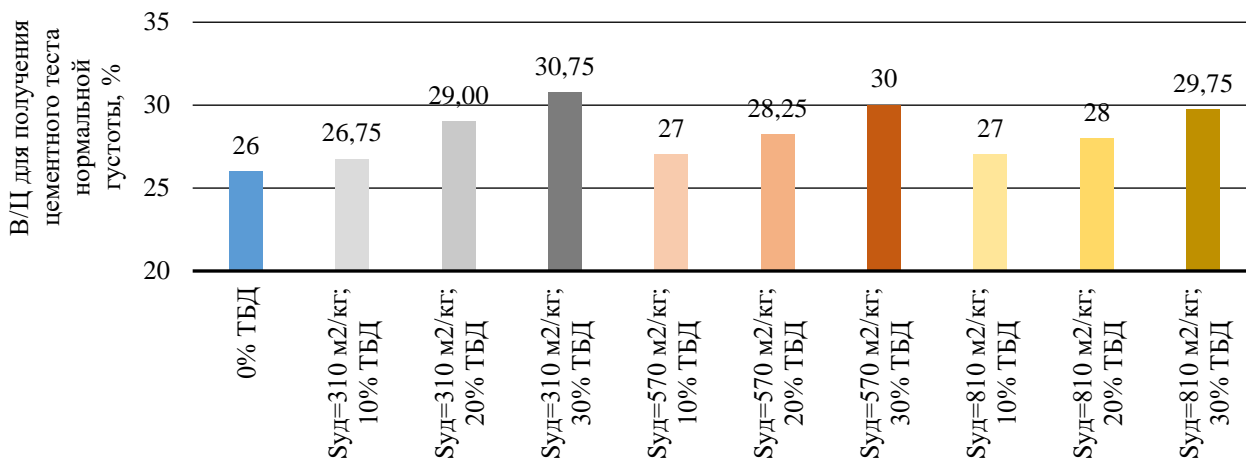


Рис. 1. В/Ц для получения цементного теста нормальной плотности

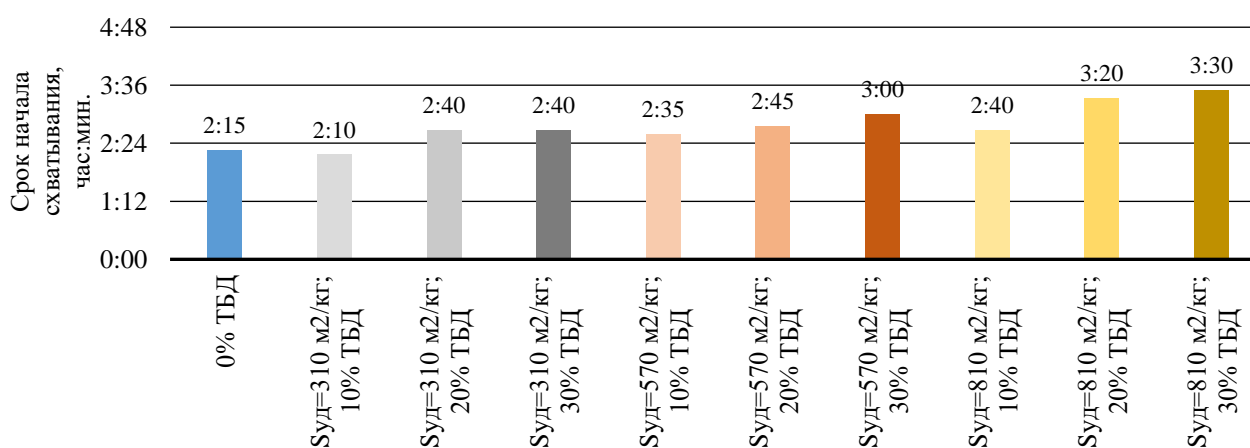


Рис. 2. Срок начала схватывания

Увеличение количества добавки, содержащей тяжелый элемент барий, ожидается приводит к увеличению плотности композиционного материала (Рис.3), также наблюдается увеличение плотности при увеличении тонкости помола добавки.

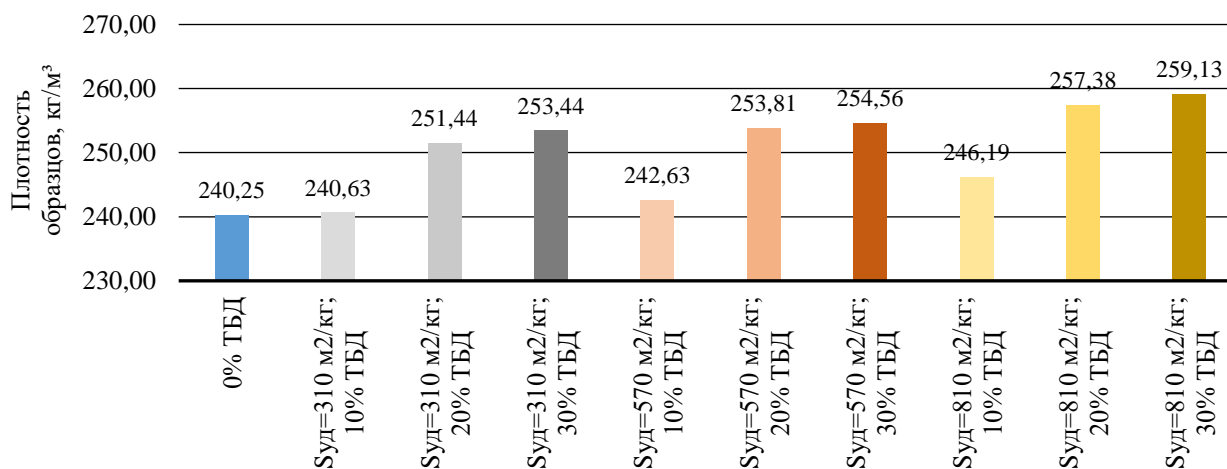


Рис. 3 Плотность образцов

Для описания зависимости прочности на сжатие композиционного материала на 28 сутки набора прочности, была составлена экспериментально-статистическая модель, адекватно описывающая поведение образцов:

$$R_{сж.28} = 101,622 + 1,0388 x_1 - 0,03017 x_1^2 + 0,0244967 x_2 - 0,0000448521 x_2^2$$

Где x_1 - Количество ТБД от массы вяжущего [10%; 30%]; x_2 - Удельная поверхность ТБД [310 м²/кг; 830 м²/кг].

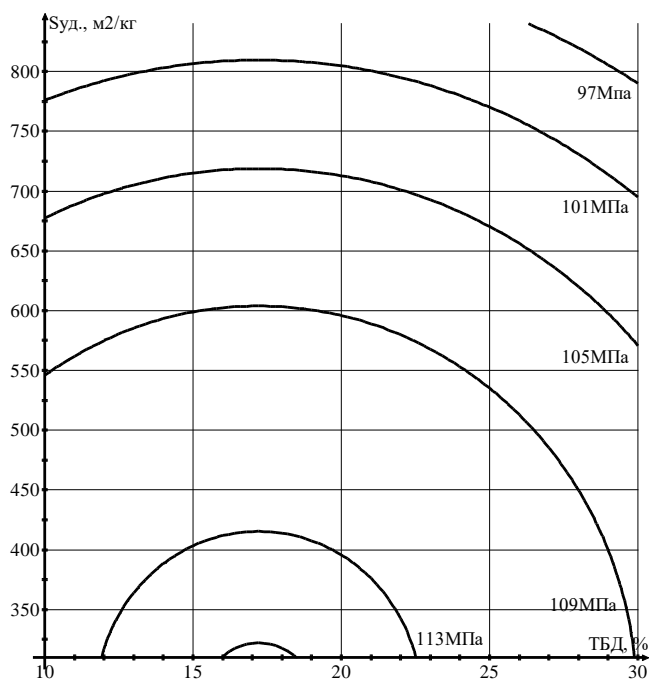


Рис. 4 Прочность образцов на сжатие в возрасте 28 суток

Наилучшие прочностные характеристики показывают образцы с содержанием ТБД в районе 17-18% от массы вяжущего, увеличение количества ТБД приводит к снижению прочности композиционного материала.

Заключение

По результатам экспериментальных исследований определено количество и тонкость помола барийсодержащей добавки, которая может быть применена для создания композиционного материала специального назначения.

Результаты исследования показывают, что при увеличении количества добавки возрастает водопотребность материала и сроки схватывания цементного теста. Плотность материала возрастает с увеличением содержания и тонкости помола ТБД. Наилучшие прочностные характеристики демонстрирует материал с содержанием 17-18% добавки от массы вяжущего.

Библиографический список:

1. Постановление Правительства РФ от 03.02.2021 N 106-6 "О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации "Развитие атомного энергопромышленного комплекса" [Электронный ресурс] // Портал госпрограмм РФ: URL: <https://programs.gov.ru/Portal/program/22/infographics> (дата обращения: 16.08.2021)
2. Дубровский, В.Б. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений: монография / В.Б. Дубровский, З. Аблсвич. – М.: Стройиздат, 1983.240 с

3. Комаровский, А.Н. Строительство ядерных установок. М.: Атомиздат, 1969. 503 с.
4. Машкович, В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева – М.: Энергоатомиздат, 1995. 494 с.
5. Калашников, В.И. Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Д.В. Калашников, К.Н. Махамбетова // Строительные материалы. 2011. №8. С. 25-28.

СИНТЕЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ОГНЕУПОРОВ НОВОГО КЛАССА В ЭЛЕКТРОГИДРОТЕПЛОСИЛОВОМ ПОЛЕ

В.Н. Соков¹, д-р техн. наук, профессор

Е.А. Рамазанов², канд. техн. наук, доцент

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Инженерная академия Республики Казахстан, Алматы, Республика Казахстан*

Аннотация. Проведенный анализ изготовления теплоизоляционных огнеупоров показывает, что прогресс в отрасли протекает вяло. Для выхода из такой ситуации нужны инновационные решения, приводящие к совершенно новым технологическим схемам, дающим эффективность не в малых процентах, а в разы. В работе решаются задачи перевода теплоизоляционных огнеупоров на единую технологическую схему изготовления - методом самоуплотнения масс в электрогидротеплосиловом поле. Исследования велись по трём направлениям: безобжиговая высокотемпературная теплоизоляция (на примере самых распространённых шамотных материалов), высокотемпературная теплоизоляция с трехзонным линейным распределением свойств (на примере дистенсиллиманитового сырья) и скоростная технология ультралегковесных бесшамотных изделий. Разработанная базовая, скоростная технология позволяет: ликвидировать парк металлических форм и сушильное отделение, занимающее в традиционных технологиях более 30% площадей, исключить обработку изделий до точных геометрических размеров, отходы от которых достигают 40%, интенсифицировать производственный процесс, ликвидировать высокотемпературный обжиг, исключить из технологической схемы шамотно-приготовительный конвейер и перейти от многокомпонентных систем к двухкомпонентным.

Ключевые слова: теплоизоляционные огнеупоры, сушка высокопористых масс, электрогидротеплосиловое поле, вспенивающийся полистирол, синтез самоуплотняющихся масс, скоростная базовая технология, безобжиговые легковесы, вариотропная структура, связь «глина-вода», микроструктура.

Для реализации энергосберегающих мероприятий, намеченных в нашей стране, необходимо форсировать развитие производства высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Однако, прогресс в отрасли протекает медленно, по сути дела вялотекуще, в основном за счет совершенствования действующих технологий и частичной модернизацией машин и оборудования. Острый дефицит в некоторых изделиях сглаживается за счет закупок их за рубежом. Для ухода от этой проблемы в промышленности высокотемпературной теплоизоляции нужны ключевые подвижки - переход к совершенно иным новым технологическим моделям, увеличивающим эффективность не в малых процентах, а в несколько раз.

Анализируя процесс изготовления легковесных огнеупоров выяснено следующее: используемые в настоящее время технологии имеют значительные трудоемкости и высокие энергозатраты, что определяет их как неэффективные с точки зрения экономичности. В настоящее время в огнеупорной индустрии применяется в основном пенный метод, составляющий до 75%. Остальные существующие методы распределяются в следующих пропорциях: комбиниро-

ванный метод до 5%, способ выгорающих добавок до 6% и метод создания волокнистого каркаса до 14%. Около 80% легковесных и ультралегковесных изделий выпускаются по литьевой технологии в металлических формах, созданных индивидуально на один кирпич. Блочный метод на 2-3 кирпича применяется реже, составляет меньше 8% от всех выпускаемых изделий. Весь технологический цикл составляет 3-7 суток, отличающийся значительными отходами до 60% для создания правильных геометрических форм и сопровождается большим расходом электроэнергии и топлива. Потребление жаростойких теплоизоляционных материалов превышает их производство на 50%.

Поэтому постоянно ведется поиск технологий с безотходными и нематериалоемкими решениями, с малозатратными энергетическими ресурсами с получением изделий с высокими свойствами. Кроме того, ведется поиск скоростных технологий и применением качественно новых видов тепловой обработки. Этот поиск и составляет цель данной работы.

На наш взгляд, отставание в отрасли вызвано сложившимся мнением о невозможности получения теплоизоляционных огнеупорных материалов методом выгорающих добавок, позволяющим получать изделия с пористостью выше 65%. При представлении сушки как удаление влаги, введенной перед формованием для увеличения подвижности смеси, только испарением приводит к увеличению продолжительности сушильного процесса, сопровождающегося усадочными деформациями. Это не приводит к сокращению времени сушки и к уменьшению усадки, а следовательно, и к качеству изделий.

Во все времена совершенствования технологий предлагались различные приемы снижения начальной влажности- введение химических добавок, вибрационные и экструзионные способы и т.д.). Мы предлагаем способ, основанный на интенсивном удалении лишней воды теплосиловым отжатием из перфорированных жестких форм, в которых находятся формовочные смеси. При этом главным становится оставшееся влагосодержание массы, а не начальное.

Метод выгорающих добавок мы приняли для своих исследований. Широко применяемые выгорающие добавки в виде опилок, кокса и др. не дают сформировать изделия с низкой средней плотностью, причем влияние поверхности и формы гранул выгорающих добавок мало изучено. Форма гранул, характер пористости и поверхности гранул влияет на физико-технические свойства готовых изделий и взаимно связаны. При использовании в качестве выгорающих добавок опилок поверхность пор образуется шершавой, шероховатой и в виде язв. Из-за различной формы гранул добавки осуществляется выгиб мембран, выпучивание частиц смеси. При литьевой технологии образуются большие объемы капиллярной пористости, что создает сильное понижение свойств изделий, включая прочностные.

Низкая прочность легковесных огнеупоров на обычных выгорающих добавках говорит о несовершенстве микро- и макроструктуры. Для совершенствования структуры легковесных огнеупоров следует находить новые типы выгорающих добавок с оптимальной удельной поверхностью и формой гранул. Во-первых, для создания монолитного скелета важен расход огнеупорного компонента, а во-вторых, следует формировать и общую пористость системы. Добавка с частицами правильной сферической формы и с минимальной по-

верхностью прочностью удовлетворяет этим условиям. Из традиционных выгорающих добавок создать идеальную поверхность и сферическую форму гранул нереально. В качестве эффективной добавки нами был принят вспенивающийся полистирол фракции мельче 0,5 мм, т.е. полистирольная пыль, которую отсеивают при производстве порошков.

Процесс изготовления состоит из следующих операций. Предварительно подвспененный полистирол загружается в лопастную мешалку, затем в нее подается вода затворения, далее вносят сухие компоненты смеси и происходит перемешивание. Полученная смесь с влажностью 40-50% укладывается на полный объем в прочную форму, имеющую по всей своей поверхности сквозные отверстия (перфорацию), закрывают форму крышкой и передают для тепловой обработки электропрогревом. При температуре выше 80°C развиваются усилия в 0,2-0,3 МПа за счет вспенивания полистирола. При этом из формы удаляется до 70-80% жидкости и на этот объем система уплотняется, выштамповывая изделия любого профиля. После окончания процесса увеличения объема полистирола форму открывают и полуфабрикат на поддоне подают на досушку и далее на обжиг.

Решение проблемы создания нового класса теплоизоляционных высокопористых огнеупорных материалов было осуществлено путем синтеза самоуплотняющихся масс в электротермосиловом поле.

В работе решалась задача изготовления жаростойких легковесов по единой технологической схеме производства – способом самоуплотнения масс. Эта модель производства может применяться с внесением необходимых корректировок для всех типов жаростойких элементов с высокопористой ячеистой структурой.

Сложно в одной работе глубоко исследовать и выдать решения по изготовлению большой линейки жаростойких легковесов. Если рассмотреть наиболее типовые и массово изготавливаемые изделия, можно найти общие и определяющие закономерности, характерные для технологических приемов целой группы материалов с различным исходным сырьем.

В работе исследования велись по трем направлениям создания нового класса легковесов.

Безобжиговая высокотемпературная теплоизоляция (на примере самых распространенных шамотных материалах). Высокотемпературная теплоизоляция с трехзонным линейным распределением свойств (на примере дистенсиллиманитового сырья)

Скоростная технология ультралегковесных бесшамотных изделий. Поставив такую задачу, мы тем не менее сохранили основной принцип подхода к ее решению - совмещение ряда процессов в одной технологической операции, обеспечивающей создание малодефектных структур с увеличенным числом и площадью контактов между компонентами смеси, при минимальных теплоэнергетических затратах.

При разработке принципов технологии безобжигового шамотного легковеса было предложено следующее: при совместном действии вяжущего из жидкого стекла и гидравлического теплового силового поля на алюмосиликатные стекольные составляющие шамота исходных масс образуются тонкие слои кле-

евых контактов и происходит активный синтез кристаллогидратов. При обжиге они превращаются в безводные образования без значительного изменения объема твердой фазы и потери прочности.

В отличие от известных работ [1, 2] при самоуплотнении смеси кардинально в других условиях осуществляется получение пленки жидкого стекла и обволакивание огнеупорных компонентов. Так создается возможность формирования тонкопленочной монолитной структуры при небольшом содержании воды. Определяющим расходом жидкого стекла становится не исходное его количество, а оставшееся в теле сырца (около 100 кг/м³ вместо 350-400 кг/м³ по технологии [2]).

На первом этапе самоуплотнения пленка из жидкого стекла толстая, а на последнем цикле она становится тоньше.

Понятно, что прочность клеевого соединения тесно связана с его толщиной, уменьшение которой до определенных значений приводит к повышению адгезионной прочности, к увеличению термодинамического потенциала системы: поверхность шамота - тонкая пленка жидкого стекла, а также усиливаются химические потенциалы сред и поверхностная энергия границ, клеевые контакты, адгезия и когезия.

Небольшой расход жидкого стекла необходимо компенсировать путем повышения поверхности соприкосновения его с шамотом.

Из рассмотрения особенностей шамота (пористость его более 40%) сделано предположение о том, что увеличить поверхность соприкосновения жидкого стекла и шамота можно путем направления части потока раствора в пористые зерна шамота за счет избыточного давления в форме.

Эти силы вдавливают жидкое стекло, за счет чего образуется пограничный слой пленки с шамотом, что способствует за счет увеличения числа клеевых контактов увеличить их сцепления.

При сушке и обжиге зона химического взаимодействия шамота и жидкого стекла увеличивается, что исключено при существующих на данный момент способах формования.

Под гидравлическим напором раствор жидкого стекла устремляется в пористое зерно и вдавливается в него. К тому же при температурах 80-120°C снижается на 85% вязкость раствора и на 20% поверхностное натяжение.

Геометрическая картина движения раствора в зерна шамота и названа нами плоскорадиальным движением [3].

Шамот с аморфной фазой при нормальных условиях не проявляет гидравлических свойств. Щелочь жидкого стекла активизирует аморфную и кристаллическую фазы шамота, обеспечивая поляризацию и разрыв кремнекислородной связи, образуя гидросиликаты и гидроалюмосиликаты натрия как на поверхности шамотных частиц, так и внутри.

При электропрогреве в замкнутом объеме развиваются высокие температуры и избыточное давление. Таким образом масса находится под действием теплосилового поля, что оказывает совместное каталитическое действие на твердеющую систему, увеличивает объем новообразований, способствующих усилению их кристаллизованности.

Экспериментальные исследования позволили создать структурную модель изготовления и рассмотреть взаимосвязь отдельных ее переделов. Анализируя полученную информацию, выделяется 28 приоритетных факторов с разбивкой взаимосвязей по 5 блокам. Результаты использованы для подбора рационального состава материала и оптимизации технологии.

Результаты исследований по выбору режимов электропрогрева в зависимости от плотности жидкого стекла показали, что наиболее оптимальным является используемое жидкое стекло с плотностью 1300 кг/м^3 . Это объясняется тем, что повышение плотности жидкого стекла хоть и позволяет провести быстрый прогрев масс, но увеличивает в составе содержание щелочных оксидов натрия, что в дальнейшем отрицательно сказывается на его эксплуатационных свойствах.

Данные физико-химических исследований полученного материала свидетельствуют об образовании вторичного муллита в процессе разогрева материала на режиме эксплуатации. Совершенствование технологии легковесных изделий проводилось по оптимизации получения максимальной их пористости и достаточной прочности.

Есть разумный предел увеличения пористости, выше которого идти не имеет смысла. Поэтому в работе ставилась задача повышение прочностных свойств и термического сопротивления за счет конструирования структуры изделий, т.е. совершенствование свойств легковесов должно идти по пути движения от однородной структуры к возрастающей направленной неоднородности, путем внутреннего перераспределения свойств материала. Такое вариатропное строение – это ключевое решение задачи. Рассматриваемое направление является новым и развивающимся, очевидным и актуальным.

Указанный принцип технологического решения вариатропных элементов состоит в принудительном формировании воздействия на формируемые смеси, где внутри их создается пространство с различными уплотненными зонами, обладающими направленной неоднородностью, создающими необходимые перепады свойств.

Стратегия получения легковесов переменной плотности состояла в интенсификации и регулировании фильтрационного влагомассопереноса, путем создания по сечению сырца значительных перепадов температур. При электропрогреве можно целенаправленно организовать замедление прогрева поверхностных слоев за счет повышенной теплоотдачи поверхностных граней формы. Перепады давления и температур от вспенивающегося полистирола направлены к центру сырца, следовательно массопоток происходит из средних слоев к поверхностным.

Результаты анализа взаимосвязи различных факторов на технологический режим самоуплотнения, применение математического моделирования, содействуют выработке самого эффективного режима электропрогрева для создания легковесов переменной плотности. Рекомендуется трехстадийный режим электропрогрева.

Остаточная влажность разноплотных сырцов составляет 10-15%. Далее следует кратковременная досушка его горячим воздухом с температурой $120 - 130^\circ\text{C}$ в течение 40-50 минут.

Физико-механические свойства разработанных трехслойных легковесов будут зависеть в первую очередь от толщины плотных поверхностных слоев.

Для определения максимальной расчетной толщины плотного слоя, которую можно создать из различных формовочных масс была установлена корреляционная зависимость между отношением толщин плотного и теплоизоляционного слоев и значениями градиента температур и величиной коэффициента перфорации.

Определение основных свойств нового материала показала, что при переходе от однородного строения к вариатропному достигнуто повышение прочностных и теплозащитных характеристик на 30-40%.

Полученные легковесы обладают многослойной (3 слоя) структурой. Поверхностные слои отличает более плотная структура, а центральный (средний) слой имеет повышенную пористость и другие размеры пор.

Три источника эффекта: технологический, конструкционный и эксплуатационный-обеспечивают уход от однородных легковесов к вариатропным.

Технически и экономически целесообразно при производстве легковесов и ультралегковесов не применять шамот в составе сырьевой массы, т.е. исключить очень энергоемкий компонент, на который при обжиге и помолу на 1 т необходимо 332 кг условного топлива. Намного эффективнее выполнить переход на бесшамотные массы. Международная практика показывает, что получать изделия из чистой глины всеми существующими методами крайне сложно и на сегодняшний день не удавалось из-за высоких воздушных усадок до 50% по объему, это вызывает растрескивание сырца и его коробление.

Чтобы повысить структурную прочность массы в шихту добавляют различные компоненты. Поэтому при получении ультралегковесов необходимо подготовить и ввести в подготавливаемую шихту девять компонентов, но даже при этом сушильный процесс ведется более 3-х суток. Технологическая схема этого способа громоздка и энергоемка, кроме того, многодельна: отличается большим количеством операций.

Теоретическое предположение, сделанное после рассмотрения механизма усадочных деформаций и классификации влаги в глиняных массах, состоит в том, что получить бесшамотные ультралегковесы возможно лишь при интенсивном удалении влаги и при минимальных воздушных усадках сырца.

В данной работе осуществлен новый подход получения легковесных изделий с искусственно измененными физико-техническими свойствами сырья по скоростной технологии с использованием форсированного электропрогрева исходных масс.

В бесшамотных массах очень сильна связь «глина-вода». Поэтому для перехода на форсированный режим необходимо было применить новый технологический прием. В связи с этим выдвинута гипотеза о том, что, искусственно изменив физико-механические свойства поверхностных слоев глинистых частиц, возможно будет ослабить связь глины с водой и затем быстро удалить усадочную влагу. Для этого в ходе исследований использовались различные добавки. Установлено, что для этой цели предпочтительно использовать гидрофобизирующую жидкость 136-41, и эту добавку необходимо вводить во время помола глины, впрыскивая ее под давлением в камеру помольного агрегата.

Использованный технологический прием дал возможность вести быстрый прогрев масс с двухстадийным режимом электропрогрева. На начальной стадии прогрев следует вести со скоростью 5-7°C в течение 20-25 минут, с равномерным увеличением прессующих усилий по всему объему. На последней стадии электропрогрева обеспечивается падение температуры за 5-10 минут. Остаточная влажность сырца 14-16%. Досушку ведут при температуре 110-120°C в течение 1,5-2 часов.

Изучение свойств опытных изделий со средней плотностью 400 кг/м³, полученных по данной технологии показало, что их физико-технические показатели выше заводских. Микроструктура бесшамотных изделий имеет значительное количество круглых замкнутых пор с размером от 0,1 мм до 1,0 мм.

Реализация исследований и рекомендаций работы позволит значительно улучшить технические и экономические показатели теплоизоляционных материалов. Экономический эффект складывается из двух основных составляющих:

- значительного уменьшения материалоемкости изделий при сохранении механических свойств и повышении долговечности.

- интенсификации производственного передела и уменьшении энергозатрат.

В качестве примера можно посмотреть изготовление дистенсиллиманитового легковесного изделия по предлагаемой технологии за счет ликвидации технологического поста создания ровной геометрии выпускаемых изделий и снижения средней плотности изделий с 800 до 600 кг/м³, где экономится до 500 кг необходимого и дефицитного сырья.

При самоуплотнении из 1,0 м³ формовочной массы выжимается до 400 кг формовочной воды и экономится при этом до 70 кг условного топлива. Сроки же тепловой обработки уменьшаются с 2-3 суток до нескольких часов.

Разработанная базовая, скоростная технология позволяет:

- ликвидировать парк металлических форм и сушильное отделение, занимающее в традиционных технологиях более 30% площадей;

- исключить технологические переделы по созданию правильных геометрических размеров, отходы от которых составляют 40%;

- ускорить производственный процесс;

- исключить высокотемпературный обжиг;

- исключить из технологической схемы шамотно-приготовительный цикл;

- перейти от многосырьевых систем к двух компонентным.

Библиографический список:

1. Тарасова А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. М, Строиздат, 1982.
2. Хаджишалалов Г.Н. Влияние предварительного разогрева на термомеханические свойства жаростойкого шамотного бетона на силикат-натриевом композиционном вяжущем: Дисс. канд. техн. наук, М., 1995.
3. Соков В.Н. Энергоэффективная скоростная технология получения высокотемпературных теплоизоляционных материалов. МГСУ, 2014. 328с.

САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ МАССЫ НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕЛЕВОГО РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

В.Н. Соков¹, д-р техн. наук, профессор

Н.С. Дмитриев¹, аспирант

М.В. Глушкова², ведущий инженер

М.Б. Каддо¹, доцент, канд. техн. наук

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева (НИИЖБ), АО «НИЦ «Строительство»*

Аннотация. Гидрогелевые сферы при свободном поглощении воды способны увеличиться в объеме 100-1000 раз благодаря нарушению баланса сил притяжения и отталкивания между звеньями геля. Добавление воды перемещает баланс в пользу сил отталкивания. Это свойство позволит использовать их в цементных системах в качестве активного расширяющегося заполнителя, который уплотнит структуру, снизит водоцементное отношение во время периода формирования структуры цементного теста, а затем отдаст воду твердеющему цементному камню. Сама гидрогелевая сфера уменьшится в объеме до своего начального состояния и оставит на своём месте пору. Получившийся материал можно считать ячеистым бетоном с уплотнёнными межпоровыми перегородками.

Ключевые слова: гидрогель, набухание, полиакрилат натрия, гидросиловое поле, поры.

Самоуплотнение основано на способности компонентов формовочной смеси расширяться при нормальной или повышенной температуре и за счет избыточного давления, развиваемого в замкнутых объемах (перфорированных или гидравлически закрытых) осуществляется формирование плотной структуры материала. Ранее в качестве активного заполнителя использовался подвешенный полистирол, для активации расширения которого необходима температура не менее 80°C.

Предлагается модификация способа самоуплотняющихся масс путем изменения природы уплотняющего компонента с дорогостоящего и экологически небезопасного полистирола на добавку, способную поглощать механически связанную влагу из формовочных масс, заключенных в гидравлически закрытых объемах.

Таким условиям удовлетворяет суперабсорбент (суперабсорбирующий полимер, САП, SAP) – это вещество, впитывающее жидкость в объемах в 100-1000 раз больше собственного объема (по массе - до 2 кг жидкости на 1 г сухого полимера), при этом удерживающее её внутри.

Большая часть суперабсорбентов производится из полиакрилата натрия и поставляются потребителю в виде гранул.

Гранулированные сферы представляют собой полимер, мономером которого является акрилат натрия ($[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{COONa})-]_n$), который соединяется в

длинные цепи, образующие в дальнейшем пространственную структуру. В отсутствии среды (жидкости) цепи полимера находятся в свёрнутом состоянии, а при погружении полимера в жидкость он начинает впитывать её и цепи из свёрнутого состояния переходят в развёрнутое. Впитавшаяся жидкость удерживается в образовавшейся полимерной сети, а материал образует гель.

На рисунке 1 схематично показано поглощение воды или других водных сред и образование гидрогеля, ограниченное сшиванием суперабсорбирующего полимера.

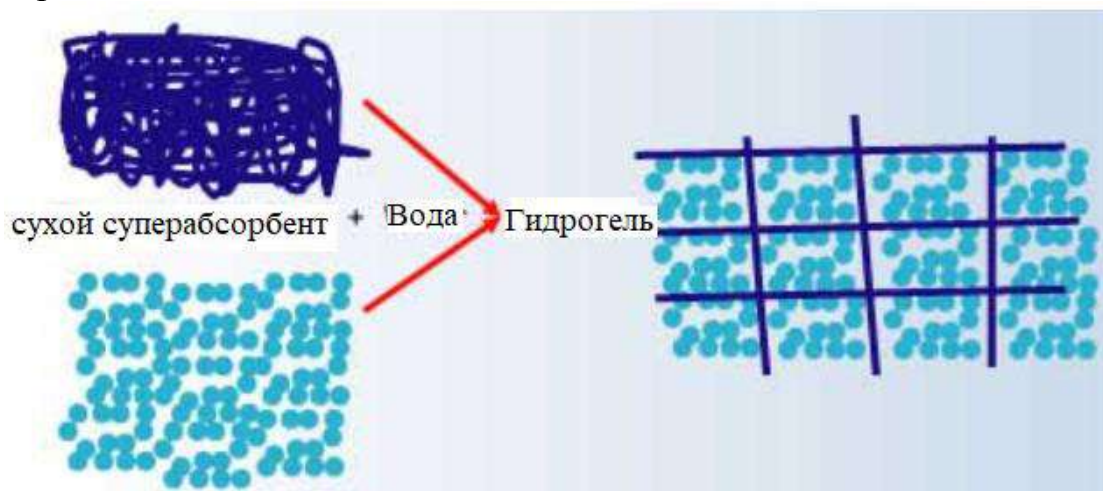
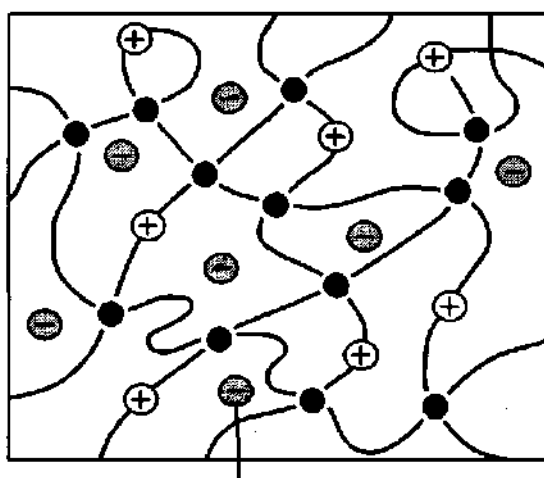


Рис. 1. Поглощение воды и образование гидрогеля.

Такое активное взаимодействие с водой обусловлено тем, что полиакрилат натрия как полиэлектролит диссоциирует в воде с образованием заряженного звена и противоиона (рис. 2). Противоионы имеют способность двигаться внутри пространства геля и они стремятся распределиться в нём равномерно, но из-за принципа электронейтральности они остаются внутри геля и не могут вырваться за его пространство. Как следствие, противоионы становятся причиной создания в гидрогеле распирающее осмотическое давление, вызывающее набухание геля [1,2]



свободные ионы

Рис. 2. Схематическое изображение полиэлектролитного геля. Он содержит заряженные звенья и низкомолекулярные противоионы, свободно перемещающиеся в объеме всего геля.

Температура формовочной массы влияет на динамику поглощения воды затворения заполнителем (рис.3-5).

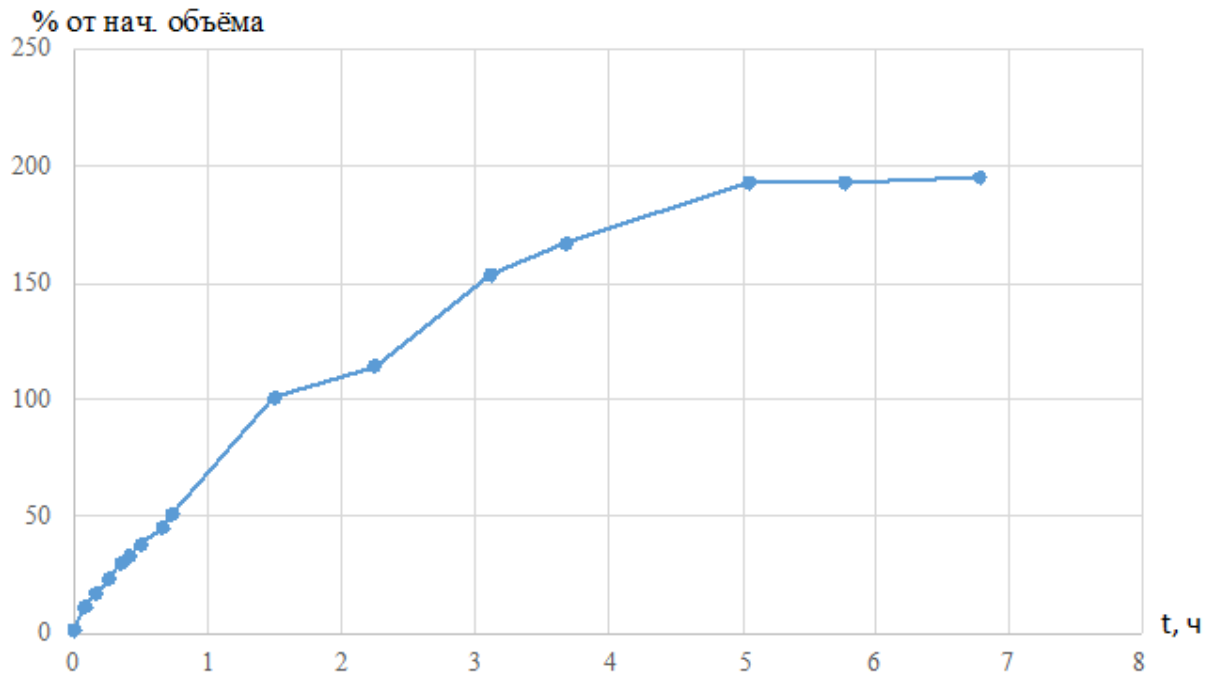


Рис. 3. Динамика расширения гидрогелевых сфер при $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

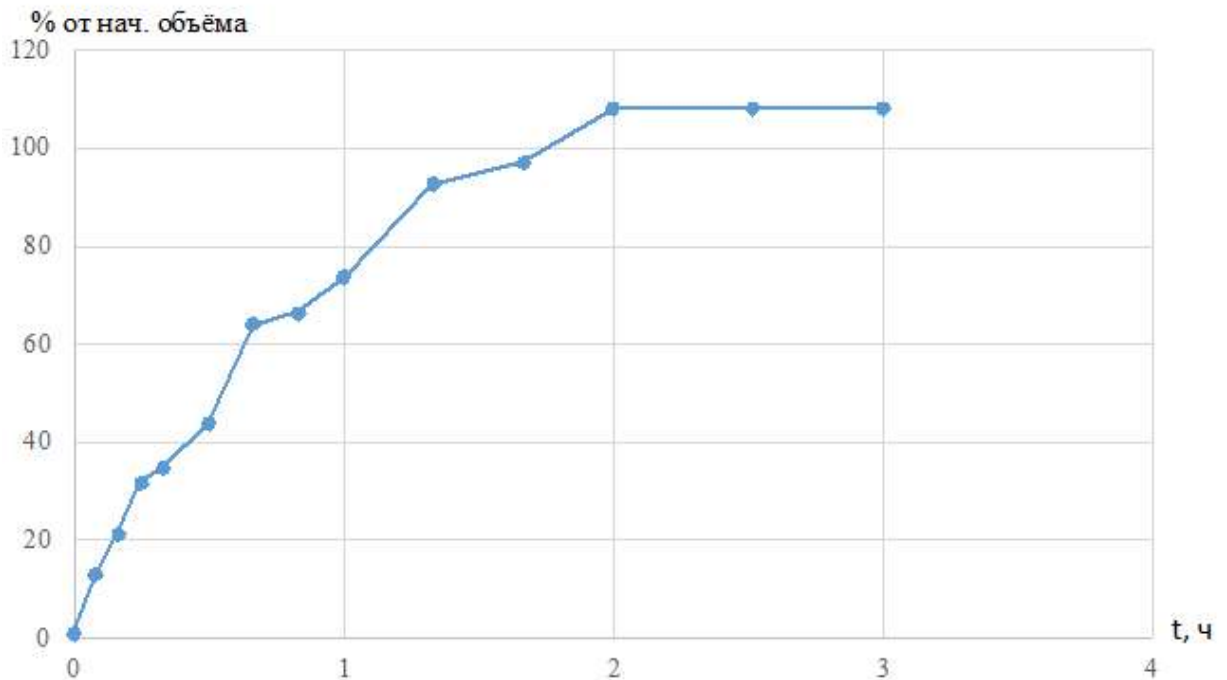


Рис. 4. Динамика расширения гидрогелевых сфер при $t=31\text{ }^{\circ}\text{C}$

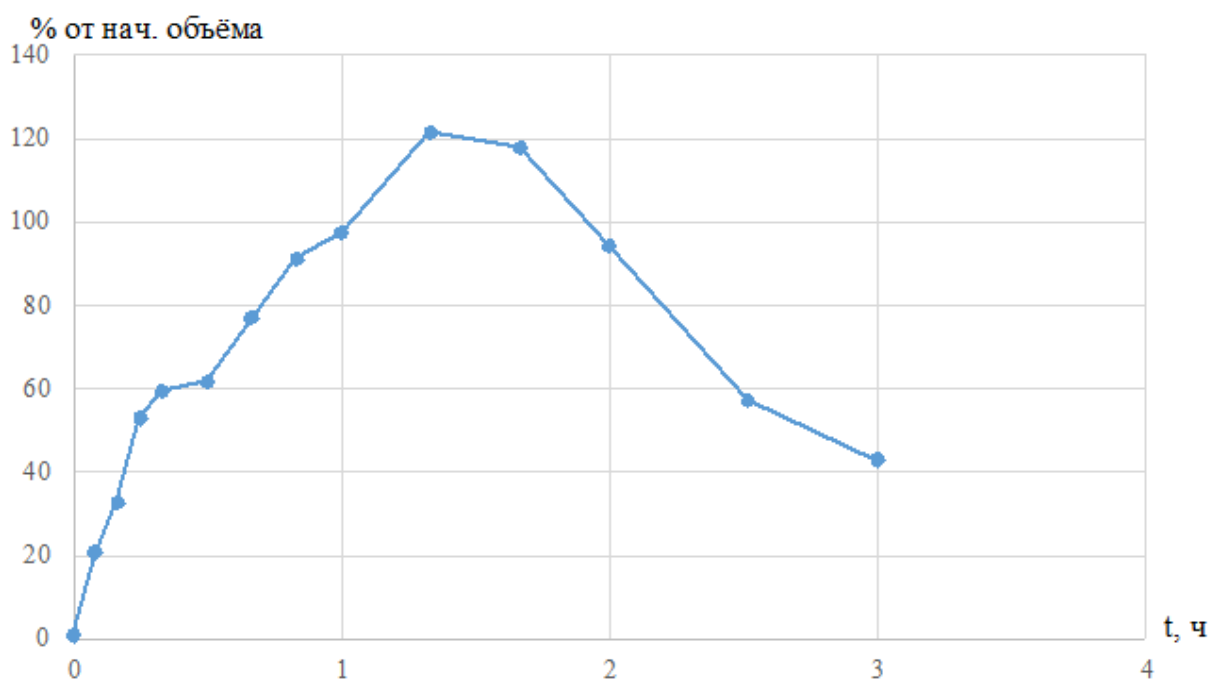


Рис. 5. Динамика расширения гидрогелевых сфер при $t=70^{\circ}\text{C}$

Как можно заключить из рис. 3-4, с увеличением температуры формовочной массы сильно сокращается время максимального насыщения гидрогелевых сфер, но возможен коллапс - быстрое уменьшение в объёме при высоких температурах (70°C). Коллапс геля могут вызвать: добавление поверхностно-активного вещества, полимера линейного строения, рН среды, температура, действие света, электрического поля и т.д.

В случае нарушения баланса сил отталкивания и притяжения цепей геля происходит переход между сколлапсированным и набухшим состоянием геля (рис. 6). Баланс сил может быть нарушен из-за различных факторов. Самыми значительными силами отталкивания являются дальнедействующие силы электростатического происхождения (осмотическое давление противоионов). Силами притяжения, которые вызывают переход геля в сколлапсированное состояние, являются силы Ван-Дер-Ваальса, гидрофобные взаимодействия, водородные связи и силы притяжения между противоположно заряженными ионами.

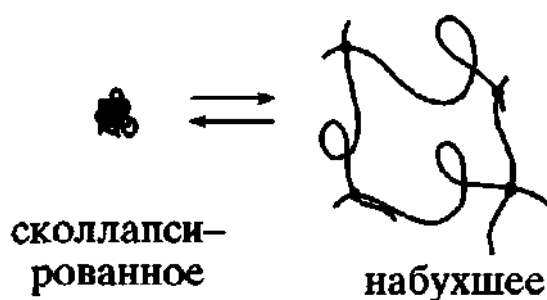


Рис. 6. Схематическое изображение двух состояний полимерного геля: сколлапсированного (субцепи в конформации глобулы) и набухшего (субцепи в конформации клубка)

Благодаря увеличению объёма при впитывании воды, гидрогелевые сферы, произведённые из подобных абсорбентов, возможно применить в технологии получения строительных изделий способом самоуплотняющихся масс, при котором активный наполнитель расширяется в объёме и вызывает увеличение давления в форме, из-за чего частицы твёрдой фазы (вяжущего вещества) сближаются, а жидкая фаза уходит через перфорации формы или, в нашем случае, поглощается гидрогелевыми сферами. Благодаря потенциальной энергии расширяющегося гидрогелевого наполнителя отпадает необходимость в перфорированных формах и, следовательно, в утилизации отжимаемой воды, которая содержит в себе тонкодисперсные минеральные частицы из-за отжатия, что приводит к засорению (и необходимости их дальнейшей чистки) перфорации стенок формы.

Таким образом для активации самоуплотняющихся масс на гидрогеле не требуется их нагрев, так как набухание и увеличение в объёме формовочных масс происходит даже при температуре 20 °С.

Гидрогелевая сфера, расширяясь в среде цементного теста в замкнутом объёме формы создаёт избыточное давление, сближая цементные частицы друг с другом, понижая при этом водоцементное отношение теста. Благодаря этому уплотняются межпоровые перегородки. После схватывания и твердения цементный камень будет поглощать воду из насыщенных гидрогелевых сфер для дальнейшего набора прочности. В результате чего наполнитель съезживается и на его месте останется пора. Размеры пор меньше размера гидрогелевой сферы, свободно расширившейся в воде.

Библиографический список:

1. Филиппова, О.Е. «Восприимчивые» полимерные гели / О.Е. Филиппова. // Высокмолекулярные соединения. 2000. Том 42, № 12. С. 2328-2352.
2. Tanaka T., Filmore D., Sun S.-T, Nishio L, Swislow G., Shah A. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. №20. P.1636.
3. Мишин В.М., Соков В.Н., Теоретические и технологические принципы создания теплоизоляционных материалов нового поколения в гидротеплосиловом поле / В.М. Мишин, В.Н. Соков, – М.: Молодая гвардия, 2000. 352 с.

ИННОВАЦИОННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Н.Г. Стенина, д-р геол.-мин. наук, профессор

Новосибирский Государственный Архитектурно-Строительный университет
(Сибстрин)

Аннотация. Геологический процесс литификации является природной моделью физико-химических процессов твердения, происходящих в системе С–S–Н. Показано, что аква-комплекс $[2\text{SiO}_3\text{--H}_2\text{O} - \text{M}^{n+}2\text{M}^{m+}\text{O}^4]$, установленный в результате исследования реакций природного минералообразования, является решением проблемы связывания минеральных ингредиентов и воды в технологической системе. Концепция аква-комплекса объясняет природу бетона и служит теоретической основой для разработки на его основе композитных материалов. Это открывает путь к инновационному развитию строительного материаловедения, целью которого является получение новых материалов с заданными свойствами при максимальном ресурсо- и энергосбережении строительных технологий.

Ключевые слова: литификация, система С–S–Н, аква-комплекс, бетон, композиты

1. Введение

Теоретической основой развития технологий строительного материаловедения является понимание физико-химической природы процессов в системе С – S – Н. В результате схватывания, твердения и упрочнения, в гетерогенной водно-минеральной системе происходит консолидация ее тонкодисперсных минеральных ингредиентов и образуется строительный монолит. Данная проблема имеет актуальное значение уже более 100 лет. Известными теориями твердения, выдвинутыми за это время, являются кристаллизационная теория Ле-Шателье (1887г.) [1], коллоидная теория Михаэлиса [2]. На этой основе, в 1923г., акад. А.А. Байковым [3] была выдвинута идея о миграции протонов (H^+) в объем тонкодисперсных частиц клинкерных минералов цемента в процессе их гидратации, получившая название протонной теории твердения. Однако исчерпывающей теории, способной объяснить все особенности физико-химического процесса образования строительного монолита, до настоящего времени не существовало. Актуальность решения данной проблемы обусловлена необходимостью расширения базы строительных материалов, создания материалов с заданными свойствами при одновременном снижении их себестоимости за счет ресурсо- и энергосбережения строительных технологий.

2. Геологический процесс литификации и аква-комплекс $[2\text{SiO}_3\text{--H}_2\text{O} - \text{M}^{n+}\text{M}^{m+}\text{O}^4]$ как его механизм

Геологический процесс литификации (окаменения) является природной моделью процессов твердения в технологической системе С – S – Н. В результате литификации рыхлые осадочные породы (щебень, песок, глина, известняк) консолидируются и преобразуются в сланцы, затем, через стадию их метаморфизма – в гранит, монолитную скальную породу (Рис. 1). Этот природный процесс, однако, длится миллионы лет. Для его ускорения в строительных техноло-

гиях используется цемент, искусственно полученные соединения Ca с Si (система C – S), как основной носитель вяжущих свойств. Как в природе, так и в строительных технологиях, вода является главным и неизменным участником структурно-химических преобразований, в результате которых образуется монолитный материал. Поэтому проблема физико-химического связывания воды с минеральным веществом имела приоритетное значение, как в строительном материаловедении [1–3], так и в геологии [4].



Рис. 1. Литификация рыхлых осадочных пород в природе: а–преобразование щебень-песчано-глинисто-известкового субстрата в сланцы, б–консолидация и метаморфизм сланцев, в – образование гранитов

Ее решение было найдено в виде аква-комплекса $[2\text{SiO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{M}^{n+}2\text{M}^{m+}\text{O}^{\cdot-}_4]$ (где T–Si и другие 4-х валентные катионы: C, Ti..., M^{n+} –одно- и двухвалентные катионы: Na, Fe^{2+} ..., M^{m+} –многовалентные катионы: Fe^{3+} ..., $\text{O}^{\cdot-}$ –O и другие летучие: Cl, S...) (Рис. 2). Аква-комплекс был установлен в результате многолетних исследований природных минеральных реакций комплексом физико-химических методов [5–8]. Учитывая ультрамикроскопические (десятые доли нанометра) размеры молекул воды и тетраэдров $[\text{Si}(\text{Al})\text{O}_4]$ как основных строительных блоков («кирпичиков») породообразующих силикатов (минералы кремнезема, глины, полевых шпатов и др.), лидирующее положение в комплексе разных методов занимали современные методы ПЭМ (Просвечивающей Электронной Микроскопии).

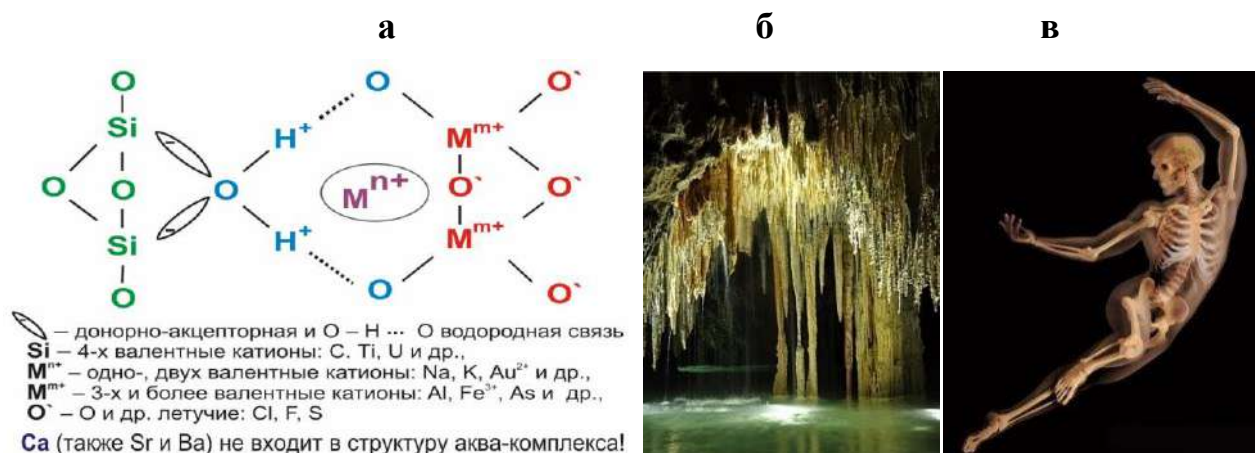


Рис. 2 Модель аква-комплекса (а); геологические (б) и биологические (в) доказательства невозможности вхождения Ca в его структуру

Согласно предложенной модели (Рис. 2а), аква-комплекс представляет собой атомную группировку, в которой центральная молекула воды, имеющая структуру заряженного тетраэдра $[\text{O} - 2\text{H}^+]$ [9] координирована слева и справа

ва двумя положительно: $2[\text{SiO}_3\Box]$ (\Box – электронная вакансия) и двумя отрицательно: $2[\text{M}^{\text{m}+}\text{O}^{\text{4}-}]$ ($\text{M}^{\text{m}+}$ – 3-хвалентный катион, в основном, Al^{3+}) заряженными радикалами. Такая структура точно отвечает определению «аква-комплекс», вследствие чего он и получил свое название.

Аква-комплекс впервые были найден и расшифрован как ростовой дефект (т.е. порция минералообразующей среды, захваченной в объем кристалла в процессе его роста) в природном кварце разного генезиса [5]. В результате дальнейших исследований [6], было установлено, что аква-комплекс представляют собой универсальную кристаллохимическую ячейку, из которой могут быть получены без исключения все известные минералы. На основе этого и других фундаментальных свойств, была сформулирована концепция аква-комплекса как закона эволюции, неформального аналога ДНК для минерального вещества Земли [7, 8].

3. Цемент и его вяжущие свойства с точки зрения концепции аква-комплекса.

Природу вяжущих свойств цемента и, как следствие, его ключевое значение в технологии получения бетона, искусственного аналога природной скальной породы, концепция аква-комплекса раскрывает следующим образом. В структурные позиции аква-комплекса (Рис. 2а) могут входить все элементы таблицы Менделеева, кроме Са (также Sr, Ва, Ra). Эти элементы, из-за особенностей структуры внешних электронных оболочек, не могут давать электроны для связывания с другими элементами в единой структуре аква-комплекса. Это подтверждается всеми данными строения как минеральной, так и живой (Рис. 2в) материи. В геологии вода в свободной форме находится, как правило, в ассоциации с Са-содержащими породами (подземные озера со сталактитами (Рис. 2б), Байкал в окружении мраморных берегов, реки) [8]. Внутренний (Рис. 2в) и внешний (панцирь) скелетов биоорганизмов также обособлены от водной (до 70-80% H_2O) мышечной массы.

Цель производства цемента, с этой точки зрения – соединить в одной фазе Са и Si, элементы – антагонисты по отношению к связыванию с водой в единой структуре аква-комплекса. Свидетельством этого является огромная ($T \geq 1300^\circ\text{C}$) энергия, необходимая для получения клинкерных минералов цемента (система С–S). Другим фактом является немногочисленный класс природных силикатов кальция (волластонит, $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ и диопсид, $\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$ как основные представители), аналогов С–S минералов.

Вяжущие свойства цемента реализуются при взаимодействии с водой. В результате этого гетерогенная водно-минеральная система (паста) превращается в твердый монолит (бетон). Этот процесс проходит через 3 стадии: схватывание, твердение и упрочнение. Чтобы понять физико-химический механизм твердения, необходимо ответить на два главных вопроса. Первый, главный: какова природа необходимой для этого энергии? Ведь все стадии преобразования пасты в монолит являются энергоемкими (Рис. 3а), тогда как процесс, в целом, проходит при нормальных условиях, в отсутствии внешних источников энергии. Второй, – механизм соединения («сшивки») разрозненных фрагментов полужидкой субстанции в единое целое.

Концепция аква-комплекса, на примере основного клинкерного минерала алита, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), дает на это следующий ответ. (Рис. 3б). При взаимодействии тонкодисперсных частиц алита с водой происходит миграция водорода H в их объем [3]. Центрами их миграции являются атомы Ca , статистически равномерно распределенные в твердой фазе. Это происходит потому, что кальций имеет полностью занятую электронами внешнюю электронную оболочку, а на предыдущей—имеет 10 электронных вакансий ($3d^0 4s^2$). Такая электронная структура не позволяет кальцию дотировать электроны для связи с другими элементами в единой структуре аква-комплекса, т.е. образовать собственный аква-комплекс. С другой стороны, это делает атомы кальция центрами притяжения водорода в объеме микрочастиц твердой фазы, т.к. он является идеальным донором электронов для заполнения пустой $3d^0$ оболочки кальция. В результате, вокруг атомов Ca образуется атмосфера водородных связей $\text{O} \cdots \text{H}^+$. Именно они являются источником энергии в $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ системе, т.к. природные и экспериментальные данные свидетельствуют об энергоинформационных свойствах водородных связей [10]. Неспособность кальция образовать аква-комплекс заставляет эту энергию Redox'a расходоваться "in situ", т.е. на месте.

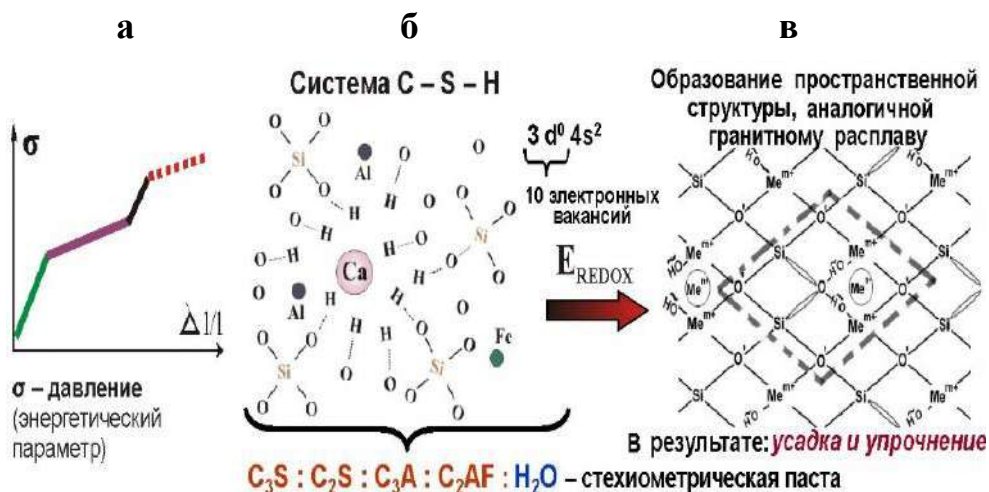


Рис. 3 Образование строительного монолита как природоподобная модель литификации: а — реологическая интерпретация процессов в $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ системе, б — гидратация алита, в — упорядочение в протонированной структуре алита и образование 3D структуры, подобной граниту

Именно эта энергия обеспечивает структурно-химическое упорядочение и связывание первоначально разрозненных фрагментов первичной гетерогенной системы. В результате образуется пространственная 3D-структура, подобная гранитному расплаву (Рис. 3в). Этот механизм объясняет явления усадки и упрочнения, имеющие место в процессе образования монолитного бетона.

4. Композиты: верификация и практика теории аква-комплекса

Бетон, в производстве которого, кроме цемента как основного базового компонента, используются различные добавки: песок, щебень и др., является первым композитом. Это направление интенсивно расширяется благодаря использованию широкого спектра новых модифицирующих компонентов с целью создания материалов с заданными свойствами и снижением ресурсо- и энергоемкости технологий их производства (Рис. 4). Последнее во многом решается за счет

утилизации вторичного сырья: золошлаков ТЭС, отходов горной и металлургической промышленности. Однако главной проблемой при использовании как природных, так и техногенных модифицирующих добавок является понимание механизма влияния этой добавки на улучшение того или иного эксплуатационного свойства строительного композита. Концепция аква-комплекса является инновационной основой решения этой проблемы.



Рис. 4 Композиты на основе бетона: проблемы и решение

В качестве примера можно привести композитный материал, полученный путем армирования ячеистого бетона тонкодисперсными добавками природных С–S минералов: волластонита (CaSiO_3) и диопсида ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) [11]. Полученный композит обладает большей прочностью, более низкой теплопроводностью и весом по сравнению с исходным образцом. Показано, что это достигается за счет структурообразования в матрице армированного ячеистого бетона (Рис. 4). В результате сокращается число открытых пор, происходит их изометризация (Рис. 4 а, б - вставки), объемное распределение пор более однородно, увеличивается прочность межпоровых промежутков.

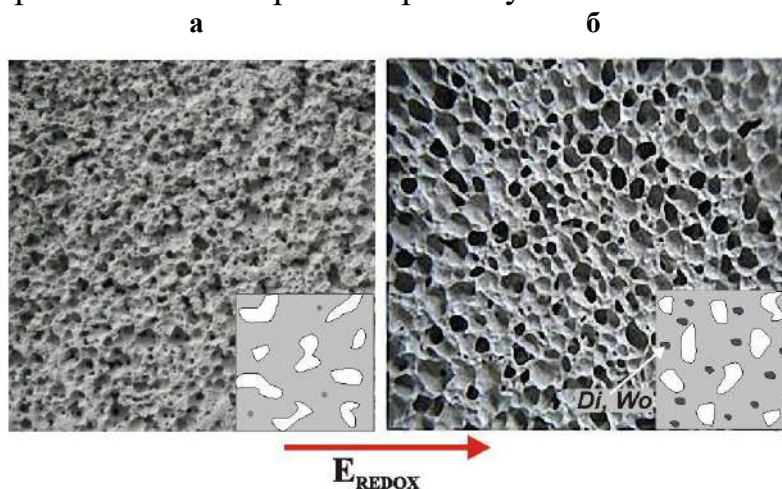


Рис. 5 Влияние тонкодисперсных добавок природных С–S минералов на упорядочение пористой структуры пенобетона; исходный образец (а), с добавками (б)

Данные структурные преобразования, особенно повышение прочности матрицы, являются энергоемкими. Поэтому, чтобы объяснить изменение внутреннего строения композита от менее (Рис. 4а) к более (Рис. 4б) упорядоченной пористой структуре, при этом – повышение прочности матрицы, необходимо найти внутренний источник генерации энергии. Концепция аква-комплекса дает основание идентифицировать его как энергию окислительно-восстановительного потенциала (**E_{REDOX}**). Так же, как и в случае процессов в **C–S–H** системе (Рис. 3б, в), эта энергия генерируется водородными связями при гидратации природных **C–S** минералов (диоксида и волластонита), распределенных тонкодисперсно в матрице ячеистого бетона

5. Заключение

Таким образом, концепция аква-комплекса как решение проблемы связывания воды с минеральным веществом делает возможным использование геологического процесса литификации в качестве инновационной основы для развития строительного материаловедения при разработке новых строительных материалов с заданными свойствами и одновременном снижении энерго- и ресурсоемкости технологий их производства.

Библиографический список:

1. Le Chatelier, H. L. Recherches experimentales sur la Constitution des Morties 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. Stenina, N.G. Water-related defects in quartz / N. G. Stenina // Bull. of Geosciences. 2004. V. 79. № 4. P. 251-268
6. 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.
7. 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] / Stenina N.G.–Novosibirsk: Academic Publishing House “GEO”, 2013. 414 p.
8. Стенина, Н.Г. Происхождение минеральной воды / Н.Г. Стенина –Новосибирск, Изд-во СОРАН, 2017. 128с.
9. 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
10. 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.
11. Машкин, Н.А., Кудяков, А.И., Бартеньева Е.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсно-армированный минеральными и волокнистыми добавками / Н.А. Машкин,

А.И. Кудяков, Е.А. Бареньева // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018.№ 8. С. 58-68

МОДЕЛЬ СВЯЗИ ДЕФОРМАЦИЙ С НАПРЯЖЕНИЯМИ ДЛЯ СТРУКТУРНО ОРТОТРОПНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННО АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А.Трещев¹, д-р техн. наук, профессор, член-корр. РААСН

Ю.А. Завьялова¹, аспирант

М.А. Лапшина¹, аспирант

¹Тулский государственный университет

Аннотация: Анализ широко известных экспериментальных исследований композитных материалов различной структуры и технологии изготовления, применяемых для строительных конструкций различного назначения, показал, что большинство среди них имеют структурную ортотропию, а в процессе нагружения приобретают деформационную анизотропию. Современная строительная отрасль предъявляет повышенные требования к точности определения напряженно-деформированных состояний композитных материалов. Используемые для этой цели различные модели имеют весьма серьезные недостатки, приводящие заметным ошибкам в результатах деформационно-прочностных расчетах. В связи с этим предлагается математическая модель физических уравнений для композитных материалов в форме энергетического потенциала, сформулированного в тензорном пространстве нормированных напряжений с векторным базисом, совпадающим с главными осями структурной анизотропии материала. Для конкретизации структурной анизотропии выбрана ортотропия, так как этот класс наиболее часто встречается в конструкционных материалах. Уровень точности предложенного потенциала ограничить квазилинейными уравнениями. Рассмотрен набор необходимых экспериментов для вычисления констант рекомендованного. Рассмотрены условия энергетической непротиворечивости предложенных определяющих соотношений для материалов, имеющих двойную анизотропию.

Ключевые слова: структурная ортотропия, деформационная анизотропия, потенциал деформаций, нормированные напряжения, полимеры, композиты.

Результаты экспериментальных исследований по деформированию поликарбоната, стеклопластиков, боропластиков, графитовых композитов, широкого круга полимеров и пластиков, направленно и хаотически армированных материалов свидетельствуют об их структурной анизотропии, а также явном несовпадении диаграмм на растяжение и сжатие в одних и тех же направлениях [1 – 8]. Усложненное поведение рассматриваемого класса материалов углубляется при сложных видах напряженных состояний. В проектной и конструкторской практике чаще встречаются материалы, класс анизотропии которых характеризуется как ортотропия. Даже «древний» материал древесина, проявляет свойства цилиндрической ортотропии. Строительные композиты обнаруживают повышенную прочность, но в процессе изготовления приобретают усложненную структуру, которая вызывает зависимость их жесткости и прочности от вида возникающего напряженного состояния. Данный факт приводит к невозможности применения к расчету композитных материалов классических деформационных и прочностных теорий. Известных исследований по определению НДС ортотропных материалов, проявляющих зависимость физико-механических от

вида напряженного состояния, к сожалению, достаточно мало. Здесь предложен вариант модели деформирования для строительных композитов. Данная модель ограничена уровнем квазилинейности и вполне применима к расчетам строительных конструкций из композитных материалов.

