

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

настоящее и будущее

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

I Всероссийской научной конференции,
посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда,
академика РААСН Юрия Михайловича Баженова



Генеральный спонсор

 **ПОЛИПЛАСТ®**
ИДЕЯ. КАЧЕСТВО. МАТЕРИЯ

2020

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2020
ISBN 978-5-7264-2473-6

УДК 691
ББК 38.3
С86

- С86 **Строительное материаловедение: настоящее и будущее** [Электронный ресурс] : сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова (г. Москва, 1–2 октября 2020 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, институт строительства и архитектуры. — Электрон. дан. и прогр. (11 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. — Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> — Загл. с титул. экрана.
ISBN 978-5-7264-2473-6

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.

Научное электронное издание

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

Ответственные за выпуск:

В.С. Семенов, С.И. Баженова, А.С. Пилипенко

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

Тел . +7 (499) 183-32-29

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

Сайт: https://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/Str_materialov/index.php

Компьютерная верстка *С.И. Баженовой, А.С. Пилипенко*

Для создания электронного издания использовано:

Microsoft Word 2010, ПО Adobe Acrobat

Подписано к использованию 26.10.2020. Объем данных 11 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 I Всероссийской научной конференции «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова.

Баженов Юрий Михайлович – советский и российский учёный-материаловед, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Почётный член Российской инженерной академии, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии вяжущих веществ и бетонов» НИУ МГСУ, президент Ассоциации учёных и специалистов в области строительного материаловедения.

Научная детальность Юрия Михайловича неразрывно связана с Московским государственным строительным университетом (МИСИ-МГСУ) и охватывает широчайший круг проблем: создание эффективных высококачественных бетонов различного назначения, вяжущих низкой водопотребности для производства высокопрочных бетонов, современных строительных материалов нового поколения. Созданная под его руководством научная школа по современным проблемам бетоноведения, объединяющая ученых различных регионов России, позволяет готовить высококвалифицированных специалистов, которые успешно работают в различных областях. В последние годы Юрий Михайлович активно занимается использованием наночастиц и наносистем с целью модифицирования цементных вяжущих.

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!

КРУПНЕЙШИЙ В РОССИИ ХОЛДИНГ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНОЙ ХИМИИ

ПРЕИМУЩЕСТВА:

1. Стабильность качества продукции
2. Широкий ассортимент
3. Разветвленная сеть сбытовых подразделений
4. Быстрая логистика
5. Устойчивое положение на рынке
6. Полный цикл производства
7. Постоянный контроль качества от сырья до готового продукта

ПРОДУКЦИЯ



**ДОБАВКИ
ДЛЯ БЕТОНОВ
И ЖБИ**



**ДОБАВКИ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ
РАСТВОРОВ**



**СМАЗКИ
И ОЧИСТИТЕЛИ
ДЛЯ ФОРМ
И ОПАЛУБКИ**



**СРЕДСТВА
ПО УХОДУ
ЗА БЕТОНОМ**



**ДОБАВКИ
ДЛЯ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
СМЕСЕЙ**

ООО «Полипласт Новомосковск»,
301661, Тульская обл.,
г. Новомосковск,
ул. Комсомольское шоссе, д. 72
(48762) 2-11-04
(48762) 2-11-40
(48762) 2-09-67

sekretar@polyplast-nm.ru

ООО «Полипласт Северо-запад»,
188480, Ленинградская обл.,
г. Кингисепп, промзона
«Фосфорит»
(81375) 2-69-98
(81375) 9-61-00
(81375) 9-61-01

sekretar@polyplast-nw.ru

ООО «Полипласт УралСиб»,
623104, Свердловская обл.,
г. Первоуральск, ул. Заводская, д. 3
(3439) 27-35-00
(3439) 27-35-03
(3439) 27-35-06

info@ppus.org

ООО «Полипласт-Юг» (г.Краснодар)
350020, Россия, г. Краснодар,
ул. Одесская, д. 48В
(861) 255-46-43
(861) 210-33-62
(861) 210-08-97

office_krasnodar@polyplast-ug.ru

ОГЛАВЛЕНИЕ

Направление 1. Теоретические основы получения строительных композитов..... 12

Айзенштадт А.М.

Элементы термодинамики поверхности высокодисперсных систем горных пород..... 12

Артамонова О.В., Чернышов Е.М.

Теоретические и прикладные проблемы наномодифицирования неорганических систем
твердения строительных композитов 18

Аскадский А.А., Соловьева Е.В.

Функциональная зависимость модуля упругости полиэтилена от влияния степени
кристалличности и объема кристаллита 24

Величко Е.Г., Шумилина Ю.С., Талипов Л.Н.

Оптимизация многокомпонетного дисперсного состава - основной фактор повышения
свойств бетонов высокой прочности 28

Данилов В.Е., Айзенштадт А.М.

Краевые углы смачивания набухающих порошков..... 37

Драцкая А.И., Скворцова А.А., Лебедев В.В.

Новое применение ячейки Штейнера в арматуре для композиционных материалов и
железобетона 43

Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М.

Природное и техногенное сырье Архангельской области для производства минераловатной
теплоизоляции 48

Екимовская В.А., Лебедев В.В.

Новая пространственная структура материала-ауксетика на основе конфигурации Саррюса.. 54

Леденев А.А., Перцев В.Т.

Моделирование и оценка структурных характеристик цементного камня,
модифицированного микронаполнителями 59

Овчаренко Г.И., Ибе Е.Е.

Роль гидроксидов алюминия и железа в формировании свойств бетона..... 65

Огурцова Ю.Н., Огурцова В.С., Литая А.А.

Подложки для фотокатализаторов в строительных материалах: виды и механизм действия . 70

<i>Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Хирхасова В.И.</i>	
Влияние наноцеллюлозы на свойства бетонов	76
<i>Соколова Ю.В., Айзеништадт А.М.</i>	
Грунтобетон на основе полимер-органического связующего с минеральным модификатором	82
<i>Степина И.В., Содомон М.</i>	
Композиты из мягколиственной древесины повышенной биостойкости	88
<i>Ткач Е.В., Шумилина Ю.С.</i>	
Теоретические основы получения дисперсных цементных систем.....	91
<i>Усачев С.М., Перцев В.Т., Стенюхин Л.В.</i>	
Топологический подход в исследовании структуры строительных композитов	100
<i>Федосов С.В., Мацевич Т.А.</i>	
Методы теории математической физики в приложениях к задачам строительного материаловедения	108
Направление 2. Повышение эффективности и долговечности строительных изделий и конструкций, в т.ч. в суровых условиях эксплуатации	114
<i>Баженов Ю.М., Булгаков Б.И., Нго Суан Хунг</i>	
Гидротехнический бетон с органоминеральной добавкой	114
<i>Бурьянов А.Ф., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н.</i>	
Влияние различных примесей гипсового камня на свойства полученных вяжущих	118
<i>Величко Е.Г., Талипов Л.Н.</i>	
Механизм пассивирования стали комплексной антикоррозионной добавкой в модели поровой жидкости бетона	121
<i>Капустин С.О., Горохов М.С., Джагарян И.Г.</i>	
Влияние качества заполнителей на водонепроницаемость бетона.....	124
<i>Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Головин С.Н.</i>	
Дисперсно-армированный полистиролбетон с комплексным кремнеземсодержащим модификатором	128
<i>Пуляев И.С., Михайлова А.А.</i>	
Методы обеспечения заданных потребительских свойств при возведении объектов транспортной инфраструктуры в ускоренные сроки	134

<i>Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Евсяков А.С.</i>	
Долговечность цементных бетонов при жидкостной коррозии с учетом кольматации пор..	140
<i>Савенков А.И., Горбач П.С.</i>	
Оптимизация состава пенобетона с помощью компьютерной программы	145
<i>Семенов В.С.</i>	
Свойства легкого кладочного раствора для зимнего строительства	152
<i>Трещев А.А., Кузнецова В.О.</i>	
Оценка и учет влияния агрессивной водородной среды на напряжённо-деформированное состояние цилиндрической оболочки из титанового сплава.....	158
<i>Шамшина К.В.</i>	
Экспериментальные исследования влияния центральной и внецентренной сжимающей нагрузки на деформативность, жесткость и прочность железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинам.....	167
<i>Юссеф Я., Ларсен О.А., Александрова О.В.</i>	
Современное состояние и перспективы применения технологии укатанного бетона в плотностроении.....	174
Направление 3. Технологии современных композиционных вяжущих веществ	179
<i>Аниканова Л.А., Волкова О.В., Кудряков А.И.</i>	
Получение гипсовых изделий из двухводного гипса в СВЧ-поле	179
<i>Дмитриев Н.С., Соков В.Н.</i>	
Способы модифицирования вторичного ангидритового сырья для производства стеновых и отделочных материалов.....	183
<i>Лхасаранов С.А., Гиркиян Л.С.</i>	
Исследование влияния перлита и нанокремнезема на тепловыделение и прочность композиционных вяжущих	188
<i>Масанин О.О., Усиков С.А., Нелюбова В.В.</i>	
Оценка влияния способа получения суспензии нанокремнезема на эффективность его распределения	191
<i>Соколова Ю.А., Акулова М.В., Исаколов Б.Р.</i>	
Получение серосодержащих вяжущих с высокими физико-техническими характеристиками методом активации и детоксикации.....	194

Федюк Р.С.