Формулировку нелинейных уравнений состояния рекомендуется осуществлять путем построения энергетических функций деформаций или напряжений [6, 9]. В монографии [1] приведен анализ опубликованных результатов экспериментального определения физико-механических характеристик композитов, имеющих структурную и деформационную анизотропию [1 – 8]. На основе этого и с учетом указаний математической теории [9] рекомендовано проводить построение нелинейных потенциальных уравнений связи тензоров деформаций и напряжений в виде степенного полинома:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots \quad (1)$$

где $W = W(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}\tau_{21}, \tau_{23}\tau_{32}, \tau_{31}\tau_{13}, \tau_{12}\tau_{23}\tau_{31})$, W_n – степенной полином $n+1$ по напряжениям, принимаемым в комбинациях, рекомендованных правилами [9] при соответствии классу ортотропии; σ_{kk} , τ_{ij} – нормальные и касательные напряжения, связанные с главными осями материала.

В разложении (1) все коэффициенты определяются свойствами материала, которые для композитов зависят от типа напряженного состояния. Детальный анализ [1] вариантов построения энергетически нелинейной зависимости деформаций от напряжений приводит к заключению, что избыточное количество имеющихся констант чрезвычайно затрудняет их вычисление, так как требуется привлечение большого набора испытаний опытных образцов, включая эксперименты по сложным трехмерным напряженным состояниям. При этом требуется, чтобы постановка экспериментов включала широкий набор двухосных, трехосных растяжений-сжатий и даже опыты, реализующие одновременно сдвиги в двух главных плоскостях ортотропии, одновременно производимые сдвиговые эксперименты с растяжением-сжатием вдоль осей, не совпадающих с нормалью к главным плоскостям сдвигов. Реализация указанных испытаний возможно только при существовании уникального экспериментального оборудования, которое до настоящего времени не обнаруживается даже в литературе, также как не находится сведений о выполнении указанного класса экспериментов и о полученных в них характеристиках. Наряду с этим достигнутый уровень строительства и техники демонстрируют широкое использование ортотропных материалов [1 – 8], свойства которых противоречат общепринятым деформационным теориям [9]. Однако элементы зданий и сооружений, возводимых с применением указанных материалов, требуется проектировать с применением деформационно-прочностных расчетов, гарантирующих обеспечение максимальной точности определения их НДС. Следуя указанному требованию можно допустить ограничение разложения (1) квазиквадратичным уровнем с показателем степени $n = 1$, представив потенциал деформаций в виде:

$$W_1 = C_1\sigma_{11}^2 + C_2\sigma_{22}^2 + C_3\sigma_{33}^2 + C_4\sigma_{11}\sigma_{22} + C_5\sigma_{22}\sigma_{33} + \\ + C_6\sigma_{33}\sigma_{11} + C_7\tau_{12}\tau_{21} + C_8\tau_{23}\tau_{32} + C_9\tau_{31}\tau_{13}. \quad (2)$$

При этом первые шесть коэффициентов разложения C_k согласно рекомендациям работы [1], представим функциями от характерных нормированных напряжений, то есть $C_k = C_k(\alpha_{ij})$. Компоненты тензора нормированных напряжений в базисе главных осей ортотропии материала определены следующим образом [1]:

$$\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S; \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (3)$$

где $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2}$ – норма тензорного пространства.

Величины нормированных напряжений ограничены интервалом от -1 до $+1$ и не являются полностью независимыми, а ограничены условием нормированности [1]:

$$\alpha_{ij}\alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{13}^2 = 1 \quad (4)$$

Установив зависимости $C_k = C_k(\alpha_{ij})$ потенциал деформаций (2) приведем к виду:

$$W_1 = 0,5(A_{1111} + B_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0,5(A_{2222} + B_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + \\ + 0,5(A_{3333} + B_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + [A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} + \\ + [A_{2233} + B_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + [A_{3311} + B_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + \\ + 0,5(A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2). \quad (5)$$

Уравнения нелинейной тензорной связи деформаций и напряжений для материалов с двойной анизотропией удобно определить в главных материальных осях путем дифференцирования потенциала (5) способом Кастильяно:

$$e_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \sigma_{ij}}; \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (6)$$

где e_{ij} – компоненты тензора деформаций.

Тогда, продифференцировав потенциал (5) по правилу (6), окончательно устанавливаем квазилинейные связи деформированного и напряженного состояний ортотропных материалов, проявляющих деформационную анизотропию:

$$e_{11} = \{(A_{1111} + B_{1111}\alpha_{11}) + 0,5[B_{1111}\alpha_{11}(1 - \alpha_{11}^2) - B_{2222}\alpha_{22}^3 - \\ - B_{3333}\alpha_{33}^3 - B_{1212}\alpha_{12}^3 - B_{2323}\alpha_{23}^3 - B_{1313}\alpha_{13}^3] + \\ + B_{1122}\alpha_{22}(1 - \alpha_{11}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}) + B_{1133}\alpha_{33}(1 - \alpha_{11}^2 - \alpha_{11}\alpha_{33}) - \\ - B_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})\}\sigma_{11} + [A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{22} + \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
& +[A_{1133} + B_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\
e_{22} = & [A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11} + \{(A_{2222} + B_{2222}\alpha_{22}) + \\
& + 0,5[B_{2222}\alpha_{22}(1 - \alpha_{22}^2) - B_{1111}\alpha_{11}^3 - B_{3333}\alpha_{33}^3 - B_{1212}\alpha_{12}^3 - \\
& - B_{1212}\alpha_{12}^3 - B_{2323}\alpha_{23}^3 - B_{1313}\alpha_{13}^3] + B_{1122}\alpha_{11}(1 - \alpha_{22}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}) + \\
& + B_{2233}\alpha_{33}(1 - \alpha_{22}^2 - \alpha_{22}\alpha_{33}) - B_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})\}\sigma_{22} + \\
& + [A_{2233} + B_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\
e_{33} = & [A_{1133} + B_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{11} + [A_{2233} + B_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22} + \\
& + \{(A_{3333} + B_{3333}\alpha_{33}) + 0,5[B_{3333}\alpha_{33}(1 - \alpha_{33}^2) - B_{1111}\alpha_{11}^3 - \\
& - B_{2222}\alpha_{22}^3 - B_{1212}\alpha_{12}^3 - B_{2323}\alpha_{23}^3 - B_{1313}\alpha_{13}^3] + \\
& + B_{1133}\alpha_{11}(1 - \alpha_{33}^2 - \alpha_{11}\alpha_{33}) + B_{2233}\alpha_{22}(1 - \alpha_{33}^2 - \alpha_{22}\alpha_{33}) - \\
& - B_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})\}\sigma_{33}; \\
\gamma_{12} = & \{A_{1212} - (B_{1111}\alpha_{11}^3 + B_{2222}\alpha_{22}^3 + B_{3333}\alpha_{33}^3) - \\
& - 2[B_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) + B_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) + \\
& + B_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\}\tau_{12}; \\
\gamma_{23} = & \{A_{2323} - (B_{1111}\alpha_{11}^3 + B_{2222}\alpha_{22}^3 + B_{3333}\alpha_{33}^3) - \\
& - 2[B_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) + B_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) + \\
& + B_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\}\tau_{23}; \\
\gamma_{13} = & \{A_{1313} - (B_{1111}\alpha_{11}^3 + B_{2222}\alpha_{22}^3 + B_{3333}\alpha_{33}^3) - \\
& - 2[B_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) + B_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - \\
& + B_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\}\tau_{13}, \quad \gamma_{ij} = 2e_{ij}.
\end{aligned}$$

Полученная форма уравнений (7) приведена к каноническому виду, принятому в классической Гуковской модели [9], в которой ненулевыми компонентами податливостей материала C_{ijkl} являются следующие: C_{1111} ; C_{2222} ; C_{3333} ; C_{1313} ; C_{2323} ; C_{1212} ; $C_{1122} = C_{2211}$; $C_{1133} = C_{3311}$; $C_{2233} = C_{3322}$.

Вычисление констант сформулированного потенциала (7) осуществляется по результатам механических испытаний эталонных образцов, вырезанных из структурно ортотропных материалов. С этой целью требуется проведение экспериментов по одноосному растяжению и одноосному сжатию вдоль главных осей ортотропии в трех направлениях. Обработав результаты проведенных экспериментов можно установить относительные деформации и вычислить нормальные напряжения, а, следовательно, вычислить модули упругости E_k^\pm и коэффициенты поперечных деформаций ν_{ij}^\pm . Здесь знаками «плюс» обозначены механические константы, соответствующие опытам на растяжение, а «минус» – на сжатие. Выполнив испытания по сдвигу в трех главных плоскостях ортотропии можно вычислить модули сдвига в каждой из

них G_{ij} . Опыты на одноосные растяжение и сжатие вдоль главной оси x_1 с внесением полученных результатов в уравнения (7) позволяют определить зависимости:

$$\begin{aligned}
1 / E_1^+ &= A_{1111} + B_{1111}; \quad 1 / E_1^- = A_{1111} - B_{1111}; \\
-v_{21}^+ &= (A_{1122} + B_{1122}) / (A_{1111} + B_{1111}); \\
-v_{31}^+ &= (A_{1133} + B_{1133}) / (A_{1111} + B_{1111}); \\
-v_{21}^- &= (A_{1122} - B_{1122}) / (A_{1111} - B_{1111}); \\
-v_{31}^- &= (A_{1133} - B_{1133}) / (A_{1111} - B_{1111})
\end{aligned} \tag{8}$$

а вдоль главной оси x_2 :

$$\begin{aligned}
1 / E_2^+ &= A_{2222} + B_{2222}; \quad 1 / E_2^- = A_{2222} - B_{2222}; \\
-v_{12}^+ &= (A_{1122} + B_{1122}) / (A_{2222} + B_{2222}); \\
-v_{32}^+ &= (A_{2233} + B_{2233}) / (A_{2222} + B_{2222}); \\
-v_{12}^- &= (A_{1122} - B_{1122}) / (A_{2222} - B_{2222}); \\
-v_{32}^- &= (A_{2233} - B_{2233}) / (A_{2222} - B_{2222}),
\end{aligned} \tag{9}$$

вдоль главной оси x_3 :

$$\begin{aligned}
1 / E_3^+ &= A_{3333} + B_{3333}; \quad 1 / E_3^- = A_{3333} - B_{3333}; \\
-v_{13}^+ &= (A_{1133} + B_{1133}) / (A_{3333} + B_{3333}); \\
-v_{23}^+ &= (A_{2233} + B_{2233}) / (A_{3333} + B_{3333}); \\
-v_{13}^- &= (A_{1133} - B_{1133}) / (A_{3333} - B_{3333}); \\
-v_{23}^- &= (A_{2233} - B_{2233}) / (A_{3333} - B_{3333}).
\end{aligned} \tag{10}$$

Испытания на чистый сдвиг в трех главных плоскостях позволяют из уравнений (7) получить еще три константы:

$$1 / G_{12} = A_{1212}; \quad 1 / G_{23} = A_{2323}; \quad 1 / G_{13} = A_{1313} \tag{11}$$

Из уравнений (8) – (11) окончательно вычисляются все константы потенциала (7) через технические характеристики:

$$\begin{aligned}
A_{kkkk} &= (1 / E_k^+ + 1 / E_k^-) / 2; \quad B_{kkkk} = (1 / E_k^+ - 1 / E_k^-) / 2; \\
A_{ijij} &= 1 / G_{ij}; \quad A_{iijj} = -(v_{ij}^+ / E_j^+ + v_{ij}^- / E_j^-) / 2; \\
B_{iijj} &= -(v_{ij}^+ / E_j^+ - v_{ij}^- / E_j^-) / 2; \quad v_{ij}^+ / E_j^+ = v_{ji}^+ / E_i^+;
\end{aligned} \tag{12}$$

$$v_{ij}^- / E_j^- = v_{ij}^- / E_i^- ; i, j, k = 1, 2, 3.$$

Численные значения механических констант для широкого круга композитных и полимерных материалов широко представлены в работах [2 – 4, 11 – 13]. Следует отметить, что при расчете конструкций с применением рассматриваемых материалов на основе уравнений (7) необходимо проверять положительную определенность энергетической функции (5) для конкретных материалов. Эта проверка связана с устойчивостью потенциала (5) в соответствии с постулатом Друккера [10]:

$$\delta e_{ij} \delta \sigma_{ij} = \frac{\delta^2 W_I}{\delta \sigma_{km} \delta \sigma_{ij}} \delta \sigma_{km} \delta \sigma_{ij} \geq 0 \quad (13)$$

Сформулированные уравнения состояния с учетом набора необходимых констант рекомендуются использовать для расчетов конструктивных элементов различного назначения.

Библиографический список:

1. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев. – Тула: ТулГУ, 2020. 359 с.
2. Schmueser, D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W. Schmueser // AIAA Journal. 1983. Vol. 21. № 12. P. 1742-1747.
3. Reddy, L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N. Reddy, C.W. Bert // ZAMM. 1982. Vol. 62. № 6. P. 213-219.
4. Jones, R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Orthotropic Materials / R.M. Jones // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. № 10. P. 1436-1443.
5. Jones, R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R.M. Jones // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. № 8. P. 995-1001.
6. Крегерс, А.Ф. Нелинейная ползучесть тканевого стеклопластика при некоторых видах сложного напряженного состояния / А.Ф. Крегерс, Р.Д. Максимов, Р.П. Турциныш // Механика полимеров. 1973. № 2. С. 212-218.
7. Амелина, Е.В. О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет / Е.В. Амелина [и др.] // ИВТ СО РАН: Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 5. С. 27-52.
8. Каюмов, Р.А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов / Р.А. Каюмов, С.А. Луканкин, В.Н. Паймушин, С.А. Холмогоров // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. 2015. Т. 157. Кн. 4. С. 112-132.
9. Грин, А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды / А. Грин, Дж. Адкинс. М.: Мир, 1965. 456 с.
10. Турсунов, Б.С. О свойствах потенциала напряжений упругих тел / Б.С. Турсунов // ПММ. 1970. Т. 34. Вып. 1. С. 15-22.
11. Розе, А.В. Трехармированные тканые материалы / А.В. Розе, И.Г. Жигун, М.Н. Душин // Механика полимеров. 1970. № 3. С. 471–476.

12. Jones, R.M. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 10. P. 1427-1435.

13. Золочевский, А.А. Расчет анизотропных оболочек из разномодульных материалов при неосесимметричном нагружении / А.А. Золочевский, В.Н. Кузнецов // Динамика и прочность тяжелых машин. Днепропетровск: ДГУ. 1989. С. 84–92.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТВЕРДЕНИИ

О.В. Артамонова, д-р техн. наук, профессор кафедры химии и химической технологии материалов

М.А. Шведова, инженер кафедры химии и химической технологии материалов

Воронежский государственный технический университет

Аннотация. В работе исследовано влияние комплексной наноразмерной добавки на основе SiO_2 (КНД) и углеродных нанотрубок (УНТ) на структурообразование и набор прочности цементных систем при длительности их твердения 28 суток, 1 год, 3 года, 5 лет. Изучены кинетика гидратации, фазовый состав и морфологические особенности формирующихся гидратных новообразований, а также прочностные характеристики наномодифицированного цементного камня. Установлено, что на протяжении всего времени твердения наномодифицированные цементные системы характеризуются высокими показателями степени гидратации и значительным приростом прочности по сравнению с эталонной системой цемент – вода. При этом наилучшие показатели степени гидратации и прочности при сжатии получены для цементной системы, модифицированной КНД. После 5 лет твердения в данной системе значение степени гидратации составляет 95 %, а предел прочности при сжатии – 132 МПа.

Ключевые слова: цементные системы, наномодифицирование, длительное твердение, структурообразование, долговременная прочность.

В последнее время для модификации структуры цементного камня, а также для придания новых и улучшенных свойств композиционным материалам на основе цементных систем твердения используются различные химические добавки и, в частности, наноразмерные частицы (НРЧ) различной природы и морфологии. При этом наиболее часто используются НРЧ оксидов металлов – TiO_2 , ZnO_2 , CuO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 [1 – 4], а особое внимание исследователей привлекают УНТ и наноразмерный кремнезем (SiO_2). Так как за счет высоких значений свободной поверхностной энергии такие частицы даже при малых дозировках (0,0006 – 0,1%) способны оказывать влияние как на свойства исходной цементной смеси (подвижность, удобоукладываемость), так и на физико-механические свойства цементного камня [1, 5 – 7].

Как правило, влияние НРЧ на процессы структурообразования и набора прочности цементных систем оценивается на ранних сроках твердения (от 1 до 28 суток), регламентируемых нормативной документацией. Однако, интересным и актуальным представляется проблема влияния НРЧ на цементные системы при длительном твердении. Это связано с тем, что НРЧ обладая высокой поверхностной энергией и являясь очень активными, могут способствовать не только самоорганизации и упрочнению наномодифицированной цементной системы твердения в условиях её жизненного цикла, но и её деградации (самораз-

рушению). Так как в наномодифицированной цементной системе со временем может накапливаться избыток свободной энергии, что в совокупности с действием внешних факторов, вероятно, может привести и к разупорядочиванию ее структуры. Стоит отметить, что научные исследования, посвященные данной проблеме, в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют.

Таким образом, цель данной работы состояла в изучении влияния наноразмерных добавок на формирование структуры и прочностные характеристики цементного камня при длительном твердении.

При получении цементных систем использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 ((Ц), ГОСТ 31108 – 2016) и техническую воду ((В), ГОСТ 23732-2011). В качестве наномодификаторов были выбраны КНД, состоящие из шарообразных НРЧ SiO₂ (d = 5 – 10 нм) и суперпластификатора (СП) на основе поликарбоксилатных эфиров, а также цилиндрические НРЧ фуллероидного типа – УНТ марки Nanosyl-7000 (l = 700 – 3000 нм, d = 5 – 35 нм). Наномодификаторы вводились в цементную систему в виде водной дисперсии ($\omega_{\text{НРЧ}} = 0,01$ % от массы цемента), которая представляла собой воду затворения. Для этого КНД получали золь-гель синтезом, по методике подробно изложенной в работе [8], а УНТ, полученные методом химического осаждения из газовой фазы [9], предварительно диспергировали в воде с помощью ультразвука. Таким образом, были получены наномодифицированные цементные системы Ц – КНД и Ц – УНТ (В/Ц = 0,27) и эталонная цементная система без добавок Ц – В (В/Ц = 0,33).

Фазовый состав цементных систем изучали методом порошковой рентгеновской дифракции (дифрактометр ARL X'TRA, CuK_α-излучение, $\lambda = 1,541788$ Å). Обработку полученных данных производили автоматически с использованием специального программного комплекса PDWin 4.0 [10]. Значения степени гидратации рассчитывали по содержанию фазы алита 3CaO·SiO₂ (C₃S) путем сравнения дифрактограмм исследуемых цементных систем с дифрактограммой цементного клинкера [11]:

$$C_{\Gamma}(C_3S) = \left(1 - \frac{I_{\text{мод}}}{I_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

где $I_{\text{мод}}$ – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2.75$ Å фазы 3CaO·SiO₂ образцов разного состава по видам добавки и срокам гидратации цемента; I_0 – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2.75$ Å фазы 3CaO·SiO₂ исходного цемента.

Предел прочности при сжатии цементных систем определяли путем разрушения образцов-кубов размером 5×5×5 см на испытательной машине INSTRON Satas 1500HDS, количество образцов в серии испытаний составляло 6. Экспериментальные исследования проводили через 28 суток, 1 год, 3 года и 5 лет твердения образцов в нормальных условиях.

Анализируя полученные экспериментальные данные (таблица) установлено, что использование наноразмерных модификаторов позволяет существенно ускорить процесс гидратации цемента. Так, уже к 28 суткам твердения для систем Ц – КНД и Ц – УНТ достигаются значения C_{Γ} равные 93 и 89 %, соответственно. При этом максимальные значения C_{Γ} характерны для системы Ц – КНД, не только на начальном этапе (после 28 суток), но и на протяжении всего

времени твердения. Так после пяти лет твердения в данной системе достигается значение C_T равное 95 %.

Согласно результатам рентгенодифрактометрических исследований во всех исследуемых системах на протяжении всего времени твердения фиксируются фазы высокоосновных гидросиликатов кальция различного состава ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $6\text{CaO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $6\text{CaO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $3(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), а также тоберморитоподобные фазы низкоосновных гидросиликатов кальция ($(\text{CaO})_x \cdot \text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$, $x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$).

При этом в системе Ц – УНТ после 1 года твердения также фиксируется наличие фазы состава $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, а после 3 лет – небольшое количество фаз этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) и портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), которые присутствуют в системе и после 5 лет твердения. А в системе Ц – КНД после 1 года твердения присутствует дополнительно фаза гидроалюмината кальция ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$), а после 3 и 5 лет – фаза этtringита.

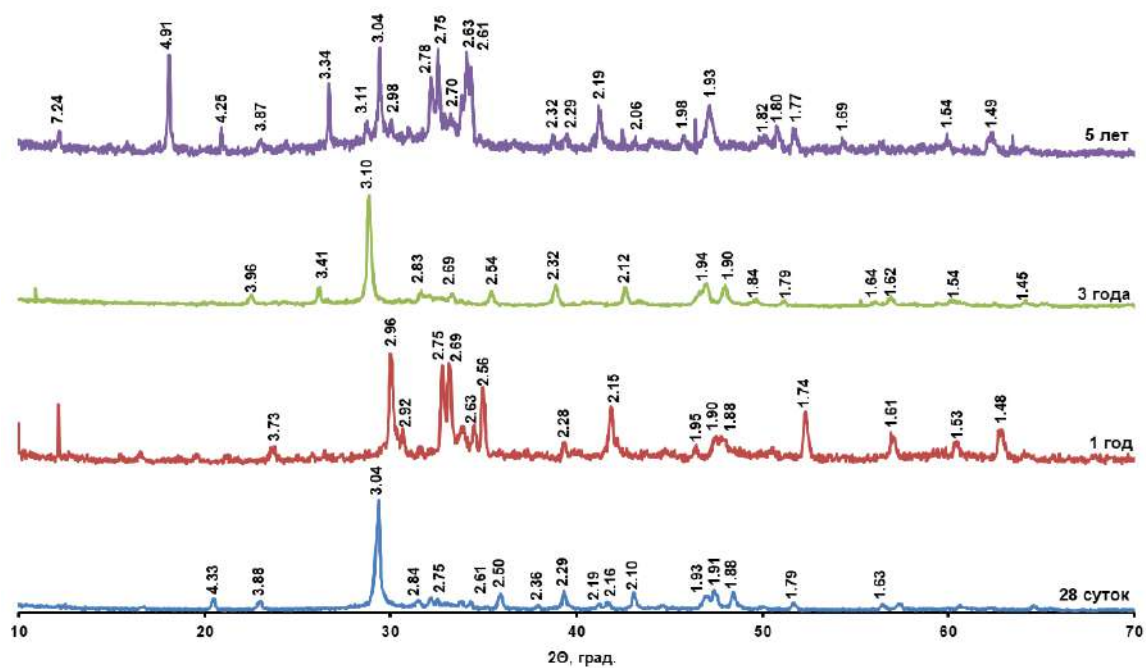
Установлено, что используемые наномодификаторы способствуют росту прочности цементного камня с течением времени. Так предел прочности при сжатии после 5 лет твердения составляет 132 и 121 МПа для систем Ц – КНД и Ц – УНТ, соответственно. При этом система Ц – КНД по сравнению с эталонной системой Ц – В имеет высокие прочностные характеристики как на начальных этапах твердения (28 суток, 1 год), так и после продолжительного твердения (3 года, 5 лет).

Полученные результаты хорошо коррелируют с данными рентгенофазового анализа. Достаточно высокие прочностные свойства наномодифицированного цементного камня обусловлены тем, что формирующиеся фазы высокоосновных гидросиликатов кальция волокнистой и игольчатой морфологии, а также тоберморитоподобные фазы в аморфно-кристаллическом состоянии и в виде пластинчатых кристаллов способствуют формированию плотной сложноорганизованной структуры с большим количеством кристаллов новообразований типа срастания и прорастания. При этом, фаза этtringита, представляющая собой вытянутые волокнистые кристаллы, способствует дополнительному армированию структуры цементного камня.

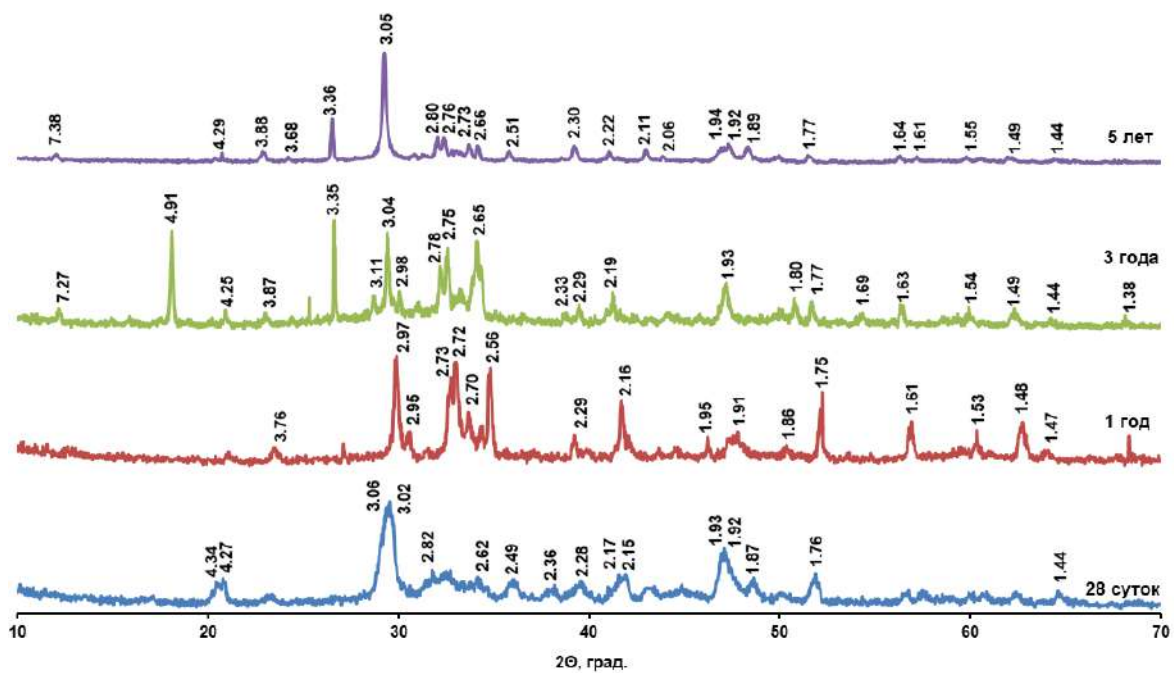
Таким образом, можно предположить, что, входящий в состав КНД наноразмерный кремнезем, благодаря родственному кристаллохимическому строению к гидратным новообразованиям цементного камня и высокой поверхностной энергии, способен оказывать модифицирующее влияние на цементную систему, которое заключается в следующем. Во-первых, НРЧ SiO_2 являются готовыми центрами кристаллизации и выполняют каталитическую роль, ускоряя процессы гидратации цемента. Во-вторых, частицы оксида кремния в высокодисперсном состоянии способны вступать в непосредственное химическое взаимодействие с минералами цементного клинкера, которое протекает в твердой фазе.

Таблица 1. Фазовый состав и морфология гидратных новообразований исследуемых цементных систем твердения

№ п/п	Система	Химический состав / морфология фаз			
		28 суток	1 год	3 года	5 лет
1	Ц – В	CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / иглы; 6CaO·4SiO ₂ ·3H ₂ O / волокна; xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O / аморфно-кристаллические пластинки;	Твёрдый раствор CSH (I): 0.8 – 1.5CaO·SiO ₂ ·0.5 – 2.5H ₂ O / волокна; тоберморит 11.02 Å: xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O; x ≈ 1; z ≈ 1 / волокна; CSH (C): 2CaO·SiO ₂ ·0.3– 1H ₂ O / волокна;	3CaO·SiO ₂ ·2H ₂ O / иглы; (CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O / пластинчатые кристаллы; CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / иглы; 6CaO·6SiO ₂ ·2H ₂ O / волокнистые агрегаты; 2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / волокна; Ca(OH) ₂ / пластинчато-призматические кристаллы;	CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / иглы; 6CaO·6SiO ₂ ·2H ₂ O / волокнистые агрегаты; (CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O / пластинчатые кристаллы; 2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / волокна; 3CaO·SiO ₂ ·2H ₂ O / иглы; Ca(OH) ₂ / пластинчато-призматические кристаллы; 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O / длинные игольчатые кристаллы или короткие призмы;
	$\frac{C_{Г, \%}}{R_{сж, МПа}}$	$\frac{75}{53}$	$\frac{80}{68}$	$\frac{80}{80}$	$\frac{81}{82}$
2	Ц – КНД	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / волокна; 6CaO·4SiO ₂ ·3H ₂ O / волокна; xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O / аморфно-кристаллические пластинки;	тоберморит : xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O / аморфно-кристаллические пластинки; CaO·SiO ₂ ·H ₂ O (I) / волокна; 3CaO·SiO ₂ ·2H ₂ O / иглы; 4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O / прямоугольные удлиненные кристаллы или гексагональные пластинки;	6CaO·6SiO ₂ ·2H ₂ O / волокнистые агрегаты; 6CaO·4SiO ₂ ·3H ₂ O / волокна, пучки волокон; 2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / волокна; xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O / аморфно-кристаллические пластинки 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O / длинные игольчатые кристаллы или короткие призмы;	6CaO·6SiO ₂ ·2H ₂ O / волокнистые агрегаты; CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / иглы; (CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O / пластинчатые кристаллы; 3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O / мелокристаллические слабоакристаллизованные интермедиаы; 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O / длинные игольчатые кристаллы или короткие призмы;
	$\frac{C_{Г, \%}}{R_{сж, МПа}}$	$\frac{93}{91}$	$\frac{94}{111}$	$\frac{93}{121}$	$\frac{95}{132}$
3	Ц – УНТ	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / волокна; 3CaO·SiO ₂ ·2H ₂ O / иглы; 3(2CaO·SiO ₂)·2H ₂ O / волокна; xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O / аморфно-кристаллические пластинки;	тоберморит 11 Å: xCaO·SiO ₂ ·zH ₂ O / аморфно-кристаллические пластинки; CaO·SiO ₂ ·H ₂ O (II) / волокна; 3CaO·SiO ₂ ·2H ₂ O / иглы; 3CaO·Fe ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O / игольчатые кристаллы или удлиненные призмы;	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O / иглы, волокна; 3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O / мелокристаллические слабоакристаллизованные интермедиаы; (CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O / пластинчатые кристаллы; CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / иглы; 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O / длинные игольчатые кристаллы или короткие призмы; Ca(OH) ₂ / пластинчато-призматические кристаллы;	CaO·SiO ₂ ·H ₂ O / иглы; 3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O / мелокристаллические слабоакристаллизованные интермедиаы; 2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O / иглы, волокна; (CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O / пластинчатые кристаллы; 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O / длинные игольчатые кристаллы или короткие призмы; Ca(OH) ₂ / пластинчато-призматические кристаллы;
	$\frac{C_{Г, \%}}{R_{сж, МПа}}$	$\frac{89}{80}$	$\frac{91}{103}$	$\frac{92}{112}$	$\frac{91}{121}$



a)



b)

Рис. Дифрактограммы цементных систем, модифицированных а) КНД; б) УНТ (длительность твердения 28 суток, 1 год, 3 года, 5 лет)

$x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.06, 2.80, 2.65, 2.14, 2.06$); $(\text{CaO})_x \cdot \text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.05, 2.93, 2.31, 1.67, 1.62$);
 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.24, 3.01, 2.78, 2.50, 1.89$); $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($d = 2.92, 2.75, 1.93, 1.86, 1.75$);
 $6\text{CaO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.31, 3.11, 2.65, 2.26, 2.07$); $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.33, 3.04, 2.92, 1.88, 1.77$);
 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.90, 2.69, 2.23, 1.93, 1.66$); $3(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.10, 2.98, 2.73, 2.64, 1.83$);
 $6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.27, 3.65, 3.07, 2.65, 1.84$); $2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.24, 3.36, 3.02, 2.65, 2.10$);
 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.05, 2.74, 2.31, 2.21, 1.92$); $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d = 3.11, 2.63, 1.93, 1.79, 1.49$);
 $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ($d = 2.80, 2.18, 1.94, 1.77, 1.68$);
 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.90, 3.02, 2.79, 1.62, 1.54$)

При этом образуются кристаллогидраты заданной морфологии, которые способствуют формированию прочной структуры цементного камня. В-третьих, значительная удельная поверхность НРЧ SiO₂ позволяет им вступать во взаимодействие с образующимся в ходе гидратации цементного клинкера гидроксидом кальция с образованием прочных и стабильных гидратных фаз. Влияние УНТ вероятно, обусловлено их наноармирующим действием, что позволяет значительно зонировать пространство образующейся кристаллизационной структуры цементного камня; кроме того, они могут способствовать направленной кристаллизации длиномерных гидратных новообразований, что в итоге также ведет к дополнительному упрочнению цементной системы при наномодифицировании.

Таким образом, исследуемые нанодобавки КНД и УНТ могут быть эффективны при модифицировании структуры цементных систем твердения, так как положительно влияют на процессы его структурообразования и набора прочности при длительном твердении.

Библиографический список:

1. Артамонова, О.В. Эффективность применения комплексных наноразмерных добавок для цементных систем / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов // Неорганические материалы. 2017. Т. 53. №10. С. 1105-1110.
2. Singh, N.B. Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials / N.B. Singh // Properties, Modelling and Applications. Micro and Nano Technologies. 2020. P. 9-39.
3. Reches, Y. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives / Y. Reches // Construction and Building Materials. 2018. V. 175. P. 483-495.
4. Muhd Norhasri, M.S. Applications of using nano material in concrete: A review / M.S. Muhd Norhasri, M.S. Hamidah, A. Mohd Fadzil // Construction and Building Materials. 2017. V. 133. P. 91-97.
5. Tolchkov, Yu.N. The Effect of a Carbon Nanotubes-Based Modifier on the Formation of the Cement Stone Structure / Yu.N. Tolchkov, Z.A. Mikhaleva, A.G. Tkachev et al. // Advanced Materials & Technologies. 2018. No. 3. P. 49-56.
6. Пухаренко, Ю.В. Модифицирование цементных композитов смешанным нанокремнеземным материалом фуллероидного типа / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова, В.А. Никитин, и др. // Технологии бетонов. 2013. № 12 (89). С. 13-15.
7. Артамонова, О.В. Эффективность применения добавок нанотубулярной морфологии для модифицирования цементных систем / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева, М.А. Шведова // Неорганические материалы. 2020. Т. 56. № 1. С. 110 – 116.
8. Артамонова, О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов: монография. / О.В. Артамонова. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2016. 100 с.
9. Nanocyl [Электронный ресурс] / <http://www.nanocyl.com>
10. JCPDS – International Centre for Diffraction Data [Электронный ресурс]. © 1987 – 1995. JCPDS – ICDD. Newtown Square, PA. 19073. USA.
11. Bullard, J.W. Mechanisms of Cement Hydration / J.W. Bullard, H.M. Jennings, R.A. Livingston // Cement and Concrete Research. 2011. V. 41. P. 1208-1223.

КОРРОЗИЯ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В ГИДРОФОБИЗИРОВАННЫХ БЕТОНАХ

В.Е. Румянцева¹, д-р техн. наук, профессор

В.С. Коновалова¹, канд. техн. наук

Б.Е. Нармания¹, магистрант

¹*Ивановский государственный политехнический университет*

Аннотация. Изучение причин сокращения периода защиты бетоном стальной арматуры и разработка способов увеличения его продолжительности являются основой повышения долговечности железобетонных изделий и сооружений. Для повышения долговечности железобетонных изделий в цементное тесто на стадии приготовления вводился стеарат кальция в количестве 0,7 масс. % для обеспечения объемной гидрофобизации. Исследования коррозии стальной арматуры в цементном камне проводилось в условиях воздействия на него 2 %-ого раствора $MgCl_2$. Нарушение пассивности арматуры в цементном камне без добавки стеарата кальция происходит примерно через 6 месяцев воздействия агрессивной среды, в гидрофобизированном цементном камне – через 9 месяцев жидкостной коррозии. С помощью поляризационных измерений проведена оценка электрохимического поведения стальной арматуры в обычном и гидрофобизированном бетоне. Рассчитанные показатели скорости коррозии стальной арматуры в цементном камне имеют малые значения, однако с течением времени у поверхности арматуры будут накапливаться агрессивные частицы, что поспособствует интенсивному развитию коррозионных процессов. Коррозия арматуры в цементном бетоне без добавки гидрофобизатора протекает в 1,3 раза быстрее по сравнению с арматурой, находящейся в гидрофобизированном бетоне. Однако, для достижения предельной концентрации хлорид-ионов у поверхности стальной арматуры в бетоне с гидрофобизатором требуется гораздо больше времени, следовательно, коррозионные процессы начнут развиваться позднее.

Ключевые слова: стальная арматура, коррозия арматуры, скорость коррозии, гидрофобизированный бетон, долговечность, коррозионная стойкость.

Коррозия железобетона протекает в две фазы и напрямую связана с коррозией стальной арматуры (рис. 1). В течение начальной фазы стальная арматура находится под защитой слоя бетона. Продолжительность этой фазы определяется скоростью проникновения агрессивных частиц через слой бетона к поверхности арматуры и протекающими в бетоне коррозионными процессами [1-3]. За счет обеспечения хорошего качества и меньшей проницаемости бетона, а также большей толщины покрытия, период инициирования коррозии стальной арматуры в железобетонной конструкции может быть увеличен. Вторая фаза начинается после депассивации поверхности стальной арматуры и заканчивается процессами деструкции железобетонного элемента конструкции вследствие накопления продуктов коррозии арматуры [4-6]. Для повышения срока службы железобетонных изделий необходимо изучать причины сокращения первой фазы и разрабатывать способы продолжительности второй фазы.

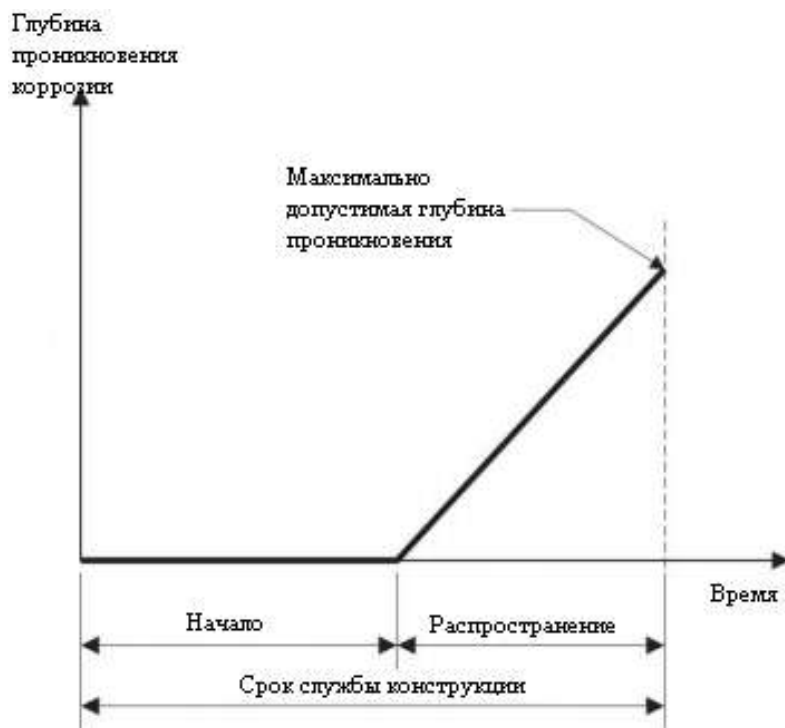


Рис. 1. Периоды начала и развития коррозии железобетона [7]

Проникновение воды в бетон является главной причиной всех основных физико-химических процессов деградации в железобетонных изделиях. Для предотвращения поступления воды вглубь бетона и растворенных в ней агрессивных частиц прибегают к гидрофобизации. Введение в состав бетона гидрофобизирующих добавок или обработка поверхности бетона специальными составами проникающего действия повышают водостойкость бетона, препятствуют возникновению коррозионных процессов и повреждений структуры бетона [8-11]. Все это способствует повышению долговечности бетонных и железобетонных конструкций.

Исследования проводились прутках арматуры из стали класса проката А500С, залитых в цилиндрической форме портландцементом марки ЦЕМ I 42,5Н с водоцементным соотношением В/Ц = 0,3. В качестве гидрофобизирующей добавки на стадии замешивания цемента вводился стеарат кальция в количестве 0,7 масс. %. Такое количество гидрофобизатора необходимо для получения бетона марки по водонепроницаемости W8. После отверждения в течение 28 суток на воздухе образцы помещались в емкости с 2 %-ым раствором $MgCl_2$ в качестве агрессивной среды. Концентрацию агрессивной среды приняли в соответствии с ГОСТ 27677-88 «Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний». В течение 24 месяцев измерялся потенциал арматуры в цементном камне относительно хлорсеребряного электрода сравнения.

Из рис. 2 видно, что на начальном этапе стальная арматура меняет потенциал, что обусловлено формированием на ее поверхности пассивной пленки. В гидрофобизированном цементном камне стальная арматура сохраняет пассивность в течение 9 месяцев, затем потенциал очень медленно понижается. Нарушение пассивности арматуры в цементном камне без добавки стеарата кальция происходит примерно через 6 месяцев воздействия агрессивной среды. При значениях потен-

циала ниже -100 мВ сталь входит в активное состояние, когда могут начать развиваться коррозионные процессы, но с чрезвычайно низкой скоростью [7]. При дальнейшем снижении потенциала процесс коррозии стали становится более интенсивным и более катодно контролируемым.

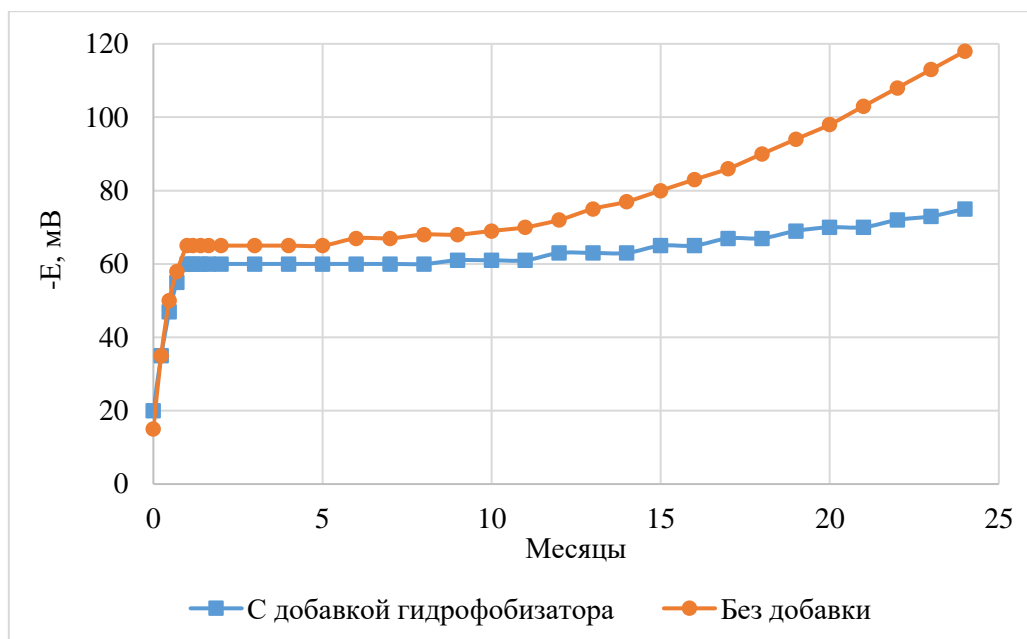


Рис. 2. Изменение потенциала арматуры из стали класса проката А500С в цементном камне, находящемся в условиях жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$

Поляризационные измерения дали информацию об электрохимическом поведении стальной арматуры в цементном камне и позволили рассчитать показатели скорости коррозии:

$$K_m^- = \frac{j \cdot A}{z \cdot 26,8'} \quad (1)$$

$$K_h = K_m^- \frac{8,76}{\rho_{me}}, \quad (2)$$

где: K_m^- – отрицательный показатель изменения массы, $г/(м^2 \cdot ч)$; j – плотность тока коррозии, $А/м^2$; A – атомная масса металла, $г/моль$; z – валентность иона металла, переходящего в раствор; 26,8 – постоянная Фарадея, $А \cdot ч/моль$; K_h – глубинный показатель коррозии, $мм/год$; ρ_{me} – плотность металла, $г/см^3$.

На поляризационных кривых (рис. 3) видно, что в цементном камне без добавки плотность коррозионного тока выше, следовательно, коррозия стальной арматуры будет протекать быстрее. Анодное растворение арматуры в цементном камне без добавок начинается при потенциале поверхности около -290 мВ и активно продолжается до повышения потенциала до 760 мВ. Пассивное состояние поверхности металла длится недолго. Затем на поверхности стали начинается питтингообразование. В гидрофобизированном цементном камне анодное растворение стали начинается при потенциале -255 мВ. Активно-пассивное состояние поверхности наступает при потенциале 340 мВ. Нарушения пассивности поверхности стали не происходит, поскольку

цементный камень имеет плотную структуру и препятствует поступлению агрессивных частиц к поверхности металла.

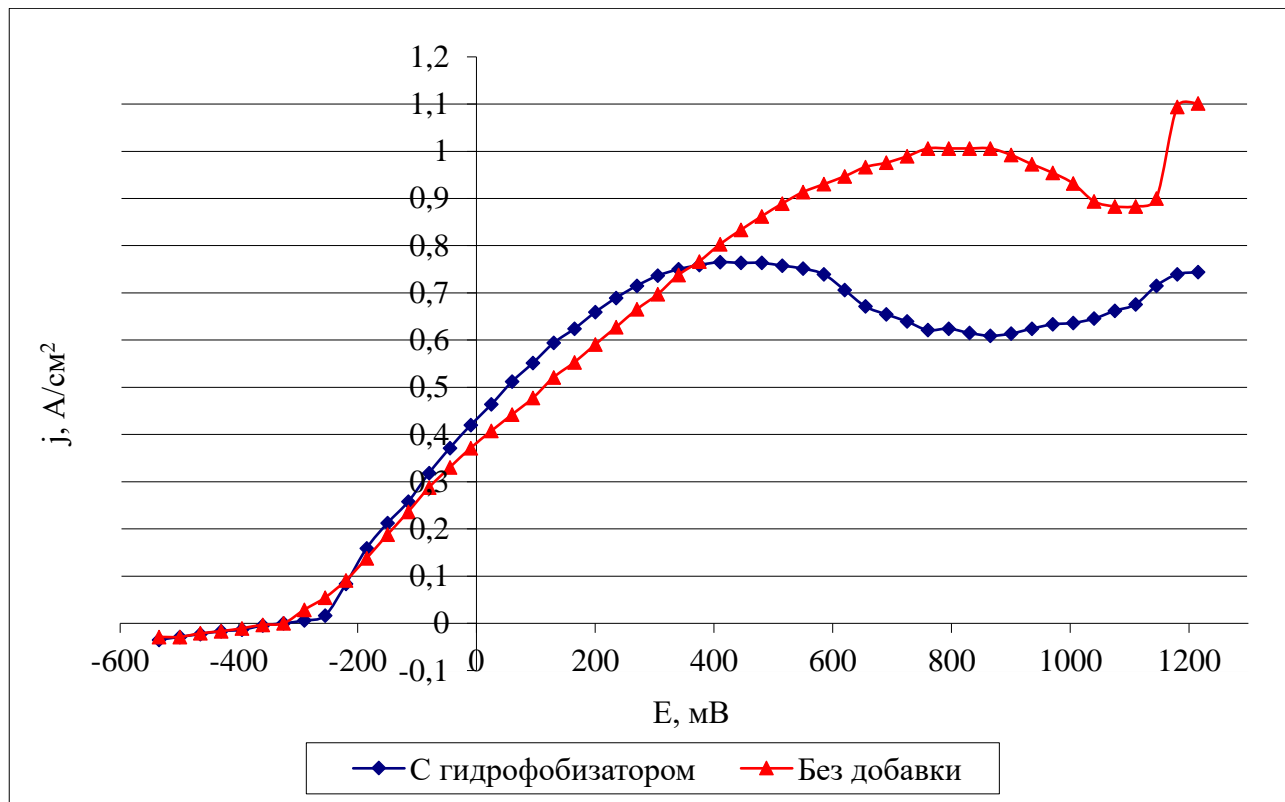


Рис. 3. Поляризационные кривые арматуры из стали класса проката А500С в цементном камне, находящемся в условиях жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$

В таблице 1 представлены рассчитанные по формулам (1) и (2) показатели скорости коррозии для максимального достигнутого значения коррозионного тока.

Таблица 1. Показатели скорости коррозии арматуры из стали класса проката А500С в цементном камне после 24 месяцев жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$

Вид цементного камня	Показатель изменения массы K_m^- , г/(м ² ·ч)	Глубинный показатель коррозии K_h , мм/год
Без добавки	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$
С добавкой гидрофобизатора	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,894 \cdot 10^{-4}$

При накоплении агрессивных частиц у поверхности стальной арматуры в количестве, достаточном для нарушения ее пассивации и начала развития коррозионных процессов, коррозия арматуры в цементном бетоне без добавки гидрофобизатора протекает в 1,3 раза быстрее по сравнению с арматурой, находящейся в гидрофобизированном бетоне. Однако, для достижения такой концентрации хлорид-ионов у поверхности стальной арматуры в бетоне с гидрофобизатором требуется гораздо больше времени. Установлено [12], что пороговое значение концентрации хлорид-ионов достигается в бетоне марки по водонепроницаемости W8 через 241 сутки. Для достижения такой

концентрации хлорид-ионов у поверхности арматуры в бетоне без гидрофобизирующих добавок при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ понадобится 174 суток.

Эти расчетные данные подтверждены результатами проведенных экспериментальных исследований изменения потенциала стальной арматуры в цементных образцах, находящихся в условиях воздействия в 2 %-ого раствора $MgCl_2$ (рис. 2).

Библиографический список:

1. Алексеев, С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С.Н. Алексеев. – М.: Стройиздат, 1968. 232 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузев; Под ред. В.М. Москвина. – М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
3. Леонович, С.Н. Модели периода иницирования коррозии арматуры / С.Н. Леонович, А.В. Прасол // Строительные материалы. 2012. № 9. С. 74-75.
4. Suvash, C.P. A Review on Reinforcement Corrosion Mechanism and Measurement Methods in Concrete / C.P. Suvash, J.B. Adewumi // Civil engineering research journal. 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp. 80-90.
5. Ožbolt, J. Modeling corrosion of steel reinforcement in concrete: natural vs. accelerated corrosion / J. Ožbolt, A. Brajković, H. Lin // Proceedings of 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Bayonne, France, 2019. 11 p.
6. Леонович, С.Н. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение / С.Н. Леонович, А.В. Прасол // Строительные материалы. 2013. № 5. С. 94-95.
7. Tuutti, K. Corrosion of Steel in Concrete / К. Tuutti. – Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 468 p.
8. Razak S, A. An Overview on Effects of Water Repellent Concrete Protective Coatings in the Durability of Concrete Structures / A. Razak S, A. Raj // International Journal of Science and Research. 2016. Vol. 5. Issue 7. Pp. 1565-1572.
9. Абзалилова, А.В. Использование пенетрирующей добавки для повышения водонепроницаемости бетона / А.В. Абзалилова, В.В. Строкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 18-24.
10. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, В.С. Коновалова, И.В. Караваев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 6 (372). С. 268-276.
11. Sohawon, H. The effect of hydrophobic (silane) treatment on concrete durability characteristics / H. Sohawon, H. Beushausen // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 199. 07015.
12. Скорость проникновения хлорид-ионов к поверхности стальной арматуры в гидрофобизированных бетонах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, И.В. Караваев // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 4 (56). С. 93-98.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА С ОБЛЕГЧЕННЫМ КАРКАСОМ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Л.А. Урханова², д-р техн. наук, профессор

А.И. Савенков¹, канд. техн. наук, доцент

¹*Восточно Сибирский государственный университет технологий и управления*

²*Ангарский государственный технический университет*

Аннотация. Оценены технологические решения применения монолитного пенобетона при заполнении каркаса из облегчённых элементов для строительства в суровых климатических условиях и в сейсмических районах. Предлагается к рассмотрению строительная система, при которой конструкции, выполненные из тонкостенных стержневых элементов, монтируются совместно с непосредственным приготовлением на стройплощадке теплоизоляционного, звукоизоляционного монолитного неавтоклавного пенобетона, используемого в качестве заполнения каркаса. В такой строительной системе, благодаря наличию пенобетонной обоймы, у конструкций каркаса зданий повышается огнестойкость, коррозионная стойкость, несущая способность. Таким образом значительно снижается вес стенового ограждения и перекрытий, тем самым повышается сейсмостойкость зданий. Рассмотрены процессы в пенобетонной смеси при укладке и схватывании массива. Предложены необходимые условия обеспечения требуемого класса прочности и минимальной теплопроводности для необходимого качества монолитного пенобетона при производстве работ.

Ключевые слова: монолитный пенобетон, сейсмостойкость, седиментация, сроки схватывания, рост прочности, теплопроводность, класс прочности, облегченный каркас.

Благодаря хорошим теплоизоляционным свойствам, экономичности и негорючести, пенобетон получил широкую популярность в строительной и коммунальной отрасли. Находит применение строительная система, при которой конструкции, выполненные из тонкостенных стержневых элементов, монтируются совместно с непосредственным приготовлением на стройплощадке теплоизоляционного, звукоизоляционного монолитного неавтоклавного пенобетона, используемого в качестве заполнения каркаса, который после схватывания образует капитальный тёплый контур здания [1]. Данная строительная система совмещает в себе известную технологию каркасно-щитового строительства с использованием металлоконструкций и новейшую технологию получения на стройплощадке монолитного неавтоклавного теплоизоляционного, звукоизоляционного и конструкционного пенобетона, применяемого во всех элементах и узлах дома от фундамента до кровли. Пенобетон как стеновой материал дешёв и эффективен, но, ввиду его недостаточной прочности, сам по себе не может применяться для несущих конструкций. Наилучшим его использованием может являться совместная работа с элементами стального каркаса. В этом случае реализуется комплексный подход: монолитный пенобетон придаёт стальным балкам и колоннам повышенную коррозионную и огнестойкость, в то же время, металлоконструкции, находящиеся в пенобетонной обойме, в свою очередь, получают дополнительную устойчивость [1,2]. Таким образом обеспечиваются высокие прочностные свойства объёмной конструкции несущего каркаса, поз-

воляющего строить как жилые каркасные дома, так и производственные сооружения.

Приготовление на стройплощадке качественного пенобетона – это, прежде всего, обеспечение требуемого класса прочности при минимальной теплопроводности.



Рис. 1. Строительство каркасно-монолитного дома, с несъемной опалубкой, утепленного пенобетоном

Прочность пенобетонного изделия в первую очередь зависит от прочности составляющей его матрицы. Как основа пенного тела, матрица в малоизменённом виде является материалом межпоровых перегородок. Когда в составе цементного раствора присутствуют ПАВ, то его коэффициент поверхностного натяжения снижается, и это делает возможным формирование пористой структуры ячеистого бетона. Но при этом изменяются сроки схватывания пенобетонного массива (Рис 2). Это связано с тем, что ПАВ создают на поверхности сольватных оболочек цементного коллоида адсорбционный слой, инициирующий стерический эффект отталкивания [3].

Стерический эффект частично затрудняет ход реакции гидратации. Так, присутствие вблизи от реагирующих атомов поверхностно активных веществ может препятствовать сближению этих атомов и замедлить реакцию или вовсе сделать её невозможной. В отличие от чистой гидратации C_3S , синтетический и протеиновый пенообразователи вызывают замедление реакции взаимодействия C_3A с водой и меняют скорость образования гексагональных гидратных фаз. Причем большие дозировки добавок оказывают более существенное влияние на кинетику кристаллизации гидратных новообразований и в меньшей мере влияют на фазовый состав. Как в воде, так и в растворах пенообразователей процесс взаимодействия с водой C_3A протекает не полностью, и спустя 28 суток после гидратации в системе частично остается исходный алит [4].

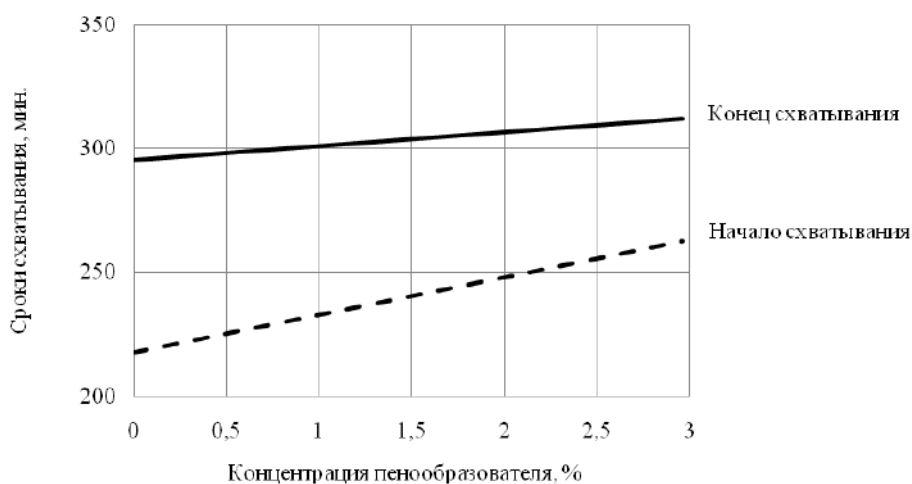


Рис. 2. Влияние синтетического пенообразователя на сроки схватывания цементного теста

В первоначальном виде пенобетонная смесь является неустойчивой гетерогенной дисперсной системой. В ее состав входят твердая, жидкая и газообразная фазы. Можно выделить две дисперсные подвижные фазы: дисперсную газовую фазу в дисперсионной среде и дисперсную гелевую фазу в водном растворе в виде дисперсионной среды. При высоких водотвердых отношениях в пенобетонных смесях происходят микрорасслоения, образующие в системе твердое тело – жидкость зоны с высоким водосодержанием, которые могут инициировать седиментацию пенной смеси. В процессе схватывания и периода пластической прочности в пространстве межпоровых перегородок далее происходит фазовый переход в связнодисперсную систему с твердой дисперсной средой — цементную матрицу. Материал, образовавшийся при твердении, характеризуется сложным напряженным состоянием, которое при нарушении технологических требований может привести к возникновению и развитию микротрещин.

Подтверждена тенденция к снижению прочности и плотности при росте концентрации пенообразователя [3,6]. Практически все пенообразователи вызывают снижение плотности, а значит разрыхление камня матрицы. Данный эффект четко показывает затруднение срастания новообразований и ведет к изменению микропористости цементного камня в сторону увеличения, а прочности – в сторону снижения. Важным фактором получения пенобетона высокого качества является применение эффективных пенообразователей и технологических приемов, что обеспечивает высокую устойчивость пенобетонной смеси. Для получения устойчивой пены при двухстадийном способе приготовления смеси, необходимо, чтобы пленка была не только упругой, но и имела высокую поверхностную вязкость, при которой значительно уменьшается скорость стекания пенного раствора на границу Плато [5]. Затрудненность срастания новообразований, вызванная наличием пенообразователя, приводит к разрыхлению структуры цементного камня, формированию сообщающихся микропор и соответственно, явному снижению плотности и прочности.

Для оценки динамики набора прочности проведены эксперименты на цементной матрице пенобетона, содержащей в своем составе поверхностно-активные вещества (рис. 3). В качестве ПАВ были использованы протеиновый и синтетический пенообразователи. Эти компоненты имеют разный химический состав и по-разному могут влиять на процесс твердения.

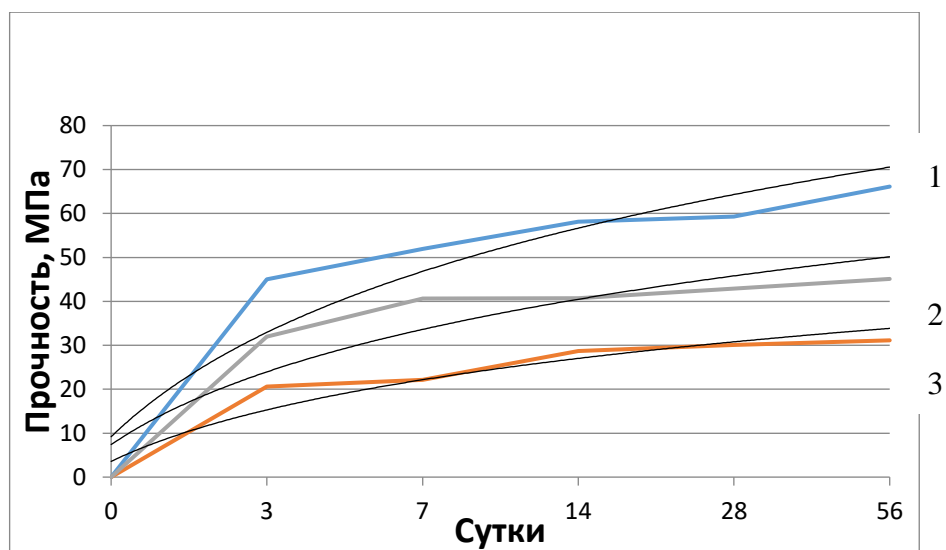


Рис. 3. Динамика роста прочности матриц, содержащих пенообразователь на цементе М600 (ЦЕМ I 52,5Н), контрольной. 1- контрольный состав; 2- с протеиновым ПАВ; 3- с синтетическим ПАВ.

Можно утверждать, по полученным результатам, что значения прочности матрицы в диапазоне от 3 до 56 суток адекватно описываются известной логарифмической моделью:

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (1)$$

Данная математическая модель роста прочности не противоречит известным закономерностям [6].

Наибольшая прочность получена на матрицах, изготовленных на цементе М600. Модель динамики прочности матрицы, содержащей в своем составе пенообразователь Омпорт описывается уравнением:

$R_n = 23,839 \ln n + 7,424$, (2), где R_n – прочность на сжатие матрицы на n – сутки.

Суточный прирост прочности оценен по первой производной функции уравнения (2). После дифференцирования данной модели получается следующее выражение: $Rn' = \frac{23,839}{n}$ (3), затем построен график (рис. 4) с наложением кривых по уравнениям (2) и (3).

Анализируя уравнение (3), можно утверждать, что после 28 суток, дальнейший прирост незначителен, следовательно, удлинять сроки твердения - нецелесообразно.

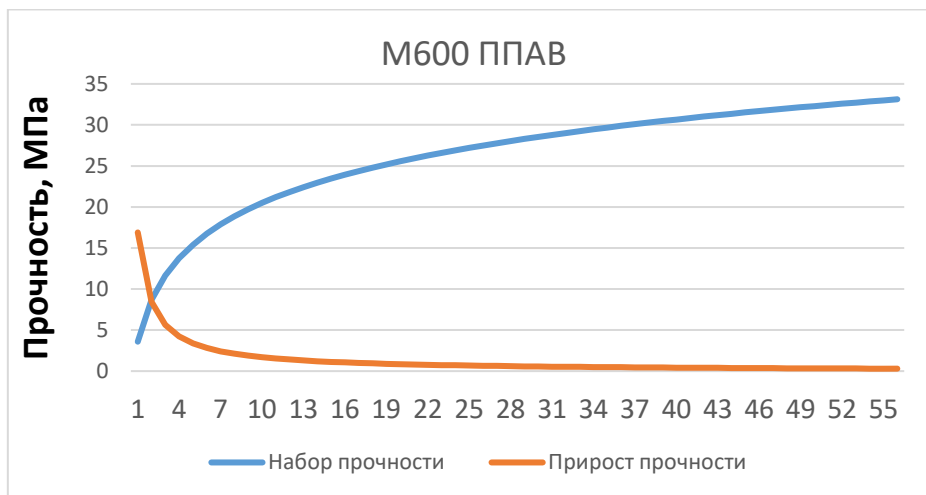


Рис. 4. Аппроксимированный график роста прочности матрицы и прироста прочности образцов на цементе М600 с ПАВ ППАВ.

В работе [4] подтверждается результатами исследований гидратации клинкерных минералов и портландцемента в воде и с добавками синтетического, а также протеинового пенообразователя, что добавки пенообразователей не оказывают существенного влияния как на кинетику процесса гидратации, так и на состав гидратных новообразований. Аналогичная закономерность прослеживается и в процессе созревания пенобетонных образцов. Следовательно, введение добавок пенообразователей в пенобетонные смеси не повлияет на скорость процессов твердения матрицы и пенобетона.

Учитывая то, что прочность пенобетона растет аналогично тяжелому бетону (рис. 5), то для сокращения технологических перерывов, можно предложить методы ускорения схватывания и твердения. Сюда относятся введение добавок-ускорителей, разогрев смеси [4], рациональный подбор состава [5] и др.

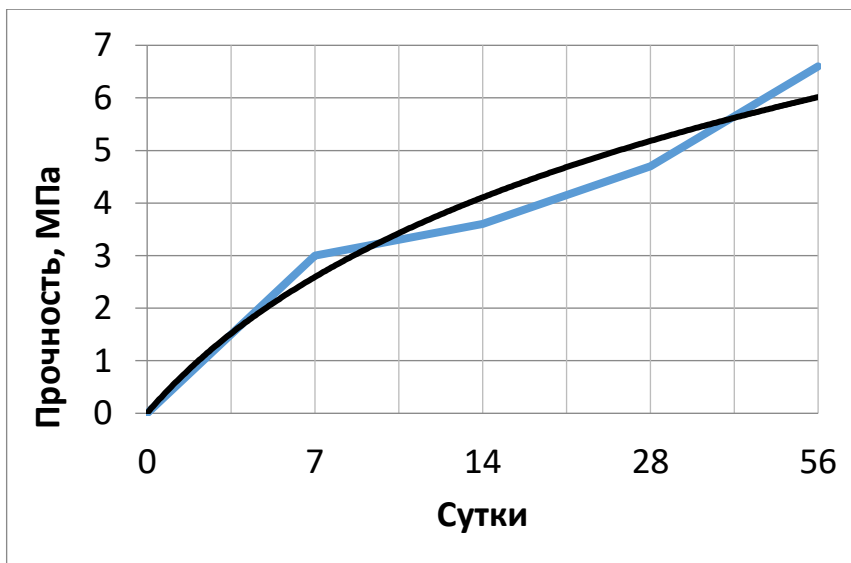


Рис. 5. –Кинетика роста прочности пенобетона D700.