Повышение эффективности неавтоклавных ячеистых бетонов с улучшенными звукопоглощающими характеристиками..... 199

Направление 4. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в производстве строительных материалов 205

Белов В.В., Смирнов М.А.

Эффективный пенобетон с использованием техногенных вторичных ресурсов..... 205

Ву Ким Зиен, Баженова С.И, Танг Ван Лам, Нгуен Конг Ли

Исследование использования песка реки Да Бак (Вьетнам) для производства пенобетона .. 209

Гурьева В.А., Ильина А.А., Мажирин А.Д., Жданова А.С.

Анализ сырьевой базы Оренбуржья для производства ресурсосберегающего керамического кирпича 215

Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Батаев Д.К-С.

Формирование структуры и прочности цементного камня на основе щелочного активатора 221

Пилипенко А.С., Скяев А.Р.

Применение вторичного полиэтилентерефталата для получения полимербетонов 229

Самченко С.В., Зайцева А.А.

Использование несортированного боя стекла в производстве теплоизоляционных материалов 232

Турчанинов В.И.

Энергоэффективный декоративный цемент 237

Явруян Х.С., Халюшев А.К., Гайшун Е.С.

Оптимизация параметров подбора состава керамического камня из нетрадиционного сырья методами математического планирования 242

Направление 5. Современные полифункциональные строительные материалы..... 248

Зыонг Т.К., Иноземцев А.С., Королев Е.В.

Перспективы использования высокопрочного легкого бетона для технологии 3D-печати... 248

Карпова Е.А., Скрипкюнас Г., Яковлев Г.И.

Применение углеродных нанотрубок для управления реологическими свойствами цементных систем 253

<i>Козлова И.В., Земскова О.В., Дударева М.О.</i>	
Синергетический подход к созданию эффективных строительных материалов.....	259
<i>Котляр В.Д., Небежко Н.И., Божко Ю.А.</i>	
Исследование глинисто-карбонатных видов опоковидных пород как сырья для получения клинкерного кирпича светлой окраски.....	265
<i>Ларсен О.А., Бахрах А.М.</i>	
Направления использования токопроводящего бетона	270
<i>Моргун Л.В., Богатина А.Ю., Моргун В.Н.</i>	
Современный полифункциональный газонаполненный бетон	274
<i>Урханова Л.А., Урханова А.А., Лхасаранов С.А., Смирнягина Н.Н.</i>	
Исследование электропроводящих свойств бетона.....	279
<i>Шахова Л.Д., Щелокова Л.С., Черноситова Е.С., Поспелова Е.А.</i>	
Тенденции изменения характеристик портландцементов	282
Направление 6. Материалы для дорожного строительства	288
<i>Глаголев Е.С., Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Лесниченко Е.Н.</i>	
Проектирование состава КГВ с минеральной добавкой опоковидного мергеля	288
<i>До Чонг Тоан, Иноземцев С.С.</i>	
Апробация акустико-эмиссионного метода для исследования композитов на битумном вяжущем.....	296
<i>Шеховцова С.Ю., Безверхова Е.О.</i>	
Отходы шинной промышленности для дорожного строительства.....	300
Направление 7. Материалы и технологии для реконструкции и ремонта зданий и сооружений	305
<i>Божко Ю.А., Лапунова К.А.</i>	
Возможности применения кирпича мягкой формовки в воссоздании исторического облика городов	305
<i>Гаркави М.С., Нефедьева А.К., Нефедьев А.П.</i>	
Качественные особенности инъекционных микроцементов	313
Направление 8. Современные строительные системы	319
<i>Би Жуйпу, Соловьев А.К.</i>	
Использование стены Тромба в современном строительстве	319

Лакетич С.К., Наумов А.Е., Абакумов Р.Г.

Выявление аспектов эффективного функционирования и капитализация сознания и территории на примере многофункционального высотного здания кинетического типа в г. Новосибирск 326

Славчева Г.С., Бритвина Е.А.

Влияние дисперсного армирования на пластичность и формоустойчивость смесей для строительной 3D-печати..... 331

Направление 9. Учебно-методическое обеспечение подготовки кадров для отрасли....337

Пименов А.Т., Барахтенова Л.А., Маньшин А.Г., Прибылов В.С.

Синергетические подходы подготовки специалистов для экспертизы состояния автомобильных дорог 337

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТИ
ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ГОРНЫХ ПОРОД

А.М. Айзенштадт¹, д-р хим. наук, профессор

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Установлено, что математическая модель, учитывающая относительное изменение поверхностной энергии системы, является термодинамически корректной для оценки дисперсионного взаимодействия композитов на основе тонкодисперсных минеральных частиц. Предложен количественный критерий для подбора сырьевых компонентов при создании композиционного материала, позволяющий оценить их дисперсионное взаимодействие. Рекомендован параметр активности поверхности в качестве критерия для построения общей энергетической классификации высокодисперсных систем на основе горных пород.

Ключевые слова: термодинамическая модель, дисперсионное взаимодействие, высокодисперсные системы, свободная поверхностная энергия, постоянная Гамакера, активность поверхности.

Известно, что дополнительное введение в строительные смеси тонкодисперсных компонентов позволяет получать композит, характеризующийся новыми улучшенными свойствами, которые не характерны для исходных составляющих [1, 2]. Одна из основных проблем, которую необходимо при этом экспериментально решать, заключается в оптимизации состава основного композита, компоненты которого при совместном присутствии позволяют получить наиболее значимый положительный синергетический эффект. Самый простой и обычный способ достижения результата – изготовление опытных образцов различных составов и проведение их испытаний. Однако этот прием не может считаться рациональным по причинам, связанным, прежде всего с временными и материальными затратами. Данный факт отмечен также и в работе [3]. Авторы фиксируют, что использование многокомпонентных материалов, широко применяемых в настоящее время в строительстве, порождает известные технологические трудности, связанные как с зависимостью структуры и свойств композита от содержания компонентов, так и с погрешностью при дозировании компонентов (последнее проявляется наиболее ярко при использовании наноразмерных объектов).

На основании проведенных исследований [4, 5], нами предложена термодинамическая модель оптимизации состава композиционной смеси, в основе которой заложен расчет изменения изобарно-изотермического потенциала многокомпонентной системы для двух состояний («0» – начальное, «0+1» – конечное):

$$\Delta G_s = \Delta \sigma + \sigma_{0+1} \cdot \ln \frac{S_{уд,0+1}}{S_{уд,0}}, \quad (1)$$

где G_s – изобарно-изотермический потенциал единицы поверхности дисперсной системы; σ – поверхностное натяжение; $S_{уд}$ – удельная поверхность.

Таким образом, для характеристики изменения энергетического состояния системы по уравнению (1) при различных термодинамических параметрах поверхности необходимо определить изменения величин удельной поверхности и поверхностного натяжения. Оценка возможности использования вышеприведенного термодинамического подхода для оптимизации состава высокодисперсной системы, образованной минеральными компонентами, представлена в работе [4]. В качестве объектов исследования были выбраны: полиминеральный речной песок (месторождения «Кеницы» Архангельской области) и сапонит-содержащий материал (из суспензии оборотной воды месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова). Для экспериментов использовали опытные образцы в высокодисперсном состоянии со средним размером частиц: песок – 102 ± 34 нм, сапонит-содержащий материал (ССМ) – 361 ± 96 нм. Задача, связанная с определением удельной поверхности твердых тел, экспериментально решается несложно. Для тонкодисперсного вещества (микро- и наноразмерного) хорошие результаты дают сорбционные методы. Существуют различные способы определения поверхностного натяжения твердых тел. Наиболее эффективным является неразрушающий метод по краевому углу смачивания (метод Г.А. Зисмана или ОВРК) [6, 7].

Графический вид функциональной зависимости $\Delta G_S = f$ (доля ССМ) (рис. 1) показывает наличие в исследуемой системе области соотношения компонентов, характеризующейся отрицательными значениями ΔG_S , которые отмечаются при содержании ССМ в интервале $3 \div 6$ %, причем с явно выраженным экстремумом при 4 % добавки последнего. Данный факт может свидетельствовать о существовании для исследуемых компонентов области, которая характеризуется значительным запасом свободной поверхностной энергии частиц. Следовательно, должна проявляться способность данной системы самопроизвольно участвовать в процессах, связанных с компенсацией свободной поверхностной энергии и приводящих к возможному увеличению силы взаимодействия частиц.

При оптимизации состава композиции на основе тонкодисперсных систем важным моментом является выбор математической модели, адекватно описывающей изменения свойств получаемых образцов в зависимости от их состава. Для микро- и наноразмерных частиц важнейшей характеристикой является энергетическое состояние системы, оцениваемое по величине свободной поверхностной энергии (E_S). Поэтому, главенствующая роль в такой модели должно быть отведено количественной оценки изменения свободной поверхностной энергии (ΔE_S) при переменном составе. В этой связи, авторы [8], анализируя вышеприведенную термодинамическую модель, справедливо обосновали ряд неточностей использованного математического аппарата, ограничивающие его применение при анализе (или прогнозе) влияния различных фактора на величину энергии границы раздела фаз. Они представили строго доказанное математическое выражение, описывающее изменение энергетического состояния композита при переменном составе, оцениваемое по относительному изменению свободной поверхностной энергии с учетом поверхностного натяжения системы и ее удельной поверхности:

$$\frac{\Delta E_S}{E_{S,0}} = \left(\frac{S_{уд}}{S_{уд,0}} + \delta\sigma \frac{S_{уд}}{S_{уд,0}} \right) - 1 = (1 + \delta\sigma) \frac{S_{уд}}{S_{уд,0}} - 1, \quad (2)$$

Представляется интересным сопоставить обработанные с помощью модели (2) результаты экспериментов по оптимизации состава композиционной смеси на основе полиминерального песка и сапонит-содержащего материала. На рис. 2 представлена функциональная зависимость $\Delta E_s/E_{s0}=f(p)$, которая имеет также ярко выраженный минимум при содержании сапонит-содержащего материала в композите, равном 4 %. Сопоставляя результаты расчетов по двум предлагаемым математическим моделям (1) и уравнению (2), отмечается хорошая сходимость результатов, связанных с определением области термодинамической совместимости компонентов. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что, несмотря на факт симбатности результатов, полученных с использованием двух моделей превращений, на наш взгляд, следует признать более универсальным и термодинамически обоснованным использование уравнения (2), которое можно рекомендовать для анализа или прогнозной оценки изменения величины энергии на границе раздела фаз тонкодисперсных систем на основе минеральных композиций.