Выполнение всех технологических требований позволит наилучшим образом реализовать достоинства строительной системы монолитно-каркасных зданий и сооружений с применением пенобетона (рис. 6).

Возведение зданий с применением данной строительной системы используется строителями по всему миру благодаря возможности быстрой и менее дорогой реализации проекта, непрерывного выполнения строительных работ, исключая технологические простои, повысить надёжность и увеличить долговечность построенных зданий, уменьшения расходов на строительство.



Рис. 6. Достоинства строительной системы монолитно-каркасных сооружений с применением пенобетона.

В Сибирском регионе суровые климатические условия и во многих случаях сейсмичность площадки строительства, с учетом микрорайонирования, составляет от 7 до 9 баллов. Для проектирования и возведения объектов требуются современные эффективные технологические и конструктивные решения. Указанная строительная система отлично подходит для строительства зданий и сооружений в сейсмических районах Сибири и Дальнего Востока.

Библиографический список:

1. Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. Часть 1. СТО 501-52-01-2007. — М., 2007.
2. Туснин А.Р. Облегчённые перекрытия многоэтажных зданий со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 99-103.
3. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика. Монография. —М.: Изд-во ассоциации строительных ВУЗов, 2010.
4. Тарасов А.С., Лесовик В.С., Коломацкий А.С. Гидратация клинкерных минералов и цемента с добавками пенообразователей// // Строительные материалы. — 2007. — №4. —С. 22-23
5. Касумов А.Ш., Величко Е.Г. Разработка рациональных параметров компонентов состава пенобетона. Строительные материалы. — 2016. — №8. —С. 52-55.
6. Савенков А.И., Горбач П.С., Щербин А.С. Неавтоклавный пенобетон. Факторы качества. Монография. - Ангарск: Издательство Ангарской государственной технической академии, 2013. - 104с.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ЛЕДОСТОЙКОЙ ПЛАТФОРМЫ

С.В. Черемных¹, канд. техн. наук

С.А. Соколов¹, канд. техн. наук

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Аннотация. Индивидуальные и специально подобранные под конкретный объект материалы позволяют существенно продлить срок службы конструкции, обеспечить ее долговечность и надежность. Это подтверждают как экономические, пусть даже и долгосрочной перспективе, так и производственные показатели такого стратегического объекта строительства, как ледостойкая платформа по добычи углеводородов в Российской Арктике. Целью представленной работы является рассмотрение мер по обеспечению комплексной защиты от внешних воздействий строящегося в суровых климатических условиях объекта. Рассматриваются общие вопросы повышения эффективности и долговечности строительных изделий и конструкций при применении современных лакокрасочных материалов, инновационные методы катодной защиты объекта наложенным током, а также вопросы теплозащиты ограждающих конструкций. Результатом исследования является разработанная методика по выбору первичной, вторичной и специальной защиты исследуемого объекта от внешних воздействий, таких как ледовые нагрузки, волновые, атмосферные и другие нагрузки, влияющие на эксплуатационные характеристики объекта и его сохранность.

Ключевые слова: ледостойкая платформа, долговечность конструкции, лакокрасочное покрытие, противокоррозионная защита, катодная защита.

Газовое месторождение «Каменномысское-море» расположено в Ямало-Ненецком Автономном округе Тюменской области РФ, в акватории Обской губы (залив Карского моря) в районе примыкания к ней Тазовской губы.

По размеру запасов нефти и газа данная территория относится к категории уникальных, поэтому для добычи ресурсов в этой местности устраивается специальная ледостойкая платформа, строительство которой началось в июне 2020 года (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид ледостойкой платформы

Она станет уже второй платформой, ведущей добычу углеводородов на российском арктическом шельфе, после морской нефтяной ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» [1-3].

В соответствии с климатическим районированием России рассматриваемый район находится в северной строительно-климатической зоне с суровыми условиями, согласно СП 131.13330.2020 в 1Г климатическом подрайоне.

В целом, опорное основание платформы представляет собой прочный жесткий прямоугольный понтон с сегментным закруглением носовой и кормовой частей и наружной наклонной стенкой по периметру, состоящий из днища, палуб, дефлекторов, борта переборок и выгородок, свайных фундаментов [4-7].

Для осуществления плавного перехода от одной части конструкции до другой и их жесткого сцепления между собой элементы соединяются сваркой.

В представленной статье будут кратко описаны перечни мероприятий по защите и повышению эффективности, а также долговечности строительных конструкций и фундаментов платформы, перечислены меры от ее разрушения.

Повышение эффективности и долговечности строительных изделий и конструкций

Защита строительных конструкций включает в себя методы первичной, вторичной защиты и специальные меры.

Первичная защита – конструктивные решения и выбор материалов, стойких к среде эксплуатации.

Вторичная защита – защитные покрытия от агрессивного воздействия среды.

Специальная защита – меры, не входящие в первичную и вторичную защиту (вентиляция, организация стоков, дренаж и т.д.).

Эксплуатация опорного основания ледостойкой стационарной платформы будет проводится в тяжёлых арктических гидрометеорологических условиях: низкая температура до минус 55°С, наличие морского льда и явления обледенения, наличия в воде микроорганизмов. В связи с чем, предусмотрен ряд мероприятий по обеспечению комплексной защиты металлоконструкций опорного основания от коррозионного воздействия водной среды, влажного атмосферного воздуха, истирания обшивки опорного основания льдом [8-10].

Комплексная система противокоррозионной защиты должна обеспечивать проектный срок службы опорного основания и безаварийную (по причине коррозии) её эксплуатацию.

Для улучшения коррозионной стойкости металлических конструкций необходимо выполнять следующие конструктивные требования:

- использовать конструкционные коррозионностойкие материалы;
- избегать образования зазоров и щелей;
- уменьшать количество сварных швов в районах, наиболее подверженных коррозии.

Комплексная система противокоррозионной защиты включает в себя применение:

- защитных эпоксидных лакокрасочных материалов;
- катодной защиты наложенным током наружной обшивки опорного основания;

- протекторной защиты балластных цистерн и ледовых ящиков;
- конструктивных решений.

Защитные лакокрасочные материалы

Для механической изоляции поверхности защищаемого металла от агрессивной среды (пассивная защита) применяются лакокрасочные материалы. Лакокрасочные материалы должны обладать следующими свойствами:

- быть устойчивыми к влиянию эксплуатационных температур, окружающей атмосферы и атмосферных осадков, ультрафиолетового излучения, ледового механического воздействия;
- обеспечивать надёжную и долговечную защиту металлоконструкций от коррозии;
- обладать отличной адгезией, иметь прочное сцепление с металлической поверхностью;
- обладать необходимой диэлектрической сплошностью покрытия;
- иметь совместимость с другими средствами противокоррозионной защиты, применяемыми для судовой конструкции;
- обладать характеристиками медленного распространения пламени;
- быть высокотехнологичными (возможность выполнения окрасочных работ при низкой температуре и высокой влажности; сокращение длительности работ за счёт высокой скорости высыхания и уменьшения количества слоёв системы покрытия);
- иметь возможность механизированного нанесения;
- быть ремонтпригодными;
- обеспечивать сохранение защитных и декоративных свойств на протяжении срока службы не менее 15 лет;
- соответствовать современным требованиям в области охраны окружающей среды и экологической безопасности.

Для представленного объекта все системы покрытий должны иметь свидетельство о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства для применения на морских стационарных платформах, работающих в условиях морского климата и ледовой обстановки.

Защита от коррозии наружных и внутренних поверхностей металлоконструкций опорного основания предусматривает применение эпоксидных лакокрасочных покрытий для следующих элементов:

- поверхности под водой ниже зоны переменного смачивания (подводная зона) совместно с катодной защитой наложенным током;
- поверхности, находящиеся в зоне переменного смачивания и в зоне, подверженной воздействию льда;
- наружные поверхности выше зоны переменного смачивания (зона морской атмосферы);
- внутренние поверхности помещений (внутренние зоны);
- внутренние поверхности цистерн (внутренние зоны).

Выбор схемы коррозионной защиты с помощью лакокрасочных материалов производится в зависимости от условий эксплуатации рассматриваемой поверхности конструкции.

В качестве межоперационной защиты металла в соответствии с требованием Российского Регистра предусматривается межоперационная грунтовка. Кроме основных требований к лакокрасочным покрытиям она допускает выполнение сварочных работ без удаления грунтовки, не снижая при этом прочность сварочного шва.

Катодная защита наложенным током

Так же, на платформе в качестве мероприятий по защите от коррозии подводной части корпуса наряду с лакокрасочным покрытием может применяться система электрохимической защиты наложенным током, обеспечивающая защиту от коррозии на весь срок службы.

Реализация электрохимической защиты подводной части корпуса платформы осуществляется посредством использования установки системы катодной защиты в состав которой входят: анодные заземлители с магниевыми электродами, электроды сравнения, катодный преобразователь, блок совместной защиты.

Энергетическая эффективность и теплозащита ограждающих конструкций

Соблюдение требуемых теплозащитных характеристик помещений обеспечивается за счет рационального применения в ограждающих конструкциях эффективных теплоизоляционных материалов.

Тепловая изоляция применяется в опорном основании во всех отапливаемых помещениях на стенках, подволоках и палубах, соприкасающихся с наружным воздухом и забортной водой, а также на конструкциях, разделяющих отапливаемые и не отапливаемые помещения.

В качестве теплоизоляционного материала применяется тепловая изоляция из каменной ваты, имеющая низкий коэффициент теплопроводности.

Поверхность изоляции со стороны помещения имеет гидрозащитное покрытие для предотвращения увлажнения изоляционного материала от проникновения вовнутрь паров влаги из воздуха помещения. В качестве гидроизоляции применяется армированная алюминиевая фольга.

Тепловая изоляция устанавливается непрерывной по поверхности с учетом набора и обеспечивает расчетные значения температур на поверхности изоляции, исключая выпадения конденсата.

При использовании современных теплоизолирующих материалов для ограждений помещений, цистерн, трубопроводов, достигается снижение теплотерь при передаче теплоносителя на большие расстояния, значительно снижается энергопотребление основного энерготехнического оборудования системы теплоснабжения.

К основным параметрам эффективности и долговечности разработанной конструкции так же следует отнести выбор марки стали, которая подбирается в зависимости от расчетной температуры и степени ответственности конструкции. Это обеспечит необходимую прочность и неизменяемость формы конструкций корпуса в различных условиях внешних воздействий на сооружение, а также долговечность службы конструкций и возможность их ремонта в процессе эксплуатации.

Все перечисленные выше мероприятия в достаточной степени обеспечат работоспособность и долговечность конструкции во всех расчетных режимах в течение заданного срока службы.

Библиографический список:

1. Дмитриевский, А.Н. Первая арктическая нефть России: исторический опыт и перспективы развития / А.Н. Дмитриевский, Н.А. Еремин // Газовая промышленность. 2018. № 12 (778). С. 108-109.
2. Крыжевич, Г.Б. Проектирование арктических нефтегазодобывающих платформ / Г.Б. Крыжевич // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 1 (387). С. 93-106.
3. Караев, И.П. Расчетно-аналитическое исследование выбора типов оснований ледостойких стационарных платформ для освоения месторождений обской губы / И.П. Караев, А.А. Новиков // Газовая промышленность. 2018. № 7 (771). С. 40-46.
4. Габова, В.В. Исследование конструкций ледостойких платформ из железобетона и предварительно напряженного железобетона / В.В. Габова, К.А. Селиванова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. № 52 (71). С. 19-26.
5. Барышев, В.Н. Проектирование ледостойкой платформы для разведочного бурения в мелководной зоне арктических морей на слабых грунтах / В.Н. Барышев, О.А. Сабодаш // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2016. № 4 (29). С. 89-95.
6. Миронов, А.С. Особенности морских стационарных ледостойких буровых платформ / А.С. Миронов, Н.А.Тарануха // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов. Материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. ФГБОУ ВО «КнАГТУ». 2016. С. 391-393.
7. Знаменский, М.В. Перспективы применения, конструктивно-технологические решения и прочность сталебетонных конструкций морских ледостойких стационарных платформ / М.В. Знаменский, Л.Н. Подгорный, Н.Г. Попов // Морской вестник. 2017. № 1S (13). С. 80-84.
8. Косырев, А.В. Методы защиты ледостойких шельфовых платформ от ледовой абразии / А.В. Косырев // Интернаука. 2021. № 6-1 (182). С. 6-9.
9. Курьшов, В.И. Ледовая защита морских платформ / В.И. Курьшов // Интеграция наук. 2017. № 7 (11). С. 38-40.
10. Габова, В.В. Конструирование и анализ опорного блока морской ледостойкой стационарной платформы / В.В. Габова, Т.С. Савченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. № 52 (71). С. 27-35.

СПОСОБЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО
АНГИДРИТОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕНОВЫХ И
ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.А. Аниканова, канд. техн. наук, доцент

О.В. Волкова, канд. техн. наук, доцент

А.И. Кудряков, д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. Использование вторичного ангидритового сырья (фторангидрита) является эффективным решением задачи комплексного использования природных ресурсов в производстве стеновых и отделочных материалов, образующих эффективную строительную систему, в которой сродство базового и отделочного слоев по ряду физических свойств (средней плотности, пористости, теплофизическим свойствам) обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики стеновых материалов, а также уменьшения отчуждения земли для хранения отходов и загрязнения среды обитания человека. Целью исследований является комплексная строительно-технологическая утилизация фторангидритового сырья для производства структурированных композиционных вяжущих и эффективных стеновых и отделочных строительных материалов. Исследования направлены на изучение физико-химических процессов структурообразования вяжущих и материалов на их основе с целью повышения эксплуатационных характеристик разрабатываемых материалов.

Ключевые слова: фторангидритовое сырье, классификация фторангидритового сырья, структурно-методологическая схема исследований, стеновые и отделочные материалы, процессы структурообразования.

Правильный выбор исходного сырья и разработка инновационных технологических процессов изготовления строительных материалов вносит заметный вклад в решение проблемы ресурсо- и энергосбережения в строительстве. Востребованность в стеновых материалах и отделочных сухих строительных смесях на основе гипсосодержащих вяжущих обусловлена управляемыми технологическими и техническими характеристиками, способностью обеспечивать комфортную среду проживания человека. В связи с ограниченностью природного гипсового сырья в ряде регионов России применяется альтернативное гипсовое сырье в виде вторичного ангидритового сырья (фторангидрита).

Практический аспект эффективного решения проблемы утилизации фторангидрита с целью производства строительных материалов связан с формированием комплексов безотходных производств в составе региональных промышленных кластеров. Реализация формирования комплексов безотходных производств зависит от степени изученности техногенных отходов в качестве потенциальных сырьевых компонентов для конструирования и синтеза структур строительных композитов, создании научно-обоснованных принципов и технологий структурообразования систем твердения и получения искусственного камня, который должен пройти тестирование, идентификацию и диагностику с точки зрения его функциональных возможностей [1-5]. Необходимость использования вторичных ресурсов является эффективным решением задачи

комплексного использования природных ресурсов в производстве строительных материалов, уменьшения отчуждения земли для хранения отходов и загрязнения среды обитания человека. До недавнего времени химическими предприятиями различных отраслей промышленности (химической, атомной, цветной металлургии) складировалось свыше полумиллиона тонн сульфаткальциевых отходов фтороводородных производств (фторангидрита) ежегодно. Причиной медленного освоения производства строительных материалов из фторангидритового сырья является недостаточная его изученность, нестабильность состава и свойств, неоднозначность научных результатов по физико-химическим процессам структурообразования фторангидрита в измельченном состоянии, низкой активностью и прочностью затвердевшего камня. Неоднородность по вещественному и гранулометрическому составу, способ и время хранения в отвалах требует решения вопросов систематизации по химическому составу, физико-механическим характеристикам с целью разработки классификации фторангидритовых отходов, конечной целью которой является формирование территориально-промышленных комплексов по производству строительных материалов и изделий с вовлечением в данный процесс других видов региональных промышленных отходов, типовых технологий и оборудования по производству строительных материалов.

Известны различные принципы классификации фторангидритового сырья: по химическому составу (содержанию растворимого и нерастворимого ангидрита, остаточных кислот), физическим и физико-механическим характеристикам. Классификация фторангидрита для его системного использования в производстве строительных материалов ранее не рассматривалась. Это объясняется тем, что основной задачей предприятий производителей фторидов является нейтрализация остаточных кислот с целью возможности хранения фторангидрита в отвалах, а не получение строительных материалов с требуемыми свойствами. Представленная классификация фторангидритового сырья, основанная на анализе фторангидрита основных выпускающих предприятий России, позволяет обобщить данные о составе, структуре и свойствах с учетом специфики их использования в технологии изготовления строительных материалов.

С учетом результатов анализа информации о вещественном составе фторангидритового сырья различных предприятий разработана блок-схема исследований (рис. 1) фторангидритового сырья, применительно к производству стеновых и отделочных материалов для объектов строительства, проведены исследования, разработана нормативно-технологическая документация на производство стеновых блоков и сухих строительных смесей. При проведении исследований использовался фторангидрит различных предприятий: нейтрализованный в условиях предприятия и измельченный (фторангидритовое вяжущее), кислый фторангидрит естественной гранулометрии и модифицированный и отвальный фторангидрит [2, 6]. Фторангидритовое вяжущее с модифицирующими добавками авторы рекомендуют использовать в качестве готового продукта в производстве стеновых материалах. Кислый фторангидрит может модифицироваться в заводских условиях или использоваться как дополнительный компонент, содержащий серную кислоту, при получении стеновых материалов [9]. Отвальный фторангидрит, в зависимости от времени и условий хранения может быть

использован в качестве вяжущего вещества и микронаполнителя. По представленной блок-схеме фторангидрит с сухим способом нейтрализации рекомендуется использовать в качестве вяжущего, отвалный фторангидрит - в качестве вяжущего после определения содержания двуводного сульфата кальция, а фторангидрит с длительным временем хранения в отвалах (более 10 лет) - в качестве гипсового камня.



Рис. 1. Классификация фторангидрита по вещественному составу и применению

Исходя из химического и гранулометрического состава отвалного фторангидрита, представленного в основном двуводным гипсом, возможно изготовление гипсовых вяжущих, технология которых основана на предварительной дегидратации гипсового камня, с последующей гидратацией и формированием структур твердения при изготовлении материалов. Процессы дегидратации являются самыми теплоемкими в общей схеме их производства. В строительстве безобжиговые ангидритовые вяжущие рекомендуется использовать при твердении изделий в обычных условиях или при тепловой обработке [6-10]. Исходя из нестабильного состава отвалного фторангидрита, меняющегося при заполнении отвала, а также существенным усложнением технологии, связанной с использованием прессового оборудования, исследована возможность использования отвалного фторангидрита в качестве заполнителя и наполнителя при производстве стеновых и отделочных материалов (рис. 1). В работе научно обоснованы и сформулированы основные способы модифицирования всех видов фторангидритового сырья для производства стеновых и отделочных материалов в виде сухих строительных смесей (рис. 2)

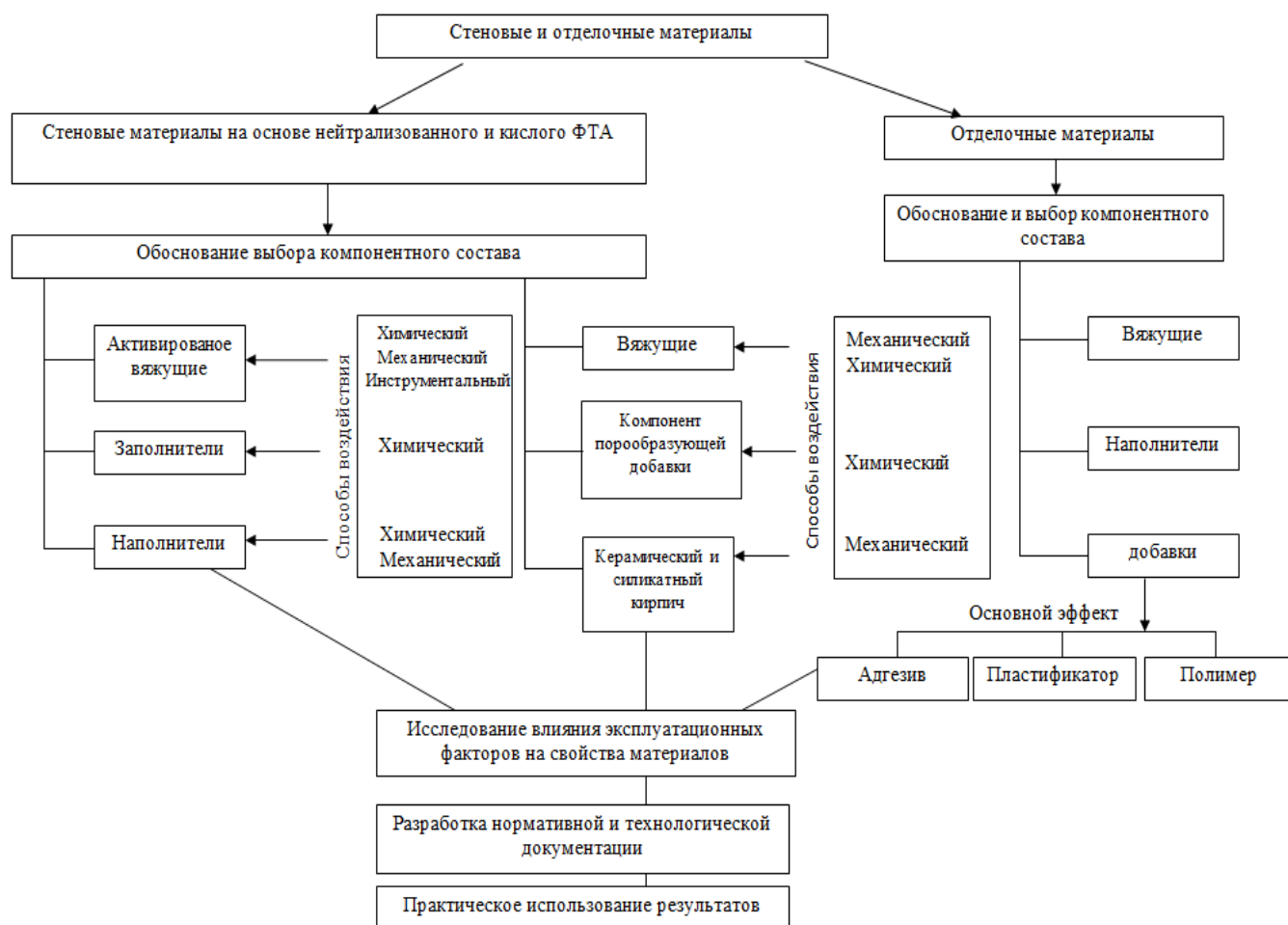


Рис. 2. Структурно-методологическая схема исследований ФТА для производства стеновых и отделочных материалов

Наиболее эффективными направлениями для улучшения характеристик стеновых материалов и сухих строительных смесей (ССС) на основе фторангидрита являются следующие:

- введение микронаполнителей, обеспечивающих химическое взаимодействие с вяжущим за счет образования экранирующих соединений и являющихся центрами кристаллизации для твердеющего фторангидрита;
- выбор зернового состава заполнителей, с целью обеспечения каркаса с требуемой прочностью и плотностью, и обеспечивающих химическое сродство с подложкой;
- выбор рациональных добавок для повышения качества стеновых и отделочных материалов;
- улучшение контактного взаимодействия между частицами вяжущего, поверхностью заполнителя и подложкой. По литературным данным макроструктура затвердевших растворов из ССС формируется в результате цементирующей способности вяжущего вещества частиц заполнителя и наполнителя с минимальным объемом межзерновых пустот, что позволяет снизить расход вяжущего и повысить его прочностные характеристики.

Таким образом, практический аспект эффективного решения проблемы утилизации фторангидрита в производстве строительных материалов зависит от степени их изученности в качестве потенциальных сырьевых компонентов,

процессов структурообразования матрицы и строительных композитов на микро- и макроуровнях, разработки технологий производства с применением типового оборудования предприятий строительной отрасли.

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. Аниканова Л.А., Стеновые и отделочные материалы использованием фторангидрита / Л.А. Аниканова, А.И. Кудяков, О.В. Волкова // Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки. 2015. Т.1. С.230-234.
3. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах. // Строительные материалы. 2018. № 8. С.18-24
4. Чернышов Е.М., Макеев А.И. О проблеме управления рецептурно-технологическими факторами получения бетонов в задачах конструирования и синтеза оптимальных структур // Строительные науки. 2018. № 3. С.135.
5. Лесовик В.С. Чернышова Н.В., Клименко В.Г. Процессы структурообразования гипсосодержащих композитов с учетом генезиса сырья // Известия вузов. Строительство. 2012. № 4. С. 3-11
6. Kudyakov A.I., Anikanova L.A., Redlikh V.V. Composite Bindung asid Fluoride Materials for fencing structures // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. №1 (34). С. 106-111.
7. Аниканова Л.А., Волкова О.В., Кудяков А.И., Курмангалиева А.И. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее // Строительные материалы. 2019. 1-2. С. 36-42.
8. Anikanova L., Volkova O., Kudyakov A., Sarkisov Y., Tolstov D. Influence of solidification accelerators on structure formation of anhydrite-containing binders // AIP Conference Proceedings 2 «Advanced Materials in Technology and Construction, AMTC 2015.
9. Токарев Ю. В., Агеев А.В., Волков М.А., Кузьмина Н.В., Яковлев Г.И. Свойства и структура ангидритового вяжущего Ергачинского месторождения в присутствии фосфатных активаторов и алевролита // Строительные материалы. 2019. С.46-50
10. 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

О. В. Александрова¹, канд. техн. наук, доцент

Нгуен Дык Винь Куанг¹, аспирант кафедры строительного материаловедения

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Речной песок широко используется в качестве мелкого заполнителя в строительной промышленности. Возросший спрос на речной песок привел к массовому истощению его природных ресурсов. Была рассмотрена возможность замены речного песка на тонкомолотый белый кварцевый песок. Исследование механических свойств бетонов, содержащих тонкоизмельченный кварцевый песок со средним размером частиц $5 \div 95$ мкм, частично заменяющий речной песок показало, что включение мелкого заполнителя и дополнительных цементирующих материалов (золы-уноса, микрокремнезема) улучшило механические свойства бетона. Совместное использование 15% тонкомолотого кварцевого песка и 30% золы-уноса с 5% микрокремнезема в качестве замены цемента привело к улучшенным механическим характеристикам.

Ключевые слова: кварцевый песок, бетон, тонкомолотый кварцевый песок, минеральная добавка, зола-уноса, микрокремнезем.

В строительной промышленности Вьетнама речной песок, добываемый из русел рек, является одним из основных ингредиентов, используемых в качестве мелкого заполнителя при производстве бетона и строительных растворов. Чрезмерная эксплуатация речного песка влияет на устойчивость экологической среды. Ограничение правительством Вьетнама добычи речного песка привело к росту цен на песок, что серьезно повлияло на стабильность строительной отрасли [1, 2]. По этой причине поиск альтернативного материала речному песку стал жизненно важным. Использование нескольких типов мелких заполнителей, таких как тонкомолотый кварцевый песок, получаемый измельчением белого песка [10], для частичной замены природного речного песка в бетонных смесях повысило прочность и долговечность бетона в сульфатной коррозионной среде. [3]. В бетонных смесях тонкомолотый кварцевый песок играет роль микрозаполнителя, что приводит к снижению пористости матрицы. Кварцевый порошок считается химически инертным при нормальных температурах окружающей среды. Следовательно, когда эти инертные материалы смешиваются с портландцементом, хотя химической реакции не происходит [4], они оказывают физическое воздействие и также могут ускорить реакцию гидратации клинкерного компонента. Это явление может быть результатом того, что наполнители обеспечивают больше мест зарождения роста гидрата силиката кальция (C-S-H) [5].

Минеральные добавки широко используются в бетоне для улучшения физических и химических свойств или для снижения затрат и экономии энергии. Использование материалов для замены цемента может снизить факторы, связанные со снижением долговечности бетона, или повысить его устойчивость к воздействию сульфатов [6]. Кроме того, минеральные добавки улучшили прочность за счет заполнения пор и изменения их диаметра и распределения [7].

Влияние золы-уноса и тонкоизмельченного кварцевого песка на свойства высокоэффективного бетона было изучено и сообщено автором и др. в [8]. Влияние тонкоизмельченного кварцевого песка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов было изучено и сообщено автором и др. в [9]. Совместное влияние минеральных добавок и мелкодисперсного заполнителя на механические свойства бетона было изучено и сообщено автором и др. в [10].

Тонкомолотый кварцевый песок, полученный измельчением белого кварцевого песка (со средним размером частиц $5 \div 95$ мкм и содержанием $\text{SiO}_2 > 99,6\%$), считается химически инертным при нормальных температурах окружающей среды, может использоваться в качестве микрозаполнителя, заполняющего пустоты в микроструктуре цементной пасты и физически стимулирующего гидратацию цемента в первые несколько часов твердения, уплотняя структуру цементной матрицы [11]. Исследование применения тонкомолотого кварцевого песка с размером частиц от 5 до 95 мкм, не обладающего пуццолановой активностью, но выступающего в качестве наполнителя приведет к улучшению механических свойств и долговечности бетона, подвергающегося воздействию хлоридной и сульфатной среды, является актуальной проблемой в настоящее время.

Для изучения влияния мелкого заполнителя на свойства бетона в работе были использованы следующие сырьевые компоненты. Сульфатостойкий портландцемент (Ц) $\text{PC}_{\text{SR}40}$ (тип 5) с истинной плотностью $3,15 \text{ г/см}^3$ состав и свойства которого соответствовали требованиям TCVN 7711-2013 и ГОСТ 22266-2013. В качестве активных минеральных добавок применяли микрокремнезем (МК) "Sikacrete[®]PP1" с размером частиц $< 0,1$ мм и плотностью $2,15 \text{ г/см}^3$ (TCVN 8827-2011 и ГОСТ Р 56592-2015); зола-уноса (ЗУ) тепловых электростанций (ТЭС) «Фа Лай» (Вьетнам) (TCVN 10302-2014 и ГОСТ 25818-2017). В таблице 1 представлен химический состав цемента и минеральных добавок. Суперпластификатор (СП) Sika[®]ViscoCrete[®]151 с плотностью $1,09 \text{ кг/л}$ и pH 4,0 ... 6,0 (TCVN 8826-2011/2 и ГОСТ Р 56592-2015). В качестве мелкого заполнителя использовали речной песок (ПР), плотностью $2,65 \text{ г/см}^3$ и модулем крупности 3,0 и водопотребностью 2% (TCVN 10796-2015 и ГОСТ 8736-2014); Тонкомолотый кварцевый песок (Км) в виде кварцевой муки белого цвета, полученный измельчением белого кварцевого песка со средним размером частиц $5 \div 95$ мкм. Гранитный щебень (Щ), в двух фракций 5-10 мм и 10-20 мм в соотношении 40: 60, с плотностью $2,68 \text{ г/см}^3$, водопотребностью 0,5% и средней прочностью 105,6 МПа (TCVN 7570-2006 и ГОСТ 8267-93*), а также водопроводная вода (В) в качестве воды затворения для получения бетонной смеси, соответствующая требованиям TCVN 4506-2012 и ГОСТ 23732-2011.

Предварительный состав бетонной смеси определяли методом абсолютных объемов. С целью изучения влияния мелкого заполнителя на физико-механические свойства бетона были разработаны следующие составы. Составы № 1, № 1а, № 2 и № 2а с содержанием портландцемента в количестве 100%, в составах № 5 и № 5а часть портландцемента была заменена на микрокремнезем (5%) и золу-уноса (30%). Общее количество вяжущего во всех составах было принято 550 кг/м^3 , водовязующее отношение (В/Вяз) поддерживалось постоянным на уровне 0,3.

Таблица 1. Химический состав цементирующих материалов

Вяжущие материалы	Химический состав (% по массе)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
Цемент	20,59	3,77	5,06	62,12	1,72	2,1	-
Зола-уноса (класс F)	57,43	24,05	6,06	0,68	0,96	0,32	5,74
Микрокремнезём	92,48	0,86	1,91	0,32	0,85	0,31	1,69
Тонкомолотый кварцевый песок	99,7	0,044	0,04	0,052	0,036	-	0,04

Исследовались контрольный состав №1, не содержащий тонкомолотую кварцевый песок, контрольный №2 и базовый №5 составы, содержащие Км с размером частиц 5 мкм и 10 мкм количестве 20%. Все составы имели соотношение щебень/(Песок речной + Кварцевая мука) (Щ/ПР+Км) = 1,75. И составы №1а, №2а и №5а содержащие 15% Км с размером частиц 5 мкм; 10 мкм; 20 мкм; 45 мкм; 63 мкм и 95 мкм, в которых было снижено соотношение (Щ/ПР+Км) до 1,55. Составы бетонных смесей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Составы и подвижность бетонных смесей

Смесь №	Вяжущие материалы, кг/м ³			Заполнитель бетона, кг/м ³								В	СП		В/В _{яж}		
	Ц	МК	ЗУ	Щ	ПР	Км							л	%		л	-
						5 мкм	10 мкм	20 мкм	45 мкм	63 мкм	95 мкм						
1	550	-	-	1088	621,7	-	-	-	-	-	-	156	1,8	9,9	0,3		
1а	550	-	-	1088	701,9	-	-	-	-	-	-	156	1,8	9,9	0,3		
2	550	-	-	1088	497,4	62,2	62,2	-	-	-	-	156	1,8	9,9	0,3		
2а	550	-	-	1088	596,6	42,1	28,1	14,0	7,02	7,02	7,02	156	1,8	9,9	0,3		
5	357,5	27,5	165	1088	497,4	62,2	62,2	-	-	-	-	156	1,8	9,9	0,3		
5а	357,5	27,5	165	1088	596,6	42,1	28,1	14,0	7,02	7,02	7,02	156	1,8	9,9	0,3		

Из каждой смеси изготавливались образцы-кубы размерами 100x100x100 мм для определения прочности на сжатие; образцы с размером 100x100x400 мм использовались для испытания на прочность при изгибе; цилиндрические образцы диаметром 100 мм и высотой 200 мм для определения прочности на разрыв при растяжении. Образцы выдерживались при температуре 28°±2°С в течение 24 часов, затем извлекались из форм и погружались в цистерны пресной водой для отверждения до времени испытаний. Механические свойства бетона были исследованы в возрасте 3, 7, 28 и 365 суток в соответствии со стандартом Вьетнама и ГОСТ 10180-2012.

Результаты исследований прочности на сжатие представлены на рисунке 1, а изменения значений прочности по отношению к контрольным смесям (соответствующие соотношению $K=(Щ/ПР+Км) = 1,75$, и 100% цемента) приведены в таблице 3.

Таблица 3. Прочностные показатели бетонов

Смесь №	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте	Прочность на растяжение при изгибе (R_{tf}), МПа	Прочности на осевое растяжение, $R_t = 0,55R_{tf}$

	3 сут.	7 сут.	28 сут.	356 сут.	56 сут.	56 сут.
1	67,6	71,1	81,8	83,8	7,9	4,35
1a	67,9	71,9	84,0	86,1	8,40	4,87
2	72,6	82,6	89,2	91,5	9,2	5,06
2a	70,2	78,8	87,5	90,5	8,95	5,19
5	67,3	72,9	80,2	95,7	8,3	4,57
5a	68,2	73,3	89,1	98,0	9,71	5,63

В результате проведенных испытаний установлено, что уменьшение соотношения $K=(\text{Щ}/\text{ПР}+\text{Км}) = 1,75$ до $1,55$ (состав №1a), приводящее к увеличению содержания мелкого заполнителя с $621,7 \text{ кг/м}^3$ до $701,9 \text{ кг/м}^3$ приводит к увеличению прочности на сжатие по сравнению с контрольным образцом №1.

Все образцы имеют значение прочности на сжатие выше, чем у контрольного образца. В частности, в возрасте 28 суток значение прочности на сжатие образца № 1a составило 84 МПа, что на 2,7% выше, чем у контрольного образца № 1; образец № 2a, полученный на 87,5 МПа, был ниже контрольного образца №2 на 1,9%; образец № 5a, полученный на 89,1 МПа, был выше контрольного образца № 5 на 2,4%.

Повышение прочности на сжатие бетонных смесей, содержащих тонкомолотый кварцевый песок, может быть объяснено эффектом уплотнения упаковки заполнителя за счет содержания тонкомолотого кварцевого песка с размером частиц в диапазоне от 5 до 95 мкм.

Увеличение содержания тонкомолотого кварцевого песка в сочетании с различной дисперсностью частиц, равномерно распределенных в смесях № 2a и № 5a, приводит к увеличению плотности упаковки твердых материалов за счет заполнения промежутков между более крупными зернами примерно так же, как цемент заполняет промежутки между мелкими заполнителями, а мелкие заполнители заполняют промежутки между крупными заполнителями в бетоне.

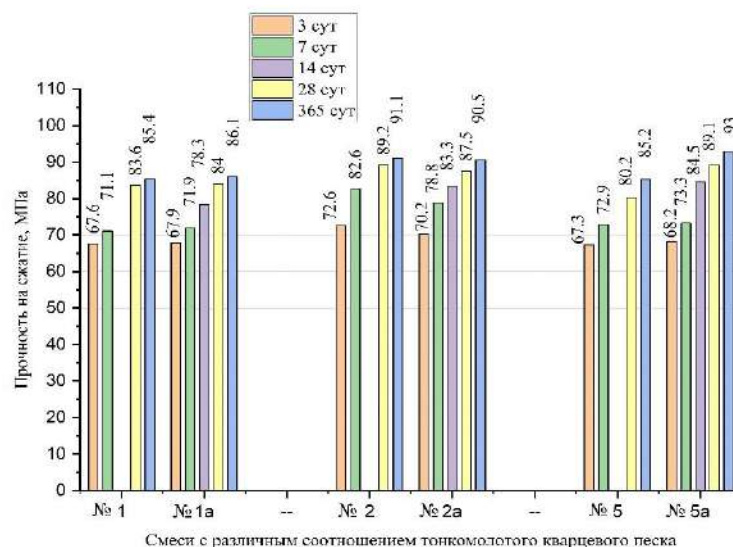


Рис. 1. Изменение прочности бетона на сжатие

Результаты, приведенные в таблице 3 и на рисунке 2, показывают, что введение в бетонную смесь активных минеральных добавок приводит к увеличению прочности на сжатие и на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток.

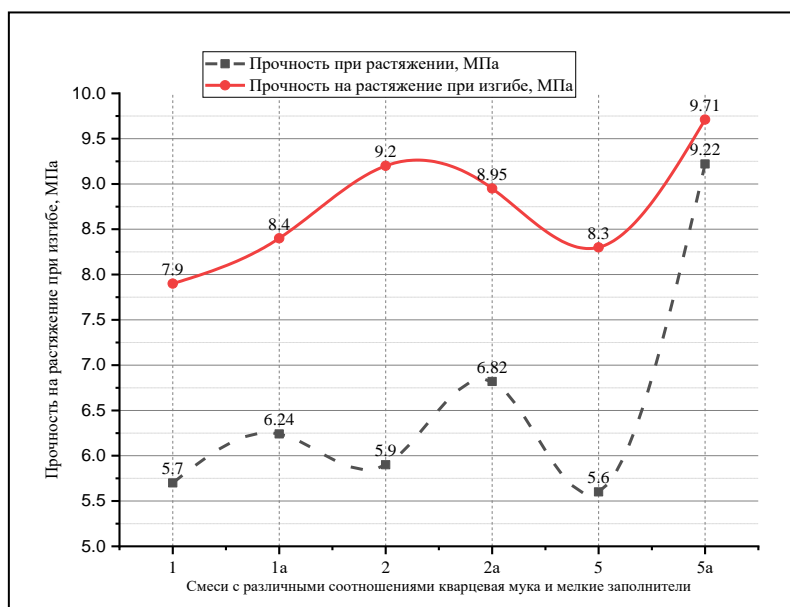


Рис. 2. Прочность бетона при осевом растяжении и на растяжение при изгибе

Замена части речного песка (ПР) на тонкомолотый кварцевый порошок (Км) в количестве 15 и 20% приводит к увеличению прочности на сжатие на 9,2 и 9 %, на растяжение при на 16,2 и 9,2% и на осевое растяжение на 16 и 16,3 % соответственно (таблица 11, рисунки 5 и 6, составы 1,2, и 2а) в возрасте 56 суток. Изменение соотношения (КЗ/(ПР+Км)) с 1,75 до 1,55 приводит к незначительному увеличению прочности на сжатие, на растяжение при изгибе и на осевое растяжение (таблица 11, рисунки 5 и 6, составы 1 и 1а, 5 и 5а) в возрасте 356 суток; В составах, с размером частиц Км от 5 до 95 мкм и содержащих комплекс минеральных добавок наблюдается увеличение прочности на сжатие, на 14 – 17% на растяжение при изгибе и на осевое растяжение на 16-23% (таблица 11, рисунки 5 и 6, составы 1 и 1а, 5 и 5а) в возрасте 356 суток.

Экспериментальные исследования доказали, что содержание и зерновой состав мелкого заполнителя значительно влияют на прочность бетона. Можно сделать вывод, что тонкомолотый кварцевый песок способствует увеличению плотности структуры цементного камня выступая в качестве наполнителя и заполняя пустоты между порами заполнителя.

Библиографический список:

1. Văn phòng chính phủ Việt Nam. Cẩm khai thác cát, sỏi tại khu vực bờ sông có nguy cơ sạt, lở / Nghị định số 23/2020/NĐ-CP. 2020.
2. Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam. Siết quản lý khai thác cát, sỏi và bảo vệ lòng, bờ bãi sông / Nghị định số 23/2020/NĐ-CP của Chính phủ quy định về quản lý khai thác cát, sỏi và bảo vệ lòng, bờ bãi sông. 2021.
3. Nguyen Duc Vinh Quang, Olga Aleksandrova, Boris Bulgakov. Mechanical and Durability Properties of High-Performance Concrete in Corrosive Medium of Vietnam / Chapter 4 - Proceedings of FORM 2021. Construction The Formation of Living Environment. (Akimov, Pavel, Vatin, Nikolai (Eds.)). Doi:10.1007/978-3-030-79983-0
4. Kadri E.H., Aggoun S., De Schutter G., Ezziane K. Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration / Materials and Structures. 2010. Vol. 43. Pp. 665–673. DOI:10.1617/s11527-009-9519-6

5. Siddique R., Aggarwal Y., Aggarwal P., Kadri E.-H., Bennacer R., Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS) / *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1916–1925, 2011
6. Shui ZH, Zhang R, Chen W, Xuan DX. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste / *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(9). Pp. 1761-1767. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.012
7. Макаров Ю.А., Лукашина С.В. Использование минеральных добавок для повышения долговечности бетона / *Sworld*. 2014. Том 19(1). С. 36-40.
8. Нгуен Дык Винь Куанг, Александрова О. В., Ткач Е. В. Effect of fly ash and quartz powder on the properties of high-performance concrete / *The 3rd Int. Conf. on Transport Infrastructure & Sustainable Development (TISDIC 2019)*. Construction Publishing House. ISBN: 978-604-82-2893-4. 2019. Pp. 503-514.
9. Александрова О. В., Нгуен Дык Винь Куанг, Булгаков Б. И., Петропавловская В. Б. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов / *Вестник ПГТУ, № 3(15), 2020 СЕРИЯ «Материалы. Конструкции. Технологии» (УДК 691.3)*. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.3.7
10. Нгуен Дык Винь Куанг, Александрова О. В., Самченко С. В. Combined effect of mineral admix-tures and fine aggregate on the me-chanical properties of ultrahigh performance concrete / *IOP Conf. Series: Materials Sci-ence and Engineering 869 (2020) 032034*. Doi:10.1088/1757-899X/869/3/032034
11. The Ministry of Industry and Trade (Vietnam). Power Development Plan-VIII. October 2020. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_coal-fired_power_stations_in_Vietnam

ПРИМЕНЕНИЕ ИНЪЕКЦИОННЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНОГО КРЕМНЕЗЁМА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛЫВУННЫХ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

К.А. Исрафилов¹, Аспирант каф. ТВВиБ НИУ МГСУ

И.Я. Харченко², д.т.н. НИИП НИУ МГСУ

А.И. Харченко³, к.т.н. ООО «НИЦ ПС»

Ю.И. Харин⁴, к.т.н., НИУ МГСУ

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

³*ООО «Научно-инженерный центр подземных сооружений»*

⁴*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния различных активаторов и технологических факторов на развитие процессов агрегации инъекционных смесей на основе коллоидного кремнезема, а также приведены результаты исследований по стабилизации и упрочнению водонасыщенных грунтов различного типа.

Ключевые слова Плывунные грунты, инъекционные смеси, коллоидный кремнезём, минеральные вяжущие, консолидация.

Введение

Значительная часть подземных сооружений в Москве и Санкт-Петербурге возводится в условиях водоносных песчаных пород, склонных к проявлению плывунных свойств. Под плывунностью подразумевают способность водонасыщенного дисперсного грунта переходить в подвижное состояние. При этом различают «истинные» плывуны и «псевдоплывуны». К «псевдоплывунам» относят водонасыщенные пески, переход которых в плывунное состояние связан с наличием гидродинамического давления поровой воды. Истинный плывунный грунт представлен слабо связанными структурными элементами коллоидного характера, обуславливающими высокую подвижность, т.е. проявляют тиксотропные свойства при динамических или вибрационных воздействиях, под влиянием которых нарушаются конденсационно-коагуляционные структурные связи. Следствием этого является вынос значительных масс водонасыщенного грунта в объём разрабатываемых подземных сооружений (тоннелей или котлованов), сопровождающихся развитием аварийных ситуаций, значительных осадочных деформаций зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния строительства.

В настоящее время, в качестве основных мероприятий, обеспечивающих строительство подземных сооружений в условиях плывунных грунтов, приме-

няется водопонижение или их инъекционное закрепление с применением смол или жидкого стекла [3]. Однако анализ результатов многолетнего опыта применения инъекционных систем на основе смол и жидкого стекла, показал их низкую эффективность, а применение водопонижения нецелесообразно в связи низкой водоотдачей грунтов. В этой связи, наиболее надёжным способом «борьбы» с грунтами плавунного типа, является их искусственное замораживание. Однако искусственное замораживание грунтов рассматривается только в качестве временного мероприятия и является дорогостоящим и трудно исполнимым технологическим процессом.

На основании вышеизложенного, учитывая высокую актуальность и практическую значимость проблемы, связанной с обеспечением безаварийного строительства подземных сооружений в условиях плавунных грунтов, нами разработана и освоена технология стабилизации и упрочнения плавунных грунтов с применением инъекционных смесей на основе коллоидного кремнезёма.

Теоретические основы

Применение инъекционных методов с целью консолидации, уплотнения и упрочнения грунтов ограничивается размером зернового состава минеральных вяжущих, препятствующих распределению инъекционных систем в капиллярно-пористой структуре грунтов различного вида, либо ускоренным загустеванием инъекционных смесей после их приготовления. Оба эти фактора явились предметом исследования при разработке и применении инъекционных смесей на основе коллоидного кремнезёма [2].

В настоящее время в химии силикатов и растворов силикатов, достаточно сложно представить результат взаимодействия элементов и химических реакций в привычном формульном выражении. С одной стороны, это объясняется сложным и, как правило, неустойчивым составом силикатного раствора, который характеризуется силикатным модулем. С другой стороны, процессы взаимодействия применяемых компонентов протекают в некристаллическом аморфном состоянии. Отличить адсорбцию от химических реакций, даже с применением современных методов исследований, весьма затруднительно.

Кроме этого, особенностью силикатных растворов является то обстоятельство, что результат химических реакций зависит не только от химической природы применяемых компонентов, но и от порядка их перемешивания, а также начальной их концентрации, что влияет на процессы структурообразования и гелеобразования смешиваемых компонентов.

В этой связи, при создании инъекционных систем с заданными свойствами для обработки различных типов грунтов, применяемые технологические приемы играют основную роль. Помимо параметров перемешивания, на результат химических реакций влияет диспергирование и предварительное затворение силикатных растворов в воде; их диспергирование; проведение гетерогенной реакции при непрерывном обновлении поверхности (например, в шаровой мельнице); растворение различных исходных реагентов в двух несмешивающихся растворителях с последующим эмульгированием и т. п.

В данной работе предпринята попытка анализа результатов взаимодействия растворов силикатов с различными реагентами с целью установить ос-

новые закономерности изменения вязкости, агрегации и структурной прочности продуктов взаимодействия для стабилизации и упрочнения структуры неустойчивых водонасыщенных грунтов плавунного типа.

Результаты экспериментальных исследований

Коллоидный кремнезём представлен суспензией кремнезёма в жидкой среде, в которой размеры частиц кремнезёма находятся в коллоидной области. При этом следует подразделять несколько видов агрегации частиц коллоидного кремнезёма: гелеобразование, коагуляцию и флокуляцию. Связанные между собой частицы коллоидного кремнезёма образуют цепи с последующим гелеобразованием по всему объёму золя. Золи из высокодисперсных частиц сохраняют прозрачность и характеризуются нарастающей во времени вязкостью. Процесс структурообразования инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма заканчивается полной потерей её подвижности. [1].

В процессе уменьшения степени дисперсности частиц коллоидного кремнезёма (коагуляции) происходит неупорядоченное агрегирование частиц кремнезёма с характерным объединением частиц в более или менее крупные рыхлые агрегаты, что приводит к потере прозрачности и постепенной седиментации агрегатов.

Результаты исследования влияния различных активаторов на развитие процессов агрегации инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма представлены на рис.1

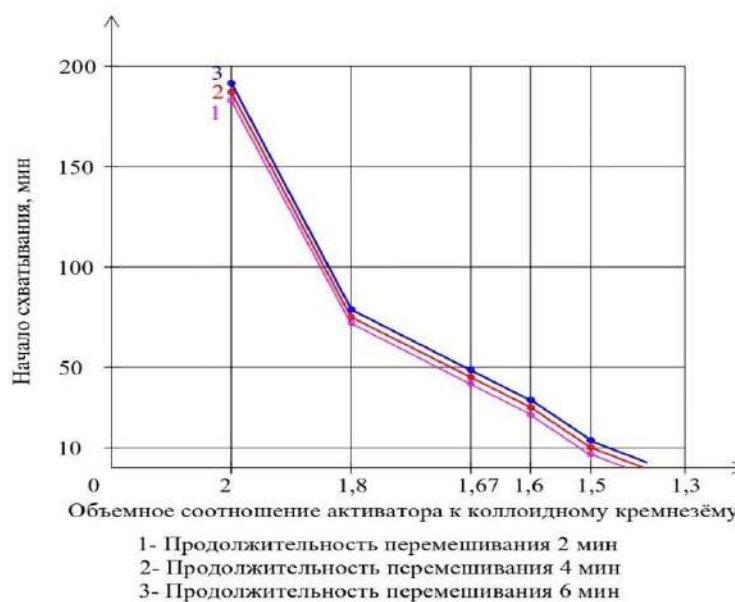


Рис. 1. Влияние различных активаторов на сроки агрегации инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма: 1 – активатор на основе лимонной кислоты; 2- активатор на основе уксусной кислоты; 3- активатор на основе щавелевой кислоты.

При этом установлено, что наиболее эффективным активатором является водный раствор щавелевой кислоты.

С целью исследования влияния режимов приготовления инъекционных смесей на основе коллоидного кремнезёма выполнялось при различной интенсивности и продолжительности перемешивания.

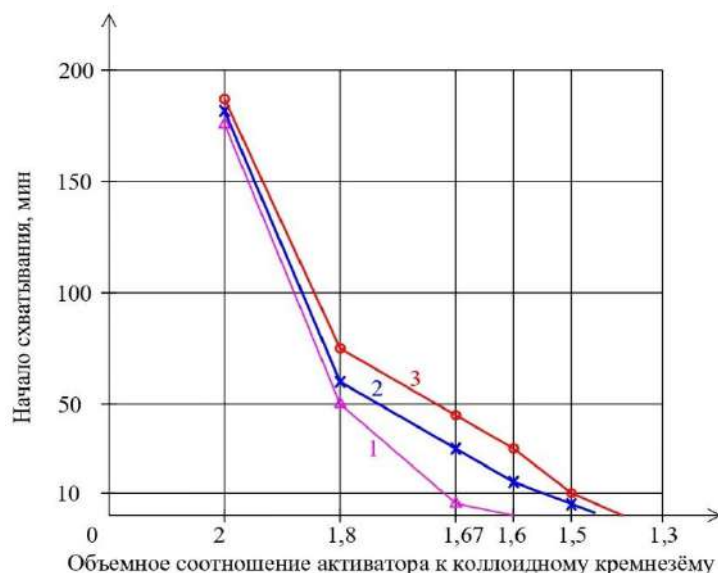


Рис. 2. Влияние интенсивности перемешивания на сроки агрегации инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма. (интенсивность перемешивания 1000 об/мин;

Результаты исследования влияния инъекционной смеси, на основе коллоидного кремнезёма, на стабилизацию и упрочнение водонасыщенных грунтов различного вида, представлены в таблице 1

Таблица 1. Результаты исследования влияния инъекционных смесей на стабилизацию и упрочнение различного вида грунтов.

№	Тип грунта	Прочность при сжатии (МПа) при различных количествах инъекционной смеси в структуре грунта (л/куб.м)					
		100	200	300	400	500	600
1	Водонасыщенный ил	-	0,1	0,22	0,48	0,53	0,50
2	Водонасыщенная супесь	0,1	0,21	0,40	0,46	0,64	0,62
3	Водонасыщенный мелкий песок	0,15	0,36	0,85	1,15	1,21	1,25

Как показывает анализ результатов выполненных исследований, для обеспечения устойчивой стабилизации водонасыщенного илистого грунта, расход инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма должен быть не менее 400 л/куб.м закрепляемого грунта. Увеличение расхода инъекционной смеси более 500 л/куб.м не сопровождается увеличением прочности закрепляемого грунта. Это связано с тем, что стабилизация и упрочнение структурны водонасыщенного илистого грунта обусловлена химическим и физико-химическим связыванием свободной воды продуктами, сопровождающими развитие процесса агрегации коллоидного кремнезёма. Дальнейшее увеличение расхода коллоидного кремнезёма в составе илистого грунта является избыточным [4]. При стабилизации и упрочнения неустойчивых водонасыщенных грунтов в ви-

де водонасыщенной супеси и мелкого песка, расход инъекционной смеси может быть увеличен до 600 л/куб.м, что объясняется не только связыванием свободной межзерновой воды, но и коагуляционным сцеплением отдельных зёрен грунта образующимися продуктами, сопровождающими развитие процесса коагуляции инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма.

Выводы

Установлено, что инъекционные смеси на основе коллоидного кремнезёма могут найти эффективное применение при стабилизации структуры и упрочнении грунтов плавунного типа, как альтернатива их искусственному замораживанию, являющимся в настоящее время основным методом их стабилизации.

Наиболее эффективным активатором структурообразования инъекционной смеси на основе коллоидного кремнезёма является раствор щавелевой кислоты. При интенсивности перемешивания компонентов 1000 об/мин, сроки агрегации инъекционной смеси, на основе коллоидного кремнезёма, могут изменяться в интервале от 5 до 200 мин в зависимости от длительности перемешивания.

Библиографический список:

1. Харун М.И., Коротеев Д.Д., Окольников Г.Э. Модифицированный грунт для строительства гражданских сооружений // Системные технологии, 2017. № 2 (23). С. 56-61.
2. Баженова О.Ю., Баженова С.И., Баженов М.И. Исследование некоторых свойств цементов с тонкодисперсной добавкой // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 96-97.
3. Kozlova I.V., Bepalov A.E., Zemskova O.V. Modified composition for fixing sandy soils // Materials Science Forum. 2020. Т. 992 MSF. С. 143-148.
4. Fatiha Bouchelaghem. Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration// Computers and Geotechnics, Volume 36, Issue 6, July 2009, Pages 1058-1071. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.03.016.
5. F. Bouchelaghem, A. Benhamida, H. Dumontet. Mechanical damage behaviour of an injected sand by periodic homogenization method// Computational Materials Science, Volume 38, Issue 3, January 2007, Pages 473-481. DOI: 10.1016/j.commsci.2005.12.044.
6. Нахаев М.Р., Муртазаев С.А.Ю., Абуханов А.З., Касумов М.М. Инъекционное закрепление структурно-неустойчивых грунтов специальными составами // В сборнике: Актуальные проблемы современной строительной науки и образования. Материалы всероссийской научно-практической конференции. 2017. С. 105-109.

КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ С ЗОЛОКАРБОНАТНЫМИ ДОБАВКАМИ

В.К. Козлова¹, д-р техн. наук, профессор

Ю.С. Саркисов², д-р техн. наук, профессор

А.А. Кишицкий¹, аспирант

Е.В. Божок¹, аспирант

А.М. Маноха¹, канд. техн. наук, доцент

¹ *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*

² *Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В статье приведены данные о влиянии комплексных золокарбонатных добавок на свойства композиционных портландцементов. Выполненные исследования позволяют отметить, что портландцементы с комплексной золодоломитовой добавкой отвечают требованиям ГОСТ 31108-2016, предъявляемым к композиционным портландцементом ЦЕМ II/A-K и ЦЕМ II/B-K. Введение комплексной золодоломитовой добавки позволяет повысить карбонизационную стойкость и сульфатостойкость цементного камня.

Ключевые слова: клинкер, композиционный портландцемент, минеральные добавки, твердение, коррозионная стойкость.

В мировом производстве цемента постоянно увеличивается доля композиционных портландцементов, что позволяет производителям экономить дорогостоящий клинкер, сокращать выбросы CO₂ в атмосферу, использовать отходы различных производств (шлаки, золы и др.), получать цементы с заданным комплексом свойств. Оптимизировать параметры качества многокомпонентных портландцементов возможно с учётом особенностей свойств отдельных компонентов. За рубежом имеется значительный опыт производства и применения композиционных портландцементов, содержащих значительное количество карбонатных добавок. Так, во Франции, более 30 % изготавливаемых портландцементов содержат 5-25 % карбонатной добавки, а в США при производстве композиционных портландцементов допускается введение в их состав до 50 % такой добавки [1]. При использовании различных минеральных добавок открываются большие перспективы получения портландцементов с необходимыми специальными свойствами (тампонажные, сульфатостойкие, цементы для транспортного строительства и др.). В настоящее время в России в общем объеме производства доля портландцементов с минеральными добавками составляет около 30 %. Проявляемая осторожность при освоении производства композиционных портландцементов объясняется недостаточной изученностью совместного влияния одновременно вводимых минеральных добавок на свойства получаемого готового продукта. Особенно это относится к использованию карбонатных добавок. Вопрос об их активном участии в химических процессах, протекающих при гидратации композиционных портландцементов, остаётся дискуссионным.

Согласно ГОСТ 31108-2016 [2] рекомендуется изготовление двух видов композиционных портландцементов ЦЕМ II/A-K и ЦЕМ II/B-K.

В композиционном портландцементе ЦЕМ II/A-K содержание портландцементного клинкера должно составлять 80-88 %, в ЦЕМ II/B-K содержание клинкера должно составлять 65-79 %. Остальная часть в том и другом портландцементе может быть представлена несколькими видами минеральных добавок, в числе которых доменный гранулированный шлак, микрокремнезём пуццолана, глиежи, зола-уноса, обожженный сланец, известняк. Содержание минеральных добавок в композиционном портландцементе ЦЕМ II/A-K может составлять 12-20 %, в цементе ЦЕМ II/B-K - 21-35 %. Для цемента ЦЕМ II/A-K при таком общем количестве добавок едва ли реально одновременное использование нескольких их видов. Класс прочности этих портландцементов 32,5.

Кроме композиционных портландцементов типа ЦЕМ II рекомендуется производство композиционных цементов типа ЦЕМ V.

В композиционном цементе ЦЕМ V/A содержание портландцементного клинкера должно составлять 40-64 % при одновременном содержании доменного гранулированного шлака в 18-30 %. Композиционный цемент ЦЕМ V/B должен содержать 20-38 % портландцементного клинкера и 31-49 % доменного гранулированного шлака. Остальная часть в композиционных цементах ЦЕМ V/A и ЦЕМ V/B может быть представлена тремя видами добавок, в числе которых пуццолана глиежи, зола-уноса. В составе цементов ЦЕМ V/A и ЦЕМ V/B таких добавок может быть введено 18-30 %. Изготовление таких композиционных цементов в настоящее время трудно освоить цементным заводам, так как для их производства кроме клинкера необходимо большое количество доменного гранулированного шлака, цена которого постоянно возрастает.

К сожалению, в указанном стандарте не уточняется возможное соотношение между количеством рекомендуемых минеральных добавок, кроме доменного гранулированного шлака, не указывается конкретно рекомендуемый вид золы-уноса в составе минеральных добавок, а в качестве карбонатной добавки рекомендуется только известняк в роли добавки-наполнителя, хотя влияние карбонатных добавок на свойства портландцементов достаточно подробно исследовано [1, 3-7]. В работе [6] приведено сравнение влияния добавки известняка и доломита на свойства портландцемента. Показано, что доломит в составе гидратированного цемента значительно активнее взаимодействует с гидроксидом кальция, чем известняк. В течение 28 суток доломит связывает количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$, соответствующее 60 мг СаО на 1 г добавки, известняк в таких же условиях связывает 35 мг СаО на 1 г добавки.

За счет более высокой активности карбонатной добавки в виде доломита, твердеющий композиционный портландцемент набирает более высокую прочность, чем такой же цемент с добавкой известняка. Поскольку запасы доломита значительно меньше, чем известняка, в качестве карбонатной добавки в композиционные портландцементы можно рекомендовать определенное количество карбонатной породы в виде доломитизированного известняка, который на многих цементных заводах выбрасывается в отвалы как некондиционное сырье для производства портландцементного клинкера из-за повышенного содержания

карбоната магния $MgCO_3$. При использовании известняка в качестве карбонатной добавки его количество должно быть увеличено.

В рекомендациях по производству композиционных портландцементов, особенно цемента ЦЕМ II/В-К, в котором общее количество добавок может составлять от 21 до 35 %, необходимо уточнять тип золы и её предельное содержание в составе добавок. Это особенно важно при использовании в качестве добавок основных зол-уноса, так как они могут содержать в своём составе до 5-8 % $CaO_{своб.}$. Введение добавки такой золы в состав портландцемента в количестве 20 % приводит к увеличению в его составе содержания $CaO_{своб.}$ до 2 % и более при допустимом количестве 0,5-1,0 % [8]. Такое увеличение содержания $CaO_{своб.}$ в цементе с добавкой золы может стать причиной неравномерного изменения объёма при твердении и снижения прочности. Это является одной из причин того, что высококальциевые золы не используются в производстве портландцементов в качестве минеральных добавок на цементных заводах Сибири. В настоящее время используется незначительное количество зол тепловых электростанций, в том числе высококальциевых зол бурых углей, обладающих самостоятельными вяжущими свойствами.

Выполненные исследования показали, что высококальциевые золы от сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна в присутствии карбонатных добавок гидратируются и твердеют без деструктивных явлений. В процессе гидратации содержащийся в её составе $CaO_{своб.}$ превращается в гидроксид кальция, активно реагирующий с карбонатной добавкой с образованием минерала деферрита $Ca(OH)_2 \cdot CaCO_3 \cdot nH_2O$.

С использованием комплексных золокарбонатных добавок возможно получение композиционных портландцементов высокой прочности и высокой коррозионной стойкости.

Изготавливаемые в настоящее время специальные виды портландцементов характеризуются повышенной стойкостью, как правило, к одному из видов химической коррозии, хотя в процессе службы бетоны, изготовленные с использованием таких цементов, подвергаются одновременному влиянию нескольких видов химического воздействия. Все виды химической коррозии строительных материалов протекают одновременно с углекислотной коррозией. В настоящее время не уделяется достаточного внимания оценке стойкости бетонов к этому виду коррозии, отсутствуют разработанные методы проверки карбонизационной стойкости.

На основе портландцементного клинкера АО «Искитимцемент» были изготовлены композиционные портландцементы ЦЕМ II/А-К и ЦЕМ II/В-К. Состав портландцемента ЦЕМ II/А-К: клинкер – 80 %; зола бурых углей Канско-Ачинского бассейна – 15 %; доломит – 5 %. Состав композиционного цемента ЦЕМ II/В-К: клинкер – 70 %, зола – 22 %; доломит – 8 %. В составе обоих видов портландцементов добавка гипсового камня 5 %. Используемый портландцементный клинкер содержал 58,5 % C_3S ; 17,5 % C_2S ; 7,8 % C_3A ; 14,5 % C_4AF . Химический состав золы бурых углей Канско-Ачинского бассейна: $CaO_{общ.}$ – 39,32 %; $CaO_{своб.}$ – 4,50 %; SiO_2 – 27,93 %; Al_2O_3 – 10,04 %; Fe_2O_3 – 10,99 %; MgO – 2,95 %; SO_3 – 4,65 %; п.п.п. – 4,12 %.

С использованием полученных композиционных портландцементов были изготовлены образцы-призмы (4x4x16 см), твердевшие в различных условиях. В таблице 1 приведены результаты определения прочности гидратированных цементов различного состава. Для сравнения приведены показатели прочности портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н, изготовленного на основе этого же клинкера.

Таблица 1. Влияние состава и условий твердения на прочность композиционных портландцементов

Марка портландцемент- та	Показатели прочности, МПа							
	Нормальные условия твердения		ТВО + 27 суток		Нормальные условия твердения + карбонизация		ТВО + 27 суток + карбонизация	
	R _{изг.}	R _{сж.}	R _{изг.}	R _{сж.}	R _{изг.}	R _{сж.}	R _{изг.}	R _{сж.}
ЦЕМ I 42,5 Н	6,81	44,35	5,13	26,72	3,35	28,72	2,46	25,16
ЦЕМ II/A-K	5,92	38,62	3,90	22,43	3,92	32,42	3,31	27,73
ЦЕМ II/B-K	4,82	33,83	3,12	18,73	2,84	30,75	1,92	19,26

Сравнение показателей прочности позволяет отметить, что портландцементы с комплексной золодоломитовой добавкой отвечают требованиям ГОСТ 31108-2016, предъявляемым к композиционным портландцементам ЦЕМ II/A-K и ЦЕМ II/B-K. Кроме того, получаемый на их основе цементный камень отличается более высокой стойкостью по отношению к углекислотной коррозии, чем цементный камень бездобавочного портландцемента. Карбонизация цементного камня осуществлялась в специальной установке при давлении углекислого газа 0,4 МПа. Определение сульфатостойкости показало, что композиционные портландцементы с золодоломитовой добавкой отвечают требованиям, предъявляемым к сульфатостойким портландцементам. В то же время для цементного камня, получаемого на основе композиционных портландцементов с золакарбонатными добавками характерна более низкая прочность после тепловлажностной обработки при температуре пара 80 °С. Для бетонов, изготовленных с использованием таких портландцементов, предпочтительнее твердение в нормальных условиях. При необходимости тепловлажностной обработки, она должна осуществляться паром с температурой не выше 50 °С.

В настоящее время в России производится незначительное количество композиционных портландцементов, в то время как накапливается большое количество различных минеральных отходов, которые могут быть использованы. Производимые портландцементы не способны обеспечить изготавливаемым на их основе бетонам необходимую коррозионную стойкость при одновременном воздействии нескольких видов химической коррозии. Все бетонные сооружения в процессе службы подвергаются действию углекислотной коррозии одновременно с другими видами коррозионного воздействия. Для повышения стойкости бетонов против углекислотной коррозии необходимо использовать при их производстве портландцементы с карбонатными добавками. Вводимые кар-

бонатные добавки в состав композиционных портландцементов позволяют более полно использовать отходы теплоэнергетики в виде высококальциевых зол и способствуют повышению коррозионной стойкости бетонов, изготавливаемых на основе таких цементов.

Библиографический список:

1. Куропятников, Ю.Ю. Влияние карбонатных модификаторов на физико-механические свойства газобетона / Ю.Ю. Куропятников, В.В. Белов // Сб. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. М.: МГСУ, 2011.
2. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019.
3. Бутт, Ю.М. Свойства цементов с карбонатными добавками / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев, В.М. Колбасов // Цемент. - 1981. - №10. - С.10-12.
4. Энтин, З.Б. Химия и технология тонкомолотых многокомпонентных цементов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.17.11 / Зиновий Борисович Энтин. -М., 1993. – 51 с.
5. Самченко, С.В. Гидратация и свойства коррозионностойкого глинозёмистого цемента с добавкой карбоната кальция / С.В. Самченко // Техника и технология силикатов. 2003. - Т.10. - №1-2. - С. 12-19.
6. Козлова, В.К. Влияние карбонатсодержащих добавок на свойства композиционных цементов / В.К. Козлова, А.М. Маноха, А.А. Лихошерстов, Е.В. Мануйлов, Е.Ю. Малова // Цемент и его применение. – 2012. – №3. – С. 53-57.
7. Пьячев, В.А. Свойства портландцементов с частичной заменой гипса известняком / В.А. Пьячев, К.С. Ишутин // Цемент и его применение. – 2009. – №1.
8. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. - М.: Стройиздат, 1979. – 157 с.

ВЛИЯНИЕ АКТИВАЦИИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Р.А. Ибрагимов, канд. техн. наук, доцент

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация. Поиск новых способов снижения энергетических затрат при получении строительных материалов является актуальной задачей современного строительного материаловедения. Целью исследования является определение влияния углеродных нанотрубок различной структуры на фазовый состав цементного камня методом ИК-спектроскопии, полученного традиционным способом и активацией в аппарате вихревого слоя. По анализу полученных спектрограмм выявлено, что модификация цементного камня углеродными нанотрубками, полученного из портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя, приводит к повышению количества силикатной фазы портландцемента (на 12-39 %), что подтверждается снижением количества портландита в данных составах на 8 % по сравнению с контрольным составом. Кроме того, модификация углеродными нанотрубками приводит к снижению содержания группы гидросульфоалюминатов кальция на 21-23 % в составах цементного камня, полученных без активации.

Ключевые слова: активация, фазовый состав, наномодификация, гидратация

Модификация строительных материалов различного рода химическими добавками, в том числе наноразмерного типа, активными минеральными добавками имеет огромное значение в практике их производства [1].

Введение углеродных нанотрубок (УНТ) в строительные композиты позволяет повысить их физико-механические свойства, трещиностойкость [2]. Однако, одной из главнейших проблем модификации УНТ – равномерное распределение в объеме строительного композита [3-4].

Одним из действенных методов оценки фазового состава гидратирующихся систем является метод ИК-спектроскопии [5-6].

Целью данного исследования является исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии.

Для исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б/ПЦ 500-Д0-Н Новотроицкого цементного завода, соответствующего требованиям ГОСТ 31108-2016 (далее – ПЦ).

Для исследований применялись углеродные нанотрубки: «TUBALL™» – однослойные углеродные нанотрубки производства компании «OCSiAl» (удельная поверхность 500-1000 м²/г) и «Graphistrength» – многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) производства компании «Arkema».

Для получения наномодифицированной добавки агломераты УНТ измельчались в среде изопропилового спирта с помощью ультразвукового диспергатора марки 1-0,063/22 с выходной мощностью 63 Вт и рабочей частотой 22 кГц. Технология диспергации состояла в том, что в изопропиловый спирт вводили УНТ, затем в ультразвуковом диспергаторе производили приготовление суспензии.

пензии. Продолжительность ультразвукового диспергирования составляла 5-7 мин.

Изопропиловый спирт применялся с целью функционализации поверхности углеродной нанотрубки путем прививки карбоксильных групп, которая меняет природу их поверхности с гидрофобной на гидрофильную.

Время обработки в АВС составило 5 минут. Для исследований образцов методом ИК-спектроскопии изготавливались кубы размером 2×2×2 см из цементного теста, которые твердели в течении 28 суток в нормально-влажностных условиях.

Регистрация ИК-спектров образцов производилась на Фурье ИК-спектрофотометре фирмы Perkin-Elmer, модель Spectrum 65, с помощью приставки НПВО Miracle ATR (кристалл ZnSe) в области 4000-600 см⁻¹, как правило, при 30 сканах. Запись и вычитание фонового спектра производилась автоматически. Изучаемые образцы предварительно измельчались в агатовой ступке до частиц микронного размера, после чего образовавшийся порошок прижимался к кристаллу НПВО специальным прижимом, входящим в комплект приставки. После регистрации автоматически осуществлялась НПВО-коррекция и сохранение спектра.

Для определения влияния воздействия активации на изменение фазового состава гидратных новообразований исследованы спектрограммы цементного камня, полученного без активации и активацией портландцемента в аппарате вихревого слоя.

Спектрограммы образцов цементного камня, полученного традиционным способом и активацией в АВС, представлены на рис. 1-2.

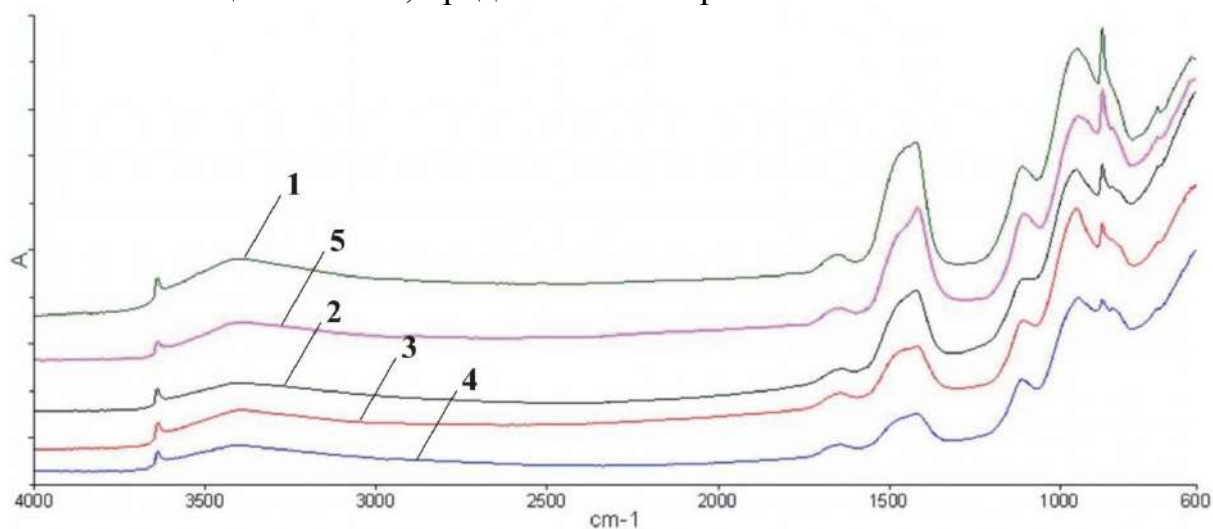


Рис. 1. Спектрограммы образцов цементного камня: 1 – контрольный состав; 2 – состав, модифицированный УНТ TUBALL; 3 – состав, модифицированный УНТ Graphistrength; 4 – состав, модифицированный УНТ TUBALL и ML; 5 – состав, модифицированный УНТ Graphistrength и ML

Содержание суперпластификатора Melflux 2651 F в исследуемых составах составило 1 %, содержание исследуемых углеродных нанотрубок – 0,005 % от массы цемента.

В качестве добавки использовали пластификатор Melflux 2651 F (далее – ML) – химическая добавка на основе полиэфиркарбоксилата (полимерная цепь образована α , β -ненасыщенными карбоновыми кислотами), порошок насыпной плотностью 400-600 кг/м³, выпускается концерном «BASF».

Обработку портландцемента производили в аппарате вихревого слоя (АВС) модель 297, производитель ООО «Регионметтранс». В работе [7] приводятся данные по основным конструктивным элементам аппарата вихревого слоя (АВС) и режимам его работы.

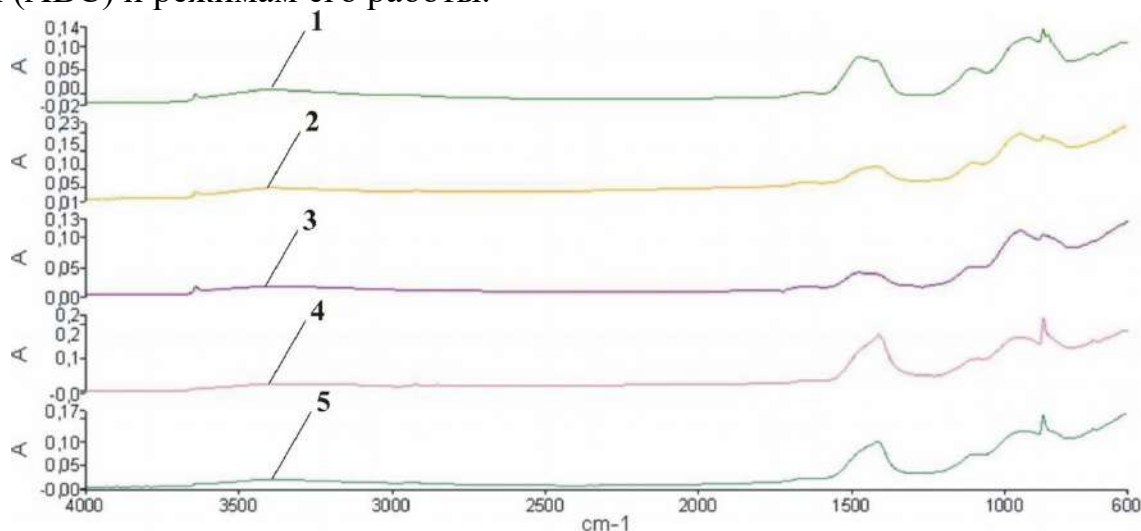


Рис. 2. Спектрограммы образцов цементного камня, полученного активацией портландцемента в АВС: 1 – контрольный состав; 2 – состав, модифицированный УНТ TUBALL; 3 – состав, модифицированный УНТ Graphistrength; 4 – состав, модифицированный УНТ TUBALL и СП; 5 – состав, модифицированный УНТ Graphistrength и СП

Химический состав продуктов гидратации исследуемых образцов цементного камня, полученных различными способами, имеют отклики при 3642; 3400; 1415; 1102; 950; 874 см⁻¹.

Полоса поглощения при 3642 см⁻¹ вызвана колебаниями ОН-групп и идентифицирует гидросиликаты кальция различной структуры (портландит, ксонолит и другие гидросиликаты аналогичной структуры). Количество портландита в составах цементного камня с УНТ, полученных без активации, уменьшается на 8 %. Модификация цементного камня УНТ TUBALL и активация в АВС также снижает количество портландита на 8 %, по сравнению с немодифицированным составом. Модификация УНТ Graphistrength не оказывает влияния на снижение количества портландита.

Наличие аномалий при отражениях 1400-1600 см⁻¹, а также широкая полоса спектра в области 3400-3500 см⁻¹ свидетельствует о наличии субмикросталлов гидросиликатов тоберморитоподобной структуры [8]. Количество данных гидросиликатов в составах № 2 и № 3 уменьшается по сравнению с контрольным составом, при этом активация портландцемента совместно с УНТ в АВС не уменьшает количество гидросиликатов тоберморитоподобной структуры.

Полосы поглощения при 1415-1473 см⁻¹ свидетельствуют о колебаниях ОН-групп в вершинах кремнекислородных тетраэдров, либо принадлежат кар-

бонату кальция, либо могут свидетельствовать о присутствии обоих компонентов. Введение УНТ при различных способах получения цементного камня незначительно уменьшает количество силикатной фазы по сравнению с составами без добавок. При этом активация портландцемента в АВС способствует образованию силикатной фазы в большем количестве, чем при традиционном получении цементных составов (на 12-39 %).

Содержание гидросиликатов кальция двухмерной структуры и одномерных в виде цепей $\nu(\text{SiO})$, наблюдаемое при полосах поглощения $1000-1100 \text{ см}^{-1}$ увеличивается в составах, модифицированных УНТ и полученных традиционным образом (на 39 % при модификации УНТ Graphistrength, и на 47 % при модификации УНТ TUBALL). При активации портландцемента в АВС введение УНТ TUBALL вызывает снижение гидросиликатов кальция двухмерной структуры, а введение УНТ Graphistrength – их повышение на 28 %, при этом в контрольном составе, полученном активацией, данных гидросиликатов больше на 39 % чем в составе, полученном без активации.

Библиографический список:

1. Королев, Е.В. Проблемы и перспективы нанотехнологии в строительстве / Е.В. Королев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 2 (16). С. 200-208.
2. Иноземцев, А.С. Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2013. Т. 5. № 1. С. 24-38.
3. Королев, Е.В. Эффективность физических воздействий для диспергирования наноразмерных модификаторов / Е.В. Королев, А.С. Иноземцев // Строительные материалы. 2012. № 4. С. 76-79.
4. Королев Е.В. Параметры ультразвука для гомогенизации дисперсных систем с наноразмерными модификаторами / Е.В. Королев, М.И. Кувшинова // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 85-88.
5. Гришина, А.Н. Исследование химического состава цементного камня, модифицированного гидросиликатами бария / А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 66-74.
6. Королев, Е.В. Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении / Е.В. Королев // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 60-64.
7. Ибрагимов, Р.А. Прочность тяжелого бетона на портландцементе, обработанном в аппарате вихревого слоя / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев, Т.Р. Дебердеев, В.В. Лексин // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 28-31.
8. Чукин, Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема / Г.Д. Чукин. М.: Типография Паладин. 2008. 172 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРКОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В СРЕДЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОДНОГО ПРОГРЕВА

А.М. Гарафиев¹, аспирант

Р.Х. Мухаметрахимов¹, канд. техн. наук, доцент

¹ФГБОУ ВО Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация. Актуальность исследований связана с необходимостью расширения области применения и повышения эффективности электропроводящих строительных композитов на основе минеральных вяжущих, наиболее распространенным из которых является бетон. Одним из перспективных областей применения электропроводящего бетона является его применение для электродного прогрева при зимнем бетонировании. Цель работы заключается в исследовании влияния молотого шунгитового наполнителя на перколяцию электрического тока в среде цементного камня при различной влажности композита и определение его оптимального содержания. Перколяция оценивалась по величине электрического сопротивления по методике измерения сопротивления бетона электрическому току двумя электродами с помощью тераомметра Е6-13А. Установлено, что для всех исследуемых показателей влажности оптимальное значение содержания шунгита с точки зрения снижения величины электрического сопротивления исследуемых систем и обеспечения средней плотности и прочности составляет от 3 до 5%, дальнейшее увеличение его количества приводит к снижению прочности цементного композита. Результаты исследований могут быть полезны при разработке научно-обоснованных технологических решений по совершенствованию шунгитосодержащих электропроводящих строительных композитов на основе портландцемента.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, бетон, электродный прогрев, шунгит, перколяция, энергосбережение.

Необходимость рационального использования электроэнергии в технологии электродного прогрева бетона при зимнем бетонировании обусловлена тем, что по мере гидратации портландцемента и испарения части воды при прогреве происходит увеличение электрического сопротивления бетона и соответственно затрат электроэнергии. При достижении бетоном примерно 40-60 % от марочной прочности дальнейший его прогрев становится затруднителен, в ряде случаев он не успевает набрать критическую прочность [1].

В связи с этим актуальным становится решение вопросов направленных на повышение эффективности электродного прогрева в условиях пониженной влажности твердеющего бетона, что позволит повысить качество железобетонных конструкций и сократить энергетические затраты при производстве работ при отрицательных температурах наружного воздуха.

Одним из способов придания электропроводящих свойств и улучшения электродного прогрева бетона является введение в его состав токопроводящих частиц, например, углеродсодержащих материалов, шунгита и др. в таком количестве, чтобы преодолеть порог перколяции электрического тока и не нарушить структуру и свойства затвердевшего композита. В работе перколяцией

называется явление протекания или непротекания электричества через смесь проводящих и непроводящих частиц цементного композита.

Выполненный анализ исследования перколяции затвердевших цементных систем [2-8] свидетельствует о научной обоснованности выполнения последующих экспериментальных исследований этого явления при разработке шунгитосодержащих бетонов для электродного прогрева при зимнем бетонировании. Особое внимание, по-нашему мнению, следует уделить особенностям этого явления при различной влажности цементного камня и содержания тонкомолотого шунгита в составе смеси.

Целью работы является исследование влияния молотого шунгитового наполнителя на перколяцию электрического тока в среде цементного камня при различной влажности композита и определение его оптимального содержания.

Для выполнения экспериментальных исследований использовали следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н соответствующий ГОСТ 31108-2016;
- молотый шунгитовый наполнитель Зажогинского месторождения, производства ООО НПК «КАРБОН-ШУНГИТ», г. Петрозаводск, следующего химического состава: SiO_2 – 57,0 %; TiO_2 – 0,2 %; Al_2O_3 – 4,3 %; MgO – 1,2 %; CaO – 0,3 %; Na_2O – 0,2 %; K_2O – 1,5 %; S – 1,5 %; C – 28,0 %; H_2O крист. – 3,0 %.
- вода водопроводная питьевая, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Образцы цементного камня изготавливались из теста нормальной густоты по ГОСТ 310.3-76, влажность образцов определили по ГОСТ Р 58949-2020, электрическое сопротивление – согласно методике измерения сопротивления бетона электрическому току двумя электродами с помощью тераомметра Е6-13А. Исследовали 5 серий образцов с различным содержанием шунгита (0, 1, 3, 5, 10%). Регулирование влажности образцов осуществляли их термической обработкой в сушильном шкафу. Средняя плотность образцов определялась на образцах-кубах размером 2х2х2 см по ГОСТ 12730.1-2020, прочность при сжатии – на образцах-кубах размером 2х2х2 см по ГОСТ 310.4-81.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что зависимость электрического сопротивления цементного камня от содержания шунгита (1-10%) при всех значениях исследуемой влажности образцов (W_m) имеет вид экспоненты и описывается следующими уравнениями:

$$\text{при } W_m 0\%: R_0 = 32,819e-0,072x; R^2 = 0,8556$$

$$\text{при } W_m 3,4\%: R_{3,4} = 4,1862e-0,204x; R^2 = 0,8789$$

$$\text{при } W_m 5,5\%: R_{5,5} = 0,1694e-0,061x; R^2 = 0,8465$$

$$\text{при } W_m 6,1\%: R_{6,1} = 0,0341e-0,134x; R^2 = 0,9349$$

Для определения оптимального содержания шунгита с точки зрения эффективности снижения величины электрического сопротивления на основе полученных экспериментальных данных определены разности относительной величины снижения электрического сопротивления от содержания шунгита при различной влажности при сравнении с каждым предыдущим составом. Установлено, что вклад объемного содержания шунгита в снижение величины электрического сопротивления не носит линейного характера и сокращается по мере его увеличения. Так, при влажности ЦК 0 %, введение 1 % шунгита приво-

дит к снижению относительной величины электрического сопротивления на 17,4 % по сравнению с исходным немодифицированным составом. Дальнейшее увеличение содержания шунгита с шагом в 1 % (2–10 %) приводит также к снижению относительной величины электрического сопротивления, но в меньшей степени на 10,26%–0,11 % (по сравнению с каждым предыдущим составом). Аналогичная картина наблюдается при влажности ЦК 3,4; 5,5; 6,1 %.

Вместе с тем установлено, что для всех исследуемых значений влажности вклад увлечения содержания шунгита более 5% в снижение разности относительной величины снижения электрического сопротивления является незначительным, что определяет оптимальное содержание шунгита в количестве до 5% от массы ПЦ с позиции оптимального соотношения перколяции электрического тока и содержания шунгита.

По результатам физико-механических испытаний установлено, что введение шунгита в количестве 1-5 % приводит к повышению средней плотности затвердевших композитов (на 0,5–2,3 %), прочности (на 3,14–8,26 %), что, по нашему мнению, обусловлено гидравлической активностью молотого шунгита и вызывает интерес для дальнейших исследований, а также перколяцией портландцемента, модифицированного шунгитом. Градационное увеличение содержания шунгита более 5 % приводит к постепенному снижению прочности.

Таким образом, для всех исследуемых показателей влажности (0; 3,4; 5,5; 6,1) оптимальное значение содержания шунгита с точки зрения снижения величины электрического сопротивления и обеспечения средней плотности и прочности составляет от 3 до 5%, дальнейшее увеличение его количества не приводит к значительному снижению величины электрического сопротивления, и предположительно не приведет к существенному повышению эффективности электродного прогрева и физико-механических свойств бетона.

Библиографический список:

1. Богатырева, Т.В. Научное обоснование энергосберегающей технологии зимнего бетонирования буронабивных свай / Т.В. Богатырева, Р.С. Марьясов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 3. С. 38–51.
2. Ивахникова, А.С. Электродный прогрев бетона / А.С. Ивахникова // World science: problems and innovations: сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции. Пенза, 2019. С. 68–70.
3. Xie, P. Electrically conductive concrete and its application in deicing / P. Xie, J.J. Beaudoin // Proc. 2nd CANMET/ACI International Symposium. Las Vegas, USA. 1995. С. 399–418.
4. Yoo, D.-Y. Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers / D.-Y. Yoo, I. You, S.-J. Lee // Sensors. 2017. Vol. 17, № 5. С. 1064.
5. Xie, P. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres / P. Xie, P. Gu, J.J. Beaudoin // J. Mater. Sci. 1996. Vol. 31, № 15. С. 4093–4097.
6. Денисюк, И.Ю. Электропроводящая композиция бетона / И.Ю. Денисюк, М.В. Успенская, М.И. Фокина, К.Ю. Логушкова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Vol. 18, № 1. С. 158–162.

7. Зарипова, И.И. Расчет состава строительных композиционных материалов с применением теории перколяции / И.И. Зарипова, Е.А. Вознесенский // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2016. Vol. 24. С. 89–92.
8. Микитаев, А.К. Описание степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки в рамках перколяционных моделей / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов // Физика твердого тела. 2015. Vol. 57, № 5. С. 961–964.

ПРИМЕНЕНИЕ ДОМЕННОГО ШЛАКА И ЗОЛЫ-УНОСА В ГЕОПОЛИМЕРНЫХ БЕТОНАХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА СООРУЖЕНИЙ ВО ВЬЕТНАМЕ

Танг Ван Лам¹, канд. техн. наук

Ву Ким Зиен², аспирант

Булгаков Б.И², канд. техн. наук, доцент

Баженова С.И², канд. техн. наук, доцент

¹Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой (Вьетнам)

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Бесцементные вяжущие и бетоны на их основе были известны еще в середине прошлого столетия, но большинство из них не получило широкого распространения для строительных работ во Вьетнаме. В статье рассмотрены проблемы производства геополимерных бетонов - современных строительных материалов, повышающих экологичность производства изделий и конструкций в результате использования многотоннажных промышленных отходов в виде топливной золы-уноса и доменного шлака, а также поиска путей снижения затрат на производство.

Ключевые слова: многотоннажные промышленные отходы, зола-уноса, доменный шлак, геополимерный бетон, строительные материалы.

В связи с расширением строительства в развивающихся странах с каждым днем возрастает потребность в строительных материалах, поэтому является актуальным стремление использовать для их производства различные вторичные ресурсы и в первую очередь, многотоннажные промышленные отходы.

Тонкодисперсные активные минеральные компоненты, содержащиеся в подобных отходах, позволяют снизить расход цемента или полностью заменить портландцемент, а также уплотнить структуру бетона за счет уменьшения его пористости и связывания свободного гидроксида кальция в менее растворимые соединения и в результате этого улучшить эксплуатационные свойства бетона и, кроме того, избежать расслоения бетонной смеси при использовании суперпластификаторов [1, 2].

В последние годы, только на территории Российской Федерации производится более 68 млн. тонн цемента и 30 млрд. м³ бетонных изделий в год. Обыкновенный портландцемент, чье производство оказывает тяжелое воздействие на окружающую среду, является основным ингредиентом бетона. Производство цемента формирует примерно 7% мирового выброса парниковых газов в атмосферу [3].

В то же время, многие промышленные отходы обладают пуццоланической и даже гидравлической активностью, что делает их близкими по свойствам к цементам, но в основном во многих странах мира они выбрасываются на свалки. Поэтому использование побочных продуктов промышленности для получения геополимерных бетонов (ГПБ) будет способствовать не только сохранению природных ресурсов, но решению проблемы утилизации промышленных отходов и, тем самым, охране окружающей среды.

В настоящее время проблема утилизации отходов энергетической отрасли остается нерешенной, например, использование низкокальциевых зол-уноса не превышает 12% от объема их выбросов [4]. С начала XX века производство образующихся шлаков вместе с развитием металлургической промышленности неизменно увеличивалось. По данным ассоциации EUROSLAG [5] в Европе в 2018 году доменного шлака образовалось 25,2 млн. т. и почти столько же в 2019 году [6].

В настоящее время во Вьетнаме большая часть доменного шлака (ДШ). Согласно [3, 4, 6] во Вьетнаме количество образующегося доменного шлака составляет около 750 тыс. т. в год и в настоящее время большая его часть используется для производства цемента или в качестве добавки в бетонные и растворные смеси. Еще одна возможность использования доменного шлака - строительство дорог с его применением, что будет способствовать защите окружающей среды от загрязнения.

Другим и более серьезным источником нарушения экологического равновесия на значительной территории во Вьетнаме служат отходы теплоэлектростанций (ТЭС). Их существенную часть составляют золы - уноса (ЗУ) с годовым объемом более 880 тыс. т. [7]. При этом, в отличие от ЗРШ топливные золы для удобрения сельскохозяйственных полей не используются из-за их большой токсичности, что делает поиск путей решения проблемы их рациональной утилизации более актуальным. Применение ДШ и ЗУ ТЭС в виде компонентов вяжущего в геополимерные бетонные и растворные смеси будет способствовать не только расширению сырьевой базы строительной индустрии во Вьетнаме и снижению себестоимости строительства, но и решению серьезной экологической проблемы. Ее практическая реализация возможна только при комплексном подходе к использованию этих крупнотоннажных отходов в такой перспективной сфере производства, как строительство, в том числе и а также гидротехнических сооружений прибрежной инфраструктуры [8, 9].

Сейчас многими учеными проводятся обширные исследования оценки целесообразности использования промышленных отходов для замены портландцемента, а также для использования отходов промышленности в качестве добавок, снижающих его расход. С этой целью одной из успешных попыток стало создание геополимербетонных, которые полностью исключают необходимость использования портландцемента для получения бетонных изделий. Вместе с тем, еще недостаточно исследованы общие закономерности воздействия вещественного и гранулометрического состава, дисперсности и поверхностного потенциала отдельных видов шлаков и щелочных затворителей на структурообразование и свойства теста и геополимерного камня [6, 8, 9].

Одними из важнейших составляющих геополимерных бетонов помимо щелочных компонентов являются наполнители и заполнители, содержащие аморфный кремнезем (SiO_2) и активный оксид алюминия (Al_2O_3). Это могут быть как природные материалы, например глина, так и техногенные отходы в виде топливной золы-уноса, золы рисовой шелухи, металлургического доменного шлака и др. В то же время, наиболее подходящими щелочными компонентами в качестве активирующего раствора для производства являются щелочи на основе натрия или калия. Для регулирования сроков схватывания бетонных

смесей как и при использовании цементов применяют природный двуводный гипс.

Целью настоящего исследования стало получение геополимерного бетона на бесцементном вяжущем с прочностью на сжатие порядка 60 МПа в возрасте 28 суток с использованием золы-уноса и доменного шлака в сочетании с активирующим щелочным раствором, состоящим из NaOH и Na₂SiO₃.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы. В работе были использованы следующие сырьевые компоненты.

1. Активные минеральные добавки

Использованные активные минеральные добавки (МДО) включали топливную золу-уноса и доменный шлак.

а. Зола-уноса

Низкокальциевая зола-уноса ТЭС «Вунг Анг» (Вьетнам) класса F, соответствовала требованиям ГОСТ 25818-2017 [10], её влажность составляла 1,15%, истинная плотность $\rho = 2,19$ г/см³, насыпная плотность - 0,955 г/см³. Химический состав использованной золы приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав золы-уноса ТЭС «Вунг Анг»

Содержание компонентов, % масс.									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Потери при прокаливании
52,33	30,65	7,61	0,29	0,18	0,15	0,61	1,78	0,34	6,06

б. Доменный шлак

Доменный шлак металлургического завода «Хоа Фат» (Вьетнам) с истинной плотностью $\rho = 2,67$ г/см³ и удельной поверхностью 3600 см²/г. Его химический состав приведен в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав доменного шлака завода «Хоа Фат»

Содержание компонентов, % масс.					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Потери при прокаливании
36,38	15,76	0,55	40,12	1,25	5,94

2. Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя (П) в исследовании был использован кварцевый песок I класса реки Ло (Вьетнам) с истинной плотностью 2,65 г/см³ и размером частиц от 0,14 мм до 5 мм, соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 [11].

3. Активирующий щелочной раствор

Активирующий щелочной раствор (АР) состоял из водных растворов гидроксида и силиката натрия с плотностью, соответственно, 1,45±0,01 г/см³ и 1,55±0,01 г/см³, в соотношении Na₂SiO₃/NaOH = 2,5 [2, 6, 8, 10]. Его процентный состав по массе: NaOH = 12%; Na₂SiO₃ = 30% и вода = 58%.

4. Суперпластификатор

Для снижения водопотребности бетонной смеси при изготовлении ГПБ использовали поликарбоксилатный суперпластификатор SR 5000F (SR5000)

производства фирмы «Silk Road» с плотностью 1,1 г/см³ при температуре 20 ± 5°С. Это суперпластификатор типа G и соответствует требованиям ASTM C494 [12].

Методы. Методология работы включала:

- для определения предварительного состава геополимерной бетонной смеси был использован метод абсолютных объемов;
- удобоукладываемость бетонной смеси определяли по её расплыву в мм с помощью усечённого миниконуса 100x70x60 мм по ASTM C1611-18 [13] и TCNV 3106:2007 [14];
- среднюю плотность бетонов определяли на образцах - кубах размером 100x100x100 мм согласно ГОСТ 12730.1-78 [15];
- прочность бетонов на сжатие определяли испытанием образцов-кубов размером 100x100x100 мм, а на растяжение при изгибе на образцах - призмах размером 100x100x400 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проектирование состава геополимерного бетона

Разрабатываемый геополимерный бетон должен обладать:

- прочностью на сжатие в 28-суточном возрасте порядка 60 МПа, достигаемой после тепловой обработки при температуре 80°С в течение 6 ч. в соответствии с требованиями национального стандарта Вьетнама TCVN 10306:2014 [17], согласно которому, высокопрочный бетон к указанному возрасту твердения должен обладать прочностью более 55 МПа.

Расчет состава геополимерной бетонной смеси производился по методу абсолютных объемов. Исходные соотношения сырьевых компонентов в бетонной смеси по массе, выбранные для проектирования состава геополимерного бетона в результате проведенных исследований и анализа научно-технической литературы [2, 6, 8], приведены в таблице 3.

Таблица 3. Соотношение сырьевых компонентов по массе в бетонной смеси

Соотношения	$\frac{П}{\text{МДО}^{(*)}}$	$\frac{ЗУ}{\text{ДШ}}$	$\frac{AP}{\text{МДО}}$	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$	$\frac{SR5000}{\text{МДО}}$	Объем вовлеченного воздуха
Значения	1,3	70/30	от 0,35 до 0,50	2,5	1%	3%

Примечание: ^(*)МДО = ЗУ + ДШ.

Для исследования были выбраны следующие соотношения $\frac{AP}{\text{МДО}}$, равные 0,35; 0,40; 0,45 и 0,50.

С помощью метода абсолютных объемов, а также последующей корректировки на основании полученных экспериментальных результатов, были рассчитаны составы бетонных смесей для получения бесцементных геополимерных бетонов с прочностью на сжатие порядка 60 МПа к 28 суткам после тепловой обработки при температуре 80°С в течение 6 ч. Составы исследованных бетонных смесей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Составы геополимерных бетонных смесей

Составы	АР МДО	МДО, кг.	Минеральные добавки		Активирующий раствор		П, кг.	SR5000, л.
			ЗУ, кг.	ДШ, кг.	NaOH, кг.	Na ₂ SiO ₃ , кг.		
ID-01	0,35	859	601	258	86	215	1117	8,7
ID-02	0,40	834	584	250	95	238	1084	8,3
ID-03	0,45	811	568	243	104	261	1054	8,1
ID-04	0,50	789	552	237	113	282	1026	7,9

2. Экспериментальные результаты определения удобоукладываемости и средней плотности бетонных смесей и геополимерных бетонов

Удобоукладываемость бесцементных бетонных смесей для получения геополимерных бетонов оценивали по расплыву конуса (РК) в мм. Испытания проводили с помощью усеченного миниконуса, изображенного на рисунке 1, путем измерения диаметра расплыва в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (рисунок 2).

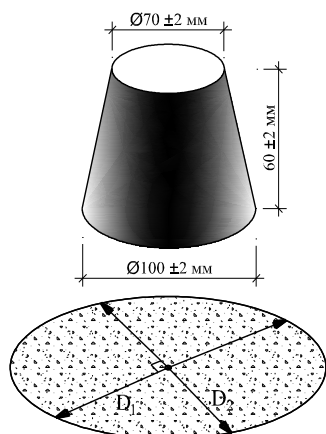


Рисунок 1. Усеченный миниконус для определения расплыва бетонной смеси

Рисунок 2. Определение удобоукладываемости геополимерных бетонных смесей по расплыву конуса

Экспериментальные результаты определения средней плотности геополимерных бетонных смесей и их удобоукладываемости сразу после замеса и спустя 30 мин. представлены в таблице 5.

Таблица 5. Средняя плотность и удобоукладываемость геополимерных бетонных смесей сразу после замеса и спустя 30 минут

Составы	Средняя плотность бетонных смесей, кг/м ³	Расплыв конуса, мм	
		Сразу после замеса	Через 30 мин. после замеса
ID-01	2283	190	165
ID-02	2259	200	170
ID-03	2238	210	185
ID-04	2218	220	190

Из полученных экспериментальных результатов определения подвижности бетонных смесей следует, что по этому показателю качества разработанные бе-

тонные смеси удовлетворяют требованиям стандартов TCVN 8218:2009 [18] (Строительство морских и прибрежных сооружений - Технические требования) и TCVN 9139:2012 [19] (Бетонные конструкции для морских сооружений - Технические требования).

В ходе проведенных экспериментов установлено, что полученные бетонные смеси однородны и не проявляют тенденции к расслоению и водоотделению.

Потери подвижности геополимерных бетонных смесей спустя 30 мин. после их получения приведены на рисунке 3.

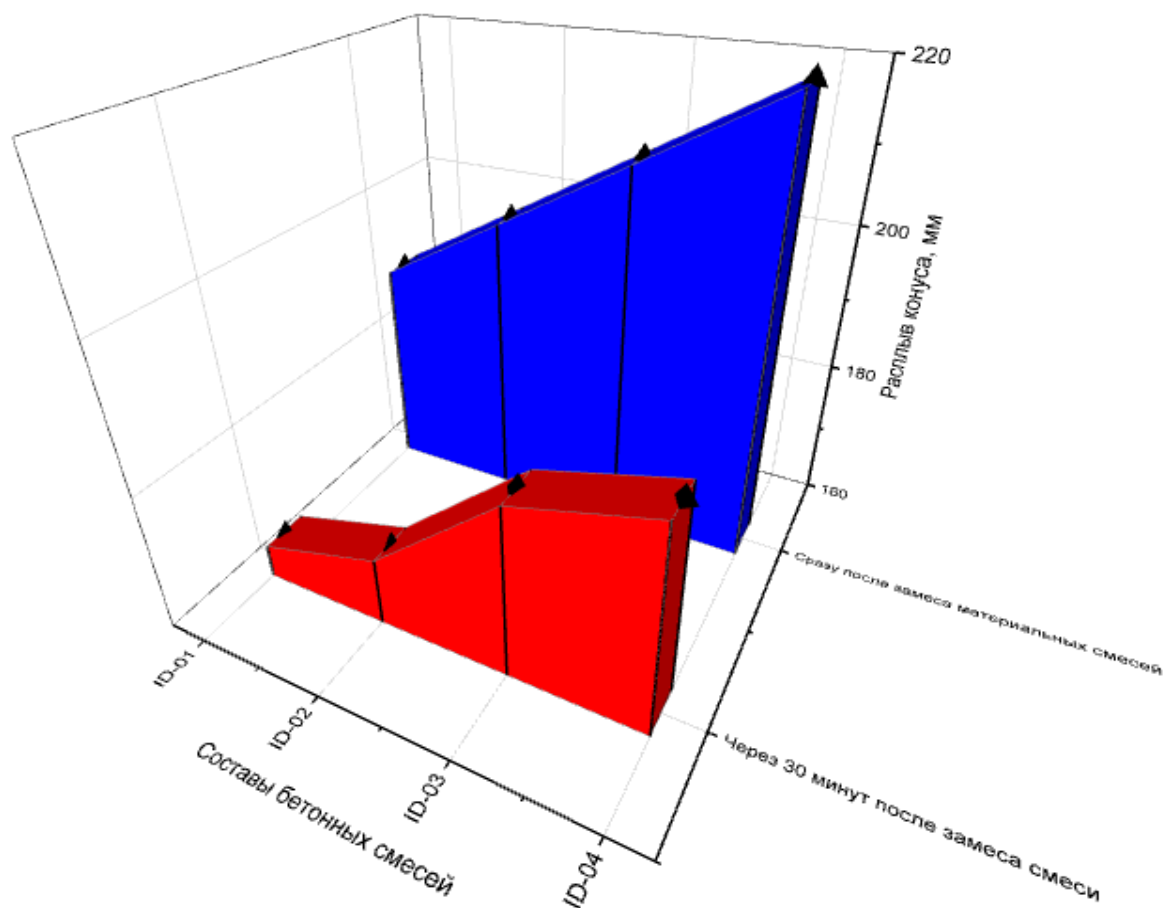


Рисунок 3. Потери подвижности геополимерных бетонных смесей спустя 30 мин. после получения

На рисунке 3 видно, что через 30 мин. после получения удобоукладываемость бетонных смесей снизилась не более, чем на 12-15%, что свидетельствует о хорошей сохраняемости их подвижности. Благодаря этому, разработанные геополимерные бетонные смеси можно транспортировать с помощью насоса и использовать для строительства монолитных многоэтажных зданий и сооружений.

3. Средняя плотность и прочность на сжатие и на растяжение при изгибе ГПБ-образцов в разном возрасте твердения

Результаты определения средней плотности и прочности разработанных ГПБ на сжатие и на растяжение при изгибе в разном возрасте твердения, предварительно подвергнутых тепловой обработке при температуре 80°C в течение 6 ч., приведены в таблице 6 и на рисунках 4 и 5 .

Из приведенных в таблице 6 и на рисунках 4 и 5 экспериментальных результатов видно, что прочность образцов ГПБ-бетонов как на сжатие, так и на растяжение при изгибе, зависит от соотношения $\frac{AP}{MDO}$. Причем, на фоне установленной общей тенденции снижения прочности с ростом указанного соотношения, наибольшие ее значения наблюдаются при величине этого соотношения, равной 0,40.

Таблица 6. Средняя плотность и прочность на сжатие и на растяжение при изгибе ГПБ-образцов в разном возрасте твердения после тепловой обработки при температуре 80°C в течение 6 часов

Составы	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на растяжение при изгибе, МПа				Прочность на сжатие, МПа			
		3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.	3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.
ID-01	2115	2,44	4,47	5,71	6,74	22,4	44,1	56,5	61,4
ID-02	2100	2,94	5,27	6,85	7,44	26,8	48,5	63,2	69,9
ID-03	2020	2,61	4,87	6,14	7,17	23,6	53,1	58,5	63,8
ID-04	2005	2,11	3,63	4,85	5,42	19,6	37,1	47,2	52,4

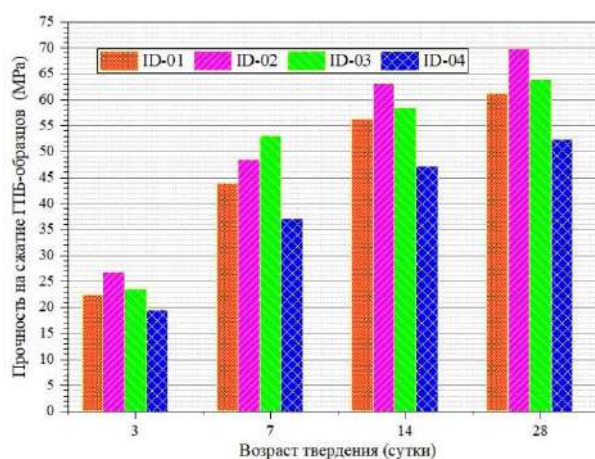
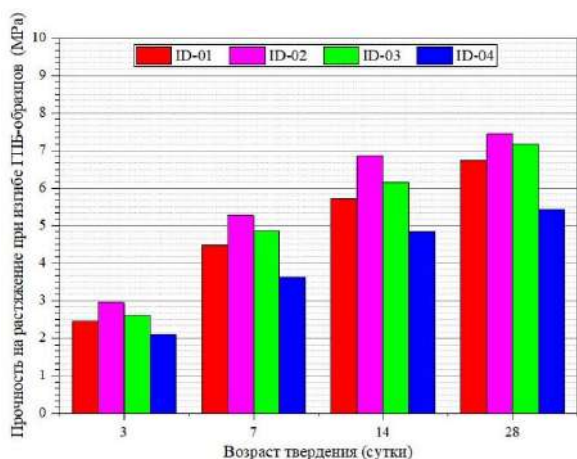


Рисунок 4. Зависимость прочности на растяжение при изгибе ГПБ-образцов от их состава и возраста после тепловой обработки при температуре 80°C в течение 6 часов

Рисунок 5. Зависимость прочности на сжатие ГПБ-образцов от их состава и возраста после тепловой обработки при температуре 80°C в течение 6 часов

Прочность разработанных бетонов на сжатие в возрасте 3 суток твердения, предварительно подвергнутых тепловой обработке в течение 6 ч. при температуре 80°C, составила 37-38% от их 28-суточной прочности, а к 7 суткам твердения – от 69% до 83% указанной прочности, что свидетельствует о их высоком темпе набора прочности в раннем возрасте. Полученные результаты можно объяснить активирующим действием щелочного раствора NaOH + Na₂SiO₃, который вступает во взаимодействие с алюминатными и силикатными составляющими использованных активных минеральных добавок с образованием быстро схватывающейся гелевой полимерной системы, обладающей вяжущими свойствами, особенно при термообработке ГПБ-образцов.

ВЫВОДЫ

1. Используя местные для Вьетнама сырьевые материалы, включая многотоннажные техногенные отходы в виде топливной золы-уноса и доменного шлака, что будет способствовать защите окружающей среды, а также активирующий щелочной раствор, содержащий NaOH и Na_2SiO_3 в соотношении 1:2,5, можно получить геополимерный бетон на бесцементном вяжущем, прочность которого на сжатие и на растяжение при изгибе после тепловой обработки в течение 6 часов при 80°C к 28 суткам достигает, соответственно 69,9 МПа и 7,44 МПа.

2. Высокий темп набора прочности на сжатие в раннем возрасте делает геополимерные бетоны перспективным строительным материалом. Кроме того, производство такого бетона будет способствовать охране окружающей среды за счёт экономии природных ресурсов и возможности использования многотоннажных техногенных отходов.

3. Из полученных экспериментальных результатов видно, что для получения геополимерного бетона, обладающего наибольшей прочностью на сжатие и на растяжение при изгибе, оптимальным является соотношение между активирующим щелочным раствором и активными минеральными добавками в составе бесцементного вяжущего, равное 1:2,5.

4. Необходимо продолжить исследования физико-механических свойств и эксплуатационных показателей разработанных геополимерных бетонов с целью определения наиболее рациональных областей их применения в условиях жаркого и влажного климата Вьетнама. Например, для строительства морских гидротехнических сооружений прибрежной инфраструктуры, поскольку протяженность побережья только материковой части Вьетнама, которое в настоящее время интенсивно осваивается, без учета многочисленных островов превышает 3200 км.

Благодарность. Публикуется при поддержке гранта научно-технической программы Министерства строительства Вьетнама, реализуемой с 2021 года в соответствии № 3813/QD-BGDĐT от 20/11/2020 с № B2021-MDA-11.

Библиографический список

1. Кожухова Н.И. Геополимерные вяжущие: природа. Перспективы применения/ Н.И. Кожухова// Сборник докладов III Международного семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих строительных смесей. Экспоцентр. 2012.С.81-86.
2. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 2. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.2
3. Thủ tướng Chính phủ. Đẩy mạnh xử lý, sử dụng tro, xỉ, thạch cao của các nhà máy nhiệt điện, nhà máy hóa chất, phân bón làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng và trong các công trình xây dựng, theo Chỉ thị số 08/TC-TTg, Thủ tướng Chính phủ ngày 26/03/2021.
4. Thủ tướng Chính phủ. Chiến lược phát triển Vật liệu xây dựng Việt Nam giai đoạn 2021-2030, định hướng đến năm 2050, theo Quyết định 1266/QĐ-TTg, Thủ tướng Chính phủ ngày 18/08/2020.

5. Статистика доменного шлака-2018. <https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2018/>
6. Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., 2021. Возможность использования золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи в геополимерных бетонах для строительства сооружений во Вьетнаме. BDU Journal of Science & Technology. Vol.03. №.01, 2021. Pp. 26-40.
7. Танг Ван Лам. Возможность использования золыных остатков для производства материалов строительного назначения во Вьетнаме/ Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №06. С. 06-12, https://doi.org/10.12737/article_5926a059214ca0.89600468.
8. Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiên Trung, Đinh Hoàng Quân, (2020). Ảnh hưởng của độ mịn xỉ lò cao đến cường độ bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa. Tạp chí KH&CN Thủy lợi, số 61, trang 16-23, 2020
9. Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiên Trung, Đinh Hoàng Quân, (2020). Kết quả ứng dụng bê tông CKD KHH sử dụng tro bay và xỉ lò cao tại công trình thử nghiệm. Tạp chí KH&CN Thủy lợi số 63, trang 73-83.
10. ГОСТ 25818-2017. Золо-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. - М.: Изд. Стандарты. 2017. 23 с.
11. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. - М.: Изд. Стандарты. 2014, 7 с.
12. ASTM C 494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, 2019, 21 p.
13. ASTM C1611-18. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM International. West Conshohocken. PA. 2018, 15 p.
14. TCVN 3106:2007. Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt. Hanoi, 2010, 10 p.
15. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. - М.: Изд. Стандарты. 2007, 5 с.
16. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. - М.: Изд. Стандарты. 2013, 35с.
17. TCVN 10306:2014. Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần mẫu hình trụ. Hanoi, 2014, 24 p.
18. TCVN 8218:2009. Bê tông thủy công – Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2009, 12 p.
19. TCVN 9139:2012. Công trình thủy lợi – Kết cấu bê tông, bê tông cốt thép vùng ven biển - Yêu cầu kỹ thuật. Hanoi, 2012, 15 p.

ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

С.Ю. Шеховцова¹, канд. техн. наук, доцент

А.О. Карпунина^{1,2}, аспирант, менеджер Отдела разработки и постановки на производство битумных материалов

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²ООО «ЛЛК-Интернешнл»

Аннотация. Информация о накоплении больших объемов пластикового мусора в океане начала поступать в информационные источники еще в начале 70-х годов XX века [1], что привлекло внимание научного общества к этой проблеме. В последнее время, когда накопился большой объем исследовательской информации об экологических последствиях пластикового мусора, данная тематика приобретает устойчивый научный интерес. В данной работе рассмотрено понятие микропластика и его роли для окружающей среды. Сформулировано определение микропластика. Рассмотрены способы утилизации пластиковых отходов.

Ключевые слова: экологическая проблема, пластиковые отходы, микропластик, переработка, утилизация.

Мировое производство пластика продолжает увеличиваться и уже достигло объема более 380 миллион тонн в год, и по-прежнему остается острой экологической проблемой процесс его переработки. Процентное распределение реализации пластиковых отходов выглядит следующим образом, рисунок 1.



Рис. 1. Соотношение способов реализации пластиковых отходов

Из представленной инфографики (рис. 1) видно, что только шестая часть от общего объема пластиковых отходов может быть переработана и заново реализована. Также стоит отметить, что 19%, что в численном выражении составляет 72,2 млн тонн пластиковых отходов ежегодно сбрасывается в различные водные источники, в том числе озера и реки, что представляет собой значительную угрозу для водной экосистемы и всего человечества в целом.

В соответствии с классическими представлениями, когда речь идет о пластиковых отходах, возникают ассоциации с пляжным мусором, плавающими обломками от различных изделий или большими залежами, неконтролируемо размещенные на свалках бытовых и промышленных отходов или произвольно на различных территориях, однако гораздо большей опасностью характеризуется микропластик. Термин «микропластик» или «microlitter» (перев. с англ. «микромусор») по-разному трактуется исследователями. Так, например, исследователи Anthony L. Andrady. (2003) [2] дали следующее определение «microlitter» – это едва видимые частицы полимеров, проходящие через сито 500 мкм, но задерживающиеся на сите с размерами ячеек 67 мкм, а частицы более крупного размера обозначались как «mesolitter» или «mesoplastic». Позже другими исследователями Fendall and (Sewell 2009, Betts 2008, Moore 2008) [3...5], был уменьшен размерный диапазон микрочастиц, ограничением нижнего предела до 333 мкм. Современное представление об определении микропластика исходит из международной номенклатуры единиц (СИ) и соответствует размерам от 1 мкм до 500 мкм (Masura et al., 2015, Hartmann et al., 2019) [6, 7]. Понятие «микропластик» не ограничивается видами полимера, ограничения есть в размерном диапазоне. Резюмируя вышесказанное, можно сформулировать его определение, в соответствии с которым микропластик является продуктом деструкции таких полимерных изделий или продуктом, образующимся в процессе их эксплуатации, часто от износа. Как правило, это высокодисперсные системы различной геометрической формы, способные свободно перемещаться в атмосфере, что пагубно отражается на жизнедеятельности человека.

Общеизвестно, что разложение пластика может достигать сотни и тысячи лет, однако частичное его разрушение, сопровождающееся отделением микрочастиц, может инициироваться практически сразу с начала момента его эксплуатации. Также источником формирования могут служить и другие источники, например, такие как косметика, текстиль, различные промышленные процессы и др. Полный цикл движения микропластика в окружающей среде пока достоверно не установлен [8]. Исследования в этой области продолжаются, но уже сейчас есть информация о том, что микропластик накапливается во всей окружающей среде, в том числе в городской и пригородной атмосфере [9], но все же большая часть его объема сосредоточена в водных и морских экосистемах. Опасность микропластика заключается в его доступности ввиду небольших размеров для широкого круга живых организмов, в том числе различного планктону потенциальным физическим и токсикологическим ущербом [10]. Американскими учеными обнаружено, что уже сегодня в крови человека находится 1000 частиц микропластика на 1 литр крови, что оказывает замедленное отравляющее действие на организм. Это их способность в совокупности с физико-химическими свойствами деструктурированного полимера определяет их опасность, существенно превышающую опасность от пластиковых отходов.

В настоящий момент разрабатывается множество способов извлечения микропластика из водных водоемов и возникает научно-практическая задача его утилизации. В научно-технической литературе отсутствуют научно обоснованные критерии, позволяющие полностью использовать потенциал микропластика, ведь сложность его реализации заключается в наличии различных видов

полимеров в микропластике, что затрудняет возможность его реализации. При разработке эффективного способа необходимо решить научную задачу, которая заключается в разработке технологии, обеспечивающей эффективное устойчивое сопряжение разнородных полимерных материалов с матрицей композита, обеспечивающее улучшение долговечности материала.

В рамках обозначенной проблемы необходимо решение последовательных задач: классификации микропластика, выявления механизмов его влияния на структурообразование композитов на термопластичной матрице (в данном исследовании предполагается в качестве такой матрицы использовать нефтяной битум, который может быть использован для изготовления битумно-минеральных материалов, например, мастик, асфальтобетонов, защитно-восстанавливающих материалов и др.), определения управляющих рецептурных и технологических факторов и диапазонов их варьирования, обеспечивающих получение эффективных и долговечных битумно-минеральных материалов, в частности, асфальтобетонов, а также оптимизацию режимов изготовления и составов.

Библиографический список:

1. Carpenter, E. J., Anderson, S. J., Harvey, G. R., Miklas, H. P., Peck, B. B. Polystyrene spherules in coastal waters / E. J. Carpenter // *Science*. 1972. Vol. 178 (4062). Pp. 749-750.
2. Anthony L. A. Microplastics in the marine environment / L. A. Anthony // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62. Issue 8. Pp. 1596-1605.
3. Fendall, L.S., Sewell, M.A. Contributing to marine pollution by washing your face. Microplastics in facial cleansers. / L.S. Fendall // *Marine Pollution Bulletin*. 2009. Vol.58. Issue 8. Pp. 1225-1228.
4. Betts, K. Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans / K. Betts // *Environ. Sci. Technol.* 2008. Vol. 42. 8995 pp.
5. Moore, C.J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat /C.J. Moore // *Environ. Res.* 2008. Vol. 108. Issue 2. Pp.131-139.
6. Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments / J. Masura. – NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48, 2015. 39 pp.
7. Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daaugard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L., Wagner, M. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris / N.B. Hartmann // *Environ. Sci. Technol.* 2019. Vol. 53. Pp. 1039-1047.
8. Grossman, E. How Plastics from Your Clothes Can End up in Your Fish / E. Grossman // *Time*. 2015. <https://time.com/3669084/plastics-pollution-fish>.
9. Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives // Y. Zhang // *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 203. 103118.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ГОМОГЕНИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННОГО
ВЯЖУЩЕГО НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО
КАМНЯ

О. А. Ларсен¹, к.т.н., доцент

А. М. Бахрах¹, аспирант

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация В работе исследовалось влияние технологических параметров получения композиционного вяжущего на электротехнические свойства токопроводящего композитного материала на его основе. цель работы - определение влияния времени совместного помола в шаровой мельнице портландцемента, токопроводящей добавки и высокоэффективного суперпластификатора на удельное электрическое сопротивление токопроводящего искусственного камня на основе полученного композиционного цементного вяжущего. В работе применялся портландцемент ПЦ 500 Д0, поликарбоксилатный суперпластификатор и строительная сажа (технический углерод П-803). В результате работы получены графики зависимостей электротехнических свойств токопроводящего цементного камня в зависимости от времени помола композиционного вяжущего. Сделан вывод об отсутствии прямой пропорциональной зависимости удельной электрической проводимости от времени совместного помола компонентов токопроводящего композитного вяжущего.

Ключевые слова: бетон, токопроводящий бетон, суперпластификатор, гомогенизация, технологичность.

Введение

Токопроводящие бетоны могут использоваться во многих отраслях промышленности. Матрица токопроводящих композитов может быть различной: полимерной [1], керамической [2], цементной [3]. Важнейшим функциональным свойством токопроводящих бетонов – их способность к резистивному нагреву при подключении к электричеству [4]. Характеристика, определяющая способность к разогреву - удельное электрическое сопротивление материала. Композитные резистивные нагреватели на полимерной основе могут решить проблему локального нагревания [5], нагреватели из бетэла могут быть использованы для объемного обогрева как внутренних помещений, [6] так и уличных покрытий (дорог, тротуаров) [7]. Современным направлением [8] исследований в области получения токопроводящих композитов на основе цементных матриц – улучшение реологических свойств токопроводящих бетонных смесей для улучшения электротехнических и эксплуатационных свойств изделий. Данная статья подготовлена в рамках цикла исследований автора, посвященных улучшению реологических свойств бетэловых смесей.

В основу получения бетэла положен принцип создания цементной матрицы с равномерно распределенной в ней токопроводящей добавки в объеме для

получения непрерывных цепей проводящего компонента. Основные различия свойств обусловлены различными видами токопроводящего компонента, технологическими особенностями получения бетэловой смеси.

В работе [9] приводится исследование возможности получения электропроводного бетона за счет сочетания различных видов армирования: стальной арматурной сетки и стальной фибры. Указанное решение предполагает улучшение реологических свойств за счет замены сочетания стальной стружки и фибры. Применение металлических компонентов получило наибольшее распространение в зарубежной практике.

В практике СССР и России как правило для повышения электропроводности бетона применяются добавки на основе углерода, полученные путем сжигания органических материалов. В методических рекомендациях [10, 11], разработанных в 80-х годах прошлого века в качестве токопроводящей добавки рекомендовано применение коксового угля и коксовой мелочи различных фракций. Данное решение существенно снижает механические характеристики бетона ввиду низкой прочности и относительно больших размеров токопроводящих частиц (кокс выполняет роль заполнителя).

В работе [8] показана возможность получения композиционного вяжущего с повышенной электрической проводимостью на основе портландцемента, технического углерода марки П-803 и суперпластификатора С-3. При этом основной задачей было повышение технологичности бетэла и получение бетэловой смеси пластического формования.

Широко бетэлы не применяются, что может быть вызвано их низкой технологичностью и сложностью работы с ними: получаемые смеси обладают крайне низкой подвижностью и как правило являются жесткими так как токопроводящий компонент обладает очень высокой водопотребностью. Указанное предопределяет необходимость работы в области повышения технологичности бетэловых смесей.

В качестве вяжущего в работе применялся бездобавочный портландцемент ПЦ 500 Д0 производства ООО «Холсим (РУС) СМ», в соответствии с ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия». В качестве токопроводящей добавки использовался технический углерод марки П-803 согласно ГОСТ 7885-86 «Углерод технический для производства резины. Технические условия». В работе был использован поликарбоксилатный суперпластификатор BASF Melflux 5581F. Для затворения была использована вода согласно ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

В работе влияние времени помола в шаровой мельнице на удельное электрическое сопротивление смеси оценивались на цементном тесте, состав которого был принят в соответствии с [8]. Максимальная дозировка пластифицирующей добавки подбиралась исходя из обеспечения самовыравнивания смеси, до достижения ровной поверхности. Составы исследуемых образцов и время гомогенизации приведен в таблице 1.

Перед затворением смесь сухих компонентов подвергалась перемешиванию в шаровой мельнице в течении 15, 30,45 и 60 минут. Образцы твердели в камере нормального твердения в нормальных условиях. Удельное электриче-

ское сопротивление образцов измерялась с помощью омметра DT 9502A подключаемого к образцу (рисунок 1).

Таблица 1. Составы образцов

№ образца	Цемент, % по массе	Тонкодисперсный углерод (сажа), % по массе	Пластификатор, % по массе	Вода, % по массе	Время гомогенизации, мин.
1	28,3	42,5	1,3	28,3	0 (ручное перемешивание)
2	28,3	42,5	1,3	28,3	15
3	28,3	42,5	1,3	28,3	30
4	28,3	42,5	1,3	28,3	45
5	28,3	42,5	1,3	28,3	60
6 (контрольный образец)	71,5	0	0	28,5	0



Рис. 1. Измерение сопротивления образца

После схватывания цементного теста и приобретения образцами достаточной для исключения их разрушения механической прочности были проведены соответствующие измерения. Измерения проводились согласно представленной методике. На рис. 1 представлены результаты измерения в возрасте от 6 до 18 суток нормального твердения. Исследования в более ранние сроки показали для такого состава и вида образца высокую вероятность разрушения образца ввиду особого расположения контактных пластин при проведении измерений на начальном этапе твердения. Также нецелесообразно измерение в ранние сроки ввиду присутствия в цементном камне ионов растворенных клинкерных минералов. Вопрос выбора вида образцов для измерения электротехнических показателей требует дополнительных исследований в области токопроводящих бетонов.

На рис. 2 приведено сравнение значений удельного электрического сопротивления для образцов 1-6. Результаты измерений на 18 суток твердения говорят о повышении удельного электрического сопротивления ввиду перехода воды в связанное состояние, вместе с тем, значение удельного электрического сопротивления для образца № 2 составило 70,2 Ом*м, для образца № 4 -77,7 Ом*м, для образца № 3 – 187,8 Ом*м. Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии прямой пропорциональной зависимости между временем гомогенизации и величиной удельного электрического сопротивления.

На рис. 3 представлена зависимость удельного электрического сопротивления для образца № 3 и № 6 от времени твердения. Полученные результаты демонстрируют эффективность применения композиционного вяжущего для снижения удельного электрического сопротивления бетона.