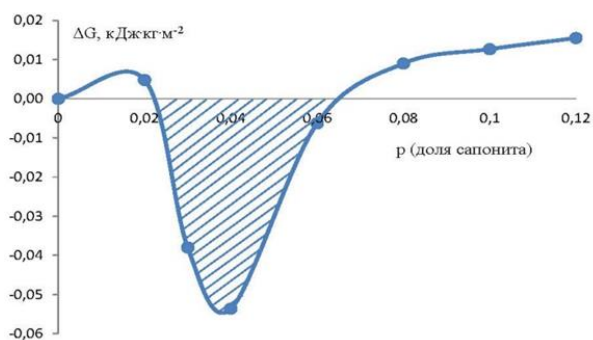


Рис. 1. Функциональная зависимость вида

$$\Delta G_s = f(\text{доля ССМ})$$

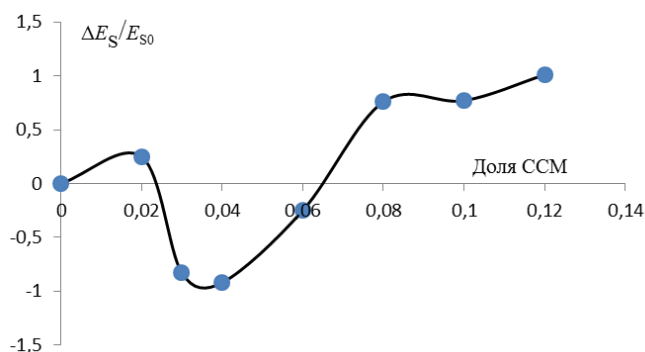


Рис. 2. Функциональная зависимость вида

$$\Delta E_s/E_{s0}=f(\text{доля ССМ})$$

В продолжение исследований нами оценена возможность использования параметров дисперсионного взаимодействия по модели (2) для оптимизации состава композиции из тонкодисперсных компонентов горных пород различного генезиса (базальт и полиминеральный песок) [9]. Механоактивацию базальта и песка проводили путем совместного механического сухого помола на планетарной шаровой мельнице. Для определения поверхностного натяжения высокодисперсных материалов были изготовлены опытные образцы путем уплотнения соответствующих исследуемых проб песка и базальта, при нагрузке 1,5 кПа в металлические формы. Далее измеряли краевой угол смачивания поверхности образцов водно-этанольными растворами с объемной концентрацией этанола от 96 до 50 % и рассчитывали искомую величину методом Г.А. Зисмана. Удельную поверхность опытных образцов определяли методом сорбции азота (теория БЭТ). На рис. 3 и 4 представлены основные результаты проведенных экспериментов.

Приведенные данные показывают наличие высокой отрицательной корреляции между сравниваемыми параметрами, причем минимум значений относи-

тельного изменения свободной поверхностной энергии строго соответствует максимальной прочности смеси. На рис. 5 представлена зависимость прочности на сжатие (R , МПа) от относительного изменения свободной поверхностной энергии исследуемых минеральных тонкодисперсных (~ 1 мкм) композиций при содержании песка в составе от 0 до 55 %. Данная зависимость описывается линейным уравнением с коэффициентом достоверности аппроксимации $r^2=0,84$.

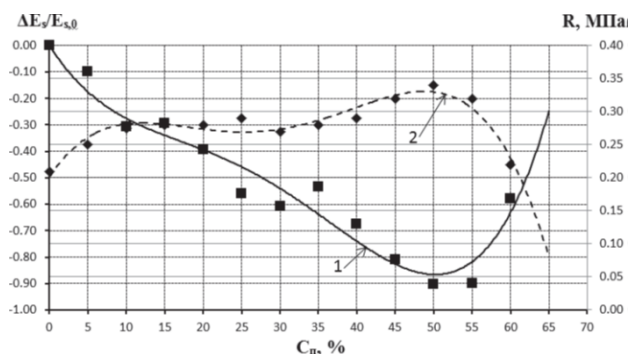


Рис. 3. Зависимость δE_s тонкодисперсной (~ 1 мкм) сухой смеси (1) и R композита (2) от содержания песка

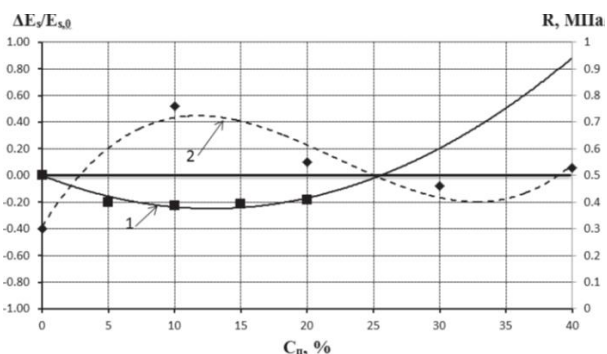


Рис. 4. Зависимость δE_s тонкодисперсной (~ 500 нм) сухой смеси (1) и R композита (2) от содержания песка

Таким образом, математическая модель, учитывающая относительное изменение поверхностной энергии системы, является корректной для оценки дисперсионного взаимодействия композитов на основе тонкодисперсных минеральных частиц. Параметр δE_s может быть рекомендован для подбора оптимального состава смеси, характеризующейся максимальной прочностью на сжатие.

Другим направлением исследований, связанных с использованием классических термодинамических функций для оценки склонности поверхности высокодисперсных систем горных пород к самопроизвольным трансформационным превращениям, явились работы по созданию научных основ и методических приемов количественного расчета параметра активности поверхности [10-15]. Так, оценить общую склонность поверхности высокодисперсной системы к трансформационным превращениям можно исходя из термодинамической характеристики ее энергетического состояния. Это состояние определяется уровнем общего запаса потенциальной энергии горной породы (зависит от условий происхождения), и ее части, перешедшей в поверхностную энергию при образовании новой поверхности твердого тела в процессе дробления материала. При этом необходимо учитывать, что данный энергетический переход количественно определяется многими факторами: размером, структурой и формой частиц, химическим, минеральным и фазовым составом, дефектностью кристаллической решетки породообразующих минералов, газо-воздушными и другими включениями и т.д. Используя принципы кристаллоэнергетики [16], показано, что мерой общего запаса энергии горных пород (заложенной в результате ее синтеза) является энергия атомизации (E_a) или, если относить ее к молярной массе веществ, составляющих горную породу [16], удельная массовая энергия атомизации (E_m , Дж/кг). Нами на примере горных пород различного генезиса показана возможность расчета величины E_a и E_m на основе анализа их химиче-

ского, минерального и фазового составов. Отработана методика определения величины свободной поверхностной энергии высокодисперсных материалов горных пород (E_s , Дж/кг) по значению поверхностного натяжения (σ_k , Н/м), которая, с учетом ее удельной поверхности ($S_{уд}$, м²/кг) рассчитывается по следующему выражению:

$$E_s = S_{уд} \cdot \sigma_k, \quad (3)$$

Отношение E_s/E_m представляет собой параметр, характеризующий уровень использования запаса потенциальной энергии, заключенной в горной породе за счет активации ее поверхности – активность поверхности высокодисперсного материала (k_s). Проведенные расчеты макроэнергетических характеристик показали, что магматические и метаморфические горные породы можно отнести к высокоэнергетическим материалам. Величина удельной массовой энергии атомизации (E_m) для исследуемых объектов изменяется в диапазоне 26,6÷29,0 кДж/кг. В то же время отмечаются значительные различия в величине поверхностной активности (k_s) высокодисперсных систем. Так для горных пород магматического происхождения (гранит, базальт) $k_s=(0,66\div 0,67)\cdot 10^{-5}$. Метаморфическая порода (амфиболит) имеет величину данного показателя в три раза ниже в сравнении с магматическими горными породами ($0,20\cdot 10^{-5}$). Данный факт показывает, что при сравнимых размерных характеристиках частиц высокодисперсных систем, магматические горные породы проявляют более высокую активность в трансформационных процессах, связанных с компенсацией поверхностной энергии. Это, в свою очередь, должно приводить к усилению адгезионного взаимодействия между частицами разных фаз при создании композиционной смеси, образовании защитного минерального покрытия материала и пр. Кроме того, важным, на наш взгляд, результатом проведенных исследований является выявленное отличие в величине поверхностной активности горных пород, отмечаемое для разных генетических групп. Этот факт дает возможность рекомендовать параметр поверхностной активности в качестве критерия для построения общей энергетической классификации высокодисперсных систем на основе горных пород.

В продолжении исследований [17] (основываясь на теории молекулярного притяжения конденсированных тел Б.В. Дерягина [18]) предложен количественный критерий для подбора сырьевых компонентов при создании композиционного материала, позволяющий оценить их дисперсионное взаимодействие. В качестве такого критерия можно использовать величину постоянной Гамакера.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0793-2020-0005.

Библиографический список:

1. Ayzenshtadt, A. Nanostructured wood mineral composite / A. Ayzenshtadt, V. Lesovik, M. Frolova, A. Tutygin, V. Danilov // Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. P. 45–51.
2. Гусев, Б.В. Особенности структурообразования гипсового вяжущего, модифицированного гидросиликатами цинка / Б.В. Гусев, А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 40-46.

3. Королёв, Е.В. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов / Е.В. Королёв, В.А. Смирнов, А.И. Альбакасов // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. 2011. № 6. С. 32-43.
4. Тутьгин, А.С. Проектирование состава строительных композитов с учетом термодинамической совместимости высокодисперсных систем горных пород / А.С. Тутьгин, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, М.А. Фролова // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 74-76.
5. Lesovik, V. «Green» composites for North-Arctic region development / V. Lesovik, A. Ayzenshtadt, M. Frolova, R. Lesovik, V. Strokhova // The Open Ecology Journal. 2014. No. 7. P. 32-36.
6. Фролова, М.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности / М.А. Фролова, А.С. Тутьгин, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, Т.А. Махова, Т.А. Поспелова // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. № 2 (4). С. 120-125.
7. Данилов, В.Е. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабея–Кьельбле / В.Е. Данилов, Е.В. Королев, А.М. Айзенштадт, В.В. Строкова // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66–72.
8. Королев, Е.В. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчет и применение / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.П. Пустовгар // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С. 104-108.
9. Danilov, V.E. Dispersion interactions as criterion of optimization of cementless composite binders / V.E. Danilov, A.M. Ayzenshtadt, M.A. Frolova, A.S. Tutygin // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. No. 4. P. 767–771.
10. Абрамовская, И.Р. Расчет энергоемкости горных пород — как сырья для производства строительных материалов / И.Р. Абрамовская, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, Л.А. Вешнякова, М.А. Фролова, С.А. Казлитин // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 23-25.
11. Лесовик, В.С. Поверхностная активность горных пород / В.С. Лесовик, М.А. Фролова, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 71-74.
12. Вешнякова, Л.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов / Л.А. Вешнякова, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 68-72.
13. Строкова, В.В. Оценка активности наноструктурированных вяжущих термодинамическим методом / В.В. Строкова, А.М. Айзенштадт, М.Н. Сивальнева, В.А. Кобзев, В.В. Нелюбова // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 3-9.
14. Вешнякова, Л.А. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород / Л.А. Вешнякова, Т.А. Дроздюк, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, А.С. Тутьгин // Материаловедение. 2016. № 5. С. 45-48.
15. Sokolova, Y.V. Evaluation of dispersion interaction in glyoxal/silica organomineral system / Y.V. Sokolova, A.M. Ayzenshtadt, V.V. Strokhova // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 929. No. 1. P. 012110.
16. Зуев, В.В. Энергоплотность как критерий оценки свойств минеральных и других кристаллических веществ / В.В. Зуев, Г.А. Денисов, Н.А. Молчанов, В.Ф. Николайчук, А.И. Щербатов, Н.В. Зуев. – М.: Полимедиа, 2000. 352 с.
17. Айзенштадт, А.М. Практическое применение постоянной Гамакера / А.М. Айзенштадт, Е.В. Королев, Т.А. Дроздюк, В.Е. Данилов, М.А. Фролова // Материаловедение. 2020. (в печати).
18. Дерягин, Б.В. Молекулярное притяжение конденсированных тел / Б.В. Дерягин, Е.М. Абрикосов, Е.М. Лифшиц // Успехи физической химии. 2015. Т. 185. № 9. С. 982–1001.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТВЕРДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

О.В. Артамонова¹, д-р техн. наук, профессор

Е.М. Чернышов¹, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН

¹*Воронежский государственный технический университет»*

Аннотация. Обсуждаются теоретические и прикладные проблемы нанотехнологий строительных композитов с гидратационно-синтезными, гидротермально-синтезными, термально-синтезными неорганическими системами твердения, определяющими возможности получения структур известковых, цементных, силикатных, керамических материалов с новым уровнем их технико-экономической эффективности. Анализируются концепции и научные основания решения вопросов технологий наномодифицирования структур систем твердения указанных строительных композитов. Показываются фундаментальность и актуальная необходимость целостного подхода к разработке решений по формированию твердофазного состояния, основанных на интегрировании нанотехнологических принципов «снизу – вверх» и «сверху – вниз», и обеспечивающего сущностное рассмотрение закономерностей такого формирования. Выделяются управляющие факторы и предлагается арсенал «нано» для технологий наномодифицирования. Дается оценка теоретической и практической значимости результатов исследований, приводятся примеры эффективной их реализации в инженерной строительно-технологической практике и использования в образовательной деятельности.

Ключевые слова: строительные композиты, неорганические системы твердения, эволюционный маршрут, наномодифицирование структуры, технологический арсенал «нано».

В настоящее время в технологии получения композиционных материалов произошел качественный скачок в связи с формированием наноконцепции в науке и практике, поэтому представляется важным рассмотрение с общих позиций концепции и стратегии технологии синтеза структур современных строительных композитов [1]. При этом, с учетом наноэффектов и наноявлений, сопровождающих получение твердого состояния материалов, необходимо систематизировать принципиальные закономерности формирования и эволюции твердого тела через все исходные начальные и промежуточные стадии изменения его субстанционального состояния, пространственно-геометрических характеристик в многоуровневой по масштабу (от нано- до макро-) структуре, а затем выделить ключевые направления в области разработки прикладных нанотехнологических приемов управления синтезом структур матричных систем композитов и структур самих композитов [2].



Рис. 1. Общая схема формирования структуры строительных композитов с позиций нанотехнологического подхода [1]

Систематизацию обозначенных выше вопросов и решений можно рассматривать как условие формирования *начал управляемой технологии наномодифицирования систем твердения в структуре строительных композитов*, опирающихся на интегрирование нанотехнологических принципов «сверху – вниз» и «снизу – вверх» в предположении «включенности» наноявлений и нанопроцессов фазообразования в любую из технологий их получения.

В структуре конгломератных строительных материалов как объектов исследования выделяются два типа строения по признаку их происхождения (рис.): первый из них, относящийся к макро-, мезо- и микроструктуре, является результатом сложения готовых зернистых частиц («система сложения»); второй из них, относящийся к микро-, субмикро- и наноструктуре, является результатом синтеза частиц в эволюционном маршруте их образования («система роста») [1].

Рассматривая технологии строительных материалов и стадии переходов в процессах формирования структур их твердого фазового состояния, можно выделить: гидратационно-синтезные (ГССТ) – мономинеральные (известь, гипс) и полиминеральные (цемент); гидротермально-синтезные (ГТССТ) – полиминеральные (силикатные автоклавные); термально-синтезные (ТССТ) – мономинеральные и полиминеральные (керамика, стекло) системы твердения для получения композитов. Применяя такую классификацию систем твердения, можно охватить все совокупности конгломератных строительных композитов неорганического состава, которые и являются объектами рассмотрения в данной обобщающей работе.

Любая система твердения (ГССТ, ГТССТ, ТССТ) при её структурообразовании развивается по определенному эволюционному маршруту. При раскрытии и анализе общей эволюционной модели образования твердого вещества можно и целесообразно следовать трактовкам И.В. Мелихова [3]. При этом

следует выделять основные стадии эволюции субстанции: зарождение твердой фазы, рост частиц, агломерация, самопроизвольное превращение во времени, а также три эволюционных перехода между стадиями и соответственно говорить о явлениях молекулярного, топологического и морфологического отбора. Центральным в эволюционном маршруте обретения твердого состояния является вопрос управления конденсацией вещества, осуществляемого на основе нанотехнологического принципа «снизу – вверх» при опосредованной роли нанотехнологического принципа «сверху – вниз».

Используя фундаментальные концептуальные модели, отражающие возможности и закономерности влияния факторов управления на механизмы наномодифицирования в эволюционном маршруте образования твердого состояния, в работе исследованы и определены средства наномодифицирования – арсенал «нано» [4].

В работе для ГССТ, ГТССТ, ТССТ как объектов технологии наномодифицирования проведена идентификация эволюционного маршрута формирования их структуры при получении строительных композитов.

Для гидратационно-синтезных (мономинеральных известковых) систем твердения суть технологии получения строительного композита заключается в обеспечении рецептурно-технологических условий формирования монолитной композитной структуры из сростка кристаллов портландита и наполняющего компонента.

При этом возникает проблема обеспечения монолитности портландитовой системы твердения, заключающаяся в том, что требуется преодолеть процесс саморазрушения при кристаллизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – портландита и образовании кристаллического сростка. В качестве эффективного приема преодоления этого явления предложено отделить стадию образования индивидуальных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ от стадии формирования из них сростка. Такое нанотехнологическое решение предполагает: 1) разработку золь-гель синтеза индивидуальных кристаллов портландита с управляемой мерой термодинамической неравновесности; 2) последующее компактирование индивидуальных кристаллов портландита в сросток контактно-конденсационного типа с получением искусственного портландитового камня как системы твердения для композитов.