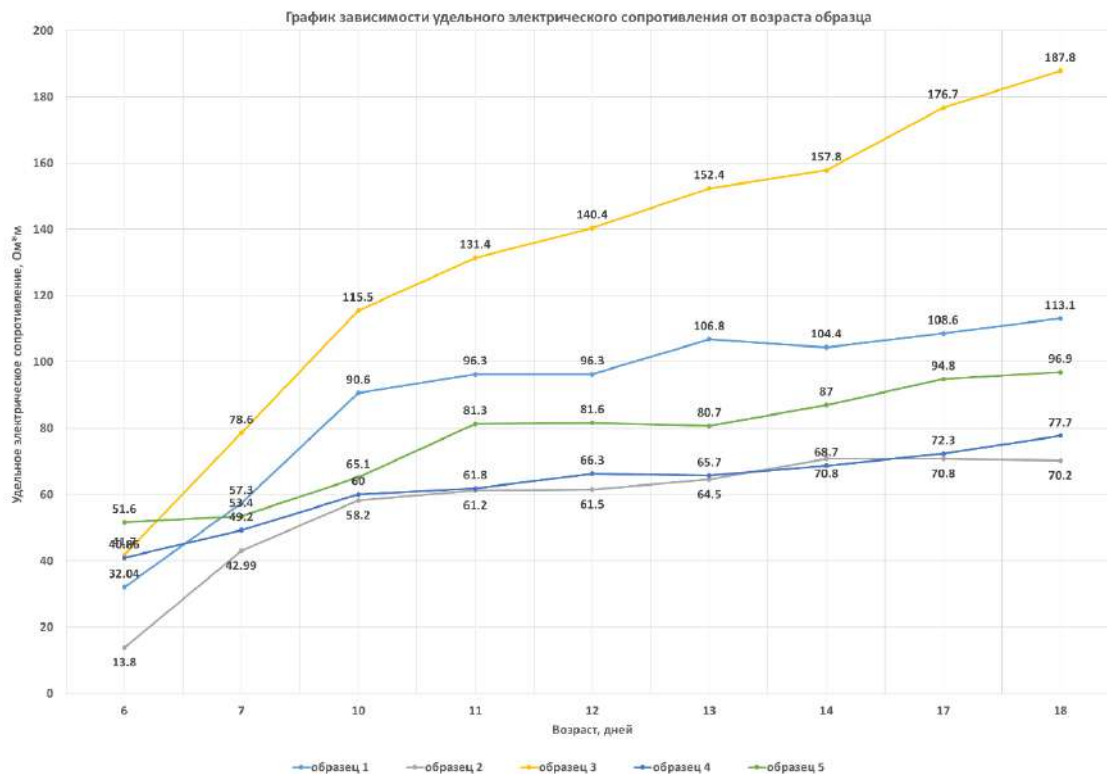


Рис. 2. Значения удельного электрического сопротивления образцов №1-6

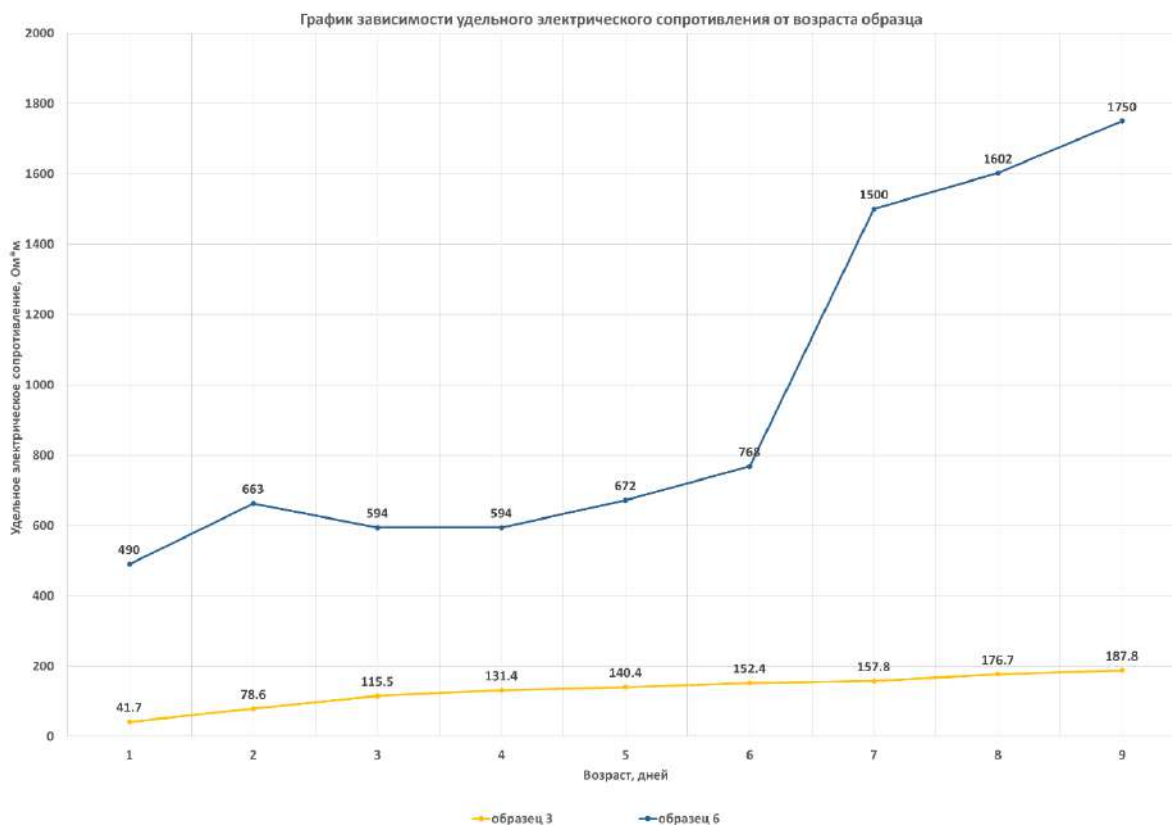


Рис. 3. Сравнение величины удельного электрического сопротивления для об-

По итогам анализа полученных результатов сделаны выводы о возможности использования супепластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов для повышения пластичности токопроводящих бетонных смесей с добавлением тонкодисперсного углерода (сажи). В работе показано значительное понижение удельного электрического сопротивления при повышении подвижности смеси за счет увеличения дозировки суперпластифицирующей добавки. Отмечено отсутствие прямой пропорциональной зависимости между временем гомогенизации и величиной удельного электрического сопротивления. Так, минимальное время перемешивания в шаровой мельнице показало наилучший результат в плане снижения удельного электрического сопротивления. Перемешивание в течение 30 минут показало наибольшее электрическое сопротивление среди образцов на основе электрокомпозиционного вяжущего. При перемешивании в течение 60 минут величина удельного электрического сопротивления составила 96,9 Ом·м. Полученные результаты указывают на необходимость изучения взаимодействия пластификатора в процессе перемешивания в шаровой мельнице, влияния пластификатора на цепочки токопроводящего компонента в цементной матрице.

Библиографический список:

1. Марков А.В., Чижов А.С. Электропроводящие саморегулирующиеся материалы на основе полиэтиленовых композиций с СВМПЭтехническим углеродом / Тонкие химические технологии / 2019. № 14(2). С. 60-69. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-2-60-69
2. Шутилов Р.А., Мызь А.Л., Кузнецов В.Л., Карагедов Г.Р. Токопроводящие керамические композиты на основе Al₂O₃, модифицированные многослойными углеродными нанотрубками. Перспективные материалы, 2016, № 8, с. 64 - 73.
3. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник для студентов высших учебных заведений / Ю.М. Баженов. - М.: Издательство АСВ, 2011. – 375с.
4. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Саморегулируемый электронагреватель на основе эластомера, модифицированный многослойными углеродными нанотрубками // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 341–345.
5. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Влияние различных типов углеродных нанотрубок и их концентраций на электрофизические параметры электронагревателей с саморегулированием температуры // Вестник ТГТУ. 2019. Т. 25. № 4. С. 678–689.
6. Маевский, Е.К. Перспективы использования электроотопления жилых и общественных зданий /Е.К. Маевский, Б.И. Долгинов. // Возможности использования электропроводного бетона (бетэла) в гражданском строительстве — Новосибирск, 1971. — С.40-47.
7. De-icing Concrete: the world's first bridge to incorporate conductive concrete [Электрон-ный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <https://fcsconcreterepairs.com.au/de-icing-concrete-worlds-first-bridge-incorporate-conductive-concrete/>, свободный.
8. Пулатов А.А., Бетон электропроводный пластического формования на электрокомпозиционном вяжущем. / А.А. Пулатов. — Москва: МГСУ, 1995. — 150с.

9. Investigation on conductive concrete [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <https://studylib.net/doc/17602999/summary--electrically-conductive-concrete-is-usually-prod>, свободный.
10. Рекомендации по приготовлению электропроводящего раствора: утв. Госстрой СССР Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона (НИИЖБ) 10.01.1983-Москва.1983.-9с.
11. Рекомендации по приготовлению электропроводящего бетона: утв. Госстрой СССР Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона (НИИЖБ) 04.05.1983-Москва.1983.-11с.

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА БЕТОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

О.А. Ларсен¹, канд. техн. наук, доцент

А.А. Солодов¹, аспирант

С.В. Самченко¹, д-р техн. наук, профессор

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Одной из основных задач при производстве монолитных бетонных и железобетонных конструкций является контроль качества бетонной поверхности. В большинстве случаев бетон обладает низкими эстетическими качествами, вызванными недостаточно ровной поверхностью с дефектами, представляющими собой трещины, изменение цвета, поры и т.д. Поэтому получение поверхности высокого качества с эстетическими свойствами является актуальной задачей. В современном строительстве наблюдается тенденция сдачи жилья с чистовой отделкой или с готовым ремонтом. Чтобы снизить издержки и повысить темпы строительства застройщику необходимо получать железобетонные изделия с поверхностью под чистовую отделку А3 и выше. Улучшение качества изготовления конструкций и панелей позволит отказаться от ручного труда шлифовщиков, а также избежать раковин и возможных открытых участков арматуры, что избавит от необходимости их замазывать ремонтными составами. В статье приводятся требования к качеству лицевой поверхности бетонной конструкции и методы ее определения.

Ключевые слова: бетон, поверхность, опалубка, изделие, строительство.

При производстве железобетонных изделий, количество факторов, влияющих на качество их поверхности, велико. В нашей стране требования к качеству поверхности и внешнему конструкциям регламентируются ГОСТ 13015-2003 «Изделия железобетонные и бетонные для строительства», в котором указаны необходимые требования к качеству поверхности для каждой конкретной области ее применения. В качестве категорий с высокими требованиями к поверхности можно выделить категории А3 и А2, которые позволяют использовать бетон без оштукатуривания, нанося на его поверхность сразу такие отделочные материалы, как краски, декоративные штукатурки, обои и т.д.

Получение поверхностей с малым количеством небольших пор и каверн является актуальной задачей не только при производстве железобетонных изделий, но и для монолитных конструкций. Некоторые условия будут одинаковы для каждого типа производства, а именно: высокое качество опалубки и её чистота, использование качественных смазочных материалов и бетонирование подвижной смесью.

Для обеспечения ровной поверхности изделий на предприятиях ЖБИ необходимым условием является соблюдение температурного режима и плавного подъёма температуры. Особенно нежелательно при формировании укладывать бетонную смесь в горячую форму. Для монолитных конструкций важное значение имеет уход за опалубкой и её качественный монтаж, плотное прилегание элементов друг к другу, исключающий потерю цементного молочка.

Важным фактором является состав бетонной смеси. Чем выше качество поверхности, тем более сложным будет состав. Так получение поверхности А1 возможно только с большим количеством тонкодисперсной части и с одновременным применением поликарбоксилатных суперпластификаторов для обеспечения наилучшей подвижности бетонной смеси и уменьшения количества вовлеченного воздуха в смесь. Получение изделий с категориями А2 и А3 возможно на подвижных бетонных смесях, но при этом необходимо уделять особое внимание гранулометрии заполнителей и содержание цементного теста.

По нашему мнению, одним из самых важных факторов, влияющих на однородность и шероховатость поверхности, является контроль укладки бетонной смеси, при которой необходимо контролировать заливку бетонной смеси в опалубку или форму, причем чем выше категория бетонной поверхности, тем сложнее технология укладки. Так, например, при бетонировании самоуплотняющимися бетонными смесями с поверхностью А1 и получения однородного цвета, необходимо пользоваться бетонолитными трубами и не допускать свободного падения бетонной смеси более, чем 0,15 м. Для менее подвижных бетонных смесей при их уплотнении не допускается их вибрация длительное время в опалубке, что приведет к их расслоению.

Получение качественной поверхности бетонных изделий тем сложнее, чем выше конструкция здания. При бетонировании горизонтальных изделий нижняя поверхность напрямую будет зависеть от опалубки, а верхняя от качества затирки. Вертикальные изделия более требовательны к технологии и требуют учесть большое количество факторов.

Для оценки качества лицевой поверхности бетонной конструкции могут применяться методы по определению твердости поверхности, ее стойкости к истиранию, применяются методы определения объема пор, водо-и воздухопроницаемости, сорбционной способности, глубины карбонизации, морозостойкости, а также производится визуальная оценка с подсчетом отверстий и пор и оценка изменения цвета.

В настоящее время не во всех зарубежных странах существуют стандарты для оценки качества бетонной поверхности. Однако в Германии в 2004 опубликован документ [1] для оценки качества архитектурного бетона, в котором определяются четыре основных класса от SB1 до SB4, предъявляющие разные требования к самой текстуре (Т1-Т3), пористости (Р1-Р4), равномерности цвета бетонной поверхности (FT1-FT3), ровности поверхности (Е1-Е3), качеству лицевой поверхности опалубки (SHK1-SHK3), качеству соединительных элементов опалубки (AF1-AF4). В таблице 1 приведены классы бетона по классификации [1].

В зарубежной практике [2] способ оценки цвета поверхности бетона, являющийся иногда не совсем точным, заключается в простом визуальном сравнении поверхности по серой шкале, которая варьируется от очень светло-серого (уровень 1) до темно-серого (уровень 7). Однако компании GTM-Construction и LMDC разработали новый способ, который позволяет объективно оценивать уровни серого цвета поверхности бетона и точно измерять площадь, покрытую поверхностными пузырьками. Инновационный метод состоит из этапа сбора

данных с последующей коррекцией изображения и этапа оценки структуры и плотности пузырьков.

Таблица 1. Классы бетона [1]

Классы архитектурного бетона		Примеры
Бетон с незначительными требованиями	SB1	Стены подвала, помещения промышленного назначения
Бетон с нормальными требованиями	SB2	Лестницы, несущие стены
Бетон с высокими требованиями	SB3	Фасады
Бетон с особо высокими требованиями	SB4	Отдельные элементы конструкции

Основным фактором в определении цвета бетона является исходный цвет цемента, водоцементное отношение, а также степень и скорость гидратации ферритовой фазы в цементе [3]. Установлено, что однородность вяжущего в результате использования суперпластификаторов и абсорбционные свойства опалубки оказывают существенное влияние на однородность цвета [4].

На основе приведенных данных, можно сделать вывод о необходимости дальнейшей работы по обеспечению равномерности цвета верхней поверхности, улучшению внешнего вида бетонных изделий, проведению исследований о влиянии реологических свойств бетонных смесей, их состава, температурного режима обработки, вида разделительного средства при укладке в опалубку, которые позволят получать изделия заданного качества.

Библиографический список:

1. Pereira, C., Hamadyk, E., Silva, A. Probabilistic analysis of the durability of architectural concrete surfaces // *Applied Mathematical Modelling*. 2020. № 77. С. 199-215.
2. Lemaire G., Escadeillas G., Ringot E., Evaluating concrete surfaces using an image analysis process // *Construction and Building Materials*. 2005. № 19. С. 604-611.
3. Bader, T., Lackner, R. Acrylic surface treatment applied to architectural High-Performance Concrete: Identification of potential pitfalls on the way to long-lasting protection // *Construction and Building Materials*. 2020. № 237. С. 117415.
4. Belmonte, I., Saorin, F., Paya, M. Quality of the surface finish of self-compacting concrete // *Journal of Building Engineering*. 2020. № 28. С. 101068.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ ТУФА-СКОРИЯ

Бекеле Арега Демисси, аспирант

А.Д. Жуков, канд. техн. наук, доцент

А.А. Медведев, канд. техн. наук, доцент

Д.А. Колесова, студентка бакалавриата

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Использование местного сырья в качестве активного компонента минеральных вяжущих, растворов и бетонов на их основе позволяет снижать расход энергоемкого портландцемента и получать изделия широкой номенклатуры. Целью исследований является изучение возможности применения туфа-скория и золы от сжигания кофейной шелухи в качестве компонента комбинированного вяжущего и легкого бетона на основе этого вяжущего. Туф-скория, является продуктом вулканических извержений, и веками используется в качестве строительного материала: стенового и для отсыпки дорог. Исследования же по его комплексному применению проводятся впервые. Определения элементного состава образцов туфа-скория проводили рентгенофлуоресцентным методом анализа с помощью спектрометра элементного состава вещества «РЕСПЕКТ». Основы методики подбора состава формировались в рамках общей методологии эксперимента разработанной НИУ МГСУ. Основой методологии является проведение эксперимента в три этапа с аналитической оценкой и оптимизацией результатов. Состав туфа-скория по оксидам: Na_2O - 1,137; MgO - 2,973; Al_2O_3 - 16,682; SiO_2 - 48,534; CaO - 11,394; TiO_2 - 2,026; Fe_2O_3 - 15,138. Установлено, что оптимальные значения расхода туфа-скория находятся в интервале от 116 до 140 кг/м^3 и зависят от расхода золы кофейной шелухи. Результаты подтверждают возможность получения комплексного вяжущего на основе туфа-скория, а интерпретация статистической модели делает возможной разработку методики подбора состава комплексного вяжущего и строительных материалов на его основе.

Ключевые слова: туф-скория, кофейная шелуха, зола, комбинированное вяжущее, планирование эксперимента, пуццолановая активность

Использование местного сырья в качестве активного компонента минеральных вяжущих, растворов и бетонов на их основе позволяет снижать расход энергоемкого портландцемента и получать изделия широкой номенклатуры. Туф-скория, является продуктом вулканических извержений, и веками используется в качестве строительного материала: стенового и для отсыпки дорог. В XX веке началось изучение возможности использования туфа-скория в качестве заполнителя в производстве бетона.

Согласно [1], туф-скория, в качестве крупного заполнителя, применим при производстве легкого бетона. Туф-скория также используется в качестве легкого заполнителя с минеральной примесью кремнезема и летучей золы при производстве легкого конструкционного бетона. Повышение механической прочности раствора наблюдалось также при использовании вулканической туфа-скория в качестве мелкого заполнителя при производстве портландцементного раствора [1, 2].

Вулканические материалы используются в производстве смешанного цемента благодаря их доступности и свойствам, в том числе и для производства экологически чистого бетона [3]. Использование туф-скория в качестве замены цемента было исследовано при производстве самоуплотняющегося бетона, который оказался экономичен и экологичен при требуемых прочностных свойствах бетона. Использование туф-скория в производстве бетона в качестве замены цемента позволило повысить долговечность бетона, его устойчивость к проникновению хлоридов и коррозионную стойкость [4].

Существуют предпосылки считать, что туф-скория, как минеральная добавка в портландцемент, эффективна в улучшении свойств цементного теста, особенно в условиях щелочно-кремнеземной реакции. Пуццолановая активность туфа-скория требует подтверждения. Тем не менее, материалы аналогичного происхождения и состава (из вулканических регионов Камеруна: Пенджа, Томбель и Фумбот) имеют доказанную пуццолановую активность [5].

Целью исследований является изучение возможности применения туфа-скория и золы от сжигания кофейной шелухи в качестве компонента комбинированного вяжущего и легкого бетона на основе этого вяжущего. Для реализации цели решались следующие частные задачи. Был изучен зарубежный опыт применения туфа-скория (и его аналогов вулканического происхождения) как компонента минеральных вяжущих и бетонов. Осуществлена оценка состава туфа-скория Эфиопии. По результатам эксперимента разработка принципиальных основ методики подбора и оптимизации состава композиционного вяжущего на основе портландцемента, тонкомолотого туфа-скория и золы.

Определения элементного состава образцов туфа-скория проводили рентгено-флюоресцентным методом анализа (РФА). Метод основан на возбуждении атомов элементов, содержащихся в анализируемом образце, и измерении интенсивности возникающего характеристического рентгеновского излучения возбужденных атомов с помощью спектрометрической аппаратуры.

Эксперимент проводился с помощью спектрометра элементного состава вещества «РеСПЕКТ» в лаборатории физических методов анализа Российского государственного геологоразведочного университета (РГГРУ).

Основы методики подбора состава формировались в рамках общей методологии эксперимента разработанной НИУ МГСУ. Основой методологии является проведение эксперимента в три этапа с аналитической оценкой и оптимизацией результатов [1–3]. На первом этапе проводится комплексный анализ объекта исследований. На втором этапе осуществляется эксперимент (активный, пассивный или комбинированный), в котором задействованы все установленные варьируемые факторы. Факторы в эксперименте (X_1, X_2, \dots, X_j) используют в кодированном виде, то есть приведенными к интервалу $[-1, +1]$.

На третьем этапе проводят серии опытов, план которых построен на основе матрицы полного квадратичного 3...5 факторного эксперимента (по числу отобранных наиболее значимых факторов). Полученные уравнения регрессии проверяют по всем статистическим гипотезам и осуществляют проверку адекватности моделей по критерию Фишера. В результате статистических проверок в результате сравнения с доверительными интервалами (Δb_j) оставляют только

значимые факторы, а в результате проверки по критерию Фишера делают вывод об адекватности (или неадекватности) полученных моделей.

Аналитическая оценка заключается в анализе полученных уравнений и оценка влияния варьируемых факторов на результат, аналитическая оптимизация уравнений регрессии и инженерная интерпретация результатов.

Интерполяция результатов, осуществляется определением расчетным путем прочности и средней плотности материала в зависимости от значений варьируемых факторов и осуществляется путем реализации программ для ЭВМ. Такая программа включает блоки ввода данных (значений факторов в натуральном выражении), блок кодирования факторов, расчётный блок, блок вывода результатов на дисплей.

Оптимизация осуществляется аналитическим методом, который базируется на следующих положениях: полученные уравнения регрессии адекватно описывают изучаемый технологический процесс; каждое уравнение является алгебраической функцией нескольких переменных (по числу значимых варьируемых факторов) и для исследования этой функции применимы методы математического анализа.

В составе вяжущего использовался тонкомолотый туф-скория и зола от сжигания кофейной шелухи (рис. 1).

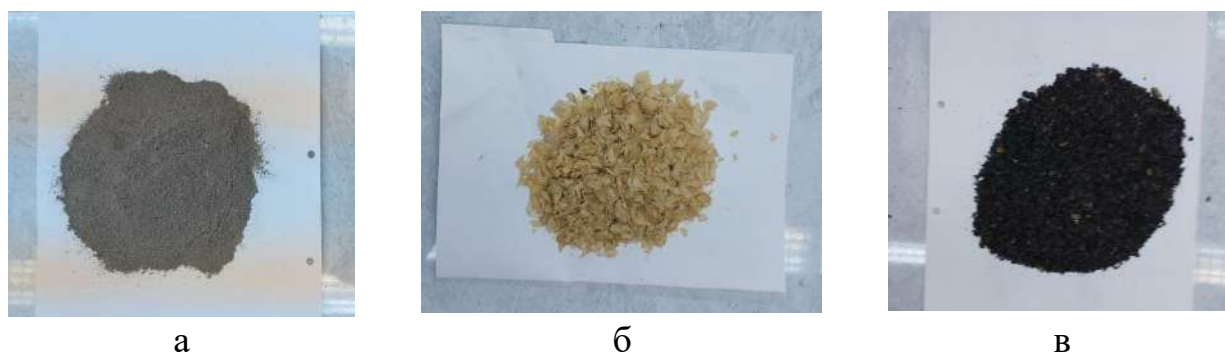


Рис. 1. Компоненты комплексного вяжущего: а – тонкомолотый туф-скория; б – кофейная шелуха; в – зола кофейной шелухи

Результаты РФА представлены на рис. 2. Состав туфа-скория по оксидам: Na_2O - 1,137; MgO - 2,973; Al_2O_3 - 16,682; SiO_2 - 48,534; CaO - 11,394; TiO_2 - 2,026; Fe_2O_3 - 15,138.

Условия эксперимента представлены в табл. 1. Расход портландцемента был принят постоянным и равным 600 кг/м^3 . Водотвердое отношение для теста нормальной густоты составляло 0,42–0,44. В качестве функции отклика и параметра оптимизации принята прочность при сжатии (Y_1).

Табл. 1. Условия проведения эксперимента

Наименование фактора	Символ X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход туфа-скория, кг/м^3	X_1	100	40	60	140
Расход золы кофейной шелухи, кг/м^3	X_2	40	20	20	60

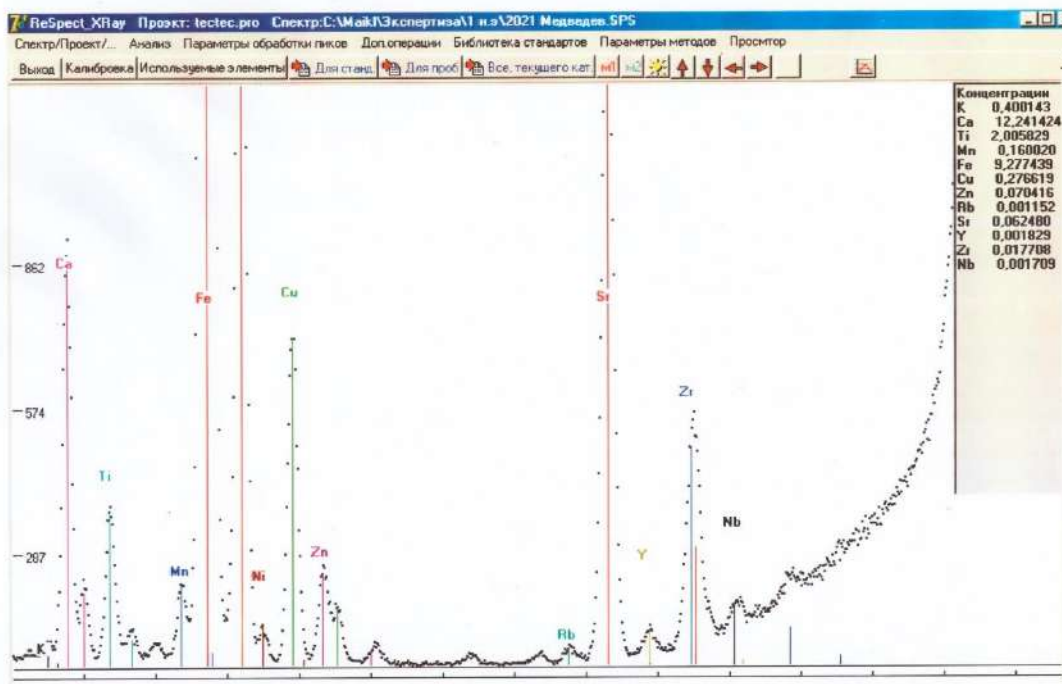


Рис. 2. Рентгено-флюоресцентный анализ (РФА) туфа-скория

Математическая обработка результатов эксперимента позволила получить уравнения регрессии для прочности при сжатии (Y_1). Значимость коэффициента проверялась по доверительным интервалам, соответственно доверительный интервал для прочности составил $\Delta b_1 = 0.8 \text{ МПа}^3$.

Получены следующие математические модели (полиномы):

- для прочности при сжатии

$$Y_1 = 87.7 + 30.7X_1 + 12.6X_2 + 10.5X_1X_2 - 18.1X_1^2 - 3.1X_2^2$$

Полученные модели проверены на адекватности по критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера равно $F_1 = 15,2$, а табличное 19,3. Расчетное значение F-критерия не превышает табличного, и с соответствующей доверительной вероятностью (98%) модель можно считать адекватной. Геометрическая интерпретация уравнения $Y_1 = f_1(X_1, X_2)$ представлена на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость прочности комплексного вяжущего от расходов туфа-скория и золы кофейной шелухи. Прочность при сжатии, МПа: 1 – 120; 2 – 100; 3 – 80; 4 – 60

Анализ коэффициентов уравнения $Y_1 = f_1(X_1, X_2)$ показывает, что прочность композиционного вяжущего увеличивается при увеличении расходов туфа-скория и золы кофейной шелухи (коэффициенты при X_1 и X_2 равные соответственно 30,7 и 12,6). При этом при значениях факторов выше средних происходит для X_1 снижение прочности вяжущего (коэффициент при X_1^2 равный минус 18,1). Этот факт будет учтен при аналитической оптимизации математических моделей. Для фактора X_2 имеет место снижение динамики роста прочности (коэффициент при X_2^2 равный минус 3,1). Весьма значимый коэффициент при парном взаимодействии (X_1X_2 равный 10,5) позволяет предположить возможность синергетического эффекта, что предполагает дальнейшую проверку установленного факта, в том числе и оценку пуццолановой активности компонентов вяжущего.

Характер уравнения $Y_1 = f_1(X_1, X_2)$ позволяет провести аналитическую оптимизацию по X_1 :

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_1} = 30.7 + 10.5X_2 - 36.2X_1 = 0 \rightarrow X_1 = \frac{30.7 + 10.5X_2}{36.2} = 0,70 + 0,29X_2$$

Подставляем в уравнение полученную оптимизированную зависимость. Решая уравнение $Y_1 = f_1(X_1, X_2)$ при $X_1 = 0,70 + 0,29X_2$ получаем:

$$Y_1[X_1 = \text{opt}] = 114.1 + 12.6X_2 - 4.9X_2^2$$

Эта функция является оптимизированной по X_1 . В натуральных величинах оптимальные значения расхода туфа-скория находятся в интервале от 116 до 140 кг/м³ в зависимости от расхода золы кофейной шелухи.

Состав туфа-скория близок к составам других аналогичных материалов вулканического происхождения, обращает внимание значительное присутствие оксида титана.

Установлено, что оптимальные значения расхода туфа-скория находятся в интервале от 116 до 140 кг/м³ и зависят от расхода золы кофейной шелухи. Полученные результаты подтверждают возможность получения комплексного вяжущего на основе туфа-скория, а интерпретация статистической модели делает возможной разработку методики подбора состава комплексного вяжущего и строительных материалов на его основе.

Пуццолановая активность туфа-скория требует изучения. Тем не менее, материалы аналогичного происхождения и состава (из вулканических пород Африканского рога) имеют доказанную пуццолановую активность.

Библиографический список

1. Shannag, M.; Charif, A.; Naser, S.; Faisal, F.; Karim, A. Structural Behavior of Light-weight Concrete Made with Scoria Aggregates and Mineral Admixtures. *Int. J. Civ. Archit. Sci. Eng.* 2014, 8, 105–109.
2. Tchamdjou, W.H.J.; Grigoletto, S.; Michel, F.; Courard, L.; Abidi, M.L.; Cherradi, T. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar. *Case Stud. Constr. Mater.* 2017, 7, 191–206.

3. Cai, G.; Noguchi, T.; Degée, H.; Zhao, J.; Kitagaki, R. Volcano-related materials in concretes: A comprehensive review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016, 23, 7220–7243.
4. Al-Swaidani, A.M.; Aliyan, S.D. Effect of adding scoria as cement replacement on durability-related properties. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 2015, 9, 241–254.
5. Hossain, K.M.A. Blended cement and lightweight concrete using scoria: Mix design, strength, durability and heat insulation characteristics. *Int. J. Phys. Sci.* 2006, 1, 5–16.
6. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // Нанотехнологии в строительстве научный интернет-журнал. – 2020. – Том 12, № 6. – С. 313–319. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319.
7. Zhukov A., Shokodko E. (2020) Mathematical Methods for Optimizing the Technologies of Building Materials // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. *TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1116. Pp. 413-421. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_40
8. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Demissi Bekele A., Zinoveva E.A. Analytical optimization of the dispersion-reinforced fine-grained concrete composition // *CATPID 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1083. (2021) 012037. doi:10.1088/1757-899X/1083/1/012037.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ СТРУКТУРЫ БЕТОНОВ ДЛЯ ХЛОРИД-ИОНОВ

Б.И. Булгаков¹, канд. техн. наук, доцент

Нго Суан Хунг^{1,2}, аспирант

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Ханойский горно-геологический университет, 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиен, Ханой, Вьетнам

Аннотация. В работе представлен экспериментальный метод ускоренного испытания бетонов на плотность их структуры путем измерения величины электрических зарядов, проходящих через поперечное сечение бетонных образцов цилиндрической формы в результате проникновения ионов хлора, в соответствии со стандартом ASTM C1202-17. В результате проведенных испытаний установлено, что ионная хлорная проницаемость образцов из модифицированных бетонов составов №3 и 4, содержащих микрокремнезем, механоактивированную золу рисовой шелухи и механоактивированную низкокальциевую топливную золу-уноса в замен части сульфатостойкого портландцемента в составе вяжущего, соответственно в 1,3 и 1,2 раза меньше, чем у контрольных образцов из бетона состава №1 без указанных активных тонкодисперсных минеральных добавок, что свидетельствует об уплотнении их структуры этими добавками, содержащими в основном аморфный кремнезем, а также активный оксид алюминия, и согласно классификации указанного стандарта исследованные бетоны относятся к очень низкому уровню ионной хлорной проницаемости.

Ключевые слова: сульфатостойкий портландцемент, тонкодисперсные активные минеральные добавки, микрокремнезем, низкокальциевая зола-уноса, механоактивированная зола рисовой шелухи, хлорид-ионная проницаемость структуры.

Долгое время бетон считался прочным материалом, практически не требующим ухода. Это предположение верно в большинстве случаев, за исключением тех, когда бетон используется в суровых условиях эксплуатации, вызывающих коррозию: контакт с морской соленой и пресной речной и озерной водой, промышленные, сельскохозяйственные и городские канализационные сбросы и др. В вышеуказанных средах бетон разрушается и становится нестабильным из-за проникновения химических веществ, таких как кислоты, растворы, содержащие соли и в первую очередь сульфаты, а также в результате щелочной реакции заполнителей, карбонизации и проникновения ионов хлора внутрь структуры железобетонных изделий и конструкций [1-4].

Ионы хлора являются основной причиной коррозии железобетонных конструкций, эксплуатируемых в морской среде. Проникновение хлорид-ионов через защитный слой бетона способствует коррозии арматуры и, тем самым, влияет на несущую способность конструкций. В современном строительстве наиболее технологичным, экономически целесообразным и универсальным способом улучшения свойств бетонов и строительных растворов с целью снижения проницаемости их структуры для хлорид-ионов является применение различных модифицирующих добавок [5-6].

Для изучения влияния тонкодисперсных минеральных добавок на проницаемость структуры бетонов для хлорид-ионов в работе были использованы следующие сырьевые компоненты.

Сульфатостойкий портландцемент (СЦ) типа ЦЕМ I СС 42,5 Н производства завода «Там Диеп» (Вьетнам) с истинной плотностью 3,15 г/м³, состав и свойства которого соответствовали требованиям ГОСТ 22266-2013 [7] и TCVN 6067:2004 [8]. Минеральный состав и физико-механические свойства использованного цемента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Минеральный состав и физико-механические характеристики сульфатостойкого портландцемента ЦЕМ I СС 42,5 Н

Минеральный состав, % масс.					Удельная поверхность, см ² /г	Нормальная плотность, %	Сроки схватывания, мин.		Прочность на сжатие, МПа	
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	др.			Начало	Конец	2 суток	28 суток
57,2	24,4	3,2	12,4	2,8	3680	29,3	120	254	18,4	51,5

В качестве активных минеральных добавок применяли низкокальциевую золу-уноса (ЗУ) ТЭС «Вунг Анг» (СРВ) класса F, отвечающую требованиям ГОСТ 25818-2017 [9] и подвергнутую механоактивации, микрокремнезем SF-90 (МК) фирмы «Vina Pacific» (СРВ), соответствующий ТУ 5743-048-02495332-96 [10] и механоактивированную золу рисовой шелухи (ЗРШ). Химические составы использованных сульфатостойкого портландцемента и тонкодисперсных минеральных добавок приведены в таблице 2.

Таблица 2. Химические составы сульфатостойкого портландцемента, золы-уноса ТЭС «Вунг Анг», микрокремнезема SF-90 и золы рисовой шелухи

Материалы	Химический состав, % масс.										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	п.п.п.
СЦ	21,97	3,68	64,65	4,55	1,95	1,76	0,16	0,3	-	-	0,98
ЗУ	54,62	25,17	2,65	7,11	1,57	0,25	0,95	2,18	1,83	0,63	3,04
МК	89,9	1	0,48	1	0,85	0,95	1,55	2,12	-	-	2,15
ЗРШ	82,2	5,25	2,52	1,75	0,8	0,5	2,67	1,14	0,15	0,25	2,77

Также были использованы щебень (Щ) из карьера Нинь Бинь (Вьетнам), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8267-93 [11], с D_{max} = 10 мм, истинной плотностью 2,75 кг/дм³ и насыпной плотностью в уплотненном состоянии 1,6 кг/дм³; кварцевый песок (П) реки Ло (Вьетнам) с модулем крупности M_к = 2,95, истинной плотностью 2,62 г/см³ и насыпной плотностью в уплотненном состоянии 1540 кг/м³, соответствующий I классу по ГОСТ 8736-2014 [12] и TCVN 7570:2006 [13]; поликарбоксилатный суперпластификатор (СП) SR 5000P производства фирмы «Silk Road» (Корея) с плотностью водного раствора 1,1 г/см³ при температуре 20 ± 5°С в соответствии с ГОСТ 24211-2008 [14], а также водопроводная вода (В) в качестве воды затворения для получения бетонной смеси, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 [15].

Предварительный состав бетонной смеси определяли в соответствии с требованиями стандарта АСІ 211.4R-08 [16] методом абсолютных объемов, после чего его оптимизировали, используя полученные экспериментальные результаты с помощью компьютерных программ Matlab и Maple-2019.

С целью изучения влияния разработанного вяжущего на физико-механические и эксплуатационные характеристики бетона, кроме разработанного оптимального состава № 3, содержащего 15% механоактивированной ЗУ и 10% МК по массе от расхода сульфатостойкого портландцемента и 1% СП от массы вяжущего, также с помощью метода абсолютных объемов был произведен подбор еще трех нижеприведенных составов бетонов: состав №1(контрольный), не содержащий тонкодисперсных активных минеральных добавок, состав №2, в котором 13% масс. сульфатостойкого портландцемента заменены механоактивированной низкокальциевой золой-уноса, и состав №4, отличающийся от состава №3 тем, что вместо микрокремнезема содержит столько же механоактивированной золы рисовой шелухи. Разработанные составы бетонов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Разработанные составы бетонов

Составы	В Вяж	Расход сырьевых материалов на 1 м ³ , кг.							
		СЦ	ЗУ	МК	ЗРШ	П	Щ	СП	В
Сост. №1	0,32	561	-	-	-	503	1040	5,6	180
Сост. №2	0,32	488	73	-	-	503	1040	5,6	180
Сост. №3	0,32	488	73	49	-	503	1040	6,1	196
Сост. №4	0,32	488	73	-	49	503	1040	6,1	196

Примечание. Вяж = СЦ + ЗУ + МК; П/(П + Щ) = 0,33.

Экспериментальные результаты определения характеристик бетонных смесей указанных выше составов, а также физико-механических и эксплуатационных показателей, полученных в результате их затвердевания бетонов, представлены в таблице 4.

Методика оценки плотности структуры бетонов путем определения ее проницаемости для хлорид-ионов описана в стандарте ASTM C1202-2017 [17]. Схема экспериментальной установки и бетонные образцы для испытаний изображены на рисунке 1. Метод является ускоренным и основан на принципе измерения величины электрических зарядов, проходящих через поперечное сечение бетонных образцов цилиндрической формы с диаметром 100 мм и высотой 50 мм в течение 6 часов. Бетонные образцы помещали между анодом и катодом. При этом, со стороны анода поверхность поперечного сечения испытываемого образца контактировали с 0,3Н р-ром NaOH, а со стороны катода - с 3% - ным р-ром NaCl. Напряжение постоянного тока составляло U = 60В. Испытания проводили после достижения бетоном возраста 28 суток в лаборатории испытательного центра строительных материалов Gosta Vietnam (рисунок 2).

Таблица 4. Технологические свойства бетонных смесей и физико-механические и эксплуатационные показатели бетонов

Показатели	Бетонные смеси и бетоны			
	Сост. №1	Сост. №2	Сост. №3	Сост. №4
Подвижность бетонной смеси, см	18	15	16	17
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	2282	2278	2347	2345
Средняя плотность бетона, кг/м ³	2268	2252	2329	2316
Прочность на сжатие, МПа	28 сут.	72,9	70,6	78,5
	180 сут.	73,3	71,1	79,3
Прочность на осевое растяжение, МПа	28 сут.	3,8	3,6	4,3
	180 сут.	3,9	3,7	4,5
Водонепроницаемость, МПа	28 сут.	1,4	1,2	1,8
	180 сут.	1,6	1,4	2,0
Водопоглощение, % масс.	3,4	3,6	2,3	2,7
Пористость, %	7,07	7,15	6,55	6,86

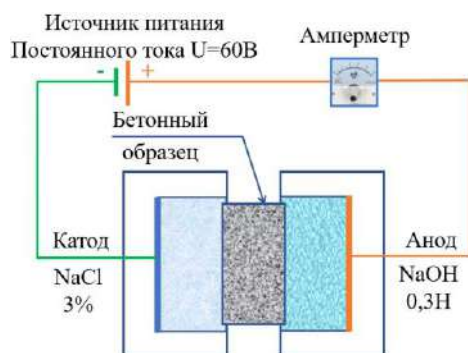


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Проведения испытаний для определения проницаемости структуры бетонов для ионов хлора

Под влиянием электрического поля ионы хлора диффундировали сквозь капиллярные поры бетонных образцов и за счет этого переносили сквозь них электрические заряды. Сила возникавшего при этом тока измерялась через каждые 30 мин. Далее суммарный заряд электричества, передаваемый через образец бетона, рассчитывался по формуле:

$$Q = \left(\frac{95}{x} \right)^2 \cdot 900 \cdot (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}),$$

где Q - общая величина электрических зарядов, прошедших через бетонный образец за 6 часов, К; I_t - сила измеряемого электрического тока в момент времени t , А; x - фактический диаметр испытуемого образца, мм.

Чем больше значение Q, тем выше проницаемость бетона для ионов хлора и, следовательно, меньше плотность его структуры.

Результаты испытаний разработанных бетонов на проницаемость их структуры для хлорид-ионов представлены на рисунке 3.

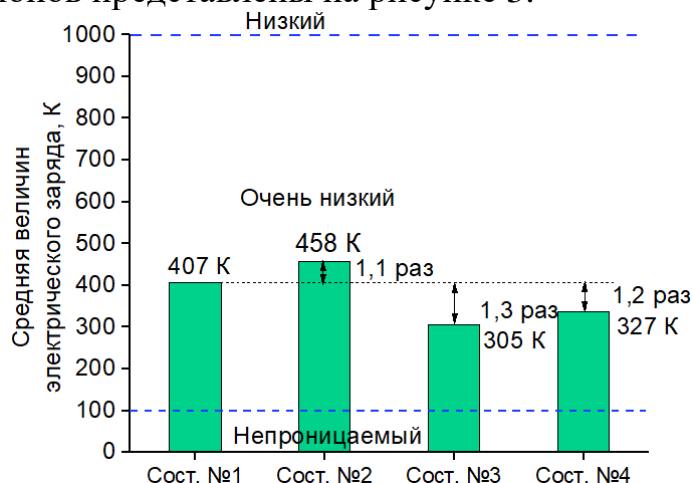


Рис. 3. Среднее значение величины электрического заряда, прошедшего через бетонные образцы в течение 6-часовых испытаний

В результате проведенных испытаний установлено, что проницаемость для ионов хлора структуры образцов разработанных модифицированных бетонов составов № 3 и 4, содержащих механоактивированную низкокальциевую ЗУ в замен части сульфатостойкого портландцемента, а также МК и механоактивированную ЗРШ, соответственно в 1,3 и 1,2 раза меньше, чем у контрольных образцов из бетона состава №1 без тонкодисперсных минеральных добавок, что свидетельствует об уплотнении структуры бетонов, и согласно классификации стандарта ASTM C 1202-17 исследованные бетоны относятся к очень низкому уровню ионной хлорной проницаемости.

Библиографический список:

1. Ануфриева Е.В. Коррозионностойкий бетон для гидротехнического строительства / Градостроительные аспекты устойчивого развития крупных городов. Харьков: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2009. № 93. С. 537-541.
2. Santhanam M., Cohen M.D., Olek J. Differentiating Seawater and Groundwater Sulfate Attack on Portland Cement Mortars // Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36 (12), pp. 2132-2137. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.011>.
3. Chindapasirt P., Kanchanda P., Sathonsaowaphak A. Cao H.T. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash // Constr. Build. Mater. 2007, № 21, pp. 1356-1361; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.10.005>.
4. Morris W., Moreno E.I., and Sagues A. A. Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in Test Cylinders using a Wenner Array Probe // Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, № 12, pp.1779-1787.
5. Mutsuyoshi H. Present Situation of durability of posttensioned pc bridges in Japan // International federation for structural concrete, Lausanne, Switzerland, 2001, pp. 75-88.
6. Hung Ngo Xuan, Lam Tang Van, B.I. Bulgakov and O.V. Alexandrova. Strength, chloride resistance and corrosion reinforced of high-strength concrete // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1425, Modelling and Methods of Structural Analysis. 13-15 November 2019, Moscow, Russian Federation.

7. ГОСТ 22266-2013. Цементы сульфатостойкие. Технические условия // М. Стандартинформ, 2014, 12 с.
8. Стандарт Вьетнама TCVN 6067:2004. Сульфатостойкие портландцементы. Технические условия // Строительные стандарты Вьетнама. Изд. Строительство. Ханой, 2004, 4 с.
9. ГОСТ 25818-2017. Золо-уноса тепловых электростанций для бетонов // М. Стандартинформ, 2017, 23 с.
10. ТУ 5743-048-02495332-96. Микрокремнезем конденсированный. Технические условия, 1996.
11. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия // М. Стандартинформ, 1995, 14 с.
12. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. // М. Стандартинформ, 2020, 14 с.
13. Стандарт Вьетнама TCVN 7570:2006. Заполнители для бетонов и растворов. Технические предписания // Стройиздат. Ханой. 2007, 11 с.
14. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия // М., Стандартинформ, 2008, 16 с.
15. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия // М.: Стандартинформ. 2012, 12 с.
16. ACI 211.4R-08. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Mater // STANDARD by American Concrete Institute. 2008. 29 p.
17. ASTM C1202-17. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration // ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.

КОМПЛЕКСНАЯ ХИМИКО-МИНЕРАЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПЕНОБЕТОНА

Р.М. Дворников¹, аспирант

А.К. Alobaidi Dheyaa¹, аспирант

Е. Г. Величко¹, д.т.н, профессор

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Рассмотрена многоуровневая оптимизация дисперсного состава пенобетона с целью значимого повышения концентрации твердой фазы в межячеистых перегородках с целью значимого повышения их плотности и прочности. Выполненные исследования показали, что рационально подобранный комплекс модификаторов обеспечивает синергетическое действие индивидуальных компонентов на структуру и свойства пенобетона, которые находятся на уровне или превышают свойства автоклавного газобетона эквивалентны марок по средней плотности.

Ключевые слова: пенобетон, состав, структура, свойства, тонкодисперсный шлак, суперпластификатор, пенобетонная смесь, водоредуцирование, прочность, теплопроводность, усадка.

Введение

Опыт строительства последних лет показывает, что большую популярность при возведении самонесущих ограждающих конструкций получили стеновые блоки из экологически чистого и не горючего пенобетона неавтоклавного твердения марок по средней плотности D500 – D600 и автоклавного газобетона - D400 – D500. Однако производство наиболее эффективного по теплофизическим параметрам пенобетона низких марок по средней плотности является проблемным ввиду сложности обеспечения устойчивости пены и пенобетонной смеси, и, следовательно, его однородной стабильной ячеистой структуры, высокой прочности и низкой теплопроводности [1-4]. Очевидно, что увеличение прочности при постоянном значении плотности может быть обеспечено только за счет повышения прочности матрицы пенобетона и качественного улучшения его структуры.

Кроме того, повышение качества пенобетона может быть связано с коэффициентом использования пены (КИП) а также с использованием многокомпонентных модификаторов, выбор индивидуальных составляющих, для которых должен осуществляться так, чтобы их применение обеспечивало пролонгированное действие с эффектом синергизма в синтезе прочности, деформативности, морозостойкости, коррозиостойкости и других его свойств. Означенные параметры могут быть обеспечены при условии создания тонкодисперсной (0,1-0,5мм) ячеистой структуры пенобетона, а также получением высокопрочной, плотной матрицы с применением компонентов аморфизированного или смешанного аморфно-кристаллического строения, например, тонкодисперсного доменного гранулированного шлака с оптимальными параметрами (дисперсность, содержание), микрокремнезема и других модификаторов, повышающих ее теплофизические свойства [5-6]. На границах раздела фаз и особенно на

компонентах смешанного аморфно-кристаллического строения наблюдается значимое рассеивание переносчиков тепловой энергии—фононов, снижающих значение коэффициента теплопроводности до 25% [6,7].

Кроме того, использование тонкодисперсного доменного гранулированного шлака с оптимальными параметрами (дисперсность, содержание) способствует получению максимально плотной упаковки частиц и многокомпонентной цементной системы, обеспечивая высокую концентрацию твердой фазы в единице объема и значимое повышение ее прочности [6].

При таких параметрах частицы шлака распределяются в основном в межчастичных пустотах портландцемента, с максимальным их наполнением [6]. Мазаично распределенные разноименно заряженные минералы на поверхности частиц клинкера и шлака, и электростатическое взаимодействие между ними способствует самопроизвольной объемной ориентации и с высокой энергией связи их фиксации на своих дисперсно – структурных уровнях. При самоорганизации структуры будет наблюдаться снижение степени неупорядоченности многокомпонентной системы, ее повышенная стабилизация в состоянии равновесия, увеличение потенциальной энергии и вязкости, обеспечивающих высокую однородность и нерасслаиваемость пенобетонной смеси и повышение КИП.

Необходимо отметить, что ухудшение КИП может наблюдаться за счет стекания жидкости пленки через каналы Гиббса-Плата на границу Плата, снижающее прочность за счет образования в пенобетоне микрообъемов пониженной прочности, являющихся зародышами разрушения. Практически все используемые виды пенообразователей редуцируют твердение цементных систем, снижая их прочность и морозостойкость [2-4].

Основными характеристиками пены, значимо влияющими на свойства пенобетона, являются также, устойчивость и кратность. Для получения высококачественного пенобетона необходимо применять пенообразователи с максимальной кратностью, обеспечивающей их минимальное содержание в составе бетона. В этом случае будет наблюдаться снижение содержания затворителя и пенообразователя в пенобетоне, и соответственно качественное улучшение его структуры и СТС. Значение КИП при расчете состава пенобетона принимают равным 0,8 [8]. Его фактическое значение составляет 0,55-0,78. Низкое значение КИП приводит к высокому содержанию составляющей, редуцирующей схватывание, твердение, прочность пенобетона, и ухудшающей его деформативные свойства. Поэтому выбор эффективных пенообразователей и стабилизаторов пены, а также структурообразующих компонентов, значимо повышающих качество пенобетона, требует своего теоретического и практического развития [2,4].

Повышение деформативных свойств пенобетона может быть обеспечено применением алюмосодержащих расширяющиеся добавок МБ-Б-I-2, МБ-Б-II-1 или их модификаций с микрокремнеземом по ГОСТ56178-2014. Эффект действия модификаторов этой группы основан на реакции образования этtringита, компенсирующего в различной степени химическую усадку, наблюдающуюся при гидратации минералов клинкера.

Метакаолин с дисперсностью $1500\text{м}^2/\text{кг}$ [9], превышает дисперсность портландцемента в 4,8-4,9 раза и при использовании в количестве 15-20% массы многокомпонентного цемента дополнительно уменьшает объем межчастичных пустот на 3-4 абс.%. Объем межчастичных пустот портландцемента в уплотненном состоянии составляет 55-60%, многокомпонентного цемента с тонкодисперсным шлаком – 47-52%, то есть больше объема пустот простой кубической упаковки (48%), для которой размер последующей частицы, заполняющей межчастичную пустоту составляет 0,41 диаметра предыдущей частицы или должен быть меньше ее в 2,44 раза [5,7]. Поэтому в каждой межчастичной пустоте распределяется одна или две частицы

Более высокий уровень оптимизации дисперсного состава пенобетона обеспечивается применением микрокремнезема с дисперсностью $18000\text{--}20100\text{м}^2/\text{кг}$ и высоким уровнем свободной энергии Гиббса [9], оптимальное содержание которого в цементных системах составляет 3-6%. При увеличении содержания микрокремнезема значительно увеличивается водопотребность, что очевидно связано с распределением его частиц в цементной матрице. Соотношение дисперсности микрокремнезема и портландцемента приблизительно в 2 раза больше отношения дисперсности портландцемента к удельной поверхности мелкого и крупного заполнителя. Поэтому частицы микрокремнезема при содержании 3-6% за счет адсорбционных и электростатических сил распределяются по поверхности частиц портландцемента и тонкодисперсного шлака в виде монослоя, а также в межчастичных пустотах портландцемента и метакаолина, создавая плотную стабилизированную ультрамикроструктуру или наноструктуру матрицы.

Образующие при этом перколяции цепочек-кластеров высокодисперсных, в т. ч. нанометрового и преднанометрового уровня частиц микрокремнезема значительно улучшают реологические свойства цементной пасты и прочность цементного камня, в основном за счет энергетического взаимодействия, обеспечивающего структурообразование новообразований гидратных фаз в плотной менее дефектной упаковке (предложено авторами настоящей работы впервые). Увеличение числа слоев микрокремнезема с пустотностью 70% требует значимого увеличения водопотребности, так как происходит максимальное заполнение пустот водой ввиду действия значительных капиллярных сил.

Очевидно, что синтез многокомпонентной системы с созданием многоуровневой плотной упаковки частиц различной дисперсности обеспечит высокую реакционную способность матрицы, в том числе по протеканию пуццолановой реакции. Негативным фактором для максимального использования потенциальной энергии такой системы может быть относительно повышенная водопотребность, определяющая необходимость применения в ее составе эффективных пластифицирующих добавок поликарбоксилатного типа. Ввиду наличия в матрице значительного количества алюминатной фазы, высокодисперсных компонентов и действия значительных адсорбционных сил содержание пластификатора без проявления негативного эффекта может быть увеличено, обеспечивая большее редуцирование водосодержания и более высокую прочность матрицы. Кроме того, высокая связность цементной системы обеспечивает бо-

лее высокий КИП, и также повышает прочность пенобетона и ускоряет темп его твердения.

Материалы и методы

Свойства и структура бетона изучались с использованием двух фракций мелкого заполнителя размером 0,315 и 0,16 мм соответственно в количестве 80% и 20%, гранитно-гравового щебня фр. 5–10 мм, портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н с удельной поверхностью 253 м²/кг, тонкодисперсного доменного гранулированного шлака – 423 м²/кг, микрокремнезема, высокодисперсной фракции цемента. Расход цемента, в т. ч. многокомпонентного, в зависимости от задачи исследований, варьировался в интервале 450 – 750 кг/м³ бетона. В качестве суперпластификатора применялся Glenium 430 (ООО «БАСФ-Строительные системы») в количестве 0,45– 0,56 % массы цемента и высоковалентный ускоритель твердения АС в количестве 0,07% в соответствии с правилом Шульце – Гарди. Применялись следующие методы исследований: форма и размер дисперсных частиц компонентов определялись седиментационным методом и лазерным анализатором, подвижность бетонной смеси по ГОСТ 10181–2014, прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180– 2012. Структура цементного камня изучалась применением термографического, и рентгенофазового методов анализа, а также растровой микроскопии с микроанализом.

Экспериментальные исследования проводились с использованием портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н Белгородского завода с удельной поверхностью 253 м²/кг, тонкодисперсного доменного гранулированного шлака – 423 м²/кг 2], микрокремнезема, метаколина МБ-Б-II-1, МБ-Б-I-2 (ГОСТ56178-2014), пенообразователя ПБ – 2000, суперпластификатора Glenium 430 (ООО «БАСФ-Строительные системы») в количестве 0,45– 0,56 % массы цемента и высоковалентный ускоритель твердения АС в количестве 0,07% в соответствии с правилом Шульце – Гарди. Пенобетон марки по средней плотности D400 приготавливали в лабораторном бетоносмесителе – активаторе объемом 20л со скоростью вращения вала 750об/мин или 15,7м/с на внешнем радиусе лопатки. Тестовые образцы-кубы размером 10×10×10см твердели в нормальных условиях (НУ) и подвергались тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 6+3+6+2ч при температуре изотермического прогрева 80±5 °С. Прочность бетона на сжатие в возрасте 1 и 28 суток после ТВО и в возрасте 28 суток после твердения в НУ определялась по ГОСТ 10180 – 2012.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований показали, что прочность контрольного состава (без модификаторов) в возрасте 1 и 28 суток после ТВО и в возрасте 28 суток после твердения в НУ составляет соответственно 1,07 и 1,59, и 1,632МПа. Размер ячеек в этом случае колеблется в интервале 0,22-2,1мм со средним размером 1,21мм и коэффициентом вариации 45%. Коэффициент теплопроводности в проектном возрасте находится на уровне 0,122 Вт/ (м °С).

Исследования по разработке составов с тонкодисперсным доменным гранулированным шлаком показали, что его оптимальное содержание для в НУ твердения пенобетона составляет 30%, а для условий ТВО – 40%. При этом

расход воды в пенобетонной смеси с тонкодисперсным шлаком редуцируется на 5-6%, прочность пенобетона повышается на 25% для НУ твердения и 28-38% для условий ТВО, а коэффициент теплопроводности снижается соответственно на 14 и 21%.

Использование в составе пенобетона тонкодисперсного доменного гранулированного шлака, микрокремнезема, метакаолина, МБ-Б-II-1, МБ-Б-I-2, суперпластификатора Glenium 430 в различных рецептурах показало, что пенобетон характеризуется размером ячеек в интервале 0,13-0,8мм со средним размером 0,48-0,5мм и коэффициентом вариации 39-41%. Прочность пенобетона при использовании комплекса модификаторов, в состав которого входит МБ-Б-II-1, имела максимальное значение, на 45-52% превышающее прочность контрольного состава, а при использовании модификатора МБ-I-1 на 32-41%. Полученные результаты с МБ-Б-I-2 очевидно связаны с седиментационными процессами и расслоением, протекающими в цементной системе при формовании образцов. Однако при использовании ускорителя твердения "АС" в оптимальном количестве равным 0.07% и массы цемента, обеспечивающим дополнительное водоредуцирование пенобетонной смеси на 21% и ее более высокую связность наблюдается высокая прочность пенобетона и более качественная структура (рисунок 1) при использовании модификатора МБ-Б-I-2. Прочность пенобетона в этом случае на 65-72% превышала прочность контрольного состава. Размер ячеек находился на уровне 0,10-0,47мм со средним размером 0,29мм и коэффициентом вариации 36%.

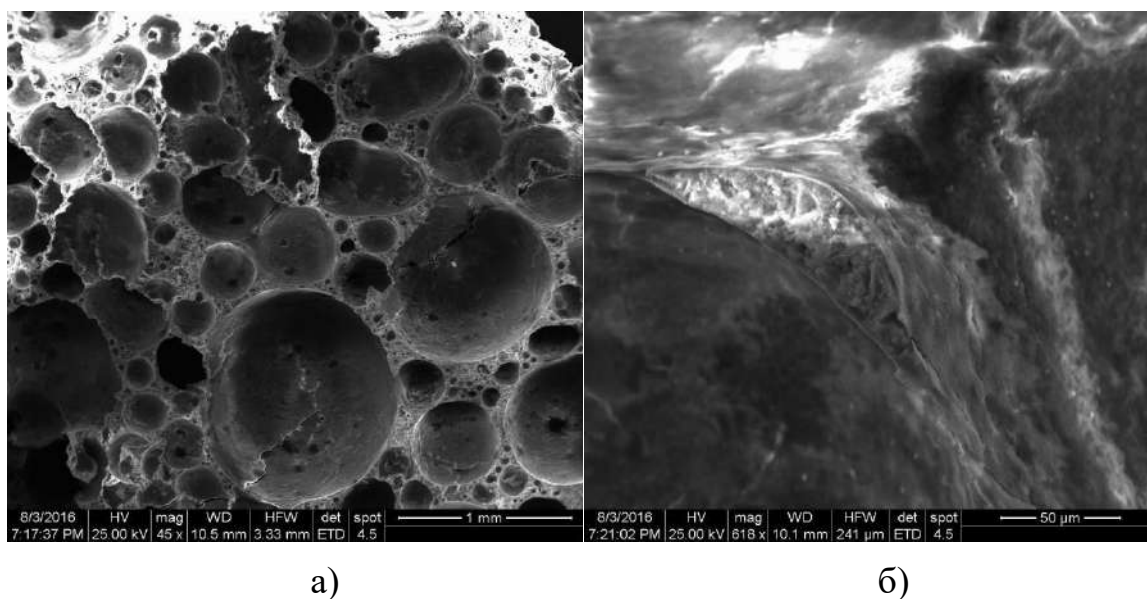


Рис. 1. Макроструктура контрольного состава (а) и микроструктура пенобетона с микрокремнезёмом и суперпластификатором, (б) после нормального твердения в возрасте 28 суток

Усадка пенобетона с модификаторами МБ-Б-II-1 и МБ-Б-I-2 снизилась относительно контрольного состава на 39 и 47% и находится на уровне автоклавного газобетона, что позволяет предположить о возможности массового применения модифицированного пенобетона, в том числе в монолитном строительстве для устройства ограждающих конструкций.

Выполненные исследования показали, что рационально подобранный комплекс модификаторов обеспечивает синергетическое действие индивидуальных компонентов на структуру и свойства пенобетона.

Заключение

Использование комплексной модификации состава и структуры пенобетона путем применения тонкодисперсного доменного гранулированного шлака, микрокремнезёма, МБ-Б-I-2, МБ-Б-II-1, оптимизирующих его дисперсный состав на различных иерархических уровнях с целью зачимого повышения плотности и прочнсти цементного камня межячеистых пергородок, а также суперпластификатора и ускорителя обеспечивает синергетическое действие означенных индивидуальных компонентов и позволяет получать неавтоклавный ячеистый бетон с экономией цемента до 40% и свойствами, в том числе усадкой на уровне газобетона автоклавного твердения.

Библиографический список

1. Ухова Т.А. Опыт производства и применения неавтоклавного поробетона // Промышленное и гражданское строительство. 2002. №9. С. 29 – 30.
2. Касумов А.Ш., Величко Е.Г. Разработка рациональных параметров компонентов состава пенобетона // Строительные материалы. 2016. № 8. С 52 – 56.
3. Касумов А.Ш., Величко Е.Г., Серов Р.Ф. Проблемы производства и применения ячеистого бетона // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. С. 267 – 271.
4. E.Velichko E., Pustynnik O. Modification of Foam Concrete with Organo-Mineral Admixtures // Materials Sciense Forum. 2019. Vol. 945, Pp. 199 – 204.
5. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Некоторые аспекты физикохимии и механики композитов многокомпонентных цементных систем. // Строит. материалы. 1997 №2. С. 21 – 25.
6. Дыкин И.В., Величко Е.Г., Еремин А.В. Многоуровневые модифицированные цементные системы // Бюллетень инженеров-строителей. 2016. № 4 (57). С. 111–114
7. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235 – 243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243
8. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона (Госстрой СССР). М., Стройиздат, 1981. С. 47.
9. Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Новый органоминеральный модификатор серии МБ-ЭМБЭЛИТ для производства высококачественных бетонов // Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону. 5-9 сентября 2005г. Москва; В 5 томах, Том 3. Секционные доклады. Секция «Технология бетона». М.: Дипак. 2005. С. 672 – 680.

РАЗРАБОТКА АЭРОГЕЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОНОПЛЯНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.С. Пилипенко, доцент, канд. техн. наук

М.Б. Каддо, доцент, канд. техн. наук

А.Р. Скаяев, аспирант

Е.О. Безверхова, аспирант

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. В статье рассмотрена идея разработки составов аэрогелей на основе целлюлозных материалов, проведён анализ уровня техники в области их производства. Для исследования в дальнейшей работе были выбраны технологии получения аэрогелей на основе наноцеллюлозы, получаемой из растительного сырья конопляных растений. В качестве матрицеобразующего компонента были выбраны составы на основе оливиновых кремнеземистых комплексов.

Ключевые слова: наноцеллюлоза, аэрогель, конопляные волокна.

С повышением технологического уровня производства материалов и накопления новых научных знаний в нашу жизнь входят материалы, которые ранее считались достаточно экзотическими. Одним из таких материалов является аэрогель на основе различных матрицеобразующих веществ.

Аэрогель - синтетический пористый сверхлегкий материал, полученный из геля, в котором жидкий компонент геля заменен газом. Согласно IUPAC, аэрогель определяется как гель, состоящий из микропористого твердого вещества, в котором дисперсная фаза представляет собой газ. Аэрогель состоит из отдельных частиц или глобул, размером в несколько нанометров, образующих сложную трехмерную структуру, благодаря которой он обладает высокой пористостью и удельной поверхностью, низкими теплопроводностью, коэффициентом преломления света, диэлектрической проницаемостью и скоростью распространения звука [1].

Применение аэрогеля в строительстве в настоящее время представлено в виде тонких теплоизоляционных матов незначительной толщины, используемых для ответственных работ, предъявляющих высокие требования по теплоизоляционным характеристикам и толщине изделий - для изоляции трубопроводов, ёмкостей и оборудования сложной формы. Наиболее распространены на строительном рынке России материалы китайской компании Alison, имеющие среднюю плотность до 200 кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,020 Вт/м·К (при 25°C), но имеющие относительно высокую стоимость. Тем не менее, применение аэрогелевых материалов позволяет создать эффективный теплоизоляционный контур ограждающей конструкции. Снизить стоимость и, как следствие, повысить применимость аэрогелевых материалов в строительстве представляется возможным за счёт разработки более дешёвых методов синтеза и производства таких материалов, в том числе и с применением возобновляемых биоматериалов.

Традиционно аэрогель синтезируют методом золь-гель. Твердые наночастицы растут и образуют трехмерную сплошную сетку с порами, заполненными растворителем. В геле создается раствор, а затем жидкость осторожно удаляется, оставляя аэрогель неповрежденным (образование золя). Для обеспечения прочности структуры гель выдерживается в «маточном растворе» и обездвиживают в растворителе для завершения реакции. Растворитель удаляется при сохранении сплошной аэрогелевой сетки либо путем сушки, либо в естественных условиях. Удаляют растворитель экстракцией в текучей среде или растворителем. Самым распространенным растворителем для экстракции является жидкий диоксид углерода, имеющий относительно низкие критические температуру и давление.

В качестве матричной фазы аэрогеля может применяться большое количество химических соединений. Всё большее распространение получают аэрогели на основе не только традиционного диоксида кремния, но и оксидов редкоземельных металлов, и наноцеллюлозы различного происхождения. Например, в Технологическом университете Эйнховена [2] был разработан аэрогель на основе модифицированной наноцеллюлозы и оливинового кремнезёмистого комплекса, обладающий коэффициентом теплопроводности 0,023-0,038 Вт/м·К, пределом прочности на сжатие 95,4 кПа и хорошей гидрофобностью. Возобновимость сырья для производства целлюлозы и хорошие физико-механические свойства позволяют предположить возможность создания эффективного состава аэрогеля на её основе.

Для получения целлюлозы применяется широкий спектр сырья растительного происхождения. В условиях России наиболее распространены технологии получения целлюлозы из продуктов переработки древесины. Подобная целлюлоза имеет отработанный технологический процесс получения, но требует большого числа технологических операций для приведения её в состояние, пригодное для производства аэрогеля. Альтернативой является применение растительного сырья меньшей плотности и связности микрофибрилл целлюлозы и гемицеллюлозы между собой и имеющего значительную биомассу в условиях России. Также необходимо обеспечивать достаточно быстрый цикл роста и набора биомассы сырьевых культур, а также возможность влиять на характеристики сырья изменениями условий роста растений. Подобными культурами могут являться традиционные для средней полосы России конопляные растения, инвазивный борщевик Сосновского и т.д.