Инструменты наномодифицирования из арсенала «нано» включают реализацию средств принципа «снизу – вверх» – 1) изменение В/Т отношения (водо-известкового отношения – В/И), 2) изменение температурного режима гидратации (регулирование начальной температуры извести и воды; принудительный отвод теплоты экзотермической реакции гидратации), 3) введение добавок с целью регулирования кинетики гидратации извести и кристаллизации портландита.

При этом можно выделить прогнозируемые эффекты технологии наномодифицирования по критериям Е (энергоёмкость технологии), τ (время завершения процесса), R (задаваемый уровень качества): изменение энергии активации зародышеобразования и кристаллизации; обеспечение посредством компактирования и соответствующей консолидации индивидуальных кристаллов в монолитный кристаллический сросток; мгновенное упрочнение искусственного портландитового камня при компактировании индивидуальных кристаллов

портландита в кристаллический сросток.

Для гидратационно-синтезных (полиминеральных цементных) систем твердения суть технологии получения строительного композита заключается в обеспечении рецептурно-технологических условий получения композитной структуры бетона из системы сложения разнотельных частиц заполнителя и портландцементной системы твердения как следствия гетерогенного процесса образования в ней продуктов гидратации и конденсации (новой твердой фазы) в виде аморфно-кристаллических монолитных структур.

Отличительными признаками формирования системы твердения по принципам нанотехнологии являются повышение эффективности гетерогенного процесса гидратации и твердения цемента по критериям скорости накопления и качественного преобразования продуктов гидратации. Это может основываться на изменении энергии активации, скорости процесса гидратации, степени гидратации и времени достижения её оптимума. Повышение эффективности процесса гидратации и твердения цемента, изменение качественных характеристик продуктов процесса может обеспечиваться: 1) регулированием традиционных рецептурно-технологических факторов; 2) применением средств из арсенала «нано», относящихся к принципам «сверху – вниз» и «снизу – вверх».

Из арсенала принципа «сверху – вниз» это выбор вида, изменение характеристик цемента посредством механохимической его активации, применение микрозаполнителей; из средств принципа «снизу – вверх» – регулирование В/Ц – отношения, использование потенциала температурного фактора осуществления гидратации, применение химических добавок, в том числе нанодобавок (выбор вида, назначения дозировок, обоснование способов введения в смеси), учет фактора времени.

К следствию всего этого анализируются следующие прогнозируемые эффекты технологии наномодифицирования по критериям E , τ , R : изменение эффективной энергии активации процесса гидратации цемента; ускорение гидратации и снижение энергоемкости процесса твердения цемента; модифицирование минеральной и дисперсно-морфологической структуры цементного камня; увеличение прочности цементного камня в ранние сроки твердения; повышение абсолютной и удельной прочности цементной системы твердения.

В случае **гидротермально-синтезных (силикатных) систем твердения** содержание технологии получения строительного композита заключается в обеспечении рецептурно-технологических условий получения монолитной композитной структуры бетона из системы сложения мелкозернистых частиц заполнителя (наполнителя) и системы твердения как следствия гетерогенного процесса гидротермального синтеза аморфных и кристаллических структур (новой твердой фазы) в основно-кислотной двухкомпонентной и основно-кислотной многокомпонентной механо-активированной тонкодисперсной смеси исходных природных и техногенных составляющих.

Возможности управления формированием структуры системы твердения соотносятся с повышением эффективности гетерогенного процесса гидротермального синтеза новообразований по критериям скорости их накопления и качественного преобразования. Это основывается на изменении энергии активации, скорости процесса гидротермального синтеза, длительности количествен-

ного накопления новой твердой фазы и времени достижения оптимального её содержания. Повышение эффективности процесса гидротермального синтеза системы твердения, изменение качественных характеристик продуктов синтеза может обеспечиваться регулированием традиционных рецептурно-технологических факторов, применением специальных средств из арсенала «нано», относящихся к принципам «сверху – вниз» и «снизу – вверх».

Инструменты наномодифицирования из арсенала «нано» включают с одной стороны, реализацию принципа «сверху – вниз» – обоснование степени дисперсности (по критериям величины удельной поверхности и поверхностной энергии) механо-активированных основно-кислотных компонентов, назначение состава сырьевой смеси по соотношению основно-кислотных компонентов; а с другой стороны, реализацию принципа «снизу – вверх» – регулирование В/Т – отношения, использование потенциала температурного фактора при осуществлении гидротермального синтеза, применение химических добавок, в том числе нанодобавок (с выбором вида, назначением дозировок, обоснованием способов введения в смеси).

Прогнозируемые эффекты технологии наномодифицирования по критериям E , τ , R следующие: изменение эффективной энергии активации процесса гидротермального синтеза; ускорение процесса и снижение энергоемкости гидротермального синтеза новообразований системы твердения; модифицирование минеральной и дисперсно-морфологической структуры гидротермально-синтезной системы твердения; повышение абсолютной и удельной прочности структуры гидротермально-синтезной системы твердения.

Для термально-синтезных (керамических) систем твердения суть технологии получения композита состоит в обеспечении рецептурно-технологических условий получения нацело наноструктурированной керамики на основе различных оксидов, получаемых в виде нанокристаллов их твердых растворов.

Отличительными признаками формирования структуры данной системы твердения являются повышение эффективности гетерогенного процесса термального синтеза нанофазы твердого вещества, которое основывается на предварительном двухстадийном получении прекурсора в виде твердых растворов на основе оксида. При таком получении в кристаллохимической решетке оксида может формироваться определенная дефектность вследствие применения добавок, позволяющая при последующем спекании прекурсора обеспечить условия формирования наноразмерной структуры твердой фазы функциональной керамики. Повышение эффективности процесса спекания системы твердения, изменение качественных характеристик продуктов термального синтеза может обеспечиваться: 1) регулированием традиционных для керамических композитов рецептурно-технологических факторов; 2) применением специальных средств из арсенала «нано», относящихся к принципам «сверху – вниз» и «снизу – вверх» и определяющих параметры интегрируемых нанотехнологий получения прекурсоров и конечного керамического продукта.

К инструментам наномодифицирования из арсенала «нано» относится реализация принципа «снизу – вверх»: 1) обоснование состава исходных прекурсоров; 2) регулирование степени дисперсности и гомогенности прекурсоров; 3)

применение нанодобавок (выбор вида, назначение дозировок, обоснование способов введения в смеси). А также реализация принципа «сверху – вниз»: 1) обоснование режимов формования; 2) назначение режимов спекания (t , τ).

Прогнозируемые эффекты технологии наномодифицирования по критериям E , τ , R включают снижение энергии активации твердофазных взаимодействий при спекании; ускорение процесса спекания термально-синтезной системы твердения; увеличение прочности нанокерамических композиций.

Заключение: Реализованные в теоретических разработках и экспериментах выдвинутые научные концепции и основания исследований позволили сформировать предложения к «началам управляемой технологии наномодифицирования структуры систем твердения в эволюционном маршруте их формирования».

Практическая значимость результатов исследований подтверждается решением прикладных вопросов повышения эффективности технологии цементных, силикатных, керамических композитов [2].

Для совершенствования образовательной деятельности впервые разработана и реализована программа повышения квалификации специалистов в области проектирования, изготовления и диагностики наномодифицированных высокотехнологичных конструкционных и функциональных композитов для строительной индустрии. Важно отметить, что данная образовательная программа показала свою перспективность при решении задач повышения профессионального уровня вузовской подготовки бакалавров, магистров и аспирантов с новыми современными компетенциями.

Библиографический список:

1. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6 – 14.
2. Чернышов, Е.М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 7. Заключительная: актуальное обобщение / Е.М. Чернышов, О.В. Артамонова // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 3 – 14.
3. Мелихов, И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества / И.В. Мелихов. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. 310 с.
4. Артамонова, О.В. К проблеме концептуальных моделей управления эволюционным маршрутом формирования наномодифицированных систем твердения в структуре строительных композитов / О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 5 (713). С. 44 – 57.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА ОТ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ КРИСТАЛИЧНОСТИ И ОБЪЕМА КРИСТАЛИТА

А.А. Аскадский¹, д-р хим. наук, профессор

Е.В. Соловьева², канд. техн. наук., доцент

¹ИНЭОС РАН им. А.Н. Несмеянова

²Вологодский государственный университет

Аннотация: в работе приводятся данные о влиянии кристаллитов на механические свойства полиэтилена. С помощью расчетных моделей рассчитаны кривые зависимости модуля упругости от степени кристалличности и объема кристаллитов. Данный подход имеет общий характер и может быть использован для моделирования аналогичных процессов в других полимерах.

Ключевые слова: полиэтилен, полимеры, модуль упругости, кристалличность, структура полимера.

При производстве полимерных материалов, которые в строительстве заняли почетное место, применяются современные электронно-вычислительные технологические процессы. При этом сырье может быть различным не только в связи с предприятием производителем, но и включать достаточно большую долю вторичных полимеров, как технологических, так и отходов потребления, в том числе твердых коммунальных [1]. Структура сырья, его свойства кристалличности влияют на многие технологические и производственные процессы, такие как вальцевание, прессование, формование; влияют они и на механические свойства готовой продукции.

Поэтому актуально при расчете модуля упругости, как одного из важнейших свойств материала, учитывать влияние кристаллитов. Известно, что кристаллиты являются эффективными узлами сетки полимерного материала (junctions) [2,3], на основании этого, уравнение для оценки модуля упругости полимеров в высокоэластическом состоянии, можем записать в виде [4]:

$$E = \frac{3\rho_n RT \left(1 + \frac{\beta}{n}\right)}{M_c} \quad (1)$$

где ρ_n – плотность полимера; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; n – приведенное число, находящихся в межузловых сегментах, повторяющихся звеньев линейных цепей, коэффициент β определяется из соотношения:

$$\beta = \frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_y}{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{n \cdot 36}} \quad (2)$$

при этом $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_y$ - Ван-дер-Вальсов объем узловой сшивки, $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{n \cdot 36}$ - Ван-дер-Вальсов объем последовательного звена в линейных сегментах сетки между сшивками.

При расчете учитываем, что среднее число последовательно расположенных звеньев линейных цепей: $n = M_c/M_0$, здесь M_c - молекулярный вес сетки, а M_0 - молекулярный вес повторяющегося звена. При подстановке в формулу (1) имеем:

$$E = \frac{3\rho_n RT \left(1 + \frac{M_0}{M_c} \beta\right)}{M_c} \quad (3)$$

Считая, что кристаллиты являются эффективными узлами сшивки, величина коэффициента β будет определяться по формуле:

$$\beta = \frac{v_{кр}}{\left(\sum_i \Delta v_i\right)_{п.зв.}} \quad (4)$$

где $v_{кр}$ - объем исследуемого кристаллита в полимере.

Для дальнейших расчетов необходимо вспомнить, что один моль любого полимера соответствует количеству повторяющихся единиц равному числу Авогадро, N_A . Если степень кристалличности обозначим за $\alpha_{кр}$, то общее число кристаллитов будет равно $\alpha_{кр}N_A$ повторяющихся единиц, а аморфная часть полимера будет определяться из формулы $(1 - \alpha_{кр})N_A$.

В одном моле количество кристаллитов m определим из соотношения:

$$m = \frac{\alpha_{кр} V_m}{v_{кр}} \quad (5)$$

где V_m - молярный объем полимера.

Известно, что молярный объем полимера равен [4]

$$V_m = \alpha_{кр} V_{м,кр} + (1 - \alpha_{кр}) V_{м,а} \quad (6)$$

где $V_{м,кр}$ - молярный объем кристаллического полимера, $V_{м,а}$ - молярный объем аморфного полимера. При этом, молярный объем полимера можно выразить в зависимости от его плотности $V_{м,кр} = M_0/\rho_{кр}$ и $V_{м,а} = M_0/\rho_a$ ($\rho_{кр}$ и ρ_a плотности кристаллического и аморфного полимера), тогда:

$$V_m = \alpha_{кр} \frac{M_0}{\rho_{кр}} + (1 - \alpha_{кр}) \frac{M_0}{\rho_a} = M_0 \left(\frac{\alpha_{кр}}{\rho_{кр}} + \frac{(1 - \alpha_{кр})}{\rho_a} \right) \quad (7)$$

На основании формул (5,6,7) выразим число кристаллитов m :

$$m = \frac{\alpha_{кр} V_m}{v_{кр}} = M_0 \alpha_{кр} \frac{[\alpha_{кр} (\rho_a - \rho_{кр}) + \rho_{кр}]}{\alpha_{кр} \rho_a v_{кр}} \quad (8)$$

Для всех повторяющихся единиц молекулярный вес аморфной части полимера равен $M_a = M_0 N_A (1 - \alpha_{кр})$. Используя это выражение найдем M_c :

$$M_c = \frac{M_a}{m} = \frac{N_A (1 - \alpha_{кр}) \rho_{кр} \rho_a v_{кр}}{\alpha_{кр} [\alpha_{кр} (\rho_a - \rho_{кр}) + \rho_{кр}]} \quad (9)$$

При расчете величину $v_{кр}$ выражаем в Å^3 , а $N_A = 0.6022$.

Подставляя (9) в (3) получаем

$$E = \frac{3\rho_a RT \left(1 + \frac{M_0 \alpha_{кр} [\alpha_{кр} (\rho_a - \rho_{кр}) + \rho_{кр}]}{0.6022(1 - \alpha_{кр}) \rho_{кр} \rho_a \left(\sum_i \Delta V_i \right)_n} \right)}{\frac{0.6022(1 - \alpha_{кр}) \rho_{кр} \rho_a v_{кр}}{\alpha_{кр} [\alpha_{кр} (\rho_a - \rho_{кр}) + \rho_{кр}]}} \quad (10)$$

Полученное выражение (10) является универсальным, т. к. позволяет определить модуль упругости полимера, варьируя расчетные параметры: концентрацию кристаллитов; их объем; структуру полимера, а именно, концентрацию кристаллитов $\alpha_{кр}$, их объем $v_{кр}$, плотность аморфного ρ_a и плотность кристаллического полимера $\rho_{кр}$, Ван-дер-Вальсова объема узла $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_n$.

Параметры рассчитываются с помощью ЭВМ-программы «Каскад», разработанной в ИНЭОС РАН под руководством д.х.н. профессора А.А. Аскадского.

Итоги расчета влияния степени кристалличности полиэтилена на его модуль упругости представлены на рисунках 1 и 2. Учитывалась комнатная температура, $\rho_a = 0.88 \text{ г/см}^3$, $\rho_{кр} = 1.0 \text{ г/см}^3$, $M_0 = 28$, $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_n = 43.1 \text{ \AA}^3$, $T = 293\text{К}$. Формула (10) дает возможность получить зависимости модуля упругости от концентрации кристаллитов $\alpha_{кр}$ при различном размере среднего размера кристаллита $v_{кр}$. (рис.1).

Полученные кривые дают возможность сделать следующие выводы: модуль упругости полимера заметно растет при увеличении концентрации кристаллитов.

На рисунке 2 представлена зависимость модуля упругости от объема кристаллитов, полученная с помощью уравнения (3). По графику видим, что, чем меньше размер кристаллитов, тем большим модулем упругости обладает полимер. Причина заключается в том, что размер кристаллитов обеспечивает резкое уменьшение M_c при одной и той же их концентрации и, в зависимости от этого, уменьшение величины β .

Modulus of elasticity, kg/cm²

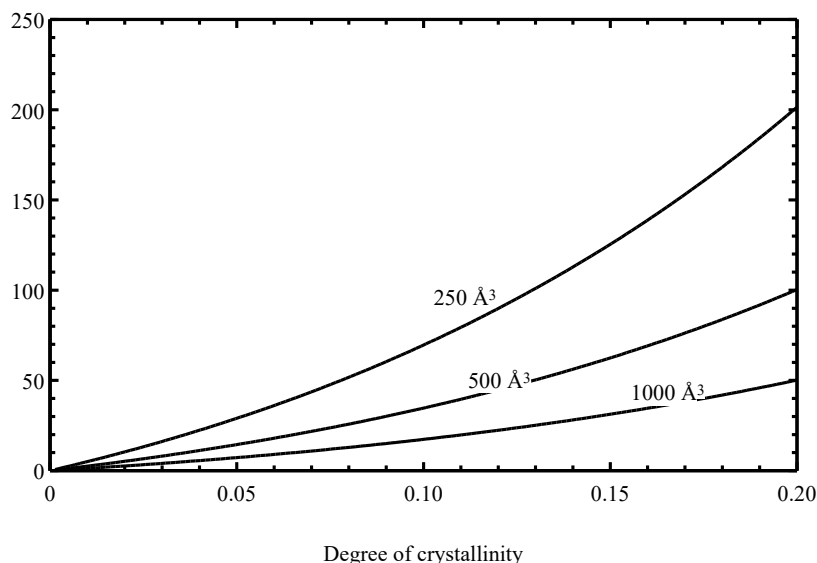


Рис. 1. Кривые, показывающие зависимость модуля упругости полиэтилена от степени кристалличности. 250\AA^3 , 500\AA^3 , 1000\AA^3 - объем кристаллитов.

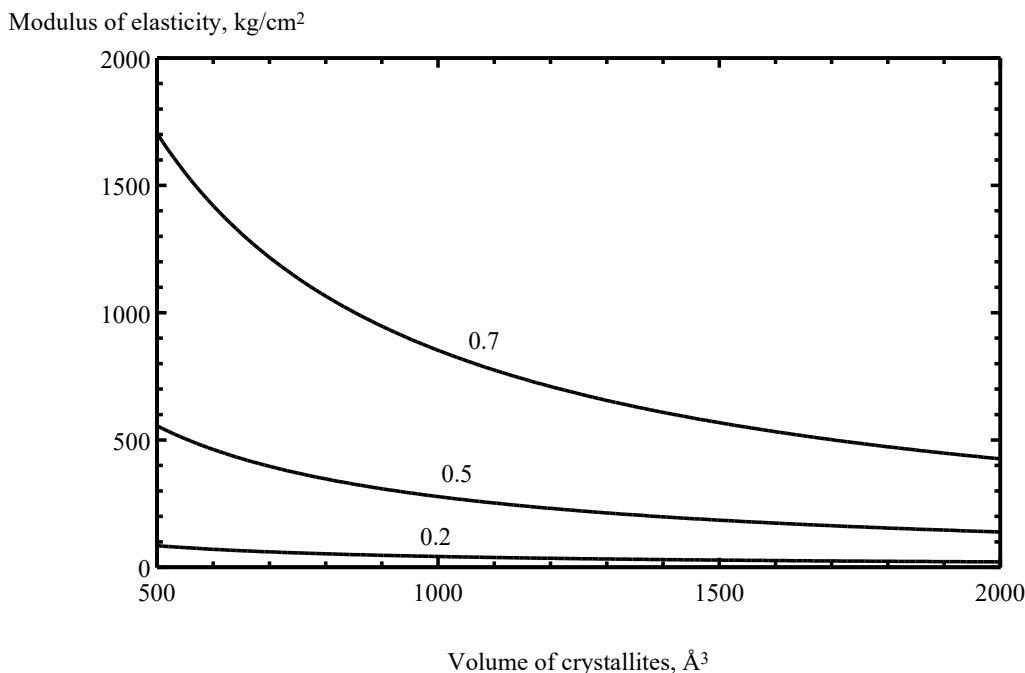


Рис. 2. Кривые зависимости модуля упругости от объема кристаллитов. 0.7, 0.5, 0.2 - степень кристалличности полиэтилена.