Для проверки возможности получения аэрогелей на базе растительного сырья были выбраны модифицированная целлюлоза, полученная на основе переработки технической конопли. Такая целлюлоза может быть легко добыта из растения-субстрата, обладает достаточно высокими физико-механическими свойствами, может быть модифицирована до нано- и нитроцеллюлозы без особых затрат. Выращивание технической конопли возможно во всей нечернозёмной зоне России, технология выращивания отработана на протяжении всей российской истории, при этом пахотные земли высокой производительности почв сохраняются для получения пищевых сельскохозяйственных культур. Получение наноцеллюлозы может быть достигнуто за счёт применения различных методов, например, применения ультразвуковой обработки в среде жидкого азота

[3]. Для создания кремнезёмистой фазы аэрогеля были выбраны оливиновые кремнезёмистые комплексы, показавшие свою эффективность в работе [2]. В ходе дальнейшей работы они могут быть заменены на более эффективные комплексы по результатам исследования. Повышение гидрофобности аэрогеля на основе конопляной целлюлозы возможно за счёт применения добавки триметилхлорсилана.

Библиографический список

1. Каддо М.Б., Синотова М.В. Перспективы применения аэрогеля в строительстве, Наука и бизнес: пути развития, №12, 2018, стр. 47-50.
2. Y.X. Chen, S. Sepahvand, F. Gauvin, K. Schollbach, H.J.H Brouwers, Qingliang Yu, One-pot synthesis of monolithic silica-cellulose aerogel applying a sustainable sodium silicate precursor. *Construction and Building Materials* 293 (2021) 123289
3. Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Вершинин М.С., Лексин В.В., Момзяков А.А., Дебердеев Р.Я. Получение наноцеллюлозы из недревесного растительного сырья // *Химия растительного сырья*, 2019. № 3. С. 15-21. URL: <http://journal.asu.ru/cw/article/view/5105>.

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Марк Содомон, аспирант

И.В. Степина, канд. техн. наук, доцент

А.Д. Жуков, канд. техн. наук, доцент

А.М. Минаева, студентка бакалавриата ИСА-4-9

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Материалы на основе природного растительного сырья легкодоступны, экологичны, являясь биопозитивными материалами, способствуют формированию комфортного микроклимата внутри помещений, процесс их производства не предусматривает использование высоких температур. Низкая биостойкость и горючесть растительного сырья ограничивает его широкое применение в современных строительных технологиях. Решением этой проблемы является химическая модификация компонентов сырья огнебиозащитными составами. Для обеспечения долговечной защиты модификатор должен образовывать прочные химические связи с подложкой. Целью исследований было изучение возможности борщевика Сосновского в качестве основы для теплоизоляционных материалов. Стебли борщевика имеют пористую структуру и очень низкую плотность и могут быть модифицированы с целью повышения биостойкости и снижения горючести. Исходное растительное сырье обладает высокой сорбционной способностью по отношению к моноэтаноламин($N \rightarrow V$)тригидроксиборату. Данные ИК-спектроскопии модифицированных образцов свидетельствуют о существенном изменении состава подложки, а именно о делигнификации и гидролизе гемицеллюлоз, а также о привитии молекул модификатора к структуре клеточных стенок. Присутствие боразотного соединения в составе лигноуглеводного комплекса стеблей должно обеспечить повышенную биостойкость и огнезащищенность конечного продукта.

Ключевые слова: борщевик, волокна, модификация, теплоизоляционный материал, боразотные соединения.

Проблема энергосбережения является одной из самых актуальных в мире и в России. Нарастающий дефицит энергоресурсов и глобальные экологические кризисы повсеместно подталкивают производителей товаров и услуг внедрять энергосберегающие технологии. В Европе ресурсосберегающие – «зеленые» – технологии начали осваивать еще в конце 80-х годов XX века. В России этому движению официальный старт дал Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Повышенный расход энергии для обогрева строений неэффективен не только с точки зрения экономики, но и причиняет вред окружающей среде. Уже давно установлено, что чрезмерные выбросы в атмосферу CO_2 , образующегося при сжигании топлива разных видов, вызывают опасный для нас парниковый эффект. Примерно 30-35 % от общего количества выбрасываемой в воздух двуокиси углерода – это результат отопления помещений. Рамочной конвенцией ООН (Парижское соглашение) от 22 апреля 2016г. предусмотрены регулирую-

щие меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020г. В этой связи разработка теплоизоляционных материалов повышенной эффективности является весьма актуальной задачей. Тем более, что такие материалы являются одними из немногих промышленных продуктов, эффективность которых напрямую связана с защитой окружающей среды от излишних выбросов парниковых газов [1, 2].

В настоящее время среди различных видов растительного сырья наиболее популярна для изготовления теплоизоляционных плит переработанная древесина [3]. В качестве основы материала используются переработанные и модифицированные отходы древесины: опилки, стружка, горбыль. Получены перспективные результаты изготовления изделий на основе рисовой соломы, тростника, торфа [4]. Материалы на основе органического сырья обладают наименьшей теплопроводностью. При этом у большинства видов органических материалов есть особенность, которую надо учитывать – это их горючесть.

В рамках работы решено было использовать местное растительное сырье – стебли борщевика Сосновского, являющегося инвазионным видом, для производства теплоизоляционных материалов. Стебли борщевика имеют пористую структуру и очень низкую плотность и могут быть использованы для создания эффективных теплоизоляционных материалов.

Некоторые исследователи уже заинтересовались борщевиком Сосновского: изучается возможность его использования в качестве заполнителя для бетона [5], и возможность изготовления из стеблей борщевика углеродных нановолокон для электродов супер конденсаторов [6].

Одним из основных требований, предъявляемым к ТИМ является долговечность материала. Поэтому исходное растительное сырье было решено модифицировать четырехкоординационным боразотным соединением, являющимся эффективным антисептиком и антипиреном.

В табл. 1 показаны результаты весового анализа модифицированных измельченных стеблей Борщевика. Из таблицы видно, что исходное растительное сырье обладает высокой сорбционной способностью по отношению к моноэтанолламин(N → В)тригидроксиборату. Данные ИК-спектроскопии модифицированных образцов, рис. 2, свидетельствуют о существенном изменении состава подложки, а именно о делигнификации и гидролизе гемицеллюлоз, а так же о привитии молекул модификатора к структуре клеточных стенок. Присутствие боразотного соединения в составе лигноуглеводного комплекса стеблей должно обеспечить повышенную биостойкость и огнезащищенность конечного продукта.

Таким образом, модификация приводит к существенному изменению структуры и состава подложки. С помощью ИК-спектроскопии установлено наличие модификатора в составе клеточных стенок. С учетом того, что перечисленные исследования проводились после продолжительной экстракции водой, приводящей к вымыванию избытка модификатора, можно говорить о хемосорбции боразотных соединений субстратом.

Таблица 1. Изменение массы образцов в процессе модифицирования, экстракции и сушки

№ пп	Т модифицирования, °С	Т сушки, °С	Исходная масса образцов, г	Масса образцов после модифицирования и сушки, г / % прироста	Масса образцов после экстракции и сушки, г / % прироста
1	25	25	5	12,0 / 140	7,3 / 46
2	25	105	5	12,6 / 152	8,8 / 76
3	50	25	5	13,7 / 174	7,6 / 52
4	50	105	5	14,0 / 180	7,8 / 56
5	75	25	5	13,7 / 174	8,1 / 62
6	75	105	5	14,3 / 186	10,3 / 106
7	100	25	5	18,3 / 266	11,8 / 136
8	100	105	5	20,9 / 318	12,5 / 150
9	КОНТ-ЛЬ	КОНТ-ЛЬ	5	5	4,4 / -12

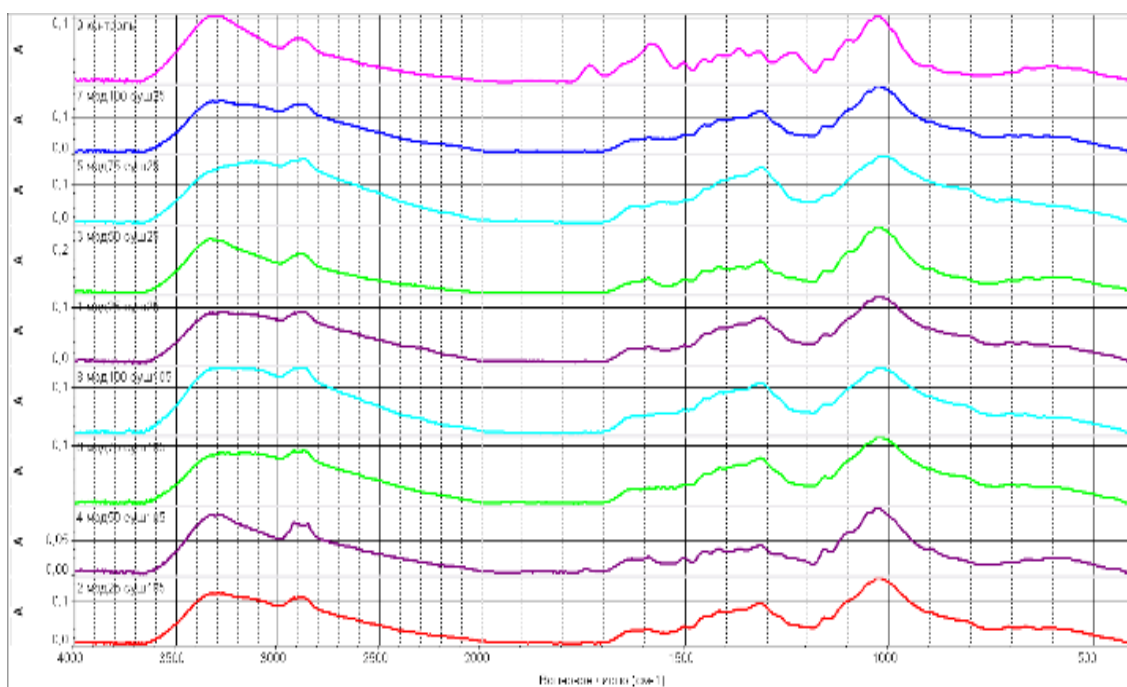


Рис. 2. ИК-спектрометрии модифицированных образцов

При модифицировании растительного сырья, представленного измельченными стеблями борщевика Сосновского, составом на основе моноэтаноламин-(N→V)тригидроксидбората происходит деполимеризация лигнина и гемицеллюлоз и их место в составе лигно-углеводного комплекса клеточных стенок занимают молекулы модификатора. Этот процесс усиливается при повышении температуры модифицирования и сушки, что приводит к повышенному содержанию боразотного соединения в составе подложки [7, 8]. Процесс пропитки растительного сырья моноэтаноламин-(N→V)-тригидроксидборатом сопровождается хемосорбцией, об этом свидетельствует наличие молекул модификатора, подтвержденное данными ИК-спектроскопии и микрофотографии, в межклеточном пространстве после длительной экстракции водой. Новизна проведенных исследований состоит в обосновании и экспериментальном подтверждении возможности повышения биостойкости растительного сырья – борщевика – путём модифицирования моноэтаноламин-(N→V)тригидроксидборатом, а также установлении механизма данного процесса.

Материалы на основе природного растительного сырья обладают целым рядом преимуществ. Во-первых, это экологичность. Являясь биопозитивными материалами, они способствуют формированию комфортного микроклимата внутри помещений и не оказывают негативного влияния на окружающую среду. Во-вторых, процесс производства не предусматривает использование высоких температур, что способствует значительной экономии топливно-энергетических ресурсов и исключает выброс парниковых газов в атмосферу. В-третьих, растительное сырьё легко доступно, распространено повсеместно и не требует больших затрат на переработку. Однако, низкая биостойкость и горючесть растительного сырья ограничивает его широкое применение в современных строительных технологиях. Решением этой проблемы может стать химическая модификация компонентов сырья огнебиозащитными составами. Для обеспечения долговечной защиты модификатор должен образовывать прочные химические связи с подложкой.

Библиографический список

1. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Энергетическая эффективность и методология создания теплоизоляционных материалов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2014. - №4. – С.1-6.
2. Ter-Zakaryan K. Ar., Zhukov Al. D. (2021). Short Overview of Practical Application and Further Prospects of Materials Based on Crosslinked Polyethylene. In: Thomas J., Thomas S., Ahmad Z. (eds) Crosslinkable Polyethylene. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_12.
3. Степанов В.В., Игнатъева Г.И. Производство древесно-наполненных теплоизоляционных материалов на минеральном вяжущем и полимерных компонентах // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. - №3. – С.64-66.
4. Зиатдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Левашко Л.И. Анализ современного состояния производства теплоизоляционных материалов и возможности создания новых материалов из отходов деревообработки//Вестник технологического университета. – 2011. - № 18. – С.63-68.

5. Мусорина Т.А., Наумова Е.А., Шонина Е.В. и др. Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик)//Вестник МГСУ. – 2019. - №12. – С.1555-1571.
6. Табаров Ф.С., Астахов М.В., Климонт А.А. и др. Углеродные нановолокна как электропроводящая добавка для электродов суперконденсаторов//Российские нанотехнологии. 2019. - №1-2. – С.13-18.
7. Котенева И.В. Боразотные модификаторы поверхности для защиты древесины строительных конструкций: монография / ГОУ ВПО Моск. гос. строит. ун-т. М.: МГСУ, 2011. – 191 с.
8. Котенева И.В., Покровская Е.Н. Исследование кинетических параметров реакций гидрофобизации древесины/ Вестник МГСУ, Москва,2007г., №1, с.170-173.

ТЕКСТИЛЬ-БЕТОН. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА

Рави Сагар Поудел¹, студент магистратуры 2 год

А.Д. Жуков^{1,2}, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

И.В. Бессонов², канд. техн. наук, главный научный сотрудник

В.М. Бесфамильная¹, студентка бакалавриата 4 курс

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН

Аннотация. Текстиль-бетон – это общее название для трех групп материалов: бетонного полотна, дисперсно-армированного бетона и текстильно-усиленного бетон. Эти материалы объединяет присутствие в их структуре волокон: в виде арматуры, тканевых полотен или дисперсно-распределенных в минеральной матрице, а так же наличие мелкозернистого модифицированного бетона в качестве матрицы. Целью исследований, было разработка и оптимизация состава текстиль-бетона с учетом особенностей его применения в условиях Непала и возможностью использования тонкомолотые строительных отходов. Эксперимент проводился с использованием методов математического планирования и статистической обработки результатов. Полученные математические модели алгоритмировались с целью решения интерполяционных задач на ЭВМ. Аналитическая оптимизация осуществлялась по авторской методике. В результате эксперимента установлена аналитическая зависимость прочности изделий от расходов модификатора, тонкомолотого вторичного бетона и армирующего компонента. Аналитически установлен оптимальный расход тонкомолотых отходов, равный 550–555 кг/м³. Полученные результаты быть использованы при разработке рецептуры текстиль-бетона и, в частности дисперсно-армированного или текстильно-усиленного бетонов.

Ключевые слова: бетонное полотна, текстильно-усиленного бетон, фибробетон, мелкзернистый бетон, сухая смесь, планирование эксперимента, строительные отходы.

Текстиль-бетон – это общее название для трех групп материалов: бетонного полотна (Concrete Canvas), дисперсно-армированного бетона и текстильно-усиленного бетона (текстиль-армированного бетона) – Textile-reinforced concrete. Стеклофибробетон, как разновидность текстиль-бетона (сокращенно – GFRC/TRC/СФБ) это мелкозернистого модифицированный бетона армированный щелочестойкими стеклянными волокнами (или фиброй), которые равномерно распределяются по объему изделия. В качестве армирующего компонента могут использовать металлические, поливинилхлоридные волокна или фибру, базальтовое волокно и различные синтетические волокна [1–3].

Бетонное полотно (ткань) это гибкий тканевой материал, пропитанный сухими смесями на основе портландцемента, модифицирующих добавок и мягких волокон. После укладки и увлажнения происходит гидратация вяжущего и материал застывает в изначально приданной этому материалу конфигурации. Первичная гидратация осуществляется методом распыления или полного погружения материала в воду. Затвердевшее бетонное полотно формирует прочный, тонкий, стойкий к огню и воде материал, что делает возможным его ис-

пользование в гражданском и промышленном (даже военном) и гидротехническом строительстве, позволяет укрплять рельеф и сохранять грунты от подвижек, защищать различные объекты, быстро и качественно сооружать здания и т.д.

Бетонное полотно соответствовать следующим показателям: плотности порядка 1420 кг/м^3 , начало схватывания мелкозернистого бетона от 90 мин; прочности на разрыв – не менее 20 кН/м. прочности на прокол от 3 кН; прочности на сжатие не менее 40 МПа.

Текстильно-армированный бетон — это тип армированного бетона, в котором обычные стальные арматурные стержни заменены текстильными материалами. Волокна, используемые для изготовления ткани (базальтовое и углеродное волокно, джут, стекловолокно, кевлар, полипропилен, полиамиды (нейлон) и т.д.) такие как имеют высокую прочность на разрыв при минимальном удлинении [4, 5].

Первоначальное создание текстильно-армированного бетона (TRC) началось в 1980-х годах. При строительстве TRC важны четыре фактора, которые включают качество бетона, взаимодействие между текстилем и бетоном, количество используемых волокон и расположение текстильной арматуры внутри бетона.

Свойства текстиль-армированного бетона зависят от свойств мелкозернистого бетона, количество слоев армирования, материала армирующих сеток и размеров их ячеек. Важным условием является формирование адгезионных контактов между материалом бетона и армирующими элементами.

Размер частиц заполнителя для бетона тщательно подбирают. Модификацию мелкозернистого бетона осуществляют для коррекции его реологических характеристик, улучшения адгезии, повышения водонепроницаемости. Характерными особенностями TRC являются его тонкая структура и податливость, а также способность сохранять высокую прочность на разрыв которая достигается использованием длинных непрерывных волокон, сплетённых определенным образом.

Бетон, армированный текстильным материалом, обычно тоньше традиционного бетона, армированного стальной арматурой. Конструкция TRC обычно имеет толщину 50 мм. Этот материал используют при ремонтных работах, восстановлении или для продления срока службы существующих конструкций, это сокращает затраты на материалы и рабочую силу, необходимые для сноса этих существующих структур с целью создания новых.

Текстильно-армированный бетон используется при строительстве мостов. При обустройстве тоннелей. Представляет интерес применение в композиционного вяжущего и использование технологии торкретирования при выполнении строительных конструкций. Этот материал используется при создании архитектурных оболочек зданий и сооружений (рис. 1).

Способы изготовления текстиль-бетона варьируются от традиционного литьевого формования (стендовым способом или прокатом на конвейере) до пултрузии (Pultrusion). При изготовлении в формах сначала устанавливается арматура, далее заливается бетон и после его затвердевания осуществляется распултка.

В составе текстиль бетона, наравне с портландцементом используются также композиционные вяжущие, в том числе на основе вторичных технологических продуктов, порошковых отходов, а также тонкоизмельченных бетонов, полученных в процессе реновации жилья [6, 7].

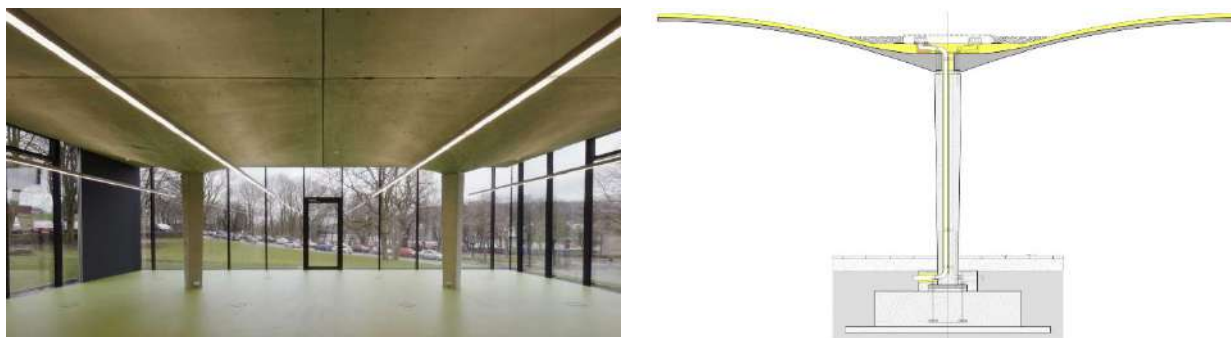


Рис. 1. Павильон в Аахене

Целью исследований, было разработка и оптимизация состава текстиль-бетона с учетом особенностей его применения в условиях Непала.

Реализация цели достигалась путем решения частных задач. Формировался обзор по видам и возможным областям применения текстиль-бетона, а также по технологиям изготовления этого материала. на основе математического планирования был проведен эксперимент, оптимизация и интерпретация результатов которого позволили сформировать предпосылки методологии подбора мелкозернистого бетона, как матрицы текстиль-бетона. В составе мелкозернистого бетона использовались тонкомолотые строительных отходов.

Эксперимент проводился на основе математического планирования. В качестве варьируемых факторов были приняты расходы портландцемента, тонкомолотых отходов, пластификатора и армирующего компонента. Расход воды устанавливается в соответствии с В/Ц в зависимости от требуемой удобоукладываемости смеси и не является независимым фактором. Функция отклика: прочность бетона при сжатии (Y_1) Условия эксперимента представлены в табл. 1. Расход портландцемента (X_1) принят постоянным и равным 440 кг/м³. Аналитическая оптимизация осуществлялась по методике, разработанной в МГСУ [8, 9].

Табл. 1. Условия эксперимента по оптимизации состава материала

Наименование фактора	Сим вол X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход пластификатора (Рп), % к расходу воды	X_2	5,5	0,25	0,3	0,8
Расход тонкомолотых отходов (Ро), кг/м ³	X_3	520	40	480	560
Расход армирующего компонента (Ра), кг/м ³	X_4	4,75	1,25	3,5	6

Тип, диаметр пластиковой арматуры и процент армирования текстиль-бетона в эксперименте не изменялся.

Установлена зависимость прочности при сжатии (Y_1) от варьируемых факторов. Алгебраический полином содержит факторы в кодированной виде (приведенном к интервалу от -1 до +1). Условия кодирования и декодирования представлены в табл.1.

Значимость коэффициентов уравнения устанавливали, сравнивая их по абсолютному значению с доверительным интервалом $\Delta b = 0,4$ МПа, который рассчитывали по критерию Стьюдента (t -критерию). Далее адекватность модели со значимыми коэффициентами проверяли по критерию Фишера (F -критерию). Модель (математический полином) имеет вид:

$$Y_1 = 36,1 + 1,6X_2 + 1,5X_3 + 1,9X_4 + 0,5X_2X_4 - 0,9X_3^2 \quad (1)$$

Анализ коэффициентов уравнения (1) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, положительные коэффициенты при X_2 , X_3 и X_4 позволяют сделать вывод, что увеличение значений каждого из варьируемых факторов (в установленных, в соответствии с условиями эксперимента, интервалах значений) увеличивает прочность материала. Во-вторых, положительный коэффициент при парном взаимодействии (X_2X_4) говорит о значимом совместном влиянии расходов пластификатора и армирующего компонента, что дает возможность предположить наличие синергетического эффекта. В-третьих, коэффициенты X_3 при и при X_3^2 свидетельствуют, что при постепенном увеличении расхода тонкомолотых отходов сначала имеет место рост прочности, а потом происходит её снижение. Функция $Y_1 = f_1(X_2, X_3, X_4)$ имеет локальный экстремум по X_3 , и возможно применение аналитической оптимизации.

Методология аналитической оптимизации основывается на том, что нелинейные зависимости, полученные в результате математической обработки результатов эксперимента и их статистического анализа, являются, с одной стороны, математическими моделями, адекватно описывающими изучаемое явление, и адекватность эта подтверждается проверкой статистических гипотез.

1). Определяем оптимальное значение по фактору по X_3 :

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_3} = 1,5 - 1,8X_3 = 0 \rightarrow X_3 = \frac{1,5}{1,8} = 0,83$$

В кодированной виде оптимальный расход тонкомолотой добавки (строительные отходы) равен $X_3 = 0,83$, а в натуральном значении (см. данные таблицы 1) составляет:

$$P_0 = 520 + 0,83 \times 40 = 553 \text{ кг/м}^3.$$

С учетом ошибки эксперимента и доверительных интервалов оптимальный расход тонкомолотой добавки строительных отходов можно принять равным 550–555 кг/м³.

2). Осуществляем оптимизацию функций $Y_1 = f_1(X_2, X_3, X_4)$ по $X_3 = 0,83$:

$$Y_1 = 36,1 + 1,6X_2 + 1,5 \times (0,83) + 1,9X_4 + 0,5X_2X_4 - 0,9 \times (0,83)^2$$

Получаем оптимизированный полином:

$$Y_1 = 36,6 + 1,6X_2 + 1,9X_4 + 0,5X_2X_4 \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рис. 2. Оценка свойств мелкозернистого модифицированного бетона при из-

вестном расходе компонентов может быть осуществлена с помощью программы для ЭВМ.

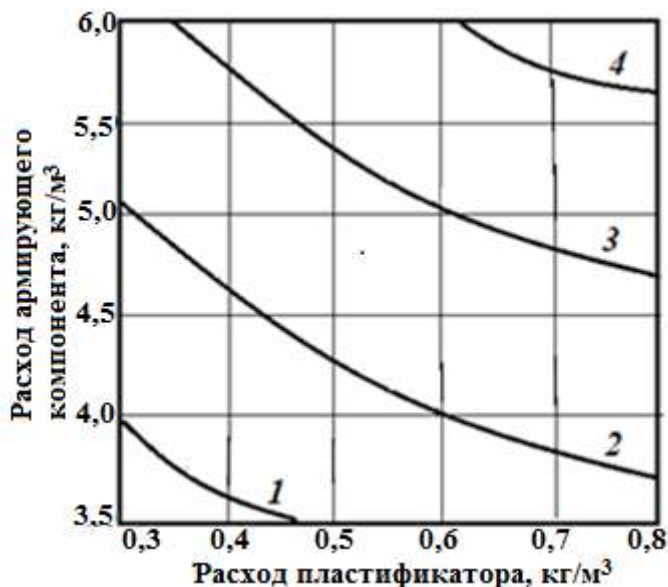


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии от расхода армирующего компонента и расхода тонкомолотых отходов при оптимальном расходе тонкомолотых отходов, равном 550–555 кг/м³. Прочность при сжатии, МПа: 1 – 30; 2 – 35; 3 – 40; 4 – 45

Развитие технологии текстиль-бетон является одним из наиболее развивающихся направлений строительства. Другим важным аспектом является использование в рецептуре строительных материалов отходов (вторичных продуктов) промышленности, технологии бетона или продуктов, получаемых в результате сноса ветхого или реновационного жилья. Такие отходы производятся, накапливаются, но мало используются. Поэтому разработка технологий утилизации бетонного лома является актуальной.

Полученные результаты в процессе реализации которых установлены многофакторные зависимости прочности изделий от расходов модификатора, тонкомолотого вторичного бетона и армирующего компонента, показывают, что разработанные методы могут быть использованы при получении текстиль-бетона и, в частности дисперсно-армированного или текстильно-усиленного бетонов.

В условиях Непала наиболее перспективным является использование бетонного полотна (Concrete Canvas). Технология полотна требует минимум затрат, а области его применения достаточно широки: от строительства жилья до облицовки каналов и склонов, а так же для проведения ремонтных работ.

Библиографический список

1. Лесовик В.С. Конструкционные материалы. Настоящее и будущее // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. №. 1 (100). С. 9-16.
2. Lesovik V. S., Popov D. Yu., Glagolev E. S. Textile-concrete-effective reinforced composite of the future. 2017. No. 3. S. 81 to 84.
3. Efimov Boris , Isachenko Sergey, Kodzoev Mukhamad-Basir, Dosanova Gulzar and Ekaterina Bobrova. Dispersed reinforcement in concrete technology 01032

Published online: 09 August 2019 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032>

4. Ehlig D., Schladitz F., Frenzel M., Curbach M. Textilbeton — Ausgeführte Projekte im überblick. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 11, S. 777—785.

<https://doi.org/10.1002/best.201200034>

5. Hankers C., Matzdorf D. Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit textilbewehrtem Spritzbeton. Fachausatz, S. 10. Access mode: <http://www.torkret.de/leistungsvielfalt/kernkompetenzen/textilbeton-carbonbet-on.html>

6. Gelbrich S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textil-bewehrtem Beton und glasfaserverstrktem Kunststoff. Leichter bauen — Zukunft formen. TUDALIT, 7 (2012), S. 9.

7. Pyataev E.R., Pilipenko E.S., Burtseva M.A., Mednikova E.A., Zhukov A.D. Composite material based on recycled concrete / FORM 2019. E3S Web of Conferences 97, 02032 (2019). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 032015(2018) doi:10.1088/1757-899X/365/3/032041.

8. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // Нанотехнологии в строительстве научный интернет-журнал. — 2020. — Том 12, № 6. — С. 313–319. — DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319.

9. Zhukov A., Shokodko E. (2020) Mathematical Methods for Optimizing the Technologies of Building Materials In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1116. Pp. 413-421. Springer, Cham. First Online 31 January 2020.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_40.

ВЛИЯНИЕ СУПЕРАБСОРБИРУЮЩЕГО ПОЛИМЕРА НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

К.Б. Шарафутдинов, аспирант

Г.Г. Кашеварова, д-р техн. наук, профессор

К.А. Сарайкина, канд. техн. наук, доцент

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования влияния суперабсорбирующего полимера (САП) на прочность бетона. Были изготовлены бетонные образцы с введением добавки САП в количестве 0 - 0,5% от массы цемента. Введение САП влияет на консистенцию раствора и повышает водопотребность бетонной смеси. Выявлена оптимальная дозировка исследованного типа САП в качестве добавки в бетон. Прочность бетона не снижается, если дозировка САП в бетоне составляет не более 0,5% от массы цемента.

Ключевые слова: Суперабсорбирующие полимеры, САП, бетон, прочность, водопотребность.

Суперабсорбирующие полимеры (САП) способны поглощать большое количество жидкости, длительное время удерживать её и постепенно выделять обратно. Эту способность можно использовать для улучшения прочностных характеристик затвердевающего бетона за счет эффекта внутреннего отверждения. Частицы САП, абсорбировавшие воду, будут постепенно отдавать её обратно в бетон и это будет способствовать более полной гидратации цемента во время твердения бетона. Объем абсорбируемой жидкости может в 400 раз превышать массу частицы САП, поэтому полимер многократно увеличивается в объеме что приводит к негативному эффекту для бетона – на месте частиц САП образуются поры, которые в свою очередь снижают прочность бетона. Исследования, проведенные Sung-Hoon Kang [3] показывают, что объем пустот существенно зависит от абсорбционной способности используемого САП. Таким образом, даже если дозировка САП будет небольшой, то объем пустот, образовавшихся в затвердевшем бетоне, может оказаться большим именно из-за высокой абсорбционной способности САП. Кроме этого, большое влияние на свойства затвердевшего бетона оказывают размер частиц добавки, способ её производства, а также дозировка добавки относительно массы цемента.

Среди отечественных исследований можно выделить исследования Д.Ю. Попова, В.С. Лесовика, В.С. Мещерина [1,2]. Результаты их экспериментов показали увеличение прочности бетона на сжатие на 7% при дозировке САП, равной 0.3%. При такой же дозировке САП сопоставимые результаты были получены и зарубежными исследователями Gemma Rodríguez de Sensale [4], Yawen Tan [5]. Jianhui Liu [6] удалось получить незначительное увеличение прочности только при введении САП в дозировке равной 0.3% совместно с противоусадочной добавкой.

В то же время существуют и другие данные, показывающие, что дозировка САП, равная 0.3% не увеличивает прочность, а показывает обратный эффект. Например, исследование Eugenia Silva [7] с тремя типами САП показало сни-

жение прочности на 5-15%. Сопоставимые результаты были получены в исследовании Laurence De Meyst [8], где снижение прочности при той же дозировке САП составило 10-12% через 7 и 28 суток твердения.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что вопрос оптимальной дозировки добавки САП поднимается во многих исследованиях, но результаты экспериментов часто не сопоставимы ввиду различий в типе САП, составе бетона, В/Ц соотношениях бетонной смеси и методик проведения экспериментов. Однозначно можно сказать, что введение САП будет увеличивать водопотребность смеси, что в свою очередь негативно скажется на прочности затвердевшего бетона. Введение САП может оказаться эффективным в высокопрочных бетонах с низким В/Ц [1], однако ввиду отсутствия экспериментальных данных по исследуемой добавке будет правильно начать исследование с влияния различных её дозировок на прочность пока без применения пластифицирующих добавок.

Целью данных экспериментальных исследований являлось определение влияния дозировки исследуемой добавки САП на прочность затвердевшего бетона, а также оценка целесообразности и эффективности применения этого типа САП в качестве добавки в бетон. Для исследования был выбран суперабсорбирующий полимер (САП) корейского производства. Абсорбционная способность исследуемого САП составляет 400 г воды на 1 г вещества, а средний размер частиц составляет 300мкм.

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы-балочки размерами 4x4x16 см. В качестве заполнителя был использован мелкозернистый песок фракции 0 – 2.5, в качестве вяжущего был использован цемент М500. Суперабсорбентполимер (САП) вводился в сухую смесь и перемешивался вручную перед добавлением воды. Дозировки САП были выбраны равными 0% (контрольный образец), 0.25%, 0.5%, 1%.

Всего было изготовлено две серии образцов-балочек. Образцы первой серии формовались по нормальной консистенции раствора согласно ГОСТ 310.4-81. Увеличение дозировки САП повышало водопотребность раствора, поэтому перед формованием экспериментальных образцов была определена зависимость В/Ц раствора от дозировки САП для его нормальной консистенции. В пределах дозировки САП от 0 до 1% полученная зависимость оказалась линейной и описывалась уравнением: $V/C = 0.42 + (0.08 * \%_{САП})$. Эта зависимость применима только для использованных в данном эксперименте типов цемента и песка.

При формовании второй серии образцов значение В/Ц = 0.5 было установлено постоянным для всех растворов, а при замешивании каждого состава определялся расплыв конуса раствора. Это значение В/Ц было подобрано так, чтобы при дозировке САП, равной 1% расплыв конуса раствора составлял 106-115 мм. При меньших дозировках САП и том же значении В/Ц наблюдалось увеличение величины расплыва конуса. График зависимости расплыва конуса от дозировки САП показан на рис.2.

Прочность бетона на изгиб и сжатие определялась через 28 суток твердения в нормальных условиях. Результаты испытаний представлены в табл.1.

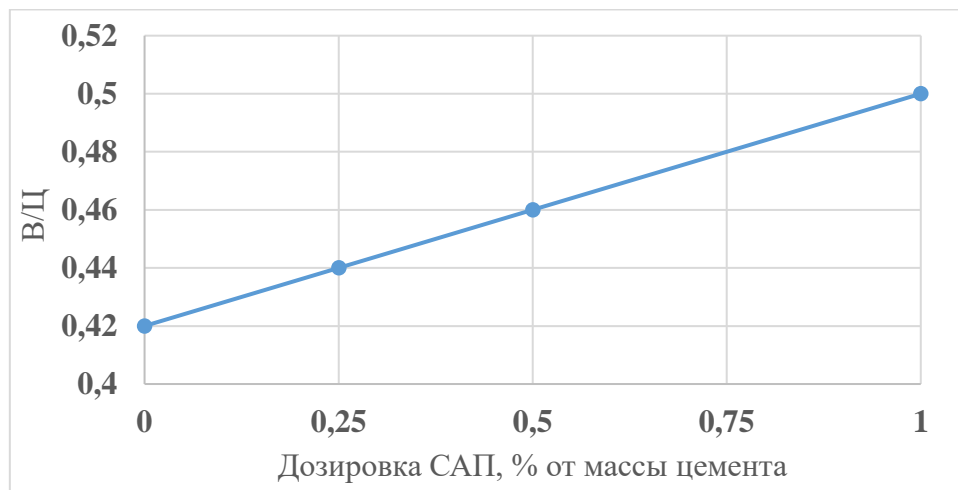


Рис. 1. Значения В/Ц для соответствующей дозировки САП для нормальной консистенции раствора.

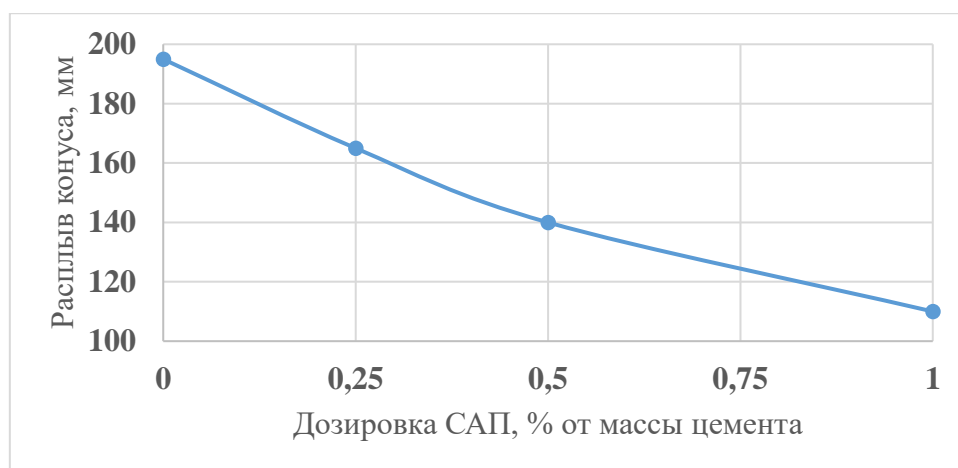


Рис. 2. Зависимость расплыва конуса от дозировки САП при В/Ц = 0.5

Таблица 1. Результаты испытаний образцов

№ серии-состава	В/Ц	САП, % от массы цемента	Распływ конуса, мм	Средняя плотность, г, см ³	Прочность на изгиб, R _{изг} , МПа	Прочность на сжатие, R _{сж} , МПа
1-1	0.42	0	110	2,21	5,64	28,17
1-2	0.44	0,25	110	2,25	5,44	30,41
1-3	0.46	0,5	110	2,17	5,48	28,57
1-4	0.5	1	110	2,09	5,22	21,85
2-1	0.5	0	195	2,17	5,24	17,66
2-2	0.5	0,25	165	2,14	5,39	19,47
2-3	0.5	0,5	140	2,12	5,51	18,56
2-4	0.5	1	110	2,04	3,89	13,94

На рис.3-4 изображены графики зависимости прочности образцов на изгиб и сжатие от дозировки исследуемого САП. На графиках приведены значения прочности, определяемой согласно ГОСТ 310.4-81, а также средние значения по всем испытанным образцам.

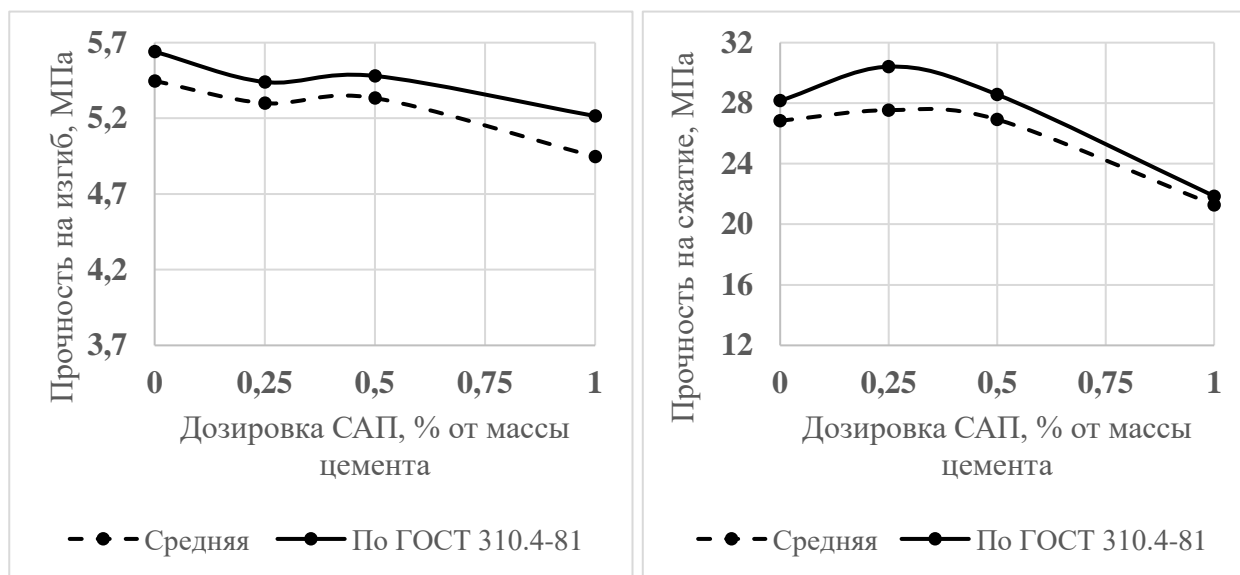


Рис.3. Графики зависимости прочности образцов на изгиб и сжатие от дозировки САП при постоянном распыле конуса

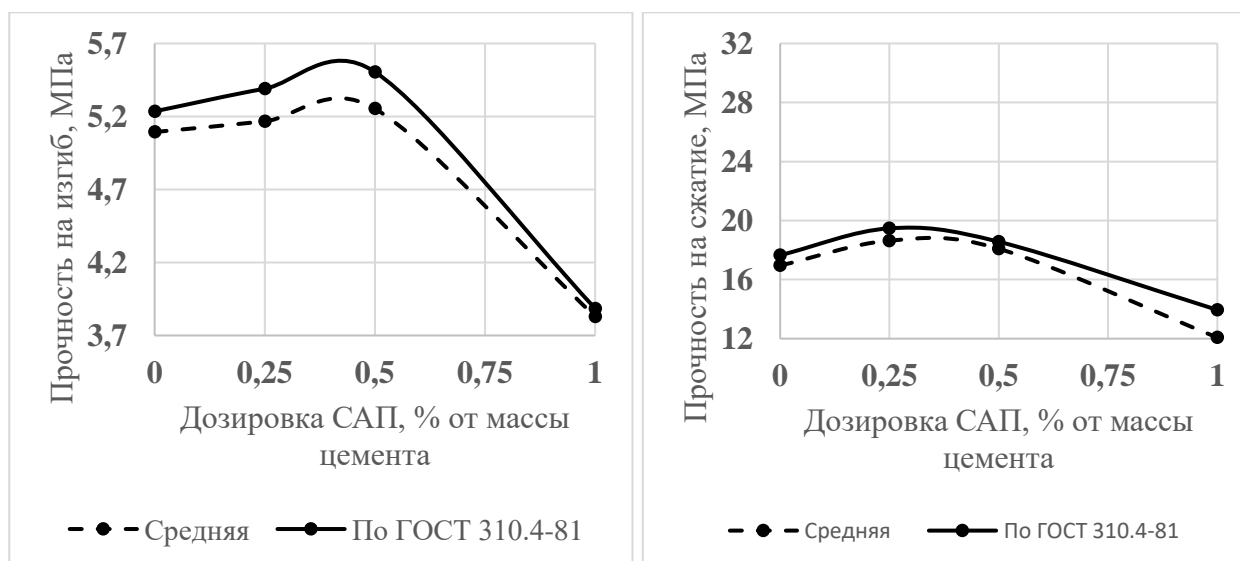


Рис.4. График зависимости прочности образцов на изгиб и сжатие от дозировки САП при постоянном В/Ц=0.5

Приведенные выше графики можно представить в виде участка поверхности (рис.5), точки которого образованы тремя значениями: В/Ц, дозировка САП в % от массы цемента и прочность бетона в МПа.

Из приведенных графиков видно, что прочность на изгиб и сжатие не снижается при дозировках САП до 0.5%, однако при дальнейшем увеличении дозировки до 1% наблюдается снижение прочности затвердевшего бетона на 20-25%. Можно сделать вывод, что для дальнейших исследований данного типа САП необходимо выбирать его дозировки не более 0.5% от массы цемента и

более подробно выяснить влияние на прочность дозировок, близких к 0.25% от массы цемента. Стоит отметить, что данный эксперимент также показал зависимость прочности от консистенции раствора, замешанного при формовании. Увеличение водоцементного соотношения снизило прочность, а по графикам на рис.5 видно, что наибольшая прочность бетона была достигнута при замешивании растворов именно по нормальной их консистенции.

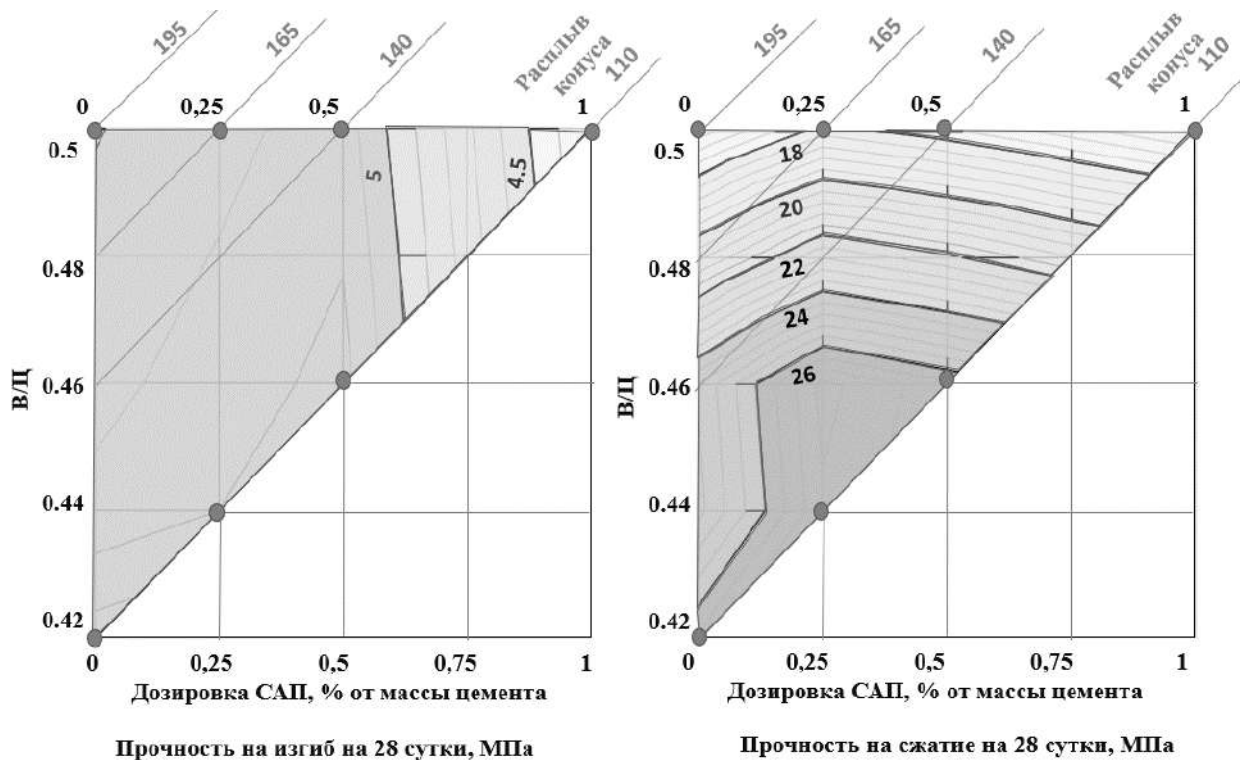


Рис.5. Величины прочности образцов на изгиб и сжатие в зависимости от соотношения В/Ц и дозировки САП

В данном исследовании прочность бетона на сжатие незначительно повысилась при дозировках САП, равных 0.25% от массы цемента. Результаты испытаний прочности согласуются с исследованиями Д.Ю. Попова, В.С. Лесовика, В.С.Мещерина [2]. Можно предположить, что дозировки исследуемого САП, равные 0.3% также покажут положительные результаты при совместном введении САП и суперпластификатора.

Таким образом, для правильного проведения дальнейших исследований необходимо определять водопотребность раствора при введении различных дозировок САП, а далее замешивать все опытные составы по нормальной консистенции раствора, так как рост В/Ц соотношения будет негативно сказываться на прочности затвердевшего бетона. Для более эффективного применения САП в бетоне следует рассмотреть его влияние на прочность бетона при совместном введении САП с пластифицирующими и противоусадочными добавками.

Библиографический список

1. Мещерин, В.Н. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны — Технологии производства и сферы применения / В.Н. Мещерин // Механизация строительства. 2008. №8. С. 32-35.

2. Попов, Д.Ю. Влияние суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку цементного камня / Д.Ю.Попов, В.С.Лесовик, В.С.Мещерин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 1-7.
3. Kang S H, Hong S G and Moon J 2018 The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete / Construction and Building Materials. 2018. №172. pp 29-40
4. Sensale G R and Goncalves A F Effects of Fine LWA and SAP as Internal Water Curing Agents / International Journal of Concrete Structures and Materials. 2014. №8
5. Tan Y, Chen H, Wang Z and Xue C 2019 Performances of Cement Mortar Incorporating Superabsorbent Polymer (SAP) Using Different Dosing Methods / Materials. 2019. №12
6. Liu J, Farzadnia N, Shi C and Ma X Shrinkage and strength development of UHSC incorporating a hybrid system of SAP and SRA / Cement and Concrete Composites. 2019. №97. pp 175-189
7. Silva E, Alejandro M R M, Lopes A NM and Dias R T F Effect of sap on the autogenous shrinkage and compressive strength of high-strength fine-grained concrete / 2020
8. Meyst L, Kheir J, Roberto J T F and Tittelboom K V The Use of Superabsorbent Polymers in High Performance Concrete to Mitigate Autogenous Shrinkage in a Large-Scale Demonstrator / Sustainability. 2020. №12

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ
В АСФАЛЬТОБЕТОНАХ

Т.Ч. До¹, аспирант

С.С. Иноземцев¹, канд. техн. наук, доцент

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. В статье представлены теоретические предпосылки, которые могут быть использованы для описания механизма самовосстановления состояния структуры асфальтобетонов, содержащих инкапсулированный восстанавливающий агент. В статье представлены основные положения теории Флори – Хаггинса, в соответствии с которой восстановительный эффект может быть реализован за счет способности молекул органического вяжущего самопроизвольно спутываться между собой. При этом интенсивность этого процесса зависит от близости молекул между собой и скорости самопроизвольного движения, которое увеличивается с ростом температуры. А в соответствии с теорией адгезии восстановление состояния структуры асфальтобетона может быть обусловлено механизмом образования адгезионных связей с помощью инкапсулированного модификатора. Для описания особенностей формирования адгезионных связей при восстановлении могут быть использованы подходы, описанные в механической, молекулярной, химической, диффузной, релаксационной теории адгезии или теории слабых граничных слоев.

Ключевые слова: самовосстановление, механизм, асфальтобетон, битум, структура.

Асфальтобетоны эксплуатируются в среде, в которой он подвергается как механическим воздействиям, так и комплексу погодно-климатических факторов, что обуславливает необходимость разработки новых технических решений, позволяющих повысить эксплуатационную стойкость материала [1, 2].

Большее распространение среди технологических решений, направленных на формирование нового эксплуатационного свойства – способности к самовосстановлению, получили разработки с использованием инкапсулированных восстанавливающих агентов [3...6]. Для использования в составе асфальтобетона восстанавливающие агенты вводятся в виде различных по форме контейнеров, изготовленных на основе органических соединений, которые отверждаясь формируют капсулы [7...10].

Технология самовосстановления, реализуемая с применением инкапсулированного модификатора, направлена на инициирование вторичного процесса структурообразования в период эксплуатации, в результате которого происходит формирования дополнительных структурных связей. В результате реализации такого подхода происходит восстановление баланса структурных связей и состояния структуры материала способно функционировать в дорожной конструкции.

Особенности реализация способности асфальтобетона к самовосстановлению обуславливается его структурными и термопластичными свойствами. При

этом особенности термопластичной матрицы обуславливают наличие восстановительного эффекта за счет собственного потенциала вяжущего [11].

Стоит отметить, что в составе асфальтобетона собственным потенциалом к самостоятельному восстановлению (самозалечиванию - self-healing) обладает битум, который зависит от его физико-химических свойств [12]. Самостоятельное восстановление битума в асфальтобетоне происходит в условиях отсутствия динамического воздействия механического нагружения, которое направлено на ликвидацию дефектов в материале, образованных в результате усталостных повреждений. Интенсивность процесса восстановления будет определяться длительностью отдыха материала от повторных механических нагрузок [12...14].

Этот эффект обуславливается способностью молекул органического вяжущего самопроизвольно спутываться между собой. При этом интенсивность этого процесса зависит от близости молекул между собой и скорости самопроизвольного движения, которое увеличивается с ростом температуры. Так, при увеличении температуры кинетическая энергия молекул вяжущего и средние расстояния между ними возрастают. Это закономерно приводит к естественным физическим явлениям: увеличению объема материала и снижению вязкости у термопластического материала [17]. В этом случае в зоне дефекта (трещины) при достаточной близости ее поверхностей будет происходить самопроизвольное сращивание вследствие снижения поверхностного натяжения на границе «материал - воздух». Для описания указанного явления можно привлечь теорию Флори – Хаггинса, согласно которой растворение одной фазы в другой происходит при значении изобарно-изотермического потенциала системы:

$$\Delta G = \Delta H_m - \Delta ST < 0$$

(где ΔH_m – изменение энтальпии; ΔS – изменение энтропии). Согласно Гилдебрандту изменение энтальпии может быть оценено с использованием параметра растворимости δ :

$$\Delta H_m = V_m \Phi_1 \Phi_2 (\delta_1 - \delta_2)^2,$$

где Φ_i – объемная доля компонента; V_m – объем системы.

Для случая с термопластичной матрицей рационально параметр растворимости определять:

$$\delta_i = a \left(\frac{\sigma}{\sqrt[3]{V_m}} \right)^b,$$

где σ – поверхностное натяжение; a, b – эмпирические коэффициенты.

При установлении зависимости поверхностного натяжения от температуры можно произвести оценку возможности восстановления (залечивания) трещины при расположении ее стенок на расстоянии H_{cr} :

$$F = \frac{A}{H_{cr}^3},$$

где F – сила притяжения; A – константа Гамакера.

При этом очевидно, что достичь первоначального уровня целостности, при котором спутанность молекул обеспечивает исходное состояние структуры за счет самопроизвольного процесса восстановления невозможно.

Использование в качестве восстанавливающего агента веществ на основе органических масел обуславливается их способностью хорошо растворяться в битумной матрице, что способствует восстановлению состава легких фракций и скорости самопроизвольного движения молекул вяжущего. За счет этого улучшается способность молекул органического вяжущего самопроизвольно спутываться между собой, обеспечивая большую эффективность восстановления.

При этом в ряде работ отмечается [16...18], что процесс самовосстановления битума может происходить на молекулярном уровне за счет обратимых водородных связей (reversible hydrogen bonding) с образованием новых сшивок и цепей через дитопические и тритопические молекулы [18]. Отсутствие механической нагрузки, приводящей к разрушению связей, является условием обеспечивающим «отдых» материала, в период которого происходят процессы восстановления. Так же с увеличением температуры, в которой материал находится в период отдыха, интенсивность процесса восстановления возрастает.

Для реализации технологии самовосстановления в составе асфальтобетона могут быть использованы различные восстановители, инкапсулированные в контейнеры. Так восстановители на основе органических соединений выполняют функцию омолаживателей (rejuvenator) матрицы, увеличивая собственный потенциал битумного вяжущего к восстановлению. Восстановители на основе полимеров способны выполнять функцию склеивания поверхностей дефектов в композите за счет формирования новых адгезионных связей в процессе преобразования.

Формирование новых адгезионных связей представляет собой двухстадийный процесс, где на первой стадии происходит перемещение восстановителя (адгезива) внутрь материала (субстрата) с ориентацией молекул в граничном слое, а на второй – взаимодействие адгезива и субстрата под влиянием химических или сил Ван-дер-Ваальса. Так на расстоянии между молекулами менее 0,5 нм действуют ковалентные связи, на расстоянии от 1 до 100 нм – ионные связи и силы Ван-дер-Ваальса [19].

Для описания особенностей формирования адгезионных связей при восстановлении могут быть использованы подходы, описанные в механической, молекулярной, химической, диффузной, релаксационной теории адгезии или теории слабых граничных слоев.

В соответствии с механической теорией адгезией прочность адгезионных связей зависит от свойств поверхности субстрата и прочности слоя адгезива, который проникая в неровности, шероховатости и дефекты после затвердевания формирует зоны повышенного трения и заклинивания [20].

Образование связей между полярными функциональными группами обеспечивает прочность адгезионного соединения, которое в соответствии с адсорбционной (молекулярной) теорией адгезией может быть нарушено при изменении температуры [21]. А теория слабых граничных слоев предполагает образование граничного слоя со свойствами отличными от свойств адгезива и субстрата [22]. В этом случае прочность новых адгезионных связей определяется интенсивностью взаимодействия адгезива и субстрата.

В диффузной теории адгезии [23] при взаимодействии полимеров молекулы одного диффундируют внутрь другого до 10 мкм и растворяются без образова-

ния различной границы раздела фаз. Для реализации такого механизма формирования адгезионных связей должно выполняться термодинамического и кинетического условия, обеспечивающее необходимую совместимость и подвижность макромолекул.

В соответствии с химической теорией адгезии [19] функциональные группы адгезива адсорбируются на поверхности субстрата и между ними образуются ковалентные или ионные связи, обеспечивая прочное сцепление. При этом необходимо наличие реакционноспособных функциональных групп для формирования прочных ковалентных связей между поверхностью адгезива и поверхностью субстрата [24].

В релаксационной теории адгезии [25] рассматривается влияние процессов возникновения внутренних напряжений и деформаций на прочность адгезии, которая выражается в изменении числа связей, обеспечивающих сцепление. Также существует электрическая теория [26] в соответствии с которой сцепление осуществляется при электризации контакта адгезива и субстрата, вследствие возникновения разности потенциалов, которая к органоминеральным композитам не может быть применима.

Таким образом, теоретические основы математической модели термодинамики растворов полимером в теории Флори – Хаггинса и положения теории адгезии использованы для описания механизма самовосстановления асфальтобетонов, содержащих инкапсулированный восстанавливающий агент.

Библиографический список:

1. Королев Е.В., Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Самошин А.П., Иноземцев С.С. Обоснование выбора способа наномодифицирования асфальтобетонных смесей. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 40-43.
2. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the weathering resistance of asphalt by nanomodification. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 147-157.
3. Ghosh Swapan Kumar. Self-healing materials: fundamentals, design Strategies, and applications (1st ed.). Weinheim: Wiley. 2009. VCH. 307 p.
4. Wiktor V., Jonkers H.M. Bacteria-based concrete: From concept to market. Smart Materials and Structures. 2016. Vol. 25 Issue 8. 084006.
5. Inozemtcev, S.S., Korolev, E.V. Review of Road Materials Self-healing: Problems and Perspective. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 855(1), 012010.
6. Schlangen E., Sangadji, S. Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms - Recent advances in self healing concrete and asphalt. Procedia Engineering. 2013. Vol. 54. Pp. 39-57.
7. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological Features of Production Calcium-Alginate Microcapsules for Self-Healing Asphalt. MATEC Web of Conferences. 2018. 251,01008.
8. Jonkers H.M., Thijssen A., Muijzer G., Copuroglu O., Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological engineering. 2010. Vol. 36 Issue 2. Pp. 230-235.

9. Wang J., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction Building Materials*. 2014. Vol. 68, Pp.110–119.
10. Feng X. Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules. *Proc. Int. Conf. on Durability of Concrete Structures*. 2008. Pp. 195-204.
11. Bhasin A., Palvadi S., Little D. Influence of Aging and Temperature on Intrinsic Healing of Asphalt Binders. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011. Vol. 2207. Issue 1. Pp. 70-78.
12. Bhasin A., Palvadi S., Little D. Influence of Aging and Temperature on Intrinsic Healing of Asphalt Binders. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011. Vol. 2207. Issue 1. Pp. 70-78.
13. Tang J., Liu Q., Wu Sh., Ye Q., Sun Y., Schlangenc E. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 113. Pp. 1029-1033.
14. Xie W., Castorena C., Wang Ch., Kim Y.R. A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 154. Pp. 771-779.
15. Д. В. Сивухин. *Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Том II* М.: Наука, 1990, 591 с.
16. Fisher H. Self repairing materials – dream or reality? *Natural Science*. 2010. Vol. 2. No. 8. Pp. 873-901.
17. Qui J., M.F.C. van de Ven, Wu S., Molenaar A.A.A. Investigation of self healing capability of bituminous binders. *Road Materials Pavement Design*. 2009. Vol. 10. Issue 1. Pp. 81-94.
18. Phillips M.C. Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing. In: *Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders*, 1998, Luxembourg. Paper no. 115.
19. Евдокимов Ю.М. Адгезия. От макро- и микроуровня к наносистемам. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ. 2011. 208 с.
20. Берлин А.А., Басин В.Е. *Основы адгезии полимеров*. М.: Химия, 1969. 320 с.
21. Дебройн Н., Гувинк Р. Адгезия. Клеи, цементы, припои. М., Издательство иностранной литературы. 1954. 600 с.
22. Бикерман Я.О. Новые представления о прочности адгезионных связей полимеров. *Успехи химии*. 1972. Т. 41. № 8. С.1431-1464.
23. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. Москва: Ростехиздат. 1960. 244 с.
24. Laurila T., Vuorinen V., Mattila T.T., Turunen M., Paulasto-Kröckel M., Kivilahti J.K. *Interfacial Adhesion in Polymer Systems. Interfacial Compatibility in Microelectronics*. 2012. Pp. 101-133.
25. Москвитин Н.И. *Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания*. Москва: Лесная промышленность. 1964. 248 с.
26. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. *Адгезия твердых тел*, М., Наука. 1973. 278 с.

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ БЕТОНЫ ДЛЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Н.И. Шестаков¹, канд. техн. наук, доцент

Д.С. Алексеева¹, студент

Д.В. Полосина¹, студент

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Оксид азота- одно из наиболее опасных соединений для здоровья человека. В статье предложен метод снижения уровня ПДК оксидов азота, путем использования акустических экранов с составом из фотокаталитического бетона. В качестве фотокаталитической добавки был использован диоксид титана, а также в состав была добавлена целлюлозная суспензия, для повышения пористости. Методом математического планирования составлен двухфакторный композиционный эксперимент, в результате которого установлены степени влияния добавок диоксида титана и целлюлозной суспензии на прочность, плотность и водопоглощение изучаемых композитов.

Ключевые слова: диоксид титана, фотокаталитические материалы, целлюлозная суспензия, автомобильные дороги, акустические экраны.

Наиболее загрязнёнными участками воздушного бассейна являются автомобильные дороги с высокой интенсивностью движения. В жилых участках содержание загрязняющих веществ в среднем в 1,2 раза ниже, чем в центре, и почти в 1,5 раза, чем вблизи автотрасс.

Полностью исключить негативное влияние транспорта на качество воздуха невозможно, но снизить вполне реально. Из множества технологий предлагается рассмотреть применение на участках с повышенным содержанием оксидов азота материалов, обладающих фотокаталитическими свойствами. А именно элементы автомобильных дорог – акустические экраны, из-за их конструктивного решения.

Конструкция акустического экрана представляет собой сборную конструкцию, состоящую из фундамента, несущей конструкции и панелей. На участках Московской кольцевой автомобильной дороги (МКАД) установлены такие экраны, основная функция которых уменьшить негативное воздействие от автомобильной дороги на жилые участки. Акустические экраны могут быть отражающими или отражающе-поглощающими, в зависимости от применяемых материалов и конфигурации (Рис. 1).

Границы варьирования количества добавок были получены посредством планирования двухфакторного композиционного эксперимента. Взяты следующие факторы: X_1 – количество фотокаталитической добавки по отношению к массе портландцемента; X_2 – количество целлюлозной суспензии по отношению к массе портландцемента. Основные уровни X_1 и X_2 – 1,0 и 0,75, шаг варьирования – 0,5 и 0,25, соответственно. В качестве функции отклика рассматривается предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток.

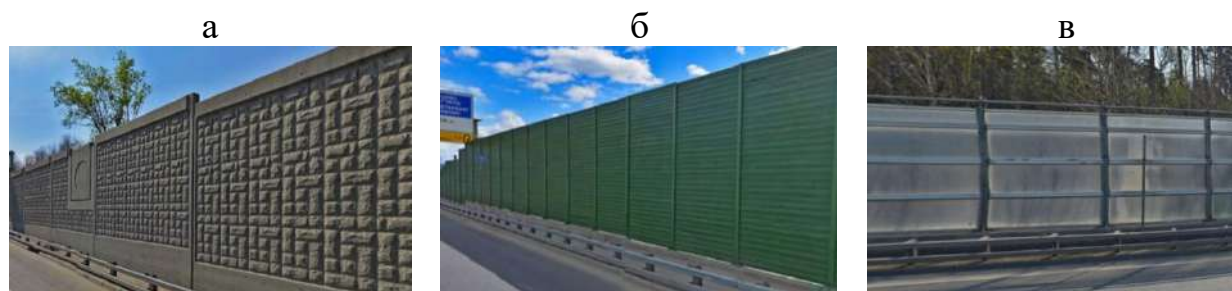


Рис. 1. Акустические экраны, установленные на МКАД
а) железобетонные, б) металлические, в) полимерные

Таблица 1. Составы и свойства композиционных вяжущих

Состав	Содержание добавок, % от массы ПЦ		Выходные параметры		
	TiO ₂	Целлюлоза	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение по массе, %
К	-	-	2064	93,5	5,3
1	0,5	0,5	2129	99,7	4,8
2	1,5	0,5	2069	101,5	4,6
3	0,5	1	2057	74,9	4,4
4	1,5	1	2054	68,7	4,7
5	0,3	0,75	2036	85,3	3,0
6	1,7	0,75	2005	87,7	3,2
7	1	0,4	2048	93,4	4,8
8	1	1,1	2026	55,9	4,6
9	1	0,75	2073	75,5	4,8

На основе результатов лабораторных испытаний цементного камня с различным содержанием факторов зависимость функции отклика имеет следующий вид:

$$R_{сж} = 75,43 - 0,12X_1 - 13,75X_2 - 1,89 X_1X_2 + 6,95 X_1^2 + 0,98 X_2^2$$

Данное уравнение регрессии показывает незначительное влияние диоксида титана на снижение прочности. Влияние целлюлозной суспензии больше сказывается на прочности образцов. При максимальном содержании влияние добавки может достигать 40% в худшую сторону относительно контрольного образца. Волокна целлюлозы, набухая, впитывают значительное количество воды, тем самым увеличивая вязкость цементного теста. Затем, в процессе твердения вяжущего, вода отделяется из набухшей целлюлозы и способствует образованию концентрированных пор в составе композита. Диоксид титана, в свою очередь, являясь водонерастворимым компонентом, снижает показатель водопоглощения за счет заполнения капиллярных пор.