Анализ данных настоящей работы дает возможность не только применить для расчета модуля упругости представленную математическую модель, но и оценить влияния кристаллитов на механические свойства полиэтилена.

Библиографический список:

1. Аскадский, А.А. Вторичные полимерные материалы: механические и барьерные свойства, пластификация, смеси и нанокомпозиты» / А.А.Аскадский, М.Н. Попова, Т.А.Мацевич. -М.: изд. АСВ. 2017. 494 с.
2. Аскадский, А.А. Физико-химия и методы исследования полимерных материалов/ А.А.Аскадский, М.Н.Попова, В.И.Кондращенко. -М.: изд. АСВ. 2015. 408 с.
3. Аскадский, А.А. Структура и свойства полимерных материалов/ А.А.Аскадский, М.Н. Попова.-М.: МГСУ, 2014г. 203с.
4. Аскадский, А.А. Компьютерное материаловедение полимеров/ Аскадский А.А., В.И. Кондращенко. - М.: Научный мир.1999.-544с.

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКОМПОНЕТНОГО ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА - ОСНОВНОЙ ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ БЕТОНОВ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

Е.Г. Величко¹, д-р техн. наук, профессор,

Ю.С. Шумилина¹, преподаватель,

Л.Н. Талипов¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Рассмотрены перспективы и проблемы многокомпонентной многоуровневой оптимизации дисперсного состава самоуплотняющегося бетона с целью значимого повышения его строительно-технических свойств, при минимальном содержании вяжущего вещества. Разработаны теоретические и практические основы проектирования дисперсно-гранулометрического составов самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов, в которых используются различные виды дисперсных минеральных модификаторов (ММ), в т. ч. зола-уноса ТЭС. Эффективными ММ для самоуплотняющихся бетонных смесей являются разно-дисперсные доменный гранулированный шлак, зола-уноса ТЭС и микрокремнезем, создающие плотную структуру упаковки частиц многокомпонентного вяжущего с низкой степенью неупорядоченности и обеспечивающие снижение расхода портландцемента в бетоне до 50% и выше. Самоуплотняющиеся бетонные смеси при таком выборе вида и параметров ММ характеризуются более низким водосодержанием, высокой вязкостью и низким уровнем значения предельного напряжения сдвига, обеспечивающими ее качественное уплотнение. Для изучения свойств и структуры бетона использовались в качестве мелкого заполнителя кварцевый песок с $M_k - 2,58$, гранитный щебень фр. 5-10 мм, портландцемент класса ЦЕМ I 52,5Н, тонкодисперсный доменный гранулированный шлак, зола-уноса ТЭС, микро-кремнезем и суперпластификатор Glenium 430. Для однородного протекания пуццолановой реакции в каждом микрообъеме применялась высокодисперсная фракция цемента. Методы исследований: форма и размер дисперсных частиц компонентов определялись лазерным анализатором, подвижность бетонной смеси по ГОСТ 10181-2014, прочность бетона на сжатие по ГОСТ 10180-2012. Структура цементного камня изучалась термографического и рентгенофазового методов анализа.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, высокопрочный, дисперсный состав, зола-уноса ТЭС, пуццолановая реакция, тонкодисперсный шлак, микрокремнезем, суперпластификатор.

Введение. Развитие строительного комплекса РФ требует постоянного повышения качества бетона и железобетона и совершенствования технологии их производства путем исследования, разработки и внедрения исходных материалов высокого качества, а также автоматизации и роботизации технологических процессов и операций. В частности, расширяется производство и применение высокопрочных и долговечных бетонов, недостатком которых является высокий абсолютный и удельный расход цемента на единицу прочности. Очевидно, что значимыми факторами в производстве бетонов высоких классов являются создание плотной структуры с высокой концентрацией твердой фазы в единице объема и качественное уплотнение бетонной смеси. Повышение плотности бетона может быть достигнуто только путем оптимизации его дисперсно-гранулометрического состава на различных структурных уровнях с целью высокого наполнения ее твердой фазой и низкого водоцементного отношения [1-

3], обеспечивающих минимальный расход портландцемента и его высокие строительно-технические свойства.

Перспективным направлением в технологии высокопрочных бетонов является использование самоуплотняющихся бетонных смесей. (self-compacting concrete – SCC), снижающих трудоёмкость производства, обеспечивающих высокое качество поверхности готовой продукции и не требующих высококвалифицированной рабочей силы [4-7]. Такие смеси должны характеризоваться низким предельным напряжением сдвига (текучестью) и высоким значением вязкости, предотвращающим расслоение, водоотделение, седиментационные процессы, т. е. повышающей ее однородность и прочность бетона. Оптимальное сочетание означенных противоречивых реологических свойств бетонной смеси облегчает выход вовлеченного в процессе приготовления воздуха, и способствует ее качественному уплотнению. Повышение качества указанных реологических свойств бетонной смеси может обеспечиваться использованием в составе бетона высокодисперсных минеральных модификаторов различного происхождения (микрокремнезем, тонкодисперсный шлак, зола-уноса ТЭЦ и др.), суперводоредуцирующих добавок поликарбоксилатного типа [8, 9], других видов химических модификаторов, регулирующих вязкость и текучесть бетонной смеси, а также ускорителей и замедлителей схватывания и твердения [5].

Кроме того, для качественного самоуплотнения бетонной смеси необходимо использовать такие технологические приемы, как снижение расхода крупного заполнителя и максимальной крупности его зерен (наиболее предпочтительней размер 5(3)-10 мм), низкое водовязущее отношение [10]. Максимальная текучесть бетонной смеси, и ее качественное самоуплотнение обеспечивается в этом случае практически исключением контактных взаимодействий между зернами заполнителей за счет повышенных расхода цемента и доли (более 0,5) песка в смеси заполнителей. Однако необходимо отметить, что бетоны с повышенным содержанием цемента характеризуются высоким тепловыделением, значимо увеличивающим кинетическую энергию в начальный период их твердения, что является негативным фактором. По этой причине фиксация частиц гидратных фаз при структурообразовании может происходить в основном в положении дальней (10-7 – 10-8 м) коагуляции, с низкой энергией связи между ними, обеспечивая при этом ее нежелательные значимо высокую рыхлость, микропористость, дефектность и снижение физико-механических свойств [11, 12]. Очевидно, что требуемые реологические свойства бетонной смеси обеспечиваются только при сохранении высокого содержания дисперсной фазы. Повышение содержания дисперсной фазы может быть обеспечено при частичном замещении портландцемента или мелкого заполнителя высокодисперсными минеральными добавками (тонкомолотый доменный гранулированный шлак, зола-уноса ТЭС, микрокремнеземом и др.) [6, 13-15]. Замещение части цемента или мелкого заполнителя ММ различной дисперсности может позволить получать цементную пасту с низким предельным напряжением сдвига без седиментационных процессов, а бетонную смесь с высокой вязкостью, без водоотделения и расслоения. Важным фактором в этом случае является выбор вида, дисперсности, пуццоланической активности и энергетического состояния ММ, обеспечивающих высокую концентрацию твердой фазы в единице объема [1, 2].

При этом максимально плотная упаковка частиц и зерен цементной системы достигается путем использования их с оптимальными дисперсностью и содержанием для каждого иерархического структурного уровня, при которых каждая последующая более тонкодисперсная фракция распределяется в основном с максимальным наполнением межчастичных или межзерновых пустот менее дисперсной [2].

Предполагая физическую модель в виде частиц шарообразной формы, а элементарную ячейку частиц клинкерного компонента в виде простой кубической упаковки частиц одного диаметра (рисунок 1, поз. 2) [2], определим наиболее рациональные параметры (дисперсность, содержание) применения различных видов ММ в многокомпонентной цементной системе, обеспечивающие повышение ее плотности или хотя бы сохраняющие ее на исходном уровне (рисунок 1, поз. 4). Очевидно, что таких уровней по дисперсности три. Первая – оптимальная (рисунок 2, поз. 2). Наблюдается уплотнение исходной многокомпонентной системы. Вторая - равнодисперсные частицы клинкерного компонента и минеральной добавки (рисунок 1, поз. 5 – поз. 9). Плотность исходной системы не изменяется. Третья – частицы с дисперсностью на уровне, значимо превышающим дисперсность клинкерного компонента, например, удельной поверхности микрокремнезема ($18000-21000\text{ м}^2/\text{кг}$). В этом случае будет наблюдаться уплотнение исходной системы, путем заполнения микропустот многокомпонентной системы и обволакивания частиц клинкера и относительно грубодисперсных добавок, а образующие цепочки-кластеры высокодисперсных частиц значимо улучшают реологические свойства цементной пасты и бетонной смеси. Таким образом, имеется только три уровня дисперсности ММ, функционально связанные с дисперсностью клинкерного компонента и собственной пуццоланической и/или химической активностью, которые могут обеспечивать прочность многокомпонентной цементной системы и ее другие строительные-технические свойства на максимальном уровне.