Выводы:

При условии замены существующих акустических экранов на фотокаталитические произойдет снижение экологической нагрузки на воздушный бассейн

МКАД и повлияет на снижение уровня ПДКс.с. по оксидам азота до допустимого уровня.

По приведенным результатам исследований установлено, что прочность, плотность и водопоглощение полученных композитов в значительной степени зависит от количества введённой целлюлозной суспензии и частично от количества TiO_2 .

Библиографический список:

1. О.Б. Ляпидевская., М.А. Фрайнт. Фотокаталитический бетон для дорожного строительства // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 125-130.
2. Шестаков Н.И., Полосина Д.В., Алексеева Д.С. Перспективы применения акустических экранов из фотокаталитических бетонов на примере МКАД // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Молодые учёные России». Пенза. 2020. С. 39-43. DOI: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44025810>.
3. Слесарев М.Ю., Попов К.В. Исследование эффективности применения фотокаталитических бетонов в городском строительстве // Современное строительство и архитектура. 2017. №3 (07). С. 18-20.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОВЫХ ШЛАМОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УКРЕПЛЕННОГО ГРУНТА В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.И. Шестаков¹, канд. техн. наук, доцент

В.Н. Пыстин² канд. техн. наук, доцент

К.Л. Чертес², д-р техн. наук, профессор

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»*

Аннотация. В статье рассматривается возможность получения укрепленных грунтов на основе буровых шламов и различных вяжущих веществ. Исследованы буровые шламы из накопителей Ванкорского и Сузунского месторождений. В качестве вяжущих рассматриваются портландцемент, известь и строительный гипс. Полученный грунтовой композит на основе буровых шламов, по своим характеристикам близок к природным грунтам и имеет перспективы применения при строительстве автомобильных дорог, отсыпке площадок отдыха и других сооружений.

Ключевые слова: автомобильные дороги, буровые шламы, отходы, земляное полотно, укрепление грунтов.

При реализации национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», дорожная отрасль стала нуждаться в большом количестве качественных и доступных строительных материалов. Нехватка остро ощущается не только на материалах для производства асфальтобетона, но и для возведения земляного полотна.

Земляное полотно является одним из основных конструктивных элементов автомобильной дороги, от которого в значительной степени зависит долговечность как вышележащих слоев, так и всей конструкции в целом.

Самым многотоннажным материалом при возведении земляного полотна является грунт. Поверхностный слой грунтов (плодородной или растительный грунт) снимается с участка поверхности, занимаемой земляным полотном, перед началом работ и в строительстве не используется, а основным материалом является грунт естественного залегания. Свойства грунтов зависят от нескольких факторов: минералогического и гранулометрического состава, структуры, текстуры и состояния в природном залегании.

Для устройства земляного полотна применяются грунты различной плотности, прочности и происхождения, а также грунты, обработанные специальными добавками для улучшения физико-механических и гидрофизических свойств [1-4].

По данным (таблица 1) статистической отчетности ФДА «Росавтодор», направленным в Росстат, очевидно, что применение природных материалов, не обработанных вяжущими веществами, в значительной степени преобладает над

укрепленными грунтами, что формирует необходимость в разработке таких составов и их активном внедрении.

Таблица 1. Динамика роста принятых в эксплуатацию типов грунтовых покрытий в России по годам

Тип покрытия	Увеличение общей протяженности за год, км		
	2018	2019	2020
из щебня и гравия, не обработанных вяжущими материалами:			
• после строительства и реконструкции	8,4	304,2	344,5
• после капитального ремонта и ремонта	22,0	451,8	657,5
из грунтов и местных малопрочных материалов, обработанных вяжущими материалами			
• после строительства и реконструкции	-	-	-
• после капитального ремонта и ремонта	33,0	-	48,9

Вместе с тем, бурение нефтяных и газовых скважин сопровождается образованием большого количества различных отходов. Наиболее крупнотоннажным видом является буровой шлам, который представляет собой коллоидную систему, где дисперсной средой является буровой раствор, а твердая дисперсная фаза представлена продуктами разрушения горных пород.

В большинстве случаев буровой шлам накапливается в амбарах непосредственно на территории буровой площадки или вывозятся на специализированные накопители. Объекты накопления и размещения буровых шламов оказывают комплексное негативное воздействие на окружающую среду и нуждаются в рекультивации, а размещенные в них отходы - в утилизации. Таким образом формируется актуальная задача - исследовать возможность применения буровых шламов в качестве компонента укрепленных грунтов для дорожного строительства.

Для приготовления образцов техногенного грунта в лабораторных условиях применялись буровые шламы из накопителей Ванкорского и Сузунского месторождений, влажностью $40 \pm 10\%$ и $60 \pm 10\%$, а также объединенная проба шлама образованного на различных интервалах бурения скважины влажностью $80 \pm 10\%$.

В качестве упрочняющего компонента использовали карьерный песок, $M_{кр}=2,0$ и максимальной плотностью частиц - $2,7 \text{ г/см}^3$. В качестве вяжущих применяли: портландцемент (ЦЕМ I 32,5Н), известь гашеную гидратную (1-сорт) и гипс строительный (Г6 БП). Строительный гипс применяли в том числе в качестве корректора реакции среды. Составы грунтовых композитов представлены в таблице 2.

Выбранные соотношения компонентов в исследованиях близки к рецептурам известных технологий производства техногенных грунтов, используемых в качестве рекультивационных материалов. [5,6] Вариации компонентов в выбранных диапазонах обусловлены различной влажностью исходных буровых шламов и связанной с этим необходимостью внесения различного количества песка. Шламопесчаное соотношение подбиралось с учетом обеспечения опти-

мального гранулометрического состава и влажности, позволяющей провести гидратацию минеральных вяжущих и не приводящей к перерасходу последних. Вариации минеральных вяжущих связаны с необходимостью подбора их оптимального количества с учетом исходной влажности смеси, консистенции получаемого продукта и наиболее полного связывания токсичных компонентов.

Таблица 2. Состав грунтовых композитов

№ состава	Содержание компонента, % масс				
	Буровой шлам	Песок	ПЦ	Известь	Гипс
1	60	30	-	10	-
2	60	30	3	-	7
3	50	40	-	10	-
4	50	40	1	9	-
5	40	50	-	10	-
6	40	50	1	9	-

Исследования прочностных характеристик проводили на композитах, предполагаемых к использованию в качестве материала для возведения земляного полотна или отсыпке придорожных площадок. Результаты проведения лабораторных исследований прочностных характеристик представлены в таблице 3.

Таблица 3. Свойства полученных грунтовых композитов

№ п/п	Показатель	№ состава						
		1	2	3	4	5	6	
1	Влажность на границе текучести, %	19	18	25	19	22	20	
2	Влажность на границе раскатывания, %	13	14	18	14	16	16	
3	Число пластичности	6	4	7	5	6	4	
4	Плотность грунта, г/см ³	1,99	1,92	1,98	2,06	1,84	1,89	
5	Плотность сухого грунта, г/см ³	1,71	1,65	1,69	1,75	1,58	1,63	
6	Размеры частиц, мм	Гранулометрический состав, %						
		5-2	2,3	0,4	1,8	1,8	2,4	1,7
		2-1	1,6	1,2	2,0	1,8	1,9	2,1
		1-0,5	4,8	2,4	3,6	3,6	5,1	4,9
		0,5-0,25	24,6	15,7	13,9	28,7	18,4	14,6
		0,25-0,1	27,9	27,4	36,7	29,3	24,1	34,1
		0,1-0,05	13,2	17,6	18,4	8,5	16,7	11,7
		0,05-0,01	21	29,1	19,2	23,8	25,6	26,4
0,01-0,005	2,9	3,8	3,5	1,4	3,4	2,9		
<0,005	1,7	2,4	0,9	1,1	2,4	1,6		
7	Модуль деформации, МПа при природной влажности	6,4	3,4	12,8	17,5	8,1	13,7	
8	Коэффициент сжимаемости, МПа ⁻¹	0,09	0,02	0,03	0,06	0,11	0,08	

Анализ таблицы показывает, что полученный грунтовой композит на основе буровых шламов, по своим характеристикам близок к природным грунтам.

Показателем, оценивающим прочностные свойства техногенного грунта, является модуль деформации (МПа). По данному показателю максимальной прочностью (до 17,5 МПа) обладает материал на основе шламов с добавлением цемента в количестве 1 % и извести в количестве 9 %. Следует отметить, что отмеченная высокая прочность также имеет прямую корреляционную зависимость с процентным содержанием песка в смеси. Снижение количества песка приводит к повышению массовой доли глинистых частиц и хрупких гидратов в смеси, а увеличение – к перерасходу природного компонента, снижению исходной влажности, недостаточному связыванию загрязнителей в кристаллогидратные формы.

При исключении цемента из состава композита модуль деформации снижается до значений (6,4 МПа). Замена извести на гипс, приводит к уменьшению прочностных свойств получаемого продукта (модуль деформации 3,4 МПа). Кроме того, внесение гипса повышает адгезионную прочность приготавливаемого материала, которая затрудняет получение однородного композита. В промышленных условиях высокие значения адгезионной прочности кратно увеличивают время, затрачиваемое на смешение компонентов, приводят к возникновению в материале неоднородных включений, линз шлама, песка и наполнителей однородной структуры. Неоднородный материал при использовании может подвергаться неравномерным осадкам, что может привести к образованию деформаций в теле земляного полотна автомобильной дороги.

Таким образом, рассмотренные варианты получения укрепленных грунтов на основе буровых шламов и различных вяжущих веществ решают сразу несколько актуальных задач. Во-первых, утилизация буровых шламов, объекты накопления и размещения которых оказывают комплексное негативное воздействие на окружающую среду. Во-вторых, позволяет получать альтернативные укрепленные грунтовые композиты для дорожно-строительных работ, на основе малопрочных местных материалов.

Библиографический список:

1. Физико-химические процессы в укрепленных грунтах Пичугин А.П., Гришина В.А., Язиков И.К. Строительные материалы. 2009. № 12. С. 41-43.
2. Андреева А.В., Буренина О.Н., Давыдова Н.Н., Саввинова М.Е. Исследование влияния способов укрепления грунтов // Наука и современность. 2015. №38. С 147-150.
3. Лыщик П.А., Науменко А.И. Механизмы структурообразования дорожных грунтов, укрепленных минеральными вяжущими // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. №2 (166). С 42-44.
4. Бавбель Е.И., Науменко А.И., Жилинский М.В. Разработка состава малоцементного композиционного вяжущего для укрепления местных дорожных грунтов // Sciences of Europe. 2018. №31-1 (31). С 43-46.
5. Тупицына О.В. Направления использования отходов ТЭЖ с получением рекультивационных материалов/ О.В. Тупицына, А.А. Ярыгина, В.Н. Пыстин, Н.А. Сафонова, А.А. Савельев, К.Л. Чертец // Экология и промышленность России. №6, 2014. – с.13-17.
6. Тупицына, О.В. Комплексная система обработки и утилизации буровых шламов при помощи фильтрующих оболочек / О. В. Тупицына, Н. А. Сафонова, К. Л. Чер-

тес, А. М. Штеренберг, А. А. Ярыгина, В. Н. Пыстин // Экология и промышленность России. – 2013, июль. – С. 11–17.

РЕКУПЕРАЦИОННЫЕ БИТУМЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Н.В. Хохлова, аспирант

Н.И. Шестаков, канд. техн. наук, доцент

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. В статье рассматриваются возможности извлечения битума из отходов кровельных и гидроизоляционных материалов. Предложена технологическая схема получения рекуперационных битумов, включающая подготовительный и основной этапы. В качестве органических растворителей рассматриваются керосин, тетрахлорметан и хлороформ. После растворения материалов в органических средах установлены некоторые зависимости количество извлеченного битума от повышения температуры и применяемого растворителя. Полученные результаты отражают эффективность применения всех рассматриваемых органических растворителей.

Ключевые слова: рекуперационный битум, рекуперация, кровельные и гидроизоляционные материалы, растворители, дорожное строительство.

В ближайшие годы в России ожидается рост спроса на битумы, основная причина - рост темпов строительства дорог в связи с увеличением объёмов бюджетного финансирования, выделяемого на строительство, реконструкцию и капитальный ремонт автомобильных дорог. По данным официальной статистики Минэнерго РФ, потребление битумных материалов составляет 6 млн. тонн в год, в то же время, мощности нефтеперерабатывающих заводов позволяют производить 11 млн. тонн битумов в год. [1]

Вместе с тем, при реализации программы реновации в Москве образуется большое количество различных строительных отходов, в том числе кровельных и гидроизоляционных материалов. По известным данным только в Москве за 2019-2020 гг. принято к утилизации свыше 240 тыс. тонн. [2]. Особенности составов этих материалов формируют определенные сложности в процессе их утилизации, что связано с их длительным разложением в природной среде. В свою очередь, такие материалы формируют обширную сырьевую базу для дальнейшего их использования в строительстве.

Отходы кровельных и гидроизоляционных материалов, после их эксплуатации, являются потенциальным источником для получения битумных вяжущих, однако есть некоторые проблемы, связанные с выбором эффективной технологии по рекуперации битума из материалов основы.

Рекуперация – это возвращение части материалов для повторного использования в том же технологическом процессе. Рекуперационные битумы — это битумы, извлеченные из битумосодержащих материалов (в том числе отходов), для повторного использования в строительстве.

Извлечение битумов из рулонных гидроизоляционных материалов является весьма сложным технологическим процессом, в связи с тем, что рулонная основа и пропитывающим ее битум удерживаются прочными физико-химическими связями, разрушение которых весьма затруднительно.

Известны способы извлечения битумов из кровельных и гидроизоляционных материалов с различными параметрами температурного воздействия и среды растворителя. [3-5]

Для извлечения битумов предложена технологическая схема (рисунок 1), которая разделена на подготовительный и основной этап. На подготовительном этапе происходит изменение размеров и состояния материала, путем его механического измельчения и насыщения органическими растворителями. На основном этапе следуют процессы отделения битума от материала основы, за счет ультразвукового воздействия и нагрева растворов.



Рис. 1. Технологическая схема получения рекуперационных битумов

Количество и состав битумов зависит от способа проведения экстракции, а также от химической природы используемых растворителей. По анализу литературных данных [6,7] по способам извлечения битума из битумосодержащих материалов, в данной работе рассматриваются наиболее распространенные органические растворители, характеристики которых представлены в таблице 1.

При ультразвуковом воздействии происходит отбивка битума от материала основы, за счет чего достигается высокая эффективность по извлечению количества битума. Ультразвуковая обработка проводилась с помощью УЗ-гомогенизатора Vibra-Cell VCX 750 (эффективная мощность: 750 Ватт, частота: 20 кГц).

Нагрев растворов материалов при извлечении битумов, проводили в течение 60 мин без механического воздействия на образцы. После термостатирования раствор распределяли тонким слоем на стеклянную подложку и фиксировали массу образца. Итоговое взвешивание проводилось при приобретении образцом постоянной массы, после отгонки растворителя. Полученные результаты графически отображены на рисунке 2.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что наибольшей степенью растворения для битумосодержащих материалов обладает керосин. Линейное повышение процента растворения при увеличении температуры объясняется активацией процесса окисления за счет увеличения интенсивности диффузионного движения в битуме.

Таблица 1. Характеристики применяемых растворителей.

Растворитель	Химическая формула	Описание
Керосин	смеси углеводородов C ₉ -C ₁₆	Содержат примеси сернистых, азотистых или кислородных соединений. Массовая доля ароматических углеводородов не более 22%, Концентрация фактических смол, мг на 100 см ³ керосина, не более 5. Температура начала кипения: 150°С
Тетрахлорметан	CCl ₄	Хлорорганическое соединение, галогеноалкан. Молекулярная масса: 153.8. Температура кипения: 76.5°С. Температура плавления: -23°С Является растворителем для жиров, смол, каучука и битумов. Не горючий.
Хлороформ	CHCl ₃	Нерастворимая в воде жидкость относительной плотности 1,488 (при 20° С) Молярная масса – 119,38 г/моль. Температура кипения: 61,2 °С. Хорошо растворяет жиры и другие органические вещества. Не горючий.

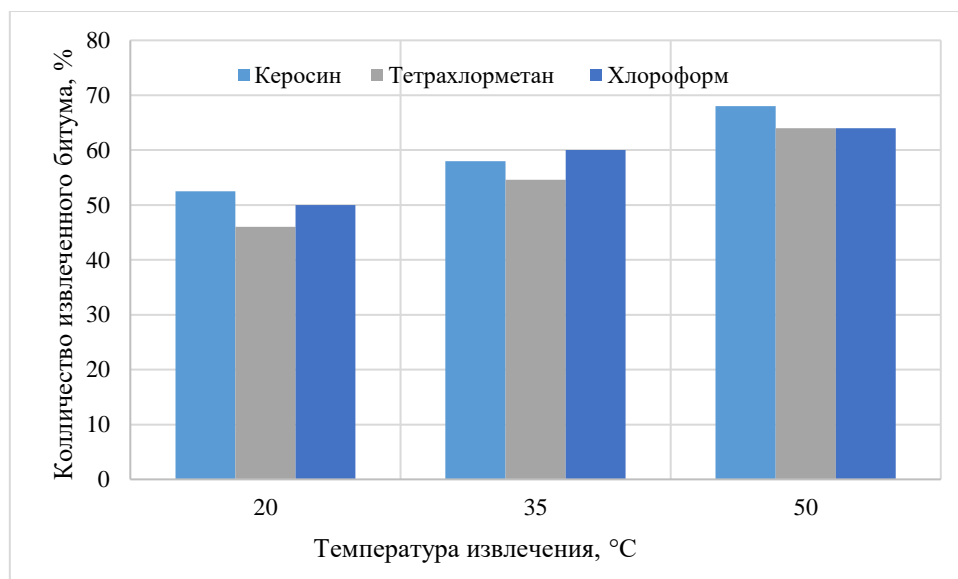


Рис. 2. Зависимость количества извлеченного битума от применяемого растворителя и температуры извлечения.

В конечном итоге, предложенная технология позволяет извлекать из отходов строительных кровельных материалов до 70% вторичного битума. Полученный битум можно рекомендовать для использования при строительстве и ремонте дорожных покрытий.

Библиографический список:

1. Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В. Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим//Строительные материалы. 2020. № 4-5. С. 62-67.
2. Чертес К.Л., Шестаков Н.И. Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора // Вестник МГСУ. 2020. №8.
3. Короткова Л.Н., Иванова О.В., Халиков Р.М., Воробьев Н.А. Рекуперационное использование битумно-полимерных отходов мягких кровель в строительстве автомобильных дорог//The Scientific Heritage. 2021. № 72-1 (72). С. 71-75.
4. Олейник П.П., Олейник С.П. Организация системы переработки строительных отходов и получение вторичных ресурсов. – Саратов: Вузовское образование, 2019. – 193 с.
5. Измаилова Г.Г., Бегалиева С.Т. Результаты наблюдений за дорожным битумом// Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2018. № 2 (105). С. 158-166.
6. Ерофеева О.С., Курносова А.В., Редькин Н.А. Изучение процесса экстракции битума из загрязнённых песков методами ик-фурье спектроскопии и спектрофотометрии// Вестник молодых ученых и специалистов Самарского государственного университета. 2017. № 2 (11). С. 80-85.
7. Акия Н., Донат Ф.А. Улучшенный способ извлечения битума из битуминозных песков Патент на изобретение RU 2647582 С2, 16.03.2018. Заявка № 2015129036 от 10.12.2013.

МОДИФИКАЦИЯ ГЛИНЯНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ
РЕМОНТНОГО СОСТАВА НА ЭПОКСИДНОЙ ОСНОВЕ

Е.В. Ткач¹, д-р техн. наук, профессор

М.И. Бичаев², аспирант 3-го года обучения

^{1,2}*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Полые нанотрубки галлуазита использовались в качестве наноконтейнеров для загрузки и для контролируемой десорбции гидроксида кальция. Предложена технология создания пробок на концах наноконтейнеров и установлено, что концевые пробки приводят к замедленному высвобождению из полости ГНТ щелочи. Включение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в просвет нанотрубок, как показали просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и энергодисперсионный рентгеновский анализ (EDX), замедляет протекание реакции карбонизации. Этот эффект можно дополнительно контролировать, установив концевые пробки из фосфата кальция. Мы доказали, что добавление модифицированных частиц галлуазита, приводит к уменьшению кислотного воздействия. Концевые пробки обладают двойным эффектом: они предохраняют гидроксид кальция от карбонизации, предотвращают быстрое образование щелочного раствора и вызывают ответную реакцию на воздействие кислоты, сводя к минимуму падение pH. Эти особенности являются многообещающими для композитных нанодобавок и при создании ремонтных систем, где требуется способность материалов к самовосстановлению.

Ключевые слова: галлуазит, наполнитель, модификация, концевые пробки.

Введение.

Цементная промышленность, производящая основной компонент бетона, по-прежнему привлекает внимание с точки зрения фактора изменения климата и препятствий на пути к его устойчивости. Помимо США, быстроразвивающиеся страны такие как Китай, Индонезия, Индия и Турция, также вызывают серьезное загрязнение окружающей среды. По данным Роберта Хатчинсона (2016), более 4 миллиардов метрических тонн портландцемента (ПЦ), которые ежегодно производятся во многих цементных отраслях по всему миру в качестве основного компонента бетона, в первую очередь ответственны за основной выброс CO_2 [1–4].

В секторе гражданского строительства ПЦ широко используется в качестве эффективного вяжущего вещества в бетоне и других строительных материалах. Между тем, его производство принято считать основным источником выбросов парниковых газов в атмосферу [5–8]. Согласно отчетам Международного энергетического агентства (МЭА), он составляет 6–7% от общих выбросов CO_2 [8–11]. Ожидается, что к 2050 году мировой спрос на ПЦ вырастет почти до 200% [8]. Снижение выбросов CO_2 от деятельности, связанной с ПЦ, требует новых типов устойчивых, умных и экологически безопасных самовосстанавливающихся материалов [12,13].

Известно, что цементные материалы обладают очень низкой устойчивостью к агрессивной среде, и это одна из самых серьезных проблем, влияющих на прочность и срок службы бетонных конструкций в естественном климате. Воздействие агрессивной среды может проявляться в виде расширения и растрескивания бетона. Иногда растрескивание бетона может вызвать серьезные структурные проблемы [14,15]. В этом смысле постоянное повышение требований к долговечности бетонных конструкций привело к разработке умных бетонов (с использованием технологии самовосстановления), где высокая долговечность является обязательной [16].

Как правило, самовосстановление способствует долговечности материалов. В частности, это выгодно, когда вмешательство человека затруднено, например, при строительстве в суровых физических и химических средах. Самовосстановление также необходимо для защиты характеристик материала, особенно в кинетических и термодинамических условиях, которые поддерживают большую плотность дефектов, таких как наноструктуры. Наноматериалы неизменно демонстрируют отличные функциональные свойства. По сравнению с обычными материалами, наноматериалы разлагаются быстрее из-за наличия множества межфазных атомов. Многие функциональные наноструктуры могут быть объединены для создания различных наносистем, в которые также могут быть включены некоторые компоненты, обеспечивающие самовосстановление.

В последнее время из-за быстрого развития нанонауки и нанотехнологий разработка и производство самовосстанавливающихся материалов вышли на новые рубежи, в которых материалы с размером частиц менее 500 нм называются наноматериалами. Самовосстанавливающиеся материалы могут восстанавливаться после повреждений. Во многих случаях самовосстановление также может быть вызвано температурой в качестве внешних стимулов, системы с такой способностью называются неавтономными самовосстанавливающимися материалами [17].

Глядя на будущие перспективы самовосстанавливающегося бетона, в данной статье рассматривается модификация ГНТ, как компонента, способного эффективно противостоять коррозии бетона первого вида.

Физическая коррозия бетона – это коррозия выщелачивания, процесс при котором происходит растворение минералов цементного камня, но не происходит химическое взаимодействие со средой. Этот вид коррозии характеризуется процессом вымывания самого водорастворимого минерала цементного камня – гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – имеет высокую растворимость в воде (около 1,2 г/л), что приводит к появлению повышенной пористости в структуре бетона, тем самым оказывая негативное влияние на прочность строительной конструкции. Как правило, данный вид коррозии интенсивно развивается под действием мягких вод, в составе которых содержатся ионы жесткости. Коррозия выщелачивания в наибольшей степени характерна для железобетонных конструкций напорного типа, этот процесс растянут во времени и зависит от величины напора воды на конструкцию и степени ее жесткости. При вымывании гидроксида кальция происходит постепенное падение рН бетона, водородный показатель стремится к нейтрализации. При достижении водородным показателем величины $\text{pH} < 11,8$ запускается процесс коррозии стальной арматуры, который характери-

зуются образованием продуктов коррозии, чей объем многократно превосходит первоначальный. Дальнейшее развитие приводит к разрушению железобетонных конструкций вдоль арматурного проката [18].

Модификация ГНТ заключалась:

- в загрузке молекул гидрооксида кальция в полость трубок, которые на увеличение кислотности отвечают десорбцией $\text{Ca}(\text{OH})_2$, повышая тем самым ее щелочность;

- в создании концевых пробок для пролонгации десорбции $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Загрузку гидрооксида кальция в полость ГНТ исследовали с помощью нескольких микроскопических методов, в то время как кинетическое высвобождение гидроксида кальция изучали с помощью измерений pH и термогравиметрии. Модификация ГНТ солями кальция (трифосфат) была исследована как первоначальный подход к образованию концевых пробок, которые могут вызывать пролонгированное во времени высвобождение загруженного гидроксида кальция и, следовательно, консолидацию и снижение кислотности среды, в которой находятся модифицированные нанотрубки.

Приведенное в данной статье технологическое решение найдет применение при реставрационных работах, где важно сохранить в первоначальном виде архитектурные элементы с минимальным изменением их облика.

Материалы.

Во всех экспериментах применялись галлуазитовые нанотрубки марки ULTRA HalloPure (I-Minerals Inc.).

В качестве образователя концевых «пробок» ГНТ для пролонгирования десорбции гидрооксида кальция использовался ТриНатрий фосфат додекагидрат ГОСТ 201-76. Гидроксид кальция ГОСТ 9262-77.

Метод.

Инкапсуляция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в ГНТ.

Один из самых простых способов загрузки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в полость ГНТ — вакуумная откачка. Нанотрубки и наполнитель помещали в сосуд с водой, а затем в системе создавали низкий вакуум. Внутри полости нанотрубок тоже содержится воздух, и вовремя откачки в образовавшееся пустое пространство «затягивало» воду и наполнитель. Дегазированный водный раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1,5 г/дм³) смешивали с порошком галлуазита (5 г/дм³) и обрабатывали ультразвуком в течение 15 мин. Затем полученную суспензию перемешивали и выдерживали в вакууме в течение 5 мин, в результате чего наблюдалось легкое шипение, и инкапсулируемое вещество конденсировалось внутри трубки. Эту процедуру повторяли трижды для повышения эффективности загрузки. Затем нанотрубки отделяли от водной фазы центрифугированием и сушили в вакууме при 70 °С в течение 10-12 ч.

Формирование концевой «пробки».

Водный раствор фосфата готовили растворением 40 г додекагидрата тринатрийфосфата в 250 см³ воды. Этот раствор выливают в порошок ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$, помещенный в воронку Бюхнера, с фильтровальной бумагой, помещенной на перфорированную пластину. Во время заливки применялся ва-

куум. Отфильтрованный материал сушили, используя колбу с боковым плечом, соединенную с вакуумным насосом.

Результаты и обсуждение.

Подтверждение инкапсуляции.

Присутствие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в композите ГНТ- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было подтверждено методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Как видно из рисунка 1, при последовательном пропускании инфракрасного излучения через $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ГНТ, ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ наблюдается ослабление интенсивности света, прошедшего через образцы. Наименьший коэффициент пропускания наблюдается у образца ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что доказывает загрузку гидроксида кальция в ГНТ.

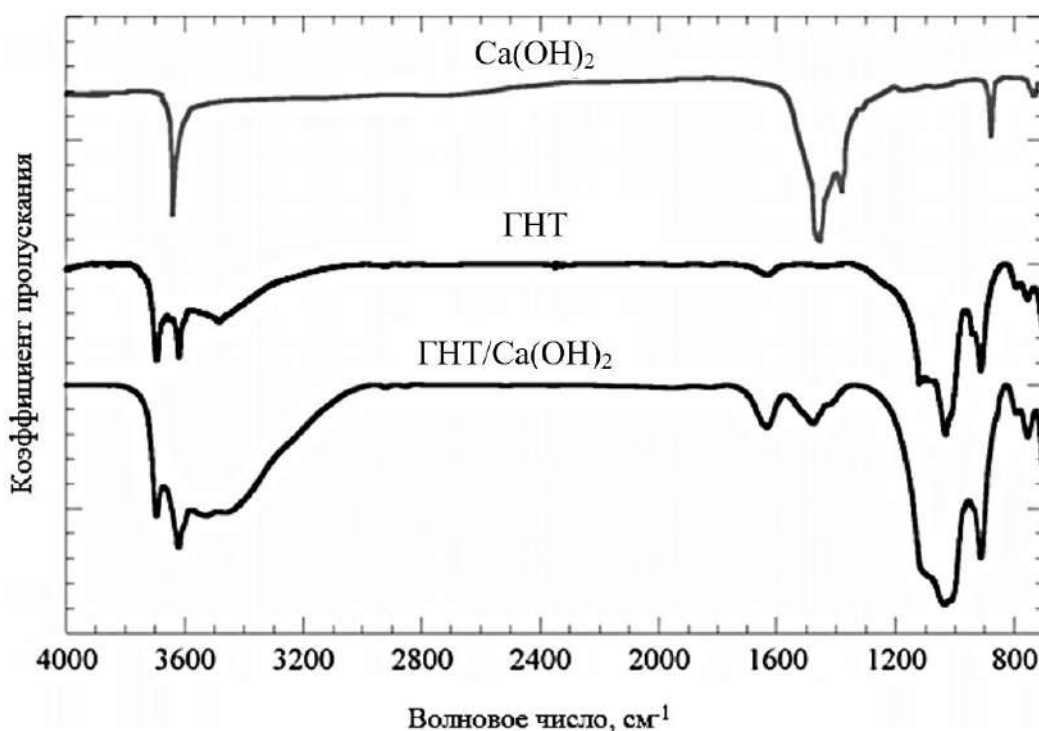


Рис. 1. Спектры FTIR для $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ГНТ и ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Данные термогравиметрического анализа (ТГА) ГНТ- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с пробками из фосфата кальция не показали каких-либо значительных отличий от образца ГНТ- $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что является доказательством того, что обработка «пробками» не изменила общий состав материала. Чтобы исследовать образование «пробки», эксперименты ПЭМ были проведены на ГНТ- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с концевыми пробками из фосфата кальция. Изображения для системы на основе ГНТ- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ показывают, что ГНТ инкапсулированы (рисунок 2), иначе концевые пробки не образовались бы.

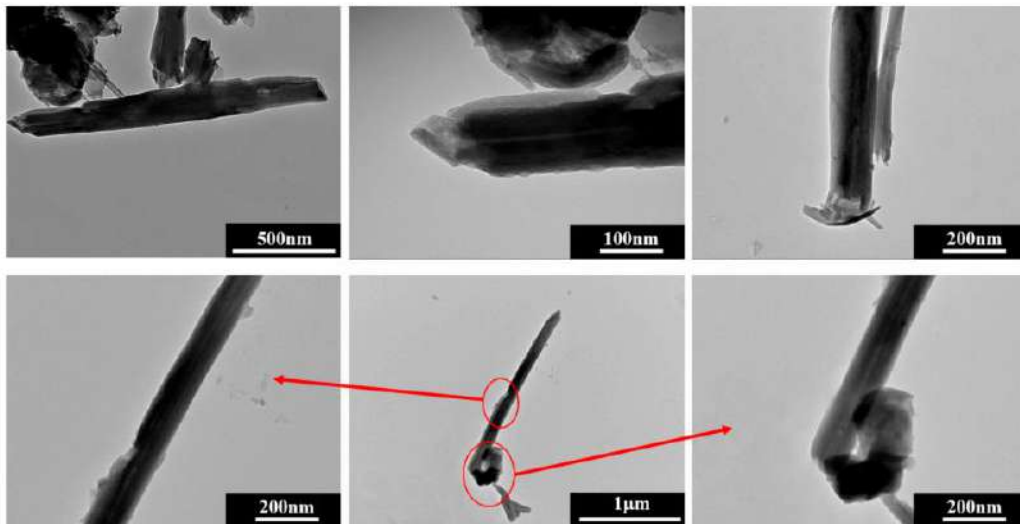


Рис. 2. ПЭМ-изображение ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с концевыми пробками из фосфата кальция.

При внимательном рассмотрении концов нанотрубок (рис. 2) выясняется, что они закрыты чем-то вроде пробки, кроме того, полость просвета рядом с окончанием ГНТ кажется пустой. Такое морфологическое наблюдение согласуется с механизмом образования концевой пробки, основанным на реакции между частично высвобожденным $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и Na_3PO_4 вблизи концов нанотрубок с образованием $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Схематическое изображение формирования концевых «пробок» показано на рисунке 3.

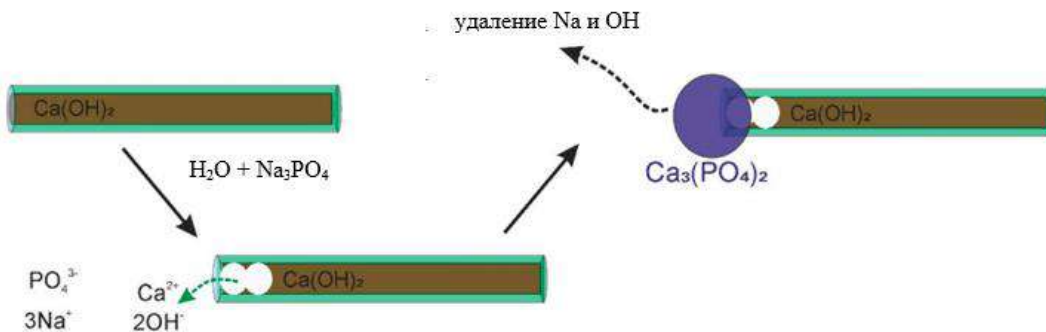


Рис. 3. Схема формирования концевых «пробок».

Исследование кинетики карбонизации и десорбции.

Мы исследовали функциональность концевой «пробки», которая контролирует высвобождение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из просвета ГНТ. Гидроксид кальция обычно улавливается CO_2 с образованием CaCO_3 .

Чтобы изучить способность просвета ГНТ контролировать такой процесс, мы использовали термогравиметрический анализ в среде CO_2 . Степень превращения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 , основанная на измеренном приросте массы и начальном содержании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в измеряемом образце, представлена на рисунке 4 как функция времени.

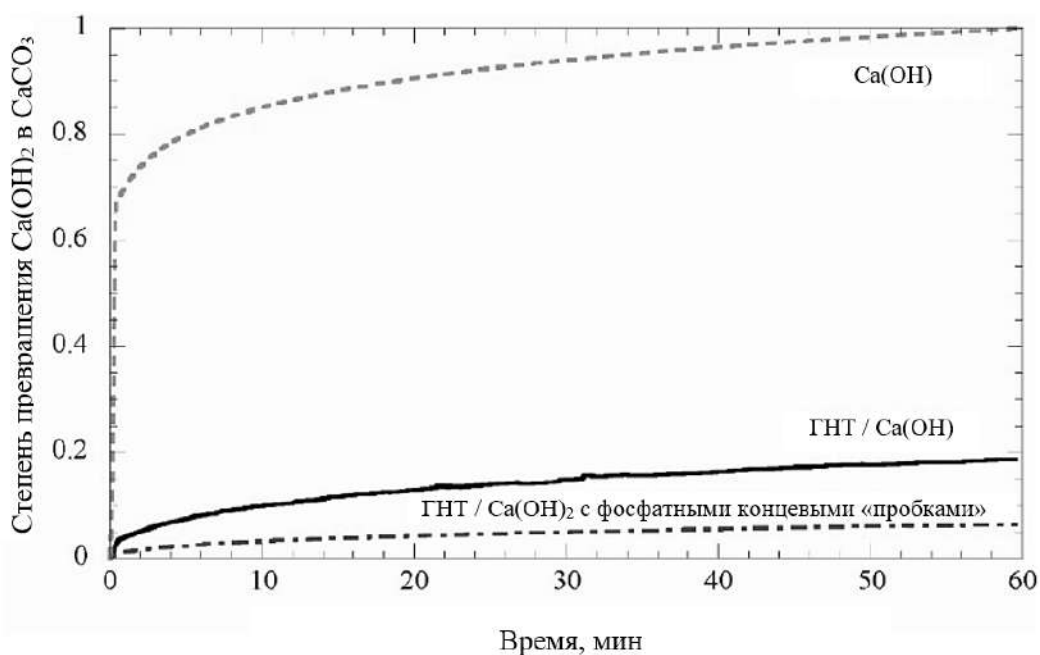


Рис. 4. Степень карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в среде CO_2 для $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с фосфатными концевыми «пробками».

Стоит отметить, что создание пробок на концах ГНТ с инкапсулируемым $\text{Ca}(\text{OH})_2$, значительно замедляет реакцию карбонизации. Кроме того, концевые пробки предотвращают контакт с CO_2 , и менее 10% гидроксида кальция превращается в карбонат через 1 час в условиях эксперимента. Хотя временные рамки относительно короткие (один час), эксперимент доказывает, что инкапсулированный $\text{Ca}(\text{OH})_2$ все еще находится в своей исходной форме, когда чистый $\text{Ca}(\text{OH})_2$ претерпевает полное преобразование. Этот результат очень многообещающий для применений, поскольку он демонстрирует возможность сохранения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ от процесса карбонизации.

Кинетику десорбции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в воде исследовали путем измерения pH дисперсии с течением времени. С этой целью водные дисперсии ГНТ и ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с концевыми пробками и без них, оставляли для уравнивания в статических условиях.

Опытным путем на образцах с одинаковым содержанием щелочи определено растворение чистого гидроксида кальция в воде в течение 5 минут. После достижения постоянного значения pH к дисперсии добавляли $0,15 \text{ см}^3 \text{ HCl}$ (0,1 М) и измеряли реакцию pH в течение 18 часов. Что касается десорбции щелочи, композит ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ показал более медленное повышение pH (рис. 5).

Еще медленнее увеличивается pH для образцов ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с концевыми пробками, которые являются наиболее эффективными в замедлении солубилизации гидроксида в воде. Установлено, что на кинетику растворения наноразмерных материалов влияет размер зерна из-за эффектов высокой удельной площади и поверхностной энергии. Следует отметить, что даже если чистое количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было одинаковым для всех образцов, более высокий pH достигается на плато для композита ГНТ/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по сравнению с системой с концевыми пробками. Этот результат отражает способность фосфатных пробок удерживать гидроксид в полости ГНТ даже в водной среде до определенной

степени. Добавление HCl вызывает внезапное падение pH, которое медленно возвращается к более высоким значениям из-за дальнейшего высвобождения гидроксида кальция из просвета. Тенденция к увеличению pH значительно замедляется из-за наличия концевой пробки. Более того, ΔpH из-за добавления HCl и после уравнивания составляет 0,35 и 0,85 для ГНТ/ $Ca(OH)_2$ с концевыми пробками и без них, соответственно.

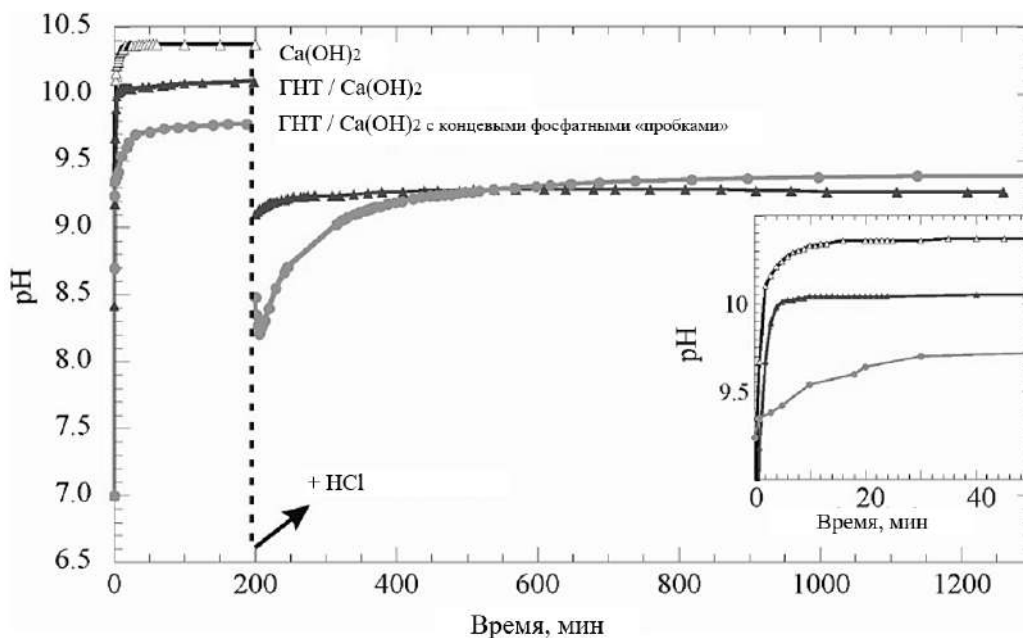


Рис. 5. Измерения pH водной дисперсии до и после добавления раствора HCl в зависимости от времени.

Таким образом, мы можем сделать вывод, что ограничение $Ca(OH)_2$ в полости ГНТ создает щелочной резервуар, который реагирует выделением $Ca(OH)_2$ в ответ на добавление кислоты, стремясь вернуть систему в равновесное состояние.

Заключение.

Была разработана технология контролируемой десорбции гидроксида кальция из просвета ГНТ с концевыми пробками. Гидроксид кальция был инкапсулирован в просвет ГНТ, что подтверждено методами ПЭМ, EDX.

Концевые пробки были созданы при непосредственном взаимодействии анионов фосфата с гидроксидом кальция, во время его частичной десорбции из нанотрубок. Полученные концевые пробки предотвращают попадание CO_2 в просвет трубки и предохраняют гидроксид кальция от карбонизации. Более того, они замедляют выделение в воду, сводя к минимуму скачки pH, если в дисперсию добавляют кислоту. Создание пробок на конце наночастиц и инкапсулирование $Ca(OH)_2$ в просвет ГНТ, привело к образованию щелочного резервуара-капсулы: частицы ГНТ/ $Ca(OH)_2$ с концевыми пробками, реагируют пролонгированным выделением $Ca(OH)_2$ в ответ на добавление кислоты, стремясь вернуть систему в равновесное состояние.

Библиографический список:

1. Chen, R., Li, Y., Xiang, R., Li, S. Effect of particle size of fly ash on the properties of lightweight insulation materials. *Construction and Building Materials*. 2016. 123. Pp. 120–126. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.140. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.140>.
2. Zhang, G.-Y., Ahn, Y.-H., Lin, R.-S., Wang, X.-Y. Effect of Waste Ceramic Powder on Properties of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Paste and Mortar. *Polymers*. 2021. 13(16). Pp. 2817. DOI:10.3390/polym13162817.
3. Mohammadhosseini, H., Tahir, M.M., Sayyed, M.I. Strength and transport properties of concrete composites incorporating waste carpet fibres and palm oil fuel ash. *Journal of Building Engineering*. 2018. 20. Pp. 156–165. DOI:10.1016/j.jobe.2018.07.013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.013>.
4. Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M.W., Arrifin, M.A.M., Hussein, A.A. The Effect of Sodium Hydroxide Molarity and Other Parameters on Water Absorption of Geopolymer Mortars. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. 9(48). DOI:10.17485/ijst/2016/v9i48/109629.
5. Du, K., Xie, C., Ouyang, X. A comparison of carbon dioxide (CO₂) emission trends among provinces in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 73(January 2016). Pp. 19–25. DOI:10.1016/j.rser.2017.01.102. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.102>.
6. Keyvanfar, A., Shafaghat, A., Abd Majid, M.Z., Bin Lamit, H., Warid Hussin, M., Binti Ali, K.N., Dhafer Saad, A. User satisfaction adaptive behaviors for assessing energy efficient building indoor cooling and lighting environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. 39. Pp. 277–295. DOI:10.1016/j.rser.2014.07.094. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.094>.
7. Fahim Huseien, G., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., Abdulameer Hussein, A. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 80(April). Pp. 54–74. DOI:10.1016/j.rser.2017.05.076. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076>.
8. Xie, T., Ozbakkaloglu, T. Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International*. 2015. 41(4). Pp. 5945–5958. DOI:10.1016/j.ceramint.2015.01.031. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.031>.
9. Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M.W. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials*. 2016. 125. Pp. 1229–1240. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.153. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.153>.
10. Palomo, Á., Fernández-Jiménez, A., López-Hombrados, C., Lleyda, J.L. Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete. *Revista Ingenieria de Construcción*. 2007. 22(2). Pp. 75–80. DOI:10.4067/S0718-50732007000200001.

11. Ghasan Fahim Huseien, Jahangir Mirza, Mohammad Ismail, Mohd Warid Hussin, M.A.M.A. Potential use coconut milk as alternative to alkali solution for geopolymer production. *Jurnal Teknologi*. 2016. 78(11). Pp. 133–139.
12. Ariffin, N.F., Hussin, M.W., Mohd Sam, A.R., Bhutta, M.A.R., Nur, N.H., Mirza, J. Strength properties and molecular composition of epoxy-modified mortars. *Construction and Building Materials*. 2015. 94. Pp. 315–322. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.056. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.056>.
13. Huseien, G.F., Mirza, J., Ariffin, N.F., Hussin, M.W. Synthesis and characterization of shelf-healing mortar with modified strength. *Jurnal Teknologi*. 2015. 76(1). Pp. 195–200. DOI:10.11113/jt.v76.3688.
14. Jiang, L., Niu, D. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*. 2016. 117. Pp. 88–98. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.094. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.094>.
15. Chen, Y., Gao, J., Tang, L., Li, X. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*. 2016. 106. Pp. 650–658. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.151. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.151>.
16. García Calvo, J.L., Pérez, G., Carballosa, P., Erkizia, E., Gaitero, J.J., Guerrero, A. Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. *Construction and Building Materials*. 2017. 138. Pp. 306–315. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.015.
17. Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Verstraete, W. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. 26(1). Pp. 532–540. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054>.
18. Коррозионные процессы в металлических, бетонных и железобетонных конструкциях: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Химия в строительстве», «Основы физико-химических процессов в строительстве» предназначены для обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство», по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения / сост. О.В. Агейкина, Н.В. Шальнева; Тюменский индустриальный университет. – 1-е изд. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТИУ, 2016. – 43 с.

ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНОГО УГЛЕВОЛОКНА

Е.С. Кецко¹, аспирант

И.С. Кузина², студент

¹ Научно–исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН)

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Аннотация. В данной статье рассмотрены этапы и технология производства работ по ремонту и усилению участков несущих железобетонных перекрытий здания многофункционального комплекса с апартаментами. В состав работ по ремонту и усилению участков несущих железобетонных перекрытий входит следующий комплекс основных мероприятий: ремонт бетонных поверхностей конструкций, подготовка поверхности под усиление, усиление железобетонных конструкций углеродными лентами, устройство защитного покрытия, устройство огнезащиты, ремонт трещин, устройство силовой набетонки со стальной арматурой.

Ключевые слова: обеспыливание, углепластиковые накладки, инъектирование, набетонка, пакеры

Подготовительные мероприятия перед началом работ по усилению включают в себя следующее. Ознакомление рабочего персонала с техникой безопасности, оформление наряда-допуска совместно с уполномоченным сотрудником службы заказчика, определение и согласование территории и границ производства работ по усилению, рабочих мест, обеспечение доступа на территорию производства работ по ремонту и усилению, осуществление демонтажных работ, включая инженерные коммуникации, существующее оборудование, строительные конструкции, которые попадают в границы производства строительных работ, обеспечение точкой подключения к сети переменного тока 220 В в пределах 25 м от зоны производства работ, осуществление подключения к данной точке необходимого оборудования через исправные влагозащищенные удлинители в розетки, оборудование мест для отдыха рабочего персонала, хранения и складирования строительных материалов, подключение бытового городка к инженерным коммуникациям, устройство для складирования строительного мусора, определение и обустройство опасных зон производства работ, обозначение их сигнальными лентами и предупреждающими знаками, изучение проектно–сметной документации, ознакомление с условиями работ согласно графику производства работ, монтаж рамных лесов для осуществления работ по ремонту и усилению железобетонных перекрытий [1-2].

Ремонт бетонных поверхностей конструкций. Первым этапом является выполнение обеспыливания поверхности конструкции с помощью компрессора. Восстанавливаемую поверхность необходимо покрыть грунтовкой глубокого проникновения для лучшего сцепления ремонтного состава к поверхности. Ремонтный состав требуется уложить поверх непосредственного нанесения грунтовки. Устранение поврежденных участков бетона следует выполнять методом

последующего восстановления геометрии конструкции полимерным ремонтным составом с высокой адгезией к «старому» слою бетона. Для изготовления растворной смеси в ремонтный состав добавляется чистая вода комнатной температуры. Сухую смесь следует перемешать с заранее отмеренным количеством воды до однородной пастообразной консистенции вручную или механическим способом, используя электродрель со специальной насадкой. Время использования раствора не более получаса с момента затворения. Растворную смесь требуется нанести на поврежденный участок шпателем или мастерком и выполнить последующее восстановление геометрии конструкции: по 10–15 мм. Вспомогательные слои могут быть нанесены после того, как верхний слой полностью сцепился – приблизительно через полчаса. Для адгезии между слоями необходимо, чтобы поверхность верхнего слоя оставалась шероховатой. В последующее время требуется систематично производить увлажнение восстановленной зоны [3-4].

Подготовка поверхности под усиление. Необходимо выполнить очистку поверхности бетона от загрязнений, масляных пятен, белого налета, цементного молочка. Согласно чертежам усиления, на поверхности бетона указывается с помощью мела или маркера разметка расположения углеволокна. Зоны следует увеличить на несколько сантиметров по всем сторонам из-за вероятных погрешностей при производстве работ. Углошлифовальной машинкой с насадкой «чашка с алмазной крошкой», следует выполнить шлифование усиливаемых зон поверхности бетона до оголения крупного заполнителя. Дефекты поверхности не должны быть более 5 мм на базе 2 м, а локальные неровности не превышать 1 мм на базе 0,3 м. Следующим действием является проведение обеспыливания поверхности конструкции кистью или с помощью промышленного пылесоса. Эпоксидная шпаклевка используется для шлифования поверхности на участках с маленькими сколами, углублениями и неровностями менее 5 мм. Изготовление и использование материала необходимо производить согласно инструкции производителя. Для улучшения сцепления, перед нанесением шпаклевки требуется выполнить покрытие поверхности низковязкой смолой. Перед шпатлеванием необходимо дать время грунтовке пропитать основание – около 15 минут. Пока грунтовка не высохла, следует нанести шпаклевку и разровнять при помощи шпателя. [5-6].

Работы по усилению железобетонных перекрытий углеволокном. Бетонную поверхность перед устройством углепластиковых накладок обеспыливают кистью или промышленным пылесосом. Углепластиковые накладки обрабатывают специальным двухкомпонентным эпоксидным составом. После отверждения эпоксидной смолы накладки могут воспринимать усилия растяжения и работать совместно с усиливаемой железобетонной плитой. Приготовление двухкомпонентного эпоксидного состава следует осуществлять строго в соответствии с инструкцией производителя. Из бобины на верстаке необходимо отмотать требуемую длину углеродной ленты. При помощи ножниц или косого ножа отрезать отмеренную заготовку на чистой ровной поверхности. Углеродную ленту обрабатывают эпоксидной смолой с каждой стороны ленты, наносят грунтовочный раствор, а затем адгезивный слой. Не допускается оставлять необработанные «сухие» поверхности. Ленты должны быть растянуты, не до-

пускается скручивание слоёв между собой. Углеродные ленты твердеют в течение суток при комнатной температуре и полтора суток при температуре до +20°C. Полная полимеризация углепластика (для возможности восприятия расчетных нагрузок) обеспечивается в течение недели [7-8].

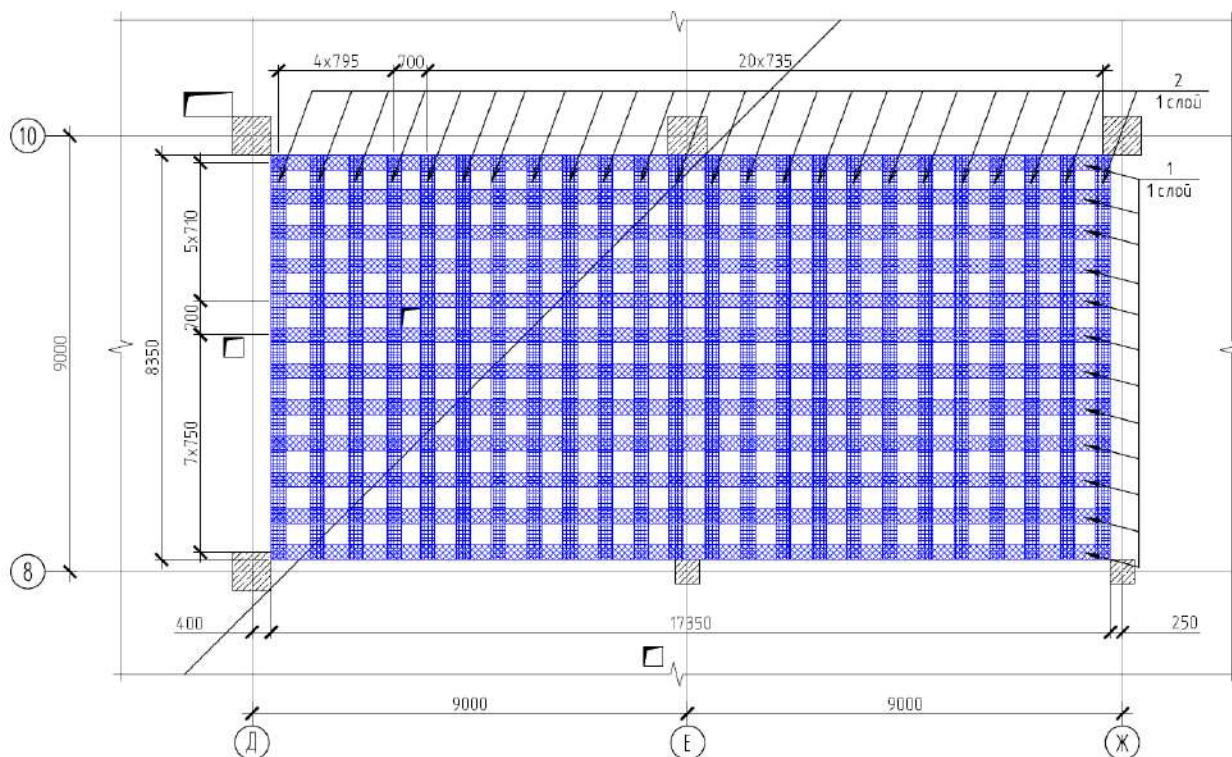


Рис. 1. Схема наклейки углеродных лент

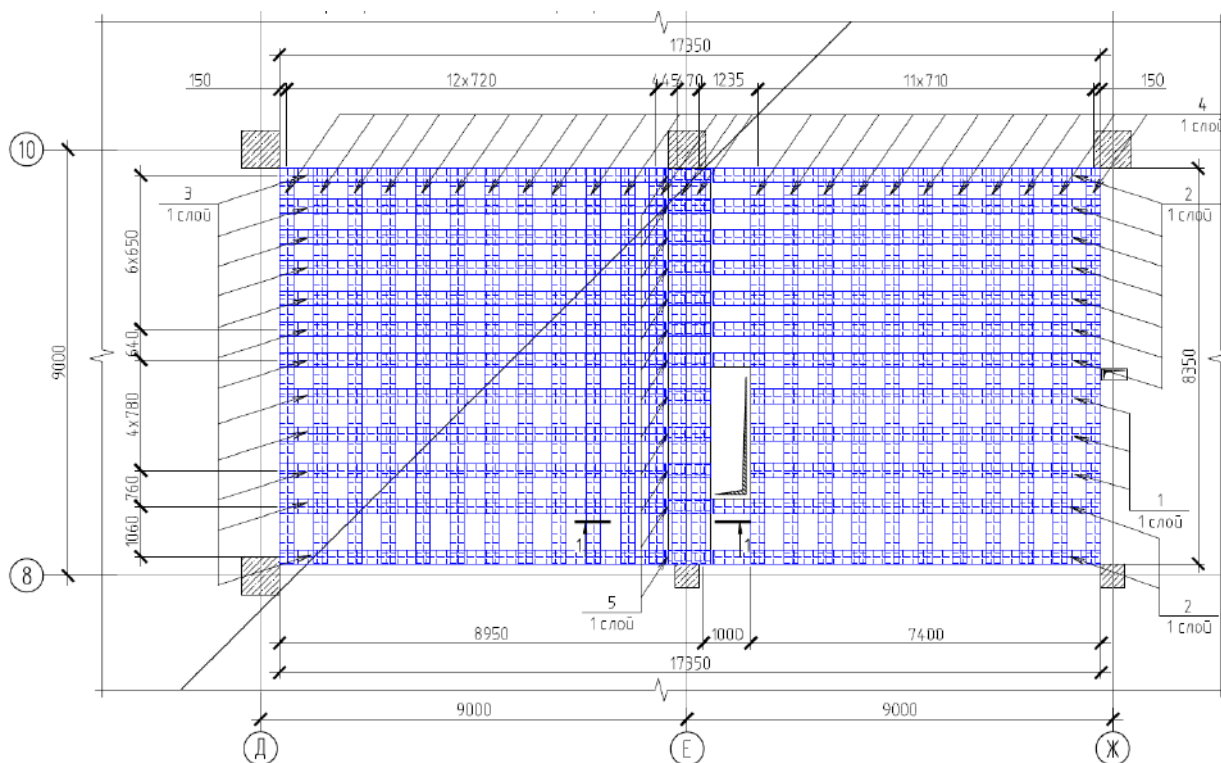


Рис. 2. Схема наклейки углеродных лент

Устройство защитного покрытия. Для обеспечения достаточного уровня сцепления защитного покрытия углеволокно присыпают песком из кварца, да-

лее на поверхность лент следует наносить полимерцементный защитный ремонтный раствор с помощью кистей или шпателей. Толщина смеси должна быть не более 4 мм. Раствор разравнивают вручную терками и полутерками, в течение последующих трех суток необходимо увлажнять поверхность [9-10].

Устройство огнезащиты. Работы следует выполнять в следующей последовательности: произвести раскрой плит из каменной ваты ножом или ножовкой. После отверждения углепластика можно приступать к работам по монтажу огнезащитных плит толщиной 80 мм с использованием штукатурно-клеевой смеси. Клей возможно наносить несколькими способами. Первый вариант применяют при выбоинах на основании более 3 мм. Клеевую смесь толщиной до 20 мм наносят на утеплитель вручную по периметру плиты сплошной полосой шириной до 40 мм, а также по центру точечно. Вторым вариантом используют при неровностях основания до 3 мм [11-12]. Клей наносят сплошным слоем по всей поверхности плиты. Расход материала следует контролировать в соответствии с рекомендациями производителя. После нанесения клеевой смеси утеплитель крепят к поверхности и плотно фиксируют. Исправление места устройства возможно в течение последующих 20 минут. Элементы утеплителя располагают с Т-образной перевязкой швов вплотную одна к другой. Допуск ширины до 3 мм. Зазоры шириной более 3 мм следует заполнить клиновидными полосками из утеплителя. Запрещается заполнять зазоры между плитами клеевым составом. Затем необходимо произвести монтаж металлического каркаса. Каркас собирается из профиля для гипсокартона 100x50x0,5 мм. Для сборки узлов используются саморезы с пресс-шайбой 4,2x13 оцинкованные со сверлом. Для крепления каркаса к плитам перекрытия следует использовать саморез универсальный 3,5x32 мм и дюбель многофункциональный 6x35 мм (усилие вырыва – 0,6 кН) [13-14].

Ремонт трещин. Ремонт трещин, которые имеют ширину раскрытия более 0,4 мм, следует осуществлять в следующем порядке. При помощи перфоратора разделать в виде штрабы размером до 5x10 мм. Далее поверхность бетона в зоне работ необходимо очистить щетками от пыли, грязи, промыть водой под давлением или обдуть сжатым воздухом. Для заделки подготовленных штраб требуется применять двухкомпонентный запечатывающий материал. Далее следует установить накладные пакеры с шагом 100 мм вдоль трещины, произвести инъектирование трещин через накладные пакеры составом с помощью однокомпонентного инъекционного насоса. Инъектирование вести до полного заполнения трещины. После проведения инъектирования необходимо демонтировать пакеры и произвести заделку отверстий запечатывающим материалом. В течение времени жизни материала все рабочие инструменты и оборудование следует очистить промывкой. Начавший схватываться или схватившийся материал можно удалить только механически [15-16].

Дополнительное усиление железобетонных перекрытий с применением силовой набетонки армированием металлической арматурой. Работы по усилению верхней зоны плит перекрытий следует выполнять в следующей последовательности: подготовка поверхности, монтаж армокаркаса, устройство набетонки толщиной 70 мм, выравнивание поверхности полов, создание пандусов для заезда и съезда автотранспорта. Поверхность пола должна быть тща-

тельно очищенной от мусора, пыли и пятен, шероховатой. Далее следует произвести разметку и сверление отверстий под анкера, установить анкера в просверленные отверстия с применением химического состава, произвести монтаж арматурной сетки с приваркой к хим. анкерам. Следует использовать арматуру А400: продольные стержни – Ø20 мм; поперечные – Ø10 мм. Устроить маяки с шагом 2 м, зону работ разбить на захватки на всю длину помещения и произвести бетонирование (толщиной 70 мм). Бетонирование выполняют из мелкозернистого бетона класса В25 с помощью бетононасоса [17]. Бетон уплотняется с использованием виброрейки и выравнивается строительным правилом по маякам. Когда набетонка затвердеет до уровня, чтобы на ней не оставались вмятины от следов при ходьбе, требуется проверить ровность и срезать бугры двухметровым металлическим правилом. По истечении 1–2 ч, когда раствор схватится, набетонку нужно затереть деревянными полутерками или штукатурно-затирочной машиной. Такие операции по устройству набетонки производят по захваткам на всю длину помещения. Для того чтобы на набетонке не образовывались трещины и отслоения от основания, через сутки после укладки ее поверхность смачивают водой два раза в день и накрывают пергамином или полиэтиленовой пленкой. Для создания пандусов для заезда и съезда автотранспорта следует огрунтовать поверхность пола грунтовкой глубокого проникновения для повышения адгезии ремонтного состава и основания. Устройство пандусов производят с применением ремонтного состава. Растворную смесь затворяют водой комнатной температуры. Необходимая пропорция раствора: 0,20 л воды: 1 кг сухой растворной смеси. Сухую смесь размешивают с водой не менее 120 с до тестообразного однородного состояния вручную или с применением механических строительных миксеров. Далее пасту оставляют на 15 минут для полного растворения химических добавок, а затем повторно перемешивают. При необходимости смесь возможно повторно перемешивать без дополнительного затворения водой в течение часа с момента приготовления раствора. Растворную смесь наносят на усиливаемый участок послойно, толщина каждого слоя составляет около 20 мм, разравнивая каждый слой шпателем или мастерком вручную. Каждый слой наносят после схватывания предыдущего. Время отверждения составляет около получаса. Для наилучшего сцепления слоёв предыдущий слой должен оставаться шероховатым. Начиная со второго дня необходимо смачивать место усиления [18-19].

Выводы. В статье была рассмотрена и изложена последовательность производства работ по усилению и ремонту и технология устройства композитных холстов и лент из углеволокна, а также технология производства работ по дополнительному усилению железобетонных перекрытий с применением силовой набетонки с армированием металлической арматурой [20].

Библиографический список:

1. Меркулов С.И., Римшин В.И., Акимов Э.К. Огнестойкость бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 50–55.
2. Римшин В.И., Курбатов В.Л., Король Е.А., Кузина Е.С., Саттаров С.А. К вопросу остаточного ресурса железобетонных конструкций при поперечном изгибе по

прочности нормальных сечений // В сборнике: Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019 Сборник материалов Всероссийской научно–практической конференции. 2019. С. 440–444.

3. Мурашкин В.Г., Анпилов С.М. Расчетно–экспериментальные исследования, методология решения влияния усадки бетона на напряженное состояние плиты перекрытия // В сборнике: Экономика, управление и право в современных условиях. Межвузовский сборник статей. Под общей редакцией М.М. Матвеевой. Тольятти, 2020. С. 55–61.

4. Ерышев В.А. Метод расчета железобетонных конструкций на прочность с применением упрощенных диаграмм деформирования материалов // Научное обозрение. 2016. № 4. С. 21–25.

5. Волкова С.В., Курбатов В.Л. Инновационные системы управления предприятием. Казанская наука. 2015. № 3. С. 46–48.

6. Мосаков Б.С., Курбатов В.Л., Римшин В.И. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Минеральные Воды, 2017.

7. Варламов А.А., Римшин В.И. Модели поведения бетона общая теория деградации // для студентов инженерно–строительных факультетов, получающих образование по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» / Москва, 2019. Сер. Научная мысль

8. Курбатов В.Л., Дайронас М.В. Экологический эффект от фотокаталитического бетона // Университетская наука. 2019. № 1 (7). С. 24–27.

9. Римшин В.И., Кузина Е.С., Хамракулов Р.Д. Анализ технического состояния несущих конструкций сооружений водоподготовки и водоотведения для последующего их усиления // В сборнике: БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНОГО ФОНДА РОССИИ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ. материалы Международных академических чтений. 2019. С. 294–302.

10. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 38–42.

11. Курбатов В.Л., Фурсов А.В., Римшин В.И. Способ для разделения сыпучих материалов по фракциям методом метания смеси частиц с одинаковой скоростью и устройство для его осуществления патент на изобретение RUS 2672697 13.10.2017.

12. Римшин В.И., Курбатов В.Л., Король Е.А., Кузина Е.С., Саттаров С.А. К вопросу остаточного ресурса железобетонных конструкций при поперечном изгибе по прочности нормальных сечений. В сборнике: Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019 Сборник материалов Всероссийской научно–практической конференции. 2019. С. 440–444.

13. Меркулов С.И., Римшин В.И. Композитные материалы для бетонных и железобетонных конструкций В Сборнике: актуальные вопросы архитектуры и строительства материалы. Семнадцатой Международной научно–технической конференции. Отв. ред.: В. Т. Ерофеев. 2018. С. 222–225.

14. Варламов А.А., Теличенко В.И., Римшин В.И. Модели материалов по теории деградации Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 4 (382). С. 59–65.

15. Римшин В.И., Кецко Е.С., Трунтов П.С., Кузина И.С., Быков Г.С. Поверочные расчеты строительных конструкций в рамках комплексного технического обследования Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции. 2020. С. 148–155.

16. Telichenko V., Rimshin V., Kuzina E. Methods for calculating the reinforcement of concrete slabs with carbon composite materials based on the finite element model. В сборнике: MATEC Web of Conferences 2018. С. 04061.
17. Rimshin V.I., Kuzina E.S., Shubin I.L. Analysis of the structures in water treatment and sanitation facilities for their strengthening // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019. 2020. С. 012074.
18. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi S. A method for assessing the stress–strain state of reinforced concrete structures В сборнике: E3S Web of Conferences 2019. С. 02046.
19. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Т. 983. С. 911-919.
20. Kuzina E., Rimshin V. Experimental and calculated evaluation of carbon fiber reinforcing for increasing concrete columns carrying capacity В сборнике: E3S Web of Conferences 2019. С. 04007.

ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ СОСТАВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОДВАЛЬНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ОТ ПОДТОПЛЕНИЙ

О.Б. Ляпидевская¹, канд. техн. наук, доцент

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Защита подвальных помещений от подтоплений имеет большое значение для обеспечения нормального тепло-влажностного режима эксплуатации и повышению долговечности зданий и сооружений. Настоящее исследование посвящено разработке универсального гидроизоляционного состава, применение которого возможно эффективно использовать при новом строительстве, а также при ремонте подвальных помещений. В отличие от существующих обмазочных покрытий на цементной основе разработанный материал обладает повышенной эластичностью, прочностью, трещиностойкостью и адгезией к бетонному основанию. Высокие показатели достигаются путем введения в состав материала добавок микрокремнезема и этилен винилацетата. Был установлен оптимальный состав гидроизоляционного материала; определены его основные физико-механические характеристики. Согласно полученным результатам проведенных исследований, было установлено, что разработанный состав соответствует требованиям, предъявляемым к гидроизоляционным материалам, и может быть рекомендован для защиты подвальных помещений, как при новом строительстве, так и при ремонтных работах.

Ключевые слова: гидроизоляционный состав, эластичность, прочность, трещиностойкость, адгезия.

Важнейшим мероприятием по защите подвальных помещений от подтоплений является устройство качественных гидроизоляционных покрытий. Существуют различные виды органических (битумных, полимерных) и неорганических (цементных, глинистых, металлических) гидроизоляционных покрытий. Широкое применение получили гидроизоляционные обмазочные составы на цементной основе благодаря следующим преимуществам: возможности нанесения на защищаемую поверхность в ранние сроки после укладки бетона; получению бесшовного покрытия; хорошей адгезии к бетону; возможности применения, как при негативном, так и при позитивном давлении воды [1-3].

Однако существующие гидроизоляционные цементные составы возможно применять в случаях, когда защищаемые конструкции не испытывают значительных температурных воздействий и деформаций, способных вызвать появление трещин и разрушение покрытий. Применение жестких покрытий допустимо, если раскрытие трещин бетона основания не превышает 0,3 мм [1].

Анализ материалов, применяемых для устройства гидроизоляционных покрытий, свидетельствует о необходимости разработки эффективного эластичного обмазочного цементного материала для защиты подвальных помещений.

В связи с этим нами был разработан гидроизоляционный материал, который представляет собой сухую смесь. В состав смеси входят следующие компоненты: портландцемент (класса ЦЕМ-I 42,5Н), песок (фр. 0,16 – 0,63 мм), микрокремнезем (марки МК 85), а также органические добавки - этилен ви-

нилацетат (Mowilith Pulver DM 2072 P), суперпластификатор (Melflux 2561F) и водоудерживающая добавка (метилцеллюлоза Tylose H 300 P 2).

Использование микрокремнезема в качестве активной минеральной добавки способствует повышению прочности и водонепроницаемости раствора за счет реакции SiO_2 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, способствующих уплотнению структуры цементного камня. С целью снижения водотвердого отношения из-за высокой удельной поверхности микрокремнезема ($18000 \text{ см}^2/\text{г}$), была применена пластифицирующая добавка.

Введение добавки этилен винилацетата, представляющей собой сухой ре-диспергируемый порошок, позволило повысить эластичность и адгезию покрытия. При смешивании добавки с водой образуется водная полимерная дисперсия, которая создает эластичные связи между частицами раствора. Благодаря этому раствор имеет повышенную прочность на растяжение при изгибе и трещиностойкость.

Во избежание образования усадочных трещин при нанесении обмазочного материала на бетонное основание, вызванного поглощением воды из растворной смеси, была применена водоудерживающая добавка [4,5].

Оптимальный состав гидроизоляционной смеси был определен с применением математических методов планирования эксперимента. За независимые переменные были приняты расходы микрокремнезема и этиленвинилацетата (в % от массы цемента). Параметры оптимизации – предел прочности на растяжение при изгибе ($R_{и}$, МПа) и прочность сцепления покрытия с бетонным основанием ($R_{сц}$, МПа). В качестве постоянных были приняты расходы материалов (в % от массы цемента): мелкий заполнитель (кварцевый песок) – 36,7 суперпластификатор – 0,35, водоудерживающая добавка – 0,2; температура твердения $+20^\circ\text{C}$, влажность среды 98%.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы. При введении микрокремнезема от 5 до 15% $R_{и}$ увеличивается от 6,5 до 12,8 МПа, а $R_{сц}$ уменьшается от 1,2 до 1,1 МПа. При введении этиленвинилацетата от 2 до 5 $R_{сц}$ увеличивается от 1,3 до 1,47 МПа, а $R_{и}$ растет от 7,2 до 10, 6 МПа; однако при дальнейшем увеличении расхода этиленвинилацетата происходит ее снижение. При обработке результатов проведенных исследований был определен оптимальный состав гидроизоляционного материала (табл. 1).

Таблица 1. Состав гидроизоляционного материала

Элемент	Содержание, кг
Портландцемент	660
Кварцевый песок	241
Микрокремнезем	66
Этиленвинилацетат	33
Суперпластификатор	2,3
Водоудерживающая добавка	1,3
Водотвердое отношение В/Т=0,32	

Основные физико-механические свойства (водоудерживающая способность, предел прочности при сжатии и изгибе, водонепроницаемость) материала полученного оптимального состава проводилось по стандартным методикам [6,7]. Образцы хранились при температуре 20°С, атмосферном давлении и относительной влажности 95 %. Адгезия, водонепроницаемость и перекрытие трещин определялось по EN 14981. Классы гидроизоляции по способности перекрытию трещин устанавливались по EN 1504-2 [8,9].

Результаты испытаний по определению физико-механических характеристик разработанного состава приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства разработанного состава

Свойства	Значение	Значения, удовлетворяющие стандартам	Нормативные документы
Водоудерживающая способность, %	95	Не менее 90%	ГОСТ Р 56703
Прочность при сжатии, МПа	50,4	Гидроизоляционное покрытие не должно приводить к снижению проектной прочности защищаемого бетона	ГОСТ Р 56703
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	10,5		ГОСТ Р 56703
Адгезия к бетонному основанию, МПа	1,7	Более 0,5 МПа	EN 14891, ГОСТ 31357
Перекрытие трещин, мм	0,8	Более 0,75 МПа	EN 14891
Класс по способности перекрытию трещин	A3	Более 0,5 мм	EN 1504-2
Водонепроницаемость, атм, марка	W14	Не ниже W6	ГОСТ 31357
Расход на 1 м ² , кг	1,5 – 1,8	-	-

Таким образом, данные, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что разработанный материал по физико-механическим и техническим характеристикам соответствует российским и зарубежным стандартам.

Результаты испытаний показали, что гидроизоляционный материал, разработанный на основе цемента с добавками микрокремнезема и этиленвинилацетата, обладает высокой прочностью на растяжение при изгибе, прочностью сцепления с бетонным основанием, трещиностойкостью, а также высокими показателями водонепроницаемости и может быть рекомендован для применения в качестве защитного покрытия для подвальных помещений.

Библиографический список:

1. Шилин, А.А., Зайцев, М.В., Золотарев, И.А., Ляпидевская, О.Б. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительстве и ремонте / А.А. Шилин. – Тверь: Русская марка, 2003. С. 25-100

2. Мальцева, И.В., Мальцев, Е.В. Сухие смеси для обмазочной гидроизоляции / И.В. Мальцева // Материалы международной научно-практической конференции «Строительство - 2010». Ростов-на-Дону, 2010. С. 49-50.
3. Mendes, P., Lopes, J. Grandão, de Brito, J., Feiteira, João. Waterproofing of Concrete Foundations / P. Mendes. // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2014. № 28(2). pp. 242-249.
4. Удодов, С.А., Гиш, М.Р. Влияние дозировки редицергируемого порошка на локализацию полимера и деформационные свойства раствора / С.А. Удодов // Научные труды КубГТУ. 2015. № 9, С. 164-174.
5. Lyapidevskaya, O. Waterproofing material for protection of underground structures/ O. Lyapidevskaya // XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment”. 2019. V. 97, 02008.
6. ГОСТ Р 56703-2015 Смеси сухие строительные гидроизоляционные проникающие капиллярные на цементном вяжущем. Технические условия.
7. ГОСТ 31357-2007 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия.
8. DIN EN 14891-2013 Liquid-applied water impermeable products for use beneath ceramic tiling bonded with adhesives - Requirements, test methods, evaluation of conformity, classification and designation.
9. EN 1504-2:2009 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 2. Surface protection systems for concrete.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦВЕТОМЕТРИЧЕСКОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТОВ С МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ И ПИГМЕНТАМИ ВНЕ ЛАБОРАТОРИИ

О.Б. Рудаков¹, д-р хим. наук, профессор

А.М. Хорохордин¹

Я.О. Рудаков²

О.В. Черноусова³, канд. техн. наук

¹*Воронежский государственный технический университет*

²*Воронежский государственный университет*

³*Воронежский государственный университет инженерных технологий*

Аннотация. Рассмотрены цветометрические характеристики типового и белого портландцемента, золы уноса, извести, мела, шлака, двойных и тройных систем портландцемента с минеральными добавками, белого цемента с пигментами коричневого, красного, оранжевого, желтого, зеленого, розового, синего и черного цветов минерального и органического происхождения. Долю минеральных добавок в смесях варьировали от 0 до 30%, пигментов 0-15 %, органических пигментов до 3%. Для измерения параметров цветности применяли цветовую систему *RGB*. Цветность оценивали с помощью смартфонов *Huawei*, для обработки цифровых изображений испытали несколько пакетов программного обеспечения, совместимого с мобильными устройствами. В качестве образца сравнения (эталоны белизны) применили порошкообразный BaSO_4 . Показано, что контроль цветности цементов с помощью цифровой цветометрии с использованием смартфонов достаточно эффективен и может использоваться для оперативного обнаружения в цементах как минеральных добавок, отличающихся от цемента по параметрам цветности, так и для определения содержания пигментов в цветных цементах. Градуировочные уравнения «параметр цветности – концентрация добавки» для количественного определения монодобавки в цементе с коэффициентами детерминации $R^2 \geq 0.95$ имеют линейный вид, градуировочные уравнения для смесей белого цемента с пигментами адекватно линеаризуются в виде полулогарифмических анаморфоз.

Ключевые слова: цифровая цветометрия, портландцемент, цветной цемент, минеральные добавки, пигменты

В гражданской и промышленной архитектуре, начиная с XX века для обеспечения эстетических дизайнерских решений активно стали применять окрашенные в различные цвета строительные материалы, например, цветные цементы. С другой стороны, широкое применение получили цементы, в которые вносят до 30% различных минеральных добавок.

В отечественных средствах массовой информации и интернет-ресурсах имеется большое количество публикаций о масштабной фальсификации и контрафактной реализации цемента, сухих строительных смесей, в связи с этим злободневной является задача экспрессного контроля качества цемента, определение подлинности его марки и выявления грубой фальсификации. Контрафактный цемент с большой долей неактивного балластного минерального материала (мел, зола, шлак и т.п.) не обладает стандартными характеристиками связующего, что приводит к тому, что полученный из него бетон не достигает

проектной прочности и долговечности, из-за чего строительные изделия и конструкции из такого бетона могут разрушаться под природными или техническими нагрузками. Как показано в [1-2], цифровая цветометрия (ЦЦМ) с использованием компактных и мобильных цветорегистрирующих устройств, а именно смартфонов, стала одним из перспективных тест-методов оперативного контроля качества строительной продукции, в том числе цемента. В строительной отрасли применяют визуальную колориметрию (ГОСТ 15825-80 «Портландцемент цветной. Технические условия»), цвет цемента сравнивают с цветом эталона визуально. В качестве эталона используют интенсивность цвета цементной покраски, эталонного цементного порошка. ЦЦМ позволяет исключить субъективность такой оценки химиком-аналитиком, позволяет проводить как только качественный тест-анализ, так и количественный анализ содержания в цементе различных добавок [2].

Целью работы – совершенствование цветометрического тест-метода с применением смартфонов для контроля параметров цветности цемента, содержащих минеральные добавки и пигменты. Применение ЦЦМ для определения минеральных примесей и пигментов в цементах мобильными устройствами можно отнести к оптическим тест-методам химического анализа, которые предназначены для быстрого обнаружения или определения содержания анализируемых веществ в пробе с использованием несложных приспособлений, простых методик и алгоритмов пробоподготовки, пригодных для реализации во внелабораторных условиях. Для выполнения тест-анализа достаточно квалификации техника или лаборанта. Тест-методы экономят время и средства, необходимые для проведения анализа, они отличаются оперативностью получения, обработки и передачи информации, при этом отсутствуют проблемы, связанные с хранением и транспортировкой проб. Статистическую и метрологическую обработку результатов измерений с помощью смартфона можно выполнять с применением облачных технологий, либо передавать первичные результаты по мобильному интернету на лабораторный компьютер.

Существует несколько цветовых систем, используемых в ЦЦМ: RGB, CIELAB, CMYK, XYZ и др. [1-2]. Из них наиболее часто применяют систему RGB. Три базовых цвета в ней могут принимать значения в диапазоне 0÷255, что позволяет описать количественно при разных пропорциях цветовых компонент до 16 млн и более цветов, тонов и оттенков. Цветовая система RGB не лишена некоторых недостатков, в частности она аппаратно-зависима, однако удобна для восприятия, благодаря сходству с человеческим зрением, и представлена во всех компьютерных программах по обработке цифровых изображений, именно поэтому эта система была использована в нашей разработке. Одной из проблем применения ЦЦМ во внелабораторных условиях являются разные условия съемки. Чтобы нивелировать систематические и случайные погрешности, обусловленные аппаратной зависимостью системы RGB, отличающейся аппаратурой (разными марками смартфонов), разным программным обеспечением, не одинаковой освещенностью во время съемки, нами предложено использовать не абсолютные, а относительные интенсивности цветовых компонент F'_i при фоторегистрации проб:

$$F'_i = F_i / F_{i,e} \quad (1)$$

где $F_{i,e}$ – интенсивности каналов цветности эталона ($BaSO_4$), полученные параллельно с F_i анализируемого образца. К примеру, относительная интенсивность красной компоненты R для образца золы уноса $F'R=FR(\text{зола})/FR(BaSO_4) = 56/232=0.24$. Относительная интенсивность этой же красной компоненты R для белого цемента без добавок пигментов $F'R=FR(\text{цемент})/FR(BaSO_4) = 209/227=0.92$.

Еще один прием стандартизации цифровой съемки, проведение ее на одинаковом расстоянии смартфона от лунок типового микропланшета UniCell, в котором одновременно можно разместить сразу несколько параллельных или разных проб и образец сравнения. Целесообразно регистрацию цифрового изображения выполнять в помещении с искусственным освещением примерно 140 люкс. Во внелабораторных условиях можно воспользоваться фотографическим боксом несложной конструкции с подсветкой проб диодными лампами небольшой мощности и креплением для смартфона [2].

В ходе выполненных исследований получены цветиметрические характеристики типового (серого) и белого портландцемента, золы уноса, извести, мела, шлака, двойных и тройных систем серого портландцемента с минеральными добавками, и белого цемента с пигментами коричневого, красного, оранжевого, желтого, зеленого, розового, синего и черного цветов минерального и органического происхождения. Содержание минеральных добавок в смесях меняли от 0 до 30%, пигментов в диапазоне $0 \div 15\%$, а для органических пигментов в соответствии с ГОСТ 15825-80 «Портландцемент цветной. Технические условия» от 0 до 3%. Параметры цветности регистрировали с помощью смартфонов Huawei двух марок, для обработки цифровых изображений испытали несколько пакетов программного обеспечения, совместимого с мобильными гаджетами: RGB. Android 1.0.47, Pixel Picker 1.3.0.23, Color Grab 3.6.1 и др. На рис. 1-4 приведены примеры изменения параметров цветности цементов в зависимости от состава добавок.

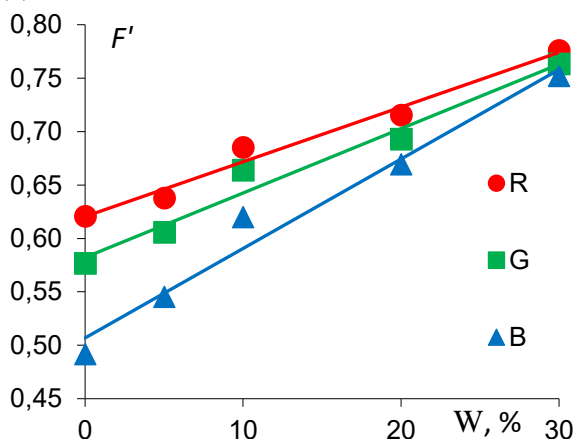


Рис. 1. Влияние на F'_i содержания мела (%) в смеси «портландцемент – мел», Huawei P Smart, ПО RGB. Android

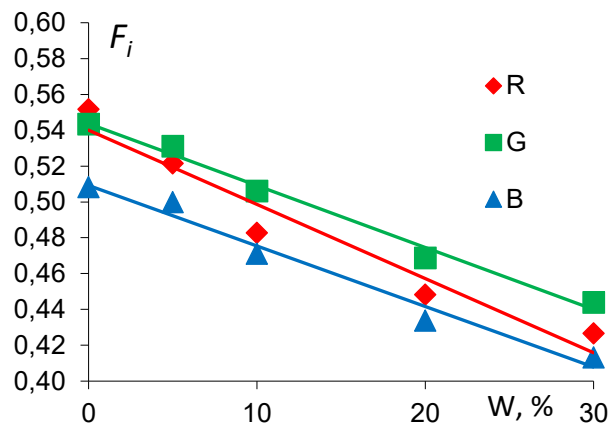


Рис. 2. Влияние на F'_i содержания золы уноса (%) в смеси «портландцемент – зола уноса», Huawei P Smart, ПО RGB. Android

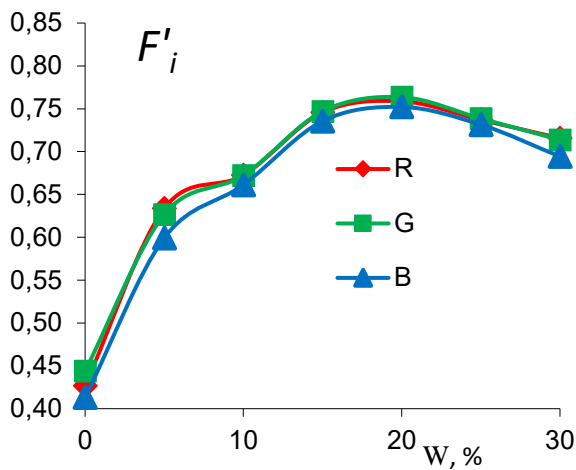


Рис. 3. Влияние на F'_i тройных смесей «цемент – зола уноса – известь» их состава; *Huawei P Smart*, ПО *RGB. Android*

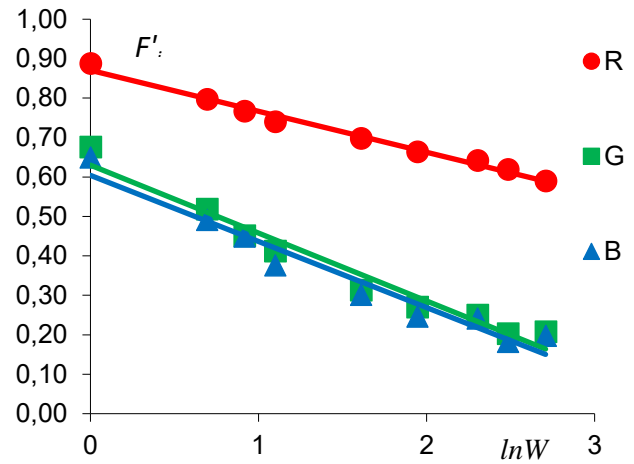


Рис. 4. Влияние на F'_i содержания красного минерального пигмента в портландцементе, *Huawei P Smart*, ПО *RGB. Android*

Градуировочные функции «параметр цветности – концентрация добавки» для количественного определения монодобавки в цементе с коэффициентами детерминации $R^2 > 0.90$ имели линейный вид (табл.1):

$$F'_i = a + bW \quad (2)$$

где W – массовая доля добавки, %, a, b – эмпирические коэффициенты.

Градуировочные функции для смесей цемента с пигментами чаще всего имеют вид полулогарифмических анаморфоз (табл.2):

$$F'_i = a - b \ln W \quad (3)$$

Таблица 1. Уравнения градуировочных функций для определения содержания добавки (%) в смеси с цементом с помощью смартфона *Huawei P Smart*, ПО *RGB. Android*

Добавка	Градуировочное уравнение (2)	R^2
Мел	$F'_R = 0.007W + 0.520$	0.99
	$F'_G = 0.007W + 0.500$	0.99
	$F'_B = 0.009W + 0.433$	0.99
Известь	$F'_R = 0.007W + 0.518$	0.99
	$F'_G = 0.007W + 0.506$	0.97
	$F'_B = 0.009W + 0.451$	0.92
Зола уноса	$F'_R = 0.544 - 0.004W$	0.99
	$F'_G = 0.540 - 0.004W$	0.95
	$F'_B = 0.509 - 0.003W$	0.98

При наличии не одной, а смеси двух добавок градуировочные функции становятся нелинейными и адекватно описываются биномиальными уравнениями. Для систем «цемент – известь (мел) – зола уноса» есть «слепые зоны», в которых F'_i тройной смеси лежат в плоскости значений, близких по интенсивности компонентам F'_i цемента без добавок (см. рис.3, табл. 3).

Таблица 2. Градуировочные функции для определения содержания пигментов (%) в смеси.

Пигмент	Градуировочная функция (3)	R^2
Красный	$F'_R=0.87 - 0.10\ln W$	0.99
	$F'_G=0.63 - 0.17\ln W$	0.97
	$F'_B=0.604 - 0.17\ln W$	0.96
Коричневый	$F'_R=0.77 - 0.17\ln W$	0.98
	$F'_G=0.67 - 0.19\ln W$	0.98
	$F'_B=0.64 - 0.19\ln W$	0.97
Розовый	$F'_R=0.95 - 0.06\ln W$	0.98
	$F'_G=0.95 - 0.02\ln W$	0.99
	$F'_B=0.94 - 0.02\ln W$	0.99
Оранжевый	$F'_R=0.96 - 0.10\ln W$	0.93
	$F'_G=0.76 - 0.11\ln W$	0.99
	$F'_B=0.60 - 0.12 \ln W$	0.99
Зеленый	$F'_R=0.65 - 0.13\ln W$	0.99
	$F'_G=0.58 - 0.14\ln W$	0.98
	$F'_B=0.71 - 0.14\ln W$	0.98
Черный	$F'_R=0.67 - 0.13\ln W$	0.99
	$F'_G=0.66 - 0.14\ln W$	0.99
	$F'_B=0.65 - 0.14\ln W$	0.99
Синий	$F'_R=0.90 - 0.004\ln W$	0.95
	$F'_G=0.91 - 0.20\ln W$	0.95
	$F'_B=0.90 - 0.11\ln W$	0.97
Желтый	$F'_R=0.98-0.02W$	0.71
	$F'_G=0.96-0.02W$	0.89
	$F'_B=0.94-0.05W$	0.98

В испытанном ряду пигментов, только желтый при увеличении его доли в цементе изменяет свою цветность в соответствии с уравнением (1) (табл. 2).

Таким образом, ЦЦМ с применением смартфонов оказалась перспективной в качестве оперативного способа контроля содержания минеральных добавок, минеральных и органических пигментов в цементах во внелабораторных условиях. Применение смартфонов обеспечивает невысокую стоимость единичного анализа, быстроту анализа, отсутствие требования высокой квалификации персонала, возможность электронного документирования, хранения и передачи первичных данных через мобильный интернет (вай-фай), блютуз, возможна обработка этих данных с помощью программного обеспечения, устанавливаемого либо непосредственно на мобильном устройстве, либо с применением облачных технологий. ЦЦМ полезна в качестве тест-анализа цементов для выявления их грубой фальсификации минеральными добавками, более светлыми или более темными, чем типовой цемент без добавок.

Таблица 3. Значения относительной интенсивности F'_i смесей «цемент – зола – мел», *Huawei P Smart*. ПО *RGB*. *Android*, $n=5$, $P=0.95$

Зола, %	Мел, %	F'_R	F'_G	F'_B
Общее количество внесенных добавок 30%				
30	0	0.43	0.44	0.41
25	5	0.63	0.63	0.60
20	10	0.67	0.67	0.66
15	15	0.75	0.75	0.74
10	20	0.76	0.76	0.75
5	25	0.74	0.74	0.73
0	30	0.72	0.71	0.69
Общее количество внесенных добавок 20%				
20	0	0.45	0.46	0.43
15	5	0.59	0.58	0.55
10	10	0.70	0.70	0.69
5	15	0.76	0.75	0.74
0	20	0.66	0.64	0.62
Общее количество внесенных добавок 10%				
10	0	0.48	0.51	0.47
5	5	0.60	0.60	0.57
0	10	0.58	0.57	0.53
Цемент без добавок				
0	0	0.55*	0.54	0.52

*Примечание: жирным курсивом выделены параметры цветности цемента без добавок и близкие к ним смесей портландцемента с минеральными добавками

Для проверки подлинности марки цемента по установленным и нормированным цветовым характеристикам и для контроля содержания в нем минеральных добавок или пигментов с применением ЦЦМ может быть эффективно использована цветовая система *RGB*. Если о природе добавок в цемент и их числе информация не известна, но известны цветометрические характеристики марки цемента можно выявить подлинность материала методом ЦЦМ качественно.

Библиографический список:

1. Шульц, Э.В. Цифровая цветометрия: аналитические возможности и перспективы использования / Э.В. Шульц, О.В. Моногарова, К.В. Осолок // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2019. Т. 60, № 2. С. 79-87.
2. Черноусова О.В., Рудаков О.Б. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа/ О.В. Черноусова, О.Б. Рудаков // Химия, физика и механика материалов. 2019. №2. С.55-125.

АНАЛИЗ АНГАРНЫХ СИСТЕМ В СТОЛЕТНЕМ ПРОМЕЖУТКЕ ВРЕМЕНИ

И.С. Игольников, студент ИДОм 1-8

Л.А. Пахомова, ст. преп.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Ангары за последние десятилетия претерпели множества изменений, следуя за высокими темпами развития строительных конструкций. Современные методы проектирования направлены не только в сторону повышения безопасности сооружения, но и в сторону функционального удобства. Цель работы — это сравнительный анализ ангаров XX и XXI века. Применялись натурные обследования мест дислокаций сооружений, анализ чертежей и проектных решений существующих ангаров. Полученные сведения структурировались и обобщались. Проведена работа по структуризации литературных и исторических источников отечественных и зарубежных авторов, посвященных проблеме развития и эволюции строительства ангарных систем, начиная с первых полевых версий, применяемых в ходе Первой мировой войны, до современных ангаров. Представлены 6 этапов создания и развития как архитектуры, так и внутреннего конструктива сооружений в целом, которые в дальнейшем привели к существующим проектным решениям. Описана подробная характеристика каждого объекта, начиная с 1908 года по 2014 год и их вклад в дальнейшее развитие. Отмечены важнейшие труды конструкторов и строителей преимущественно Европейской части. Показаны примеры и фотографии ныне существующих ангарных систем, построенных в каждый период. Каждый этап развития иллюстрируется примерами реальных сооружений с их конструктивным описанием. Существующие проектные и технические решения во многом превосходят первые версии ангаров. Благодаря развитию стандартизации и менеджмента качества строительной продукции, мы видим колоссальные улучшения не только в скорости и качестве возводимых объектов, но и в их безопасности и устойчивости к неблагоприятным внешним воздействиям. Наглядность прогресса в данной сфере, дает нам уверенность, что через сто или двести лет мы увидим модернизацию имеющихся проектов на совершенно новом уровне.

Ключевые слова: ангар, несущие конструкции, строительный материал, проектное решение, технология строительства, металлические конструкции, деревянные конструкции, современное строительство.

ВВЕДЕНИЕ

Первые ангары были деревянными и простыми в конструкции [1]. Главными преимуществами ангаров были скорость их возведения и устойчивость к погодным условиям.

Позднее стали строить деревянные ангары в отдаленных уголках нашей страны для различных нужд. Транспортировка и монтаж металлических конструкций в данной местности были невозможны, поэтому строительство из местных материалов применялось достаточно продолжительное время.

В крупных же городах ангары стали строить и из других строительных материалов [2-4]. В нашей стране в 30-х годах прошлого столетия начали появляться первые металлические ангары пролетом 30-45 м. Они более устойчивы к

погодным влияниям, а также имеют более высокую несущую способность, но они более дорогостоящие, нежели деревянные. Однако с течением времени по мере налаживания и увеличения контроля за производством металлических изделий, ангары со стальным каркасом все больше использовались в современном строительстве [5].

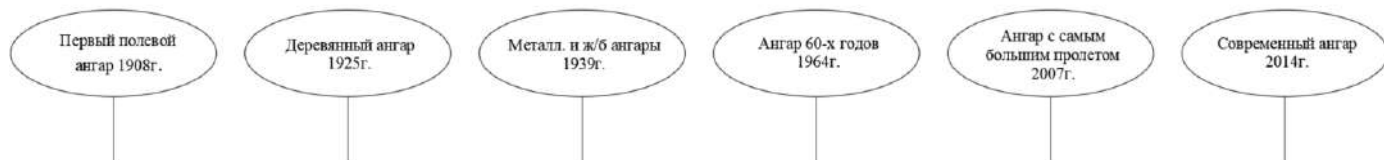


Рис. 1. Временная лента ангарных систем

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения этапов формирования строительства ангаров как отдельной отрасли были применены труды как инженеров начала XX века, так и современных инженеров проектировщиков, принимавших участие в проектировании ангаров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый ангар.

Западная часть России даже по современному СП 20.13330.2016 [6] характеризуется весьма внушительным снеговым покровом, не говоря иногда и о сильных ветрах, а если еще учитывать изменение климата в сторону потепления за последние десятилетия, то эти цифры можно смело увеличивать.

Первые ангары использовались для хранения или же укрытия чего-либо от погодных условий. Такими первыми ангарами стали ангары системы «Бессонно».

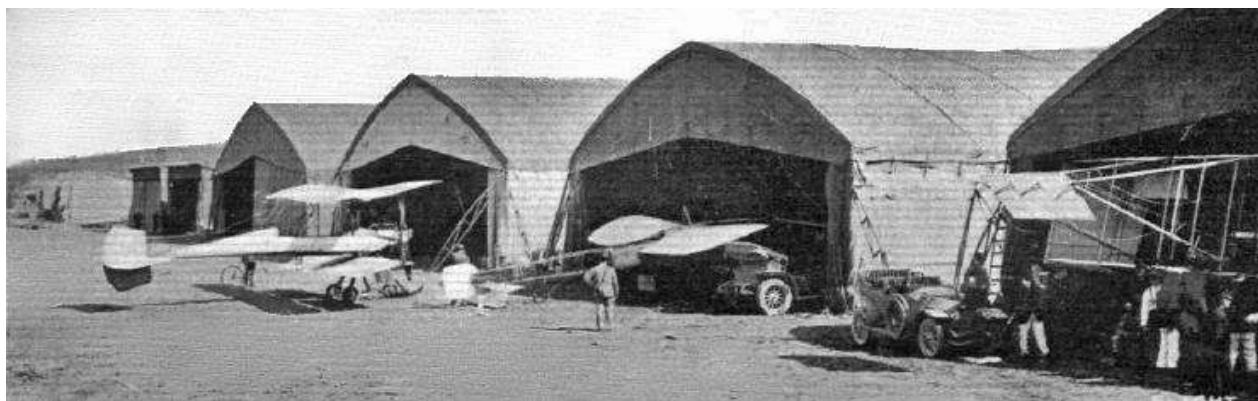


Рис. 2. Полевые ангары системы «Бессонно» в Везуле, 1911 г.

Первые ангары Российская империя активно закупала у Франции. Деревянная конструкция, покрытая брезентом, снискала успех не только за рубежом, но и у нас, пройдя самые экстремальные испытания.

Ангар представлял собой пространственный деревянный каркас с колоннами и фермами [8], а также связями между ними. Так как древесина имела сравнительно небольшой вес, а также была более доступна чем другие материалы, то любая поломка какого-либо элемента с легкостью заменялась на идентичный с

помощью местных ресурсов. Это обеспечивало древесине в годы Первой мировой войны весьма широкое распространение как ценный строительный материал.

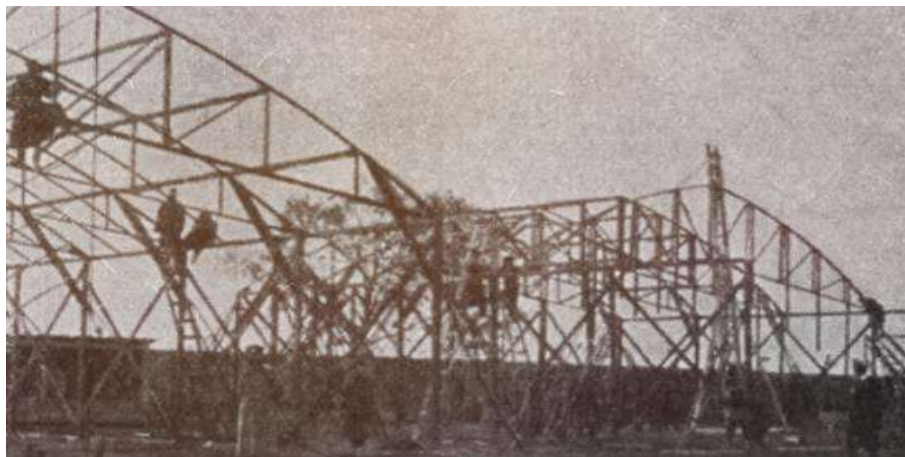


Рис. 3. Монтаж полевых ангаров системы «Бессонно», 1910 г.

Ферма для ангаров системы «Бессонно» была полигонального очертания, с нисходящими раскосами, что являлось наиболее выгодным и практичным. Нисходящий раскос, как более длинный элемент, испытывал растяжение, а стойка, как более короткий элемент, сжатие. Плюсом служит то, что фермы, очерченные по эпюре моментов, являются наиболее экономичными.

В комплект поставки входили элементы ферм и связей, деревянные пластины, стальные скобы и болты. Такой подход позволял в короткие сроки установить ангар в проектное положение, и так же быстро его демонтировать в случае необходимости. Длина ангара варьировалась в зависимости от нужд и составляла 6, 9 или 12 метров.

По сторонам и с тыльной части ангара были задействованы аркбутаны, передающие горизонтальные усилия от распора рамы. Использовались веревки для привязки всей конструкции к стальным пикетам, вбитым в землю. Для придания дополнительной жесткости ферме, в плохих погодных условиях, использовались «снежные столбы», которые с одного края были шарнирно сопряжены с фермой, а с другого крепко привязаны к ферме и в случае сильного снегопада или ветра, производилось раскрепление привязанного конца, для дополнительной поддержки крыши. Элементом покрытия данной конструкции служило брезентовое покрытие, привязанное к каркасу ангара. Внутреннее пространство ангара имело ширину 20 м, длину 24 м и высоту 4 м, что являлось весьма внушительным для такого времени размером [9].

При таком выполнении работ коэффициент механизации, рассчитываемый по формуле 1 составлял примерно 20 процентов:

$$M = \frac{V_m}{V_o} \quad (1)$$

где V_m – объем работ, выполняемых механизированным способом в натуральном измерении, а V_o – общий объем работ данного вида в натуральном измерении. Такое низкое значение было вследствие того, что строительные машины не всегда могли участвовать в возведении ангаров и приходилось сооружать на месте различные подъемные механизмы для расширения фронта работ.

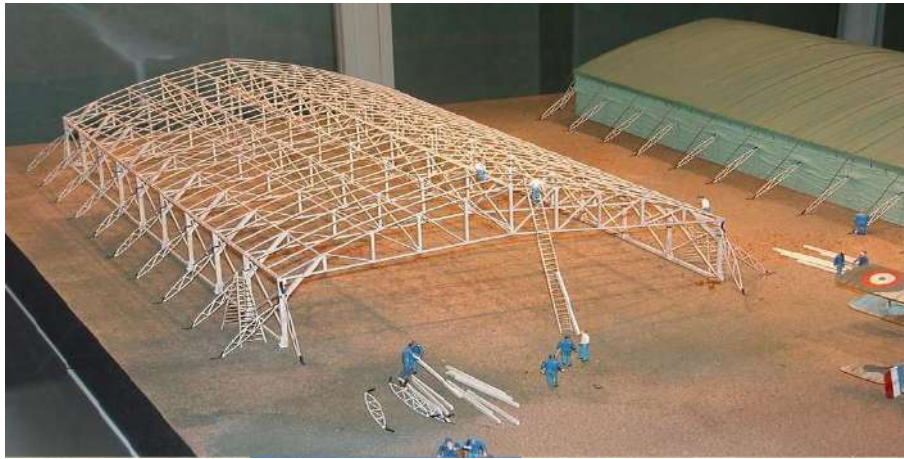


Рис. 4. Модель ангара в музее Бурже, 1910 г.

Накопленный опыт в дальнейшем позволил создавать и разрабатывать собственные ангары, с учетом любых погодных условий. Сначала это были такие же деревянные конструкции малых пролетов с несущими колоннами и фермами покрытых дощатым настилом. В современном же строительстве это уже металлические конструкции, где вариативность исполнения как несущих, так и ограждающих конструкций существенно расширилась.

Деревянный ангар.

Так, например, на Соловецких островах в 1925 году был построен древнейший и сохранившийся до наших времен ангар. Ангар был построен для воздушного сообщения с попыткой организации авиапочты Соловецких островов с материком [10].

Ангар все еще представлял из себя каркасно-рамную деревянную конструкцию, но уже отечественного производства по индивидуальному проекту.



Рис. 5. Южный фасад ангара на Соловецких островах.

На рис. 4 видно, что с восточной и западной стороны присутствовали боковые пристройки, предназначенные для хранения инструментов и обслуживания. Так же на эти пристройки крепились рельсы, служившие направляющими для раздвижных ворот.

Южная часть ангара имеет односкатную кровлю, в то время как северная двускатную. Такое архитектурное решение позволяло не бояться весьма большого снегового покрова [11]. Ограждающие конструкции представляли собой деревянную опалубку в различных вариациях.

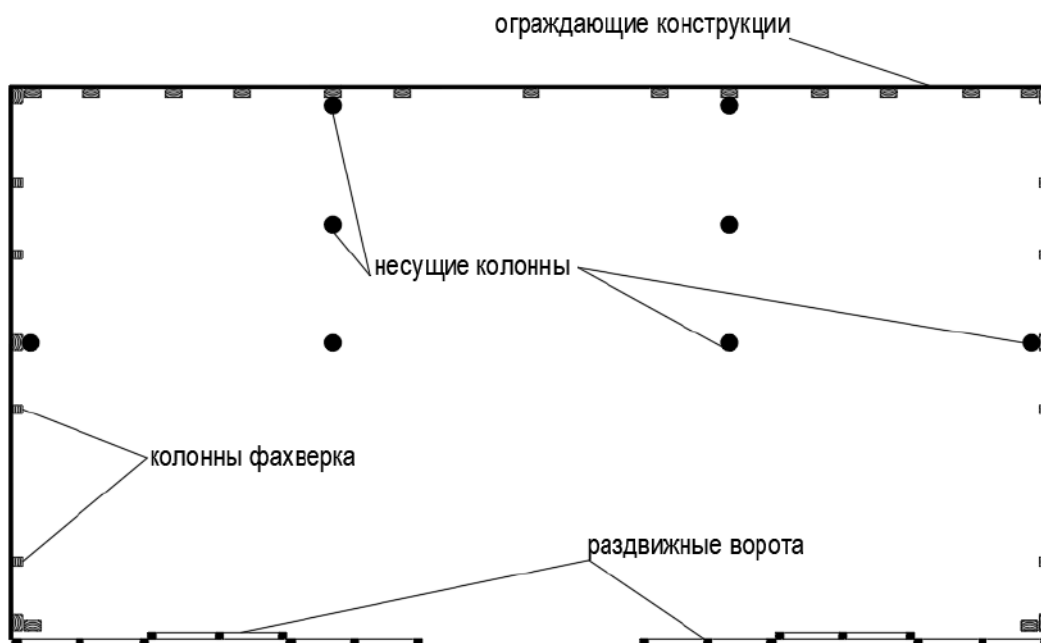


Рис. 6. План несущих конструкций ангара.

С 1939 года раздвижные ворота южного фасада обездвижены и теперь играют роль ограждающей конструкции с двойными дверьми посередине. С 2000 г. и в течение последующих лет здание, является единственным подобного рода памятником архитектуры России.



Рис. 7. Современный вид ангара.

Металлические и железобетонные ангары.

В 1934 году рядом с поселком Нойтиф, было принято решение построить ангары. Строительство продолжалось с 1934 г. по 1939 г.

Всего было построено 6 ангаров, 3 железобетонных и 3 металлических [12]. Уникальность этого объекта в том, что он был построен на зыбучих песках, омываемых водами Балтийского моря и залива. Все шесть ангаров имели прочный ленточный фундамент, в который после заливки устанавливались несущие опоры [13]. Такая технология позволила сохранить все конструкции более 80 лет, несмотря на то что сейчас, они находятся в плачевном состоянии [14, 15].

Давление ветра на Балтийской косе соответствует III ветровому району, ветер причем весьма переменчив по направлению. Поэтому строительство из бетона и стали стало наиболее рациональным способом, чтобы выдерживать данные нагрузки [16]. Ангары могли не только быть местом защиты от погодных условий, но и при необходимости обеспечивать место для ремонта. Так же немаловажным требованием была стойкость к особым воздействиям [17, 18], так что строительство из древесины было невозможно.

Все железобетонные ангары состоят из двух секций и шагом колонн 12 м [19, 20], в то время как металлические ангары более разнообразны в конструктивном решении [21]. Ко всем ангарам по бокам и с тыльной стороны организованы пристройки для технического обслуживания и ремонта. Так же у всех ангаров имелись ворота, состоящие из металлических створок, шарнирно соединенных и отодвигающихся по типу гармошки в разные стороны. Ограждающие конструкции выполнены в виде кирпича. При монтаже использовался сборный железобетон, для сокращения сроков строительства. Нумерация ангаров официальная.

Второй и четвертый ангар, одинаковы в конструктивном и планировочном решении. Выполнены в железобетонном варианте [22]. Компоновку поперечной рамы составляют колонны и фермы с дополнительными стойками, с нисходящими и восходящими раскосами. Пролет каждой секции составляет 60 метров, что в общем составляет 120 м, длина ангара 45 м, высота 9,5 м. Длина арочного покрытия составляет 35 м, которая в дальнейшем резко переходит в односкатную кровлю длиной 10 м.



Рис. 8. Общий вид второго ангара.

Третий ангар, так же выполненный в железобетонном варианте, но более интересен в конструктивном плане и имеет некоторые отличия. Он характеризуется отсутствием раскосов, при тех же внутренних размерах что и два предыдущих. Отсутствие раскосов компенсируется изменением сечения стоек по высоте, более массивными поясами фермы, а места опирания ферм на колонны имеют мощные приливы [23].



Рис. 9. Общий вид третьего ангара.

Шаг колонн остался неизменным, изменения коснулись только увеличения сечения в нижней части колонны [24]. Правая передняя секция обрушилась в 1955 г. не выдержав порыва ветра из-за критических повреждений. По бокам ангара находятся башни с лестничными пролетами, верхние площадки которых были оборудованы для установки различных защитных приспособлений.



Рис. 10. Внутренний конструктив третьего ангара.

В первом металлическом ангаре использовалась комбинация балок и ферм, которые были соединены между собой второстепенными балками, находившимися на одном уровне с главными балками, что позволяло уменьшить высоту ан-

гара в целом [25]. Пролет ангара составлял 60 метров, длина 35 метров, высота 9,5 м. Шаг колонн здесь отличается от железобетонного варианта и составляет 15 м.



Рис. 11. Общий вид первого ангара.

Металлическая балка посередине имеет весьма большое двутавровое сечение с постановкой поперечных ребер через каждый 1 м [26]. С одной стороны такая массивная конструкция позволяла уменьшить расход времени на монтаж, но с другой существенно влияла на затраты производства. Сверху на второстепенные балки укладывались балки настила, на которые в свою очередь конструкция покрытия [27], состоящая из армированного железобетона. Крыша двускатная с малым уклоном. Ворота ангара состояли из металлических створок, отодвигающиеся по типу гармошки в разные стороны. Данный ангар использовался в качестве места для ремонта, так как имел большую удаленность от других ангаров, в последствии использовался в качестве автопарка.



Рис. 12. Внутренний конструктив первого ангара.

Пятый ангар из металлоконструкций имеет внутренние размеры 73,5х45х9,5 м. Это единственный ангар, имеющий большой пролет без внутренних опор. Конструкция покрытия выполнена из стальных ферм из бетонных плит небольшой толщины. Крыша двускатная.



Рис. 13. Общий вид пятого ангара.

Шестой ангар имеет внутренние размеры — 100х35х9,5 м. Покрытие выполнено из стальных ферм, балок и бетонных плит небольшой толщины. Крыша двускатная, практически плоская. На фасадной части присутствует промежуточная колонна, разделяющая ангар на 2 секции, но во внутреннем пространстве они отсутствовали, что позволяло максимально эффективно использовать весь внутренний объем.



Рис. 14. Общий вид шестого ангара.

Ангар 60-х годов.

Ангар, расположенный в Толмачево, был построен в 1964 г. До строительства условия сибирских механиков оставляли желать лучшего. Обслуживания техники происходило как в жаркое летнее время, так и в 40-градусный мороз и

при больших порывистых ветрах, так что строительство ангара существенно бы улучшило положение.



Рис. 15. Общий вид ангара.

Каркас ангара состоит из трех пространственных двухпролетных поперечных рам, с шагом 30 м. Прокат, используемый в главных фермах и поперечных рамах, привезен из Германии и имеет повышенные прочностные характеристики [28], так как сталь представляет собой смесь перлита и феррита. Остальные элементы такие как решетка колонны, элементы связей и т.д. использована сталь марки ВСТЗкп. Размеры ангарной части 136x72x30 м с общим весом металлоконструкций около 1800 тонн.

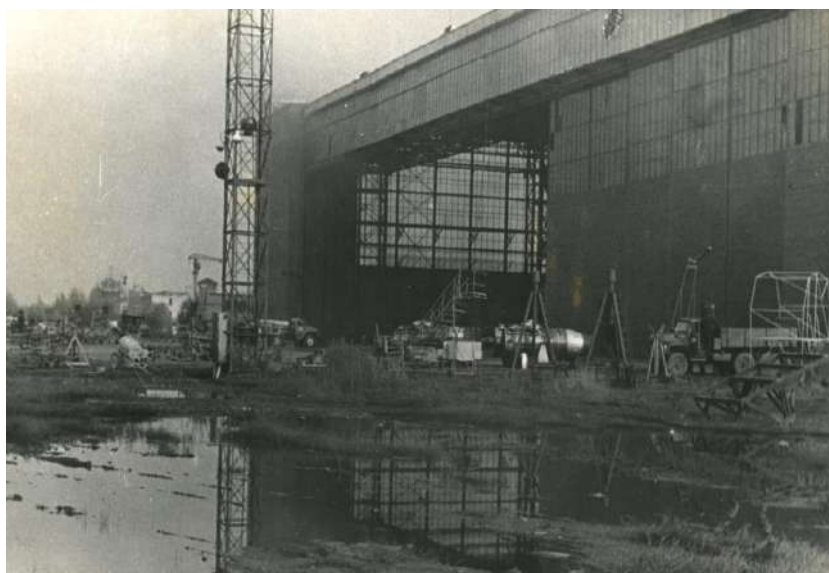


Рис. 16. Общий вид ангара со стороны аэродрома.

В Пристройках к ангарной части располагалось оборудование для ремонта и различных проверок технического состояния, кладовая и так же личные помещения сотрудников. Данный ангар был оснащен всеми современными средствами пожаротушения и оборудованном высокого качества [29]. Данный ангар функционирует и по сей день.

Наиболее распространенные современные ангары.

В настоящее время в строительстве используется тот же принцип архитектурной планировки только уже с более прочными несущими конструкциями, что позволяет проектировать большепролетные сооружения. Здания ангаров состоят из двух или трех блоков: прямоугольного объема большепролетной ангарной части с карманом для откатных ангарных ворот и примыкающей к ней с одной или двух сторон более низкой пристройки [30]. Пристройки чаще всего в целях экономии выполняют из железобетона, тогда как ангарную часть из стальных конструкций.

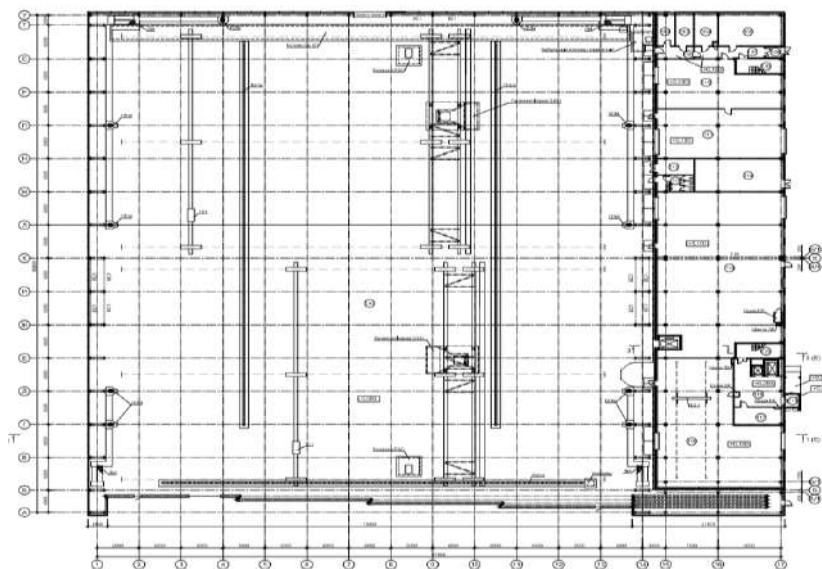


Рис. 17. План ангарной секции с пристройкой.

Для соблюдения требования пожаробезопасности все металлические конструкции окрашиваются огнезащитной краской [31]. Ограждающие стеновые панели монтируются из сэндвич-панелей с негорючим утеплителем. Кровля у современных ангаров чаще всего проектируется плоской, из чего следует необходимость удаления дождевой воды по внутреннему водостоку. Кровельный пирог состоит из водозащитной мембраны ПВХ, утеплителя, пароизоляции и стального профнастила.

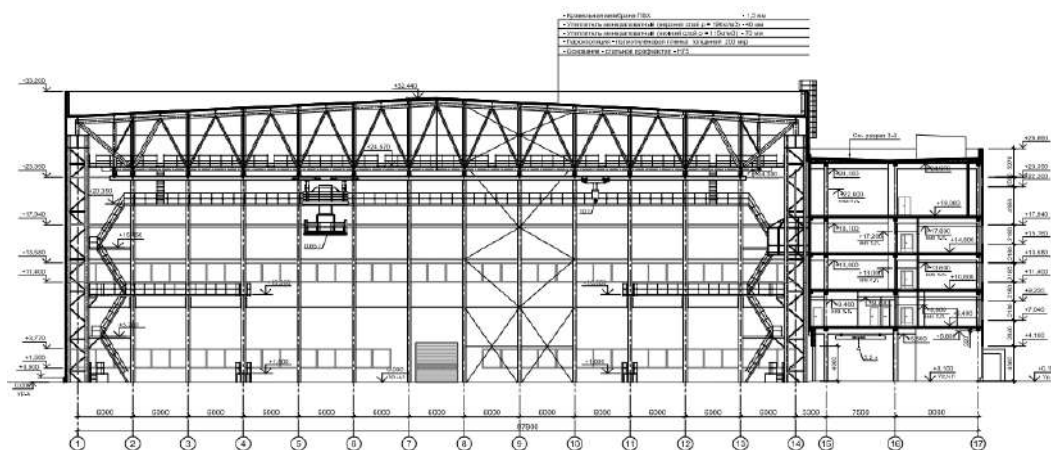


Рис. 18. Поперечный разрез ангара с пристройкой.

Данные технологические решения позволяют построить большепролетные сооружения в небольшие сроки. Например, ангар длиной 90 м, пролетом 78 м, с шагом колонн 6 м, высотой до низа фермы 24,3 м и одной боковой пристройкой высотой в 5 этажей выполненной в железобетонном варианте, сделав технико-экономический анализ и построив график производства работ, можно увидеть, что средняя продолжительность работ составляет 19 месяцев. Это очень быстро для такого ответственного сооружения.

Наименование работ	Продолжительность строительства																						
	1 квартал 1 года			2 квартал 1 года			3 квартал 1 года			4 квартал 1 года			1 квартал 2 года			2 квартал 2 года			3 квартал 2 года				
	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май		
Земляные работы и подготовительный период	█																						
Ввод коммуникаций		█																					
Устройство нулевого цикла			█																				
Возведение ангара с пристройкой				█																			
Устройство кровли ангара и пристройки									█														
Отделка ангара и пристройки											█												
Специальные работы и благоустройство территории		○					█								█								
Прочие неучтенные работы и сдача объекта		█																					

Рис. 19. Календарный план производства работ.

При таком выполнении работ коэффициент механизации, рассчитываемый по формуле (1), составляет 95 процентов. Высокое значение говорит об огромном прогрессе и повсеместном применении строительной техники для строительно-монтажных работ.

Современный ангар с самым большим пролетом в Европе.

Данный ангар был построен во Франкфурте в 2007 году. Он спроектирован так, чтобы объем объекта можно было в дальнейшем расширить до длины 350 метров при необходимости. Ангар имеет размеры 180 м. в ширину и 140 м. в длину, включая 20-метровое административное здание из железобетона. Высота у ангара довольно внушительная, 30 м.

Конструкция крыши состоит из двух продольных главных ферм с параллельными поясами пролетом 180 м [32]. К главным фермам крепятся небольшие поперечные, с треугольной решеткой, с шагом составляет 35 м. Главные и 27 поперечных ферм соединены между собой, вместе они образуют жесткий каркас, поддерживающий конструкцию покрытия. При устройстве фундамента были применены буронабивные сваи.

Кроме самого большого пролета в мире, особенностью так же является и то, что все несущие конструкции покрытия вынесены за его пределы. Это дает возможность использовать всю высоту ангара, не ограничиваясь нижним поясом ферм. Можно заметить, что основные фермы все так же используют нисходящие растянутые раскосы со сжатыми стойками



Рис. 20. Главные фермы ангара.

Огромный вклад в сторону увеличения темпов строительства и исключения ошибок в проектирование привнесли современные методы расчета, выполняемые в специальных программных комплексах расчета строительных конструкций. Если раньше на расчеты требовались годы или десятилетия, то сейчас это делается за несколько месяцев. Также современные строительные материалы позволили создавать более ответственные конструкции не только с технологической точки зрения, но и с экономической. Безопасность как выполнения работ по монтажу таких конструкции, ровно, как и их использования, возросла в разы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, сравнение существующих ангаров показало, что все строительство основывается на опыте предыдущих лет и подстраивает этот опыт под нынешние реалии с добавлением современных технологий, исключая ошибки. Принципиальная схема осталась та же самая: пространственный каркас, состоящий из колонн и ферм с разными ограждающими конструкциями. Изменились только материалы, методы расчета и технологии строительства. Эти методы позволяют делать все более увеличенные внутренние пространства ангаров, повышая при этом стойкость к погодным условиям, требованиям к безопасности и технологичности сооружения, подстраиваясь под современные нужды.

Библиографический список:

1. *H.C. Fu, M. Seckin.* Safety evaluation of a timber Warren truss hangar // *Structural Safety*. 1988. Vol. 5. No. 4. Pp. 299-315. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(88\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0167-4730(88)90030-6).
2. *Шепелев В.В., Егоров А.Н.* Пневмоангар как быстровозводимое сооружение // *COLLOQUIUM-JOURNAL*. 2020. №2-2 (54). С. 201-202. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42359713_83165872.pdf.
3. *Подрепный Е.И.* Отечественный авиапром и модернизация самолетного парка дальней авиации в годы первой послевоенной пятилетки // *КЛИО*. 2015. №4. С. 108-112. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23241870_43488747.pdf.
4. *Ильдияров Е.В., Шевцов И.А., Свиридов В.Н.* Классификация конструктивных систем самолетных ангаров // *Проблемы современной науки и образования*. 2016. №16 (58). С. 116-118. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26379056_37645394.pdf.

5. Металлические конструкции / Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С, Под ред. Кудишин Ю.И. 13 изд. М.: Академия, 2011. 688 с.
6. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2): утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. N 891/пр: дата введения 04.06.2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 20.02.2021). Текст: электронный.
7. *Harada, M., Hayashi, Y., Hayashi, T. et al.* Effect of moisture content of members on mechanical properties of timber joints // *J Wood Sci.* 2005. Vol. 51. Pp. 282-285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0656-9>.
8. *Wu, G., Zhu, E., Zhong, Y. et al.* Development and investigation of a hybrid built-up column made of small diameter logs originating from juvenile trees // *J Wood Sci.* 2018. Vol. 64. Pp. 353-363. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1689-1>.
9. *Ando, K., Onda, H.* Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure I: Effect of anatomy on the initial deformation process during radial compression // *J Wood Sci.* 1999. Vol. 45. Pp. 120-126. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01192328>.
10. *Pandey, S.* Climatic influence on tree wood anatomy: a review // *J Wood Sci.* 2021. Vol. 67. No. 24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01956-w>.
11. *Park, CY., Kim, H., Eom, CD. et al.* Effect of lintel on horizontal load-carrying capacity in post-beam structure // *J Wood Sci.* 2014. Vol. 60. Pp. 30-38. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1371-1>.
12. *Евченко С.В., Иванова О.Б.* Технично-экономический анализ по расходу стали трех конструктивных вариантов выполнения ангара для двух самолетов airbus a380 // *Международный студенческий научный вестник.* 2019. №3. С. 42. URL: <http://eduherald.ru/article/view?id=19660>.
13. *Виноградова Е.В.* Проблемы управления качеством бетонных работ // *Инженерный вестник Дона.* 2012. №3 (21). Ст. 711-714. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/2012_3_129.pdf_1001.pdf.
14. *Romain Dupuis, Juhyuk Moon, Yeonung Jeong, Rae Taylor, Sung-Hoon Kang, Hegoi Manzano, Andrés Ayuela, Paulo J.M. Monteiro, Jorge S. Dolado.* Normal and anomalous self-healing mechanism of crystalline calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research.* 2021. Vol. 242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106356>.
15. *Röscher, S. and Knobloch, M.* Towards a prognosis of fatigue life using a Two-Stage-Model // *Steel Construction.* 2019. Vol. 12. No. 3. Pp. 198-208. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900018>.
16. *Chrzanowski, M., Odenbreit, C., Obiala, R., Bogdan, T. and Degée, H.* Transfer of shear stresses at steel-concrete interface // *Steel Construction.* 2019. Vol. 12. No. 1. Pp. 44-54. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201800024>.
17. *Tankova, T., da Silva, L.S. and Martins, J.P.* Stability design of cable-stayed columns // *Steel Construction.* 2019. Vol. 12. No. 4. Pp. 309-317. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900032> /.
18. *Польской П.П., Георгиев С.В.* Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // *Инженерный вестник Дона.* 2013. №4 (27). Ст. 253. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_114_Polskoj.pdf_2134.pdf.

19. *Мкртчян А.М., Маилян Д.Р.* Особенности расчёта железобетонных колонн из высокопрочного бетона по деформированной схеме // Инженерный вестник Дона. 2013. №4 (27). Ст. 184. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_43_Mkrtchyan.pdf_2186.pdf.
20. *Мкртчян А.М., Аксенов В.Н.* Отличия расчёта колонн из высокопрочного бетона по нормам // Инженерный вестник Дона. 2013. №4 (27). Ст. 250. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_111_Mkrtchyan_1.pdf_2131.pdf.
21. *Dinis, P.B., Camotim, D. and Landesmann, A.* Design of simply supported hot-rolled steel short-to-intermediate angle columns // *Steel Construction*. 2019. Vol. 12. No. 4. Pp. 278-290. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900029>.
22. *Marta Roig-Flores, Tamara Lucio-Martin, María Cruz Alonso, Luis Guerreiro.* Evolution of thermo-mechanical properties of concrete with calcium aluminate cement and special aggregates for energy storage // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106323>.
23. *Arowojolu, O., Ibrahim, A., Almakrab, A. et al.* Influence of Shear Span-to-Effective Depth Ratio on Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Beams // *Int J Concr Struct Mater*. 2021. Vol. 15. Pp. 14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00444-7>.
24. *Hamidian, M.R., Shafiqh, P.* Post-peak Behaviour of Composite Column Using a Ductile Lightweight Aggregate Concrete // *Int J Concr Struct Mater*. 2021. Vol. 15. Pp. 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00453-6>.
25. *Munesi, A., Sharbatdar, M. and Gholhaki, M.* An investigation into the factors influencing the cyclic behaviour of buckling-restrained steel plate shear walls // *Steel Construction*. 2021. Vol. 14. No. 1. Pp. 35-46. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900047>.
26. *Konrad, M., Eggert, F., Kuhlmann, U. and Schorr, J.* New approach for the design shear resistance of headed studs in profiled steel sheeting with ribs transverse to supporting beam // *Steel Construction*. 2020. Vol. 13. No. 4. Pp. 252-263. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.202000018>.
27. *Schaper, L., Jörg, F., Winkler, R., Kuhlmann, U. and Knobloch, M.* The simplified method of the equivalent compression flange // *Steel Construction*. 2019. Vol. 12. No. 4. Pp. 264-277. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900033>.
28. *Lange, J. and Kawohl, A.* (2019), Tension-shear interaction of high-strength bolts during and after fire // *Steel Construction*. 2019. Vol. 12. No. 2. Pp. 124-134. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900008>.
29. *Горббань Ю.И., Никончук М.В.* Пожаротушение ангаров для самолетов. Особенности проектирования // *Алгоритм безопасности*. 2016. №2. Ст. 26-28. URL: https://algorithm.org/arch/16_2/16_2_9.pdf.
30. *Yichen Qin, Z.X. Wang, Felix T.S. Chan, S.H. Chung, T. Qu.* A mathematical model and algorithms for the aircraft hangar maintenance scheduling problem // *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 67. Pp. 491-509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.11.008>.
31. *Fei Liu, Tengfei Tim Zhang, Haiqiao Zhang, Qiannan Huo, Jihong Wang, Zhengwei Long, Junjie Liu.* Removing painting-generated VOCs in a commercial airplane hangar with multiple portable exhaust hoods // *Building and Environment*. 2021. Vol. 196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107797>.
32. *Aydin, A.C., Ardalani, A., Maali, M. and Kiliç, M.* Numeric modelling of innovative semi-rigid connections under cyclic loading // *Steel Construction*. 2021. Vol. 14. No. 1. Pp. 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1002/stco.201900037>.