Для наполнения первого уровня межчастичных пустот применяется тонкодисперсный ММ (например, доменный гранулированный шлак и др.), в количестве 18-25% массы цемента с оптимальной дисперсностью, в среднем на $150\text{ м}^2/\text{кг}$, превышающий удельную поверхность портландцемента [2]. Его частицы вследствие оптимальной дисперсности и наличия мозаично распределенных разноименно заряженных минералов на поверхности и электростатического взаимодействия с частицами клинкера самопроизвольно объемно ориентируются и однородно с высокой энергией связи с ними будут фиксироваться в его межчастичных пустотах. Для второго уровня - при равной дисперсности клинкерного компонента и ММ рациональное содержание его может быть равным 25-75%, а для третьего определяется экспериментально и должно быть незначительным [2]. Для высокопрочных бетонов наиболее предпочтительные поз. 5 и поз.7 (рисунок 2), т. е. теоретическое содержание ММ в многокомпонентном вяжущем может приниматься в количестве 25 или 50%.

В реальных системах конгломератного или композитного типа строения и особенно при наличии разнодисперсных ММ имеется вероятность того, что две или большее количество дисперсных частиц ММ могут объединиться, и будут представлять собой отдельный агрегат [2, 13]. В таких микрообъемах цемент-

ных систем пуццолановая реакция практически не протекает, и они представляют собой псевдопоры размером 5-7 мкм (случай трех частиц) и 0,5-1,5 мкм (двух частиц). Означенные дефекты структуры вносят значимый вклад в снижение прочности, морозостойкости, деформативных характеристик цементного камня, например, пуццолановый и шлакопортландцемент.

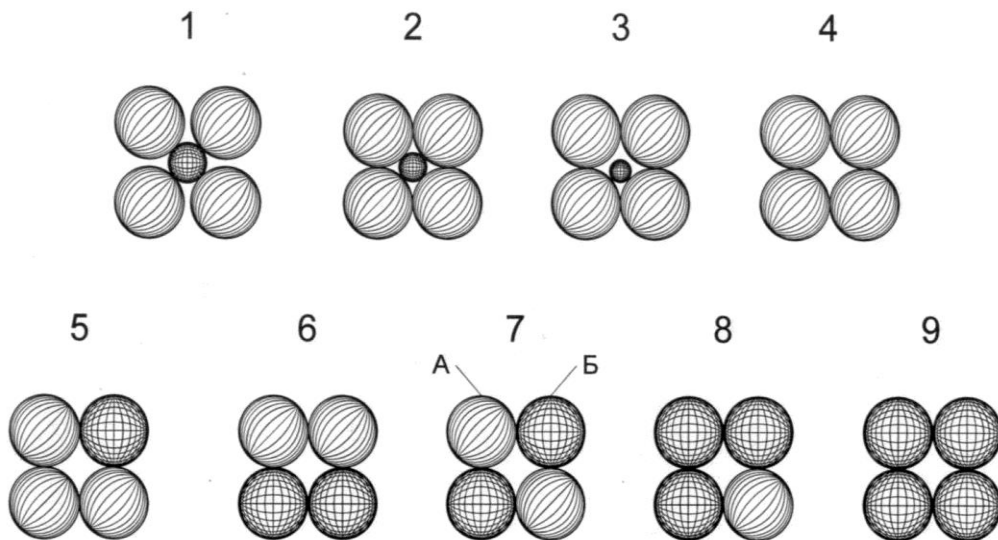


Рис. 1. Геометрия теоретически возможных схем частиц клинкерного компонента (КК) и минеральных модификаторов (ММ): А – КК; Б – ММ:

1 – дисперсность ММ меньше оптимальной; 2 – то же оптимальная; 3 – больше оптимальной; 4 - 9 – частицы КК и ММ равной дисперсности

Выбор материалов для однородного распределения частиц на различных уровнях структуры по дисперсности и содержанию с целью значимого снижения расхода клинкерного компонента и формирования более упорядоченного строения должен обеспечивать или однородное протекание процесса гидратации их, или пуццолановой реакции в каждом микрообъеме многокомпонентной цементной системы. Кроме того, для получения высокой прочности таких систем дисперсные частицы всех уровней должны иметь высокие модули упругости и наиболее целесообразно совпадающие по значению, обеспечивая их более однородное напряженное состояние, в т.ч. при подводе к системе энергии или вещества [2]. Уровень допускаемой подводимой энергии к материалу в этом случае увеличивается.

Таким образом, синтез многокомпонентной цементной системы с многоуровневой разнодисперсной модификацией структуры наиболее целесообразно осуществлять с использованием следующих принципиальных положений.

Объем компонентов многокомпонентного вяжущего определяется по методу абсолютных объемов, а дисперсные структурные уровни могут быть синтезированы следующим образом. Например, первый уровень в виде портландцемента с дисперсностью 300 - 350 м²/кг и менее с целью обеспечения длительного сохранения прочных с высоким модулем упругости реликтов частиц клинкера в цементном камне. Для наполнения первого уровня межчастичных пустот портландцемента применяется тонкодисперсный доменный гранулированный шлак в количестве 20-25% массы цемента с оптимальной дисперсностью 450-

500м²/кг [2]. Для второго уровня, например, может быть использована зола-уноса ТЭС с удельной поверхностью 320-380см²/кг в количестве 25%. т. е. для реализации поз 5, рис.2. Зола-уноса вследствие сферической оплавленной формы частиц обладает низкой водопотребностью и значительно улучшает текучесть бетонной смеси и повышает ее вязкость за счет высокой энергии связи с частицами клинкера и тонкодисперсного шлака.

Для третьего - микрокремнезем - 2-6% - 18000-21000 м²/кг, способствующий вследствие наличия небольшого количества частиц нанометрового уровня стабилизации структуры цементного камня и фиксации вследствие молекулярного отбора частиц гидратных фаз с высокой энергией связи в положении ближней коагуляции, значительно повышающих ее плотность [7, 8, 13, 16]. а также образованию за счет пуццолановой реакции прочных вторичных низкоосновных гидросиликатных фаз. Это связано также с тем, что высокодисперсный аморфный диоксид кремнезема, взаимодействуя с гидроксидом кальция, образует практически в процессе приготовления бетонной смеси, волокнистые гидросиликаты кальция нанометрового уровня, которые создают структурные цепочки-агломерации, способствующие кластерообразованию частиц гидратных фаз в высокоплотной упаковке. Оптимальное содержание микрокремнезема в этом случае будет незначительным и определяются экспериментально.

С учетом возможного образования агрегатов ММ необходимо использование высокодисперсного портландцемента в количестве 4 - 12% с удельной поверхностью 900 - 1100м²/кг [1,2], обеспечивающий однородное протекание реакций гидратации или пуццолановой реакции во всех микрообъемах, содержащих минеральные модификаторы.

Материалы и методы. Исследования проводились с целью оценки влияния использования золы-уноса ТЭС Черепетской ГРЭС на реологические и технологические свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и прочность высокопрочного бетона, содержащего разномодисперсные различного вида ММ (тонкодисперсный доменный шлак, микрокремнезем и тонкодисперсную фракцию цемента с удельной поверхностью 980 м²/кг). Дисперсность портландцемента и золы ТЭС находятся на одном уровне и составляют 330 -350 м²/кг, т.е. реализуются поз.5, рисунок 1, а тонкодисперсного шлака – 480 м²/кг (рисунок 1, поз. 2) [2]. Содержание микрокремнезема принималось равным 3%. При таких параметрах разномодисперсных ММ представляется возможным использовать их в количестве до 50 %, в том числе различных видов, для замещения эквивалентной части портландцемента и мелкого заполнителя без образования их агрегатов.

Приготовление бетона осуществлялось с использованием в качестве мелкого заполнителя песка I класса с Мк = 2,58 Вяземского щебеночного завода, гранитного щебня фр. 5-10 мм с маркой по дробимости М1400 месторождения Липпесюрья Карелии, портландцемента класса ЦЕМ I 52,5Н с удельной поверхностью 330 м²/кг филиала ООО «ХайльдербергЦемент Рус» пос. Новогуровский Тульской области. Расход портландцемента принимался равным 420 кг/м³ бетона, а его тонкодисперсной фракции с удельной поверхностью 980 м²/кг - 6% массы многокомпонентного цемента [17]. В качестве суперпластификатора применялся Glenium 430 (ООО «БАСФ-Строительные системы») в

количестве 0,67% массы многокомпонентного цемента (портландцемент+тонкодисперсный шлак+ зола-уноса). Применялись следующие методы исследований: форма и размер дисперсных частиц компонентов определялись 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.

Результаты исследования и их анализ. Исследование структуры цементного камня с использованием растровой микроскопии с микроанализом показали, что частицы тонкомолотого доменного гранулированного шлака с оптимальными параметрами однородно (коэффициент вариации 0,5%) распределяются в матрице многокомпонентного цементного камня. Такие параметры компонентов первого иерархического уровня микроструктуры обеспечивают значимое снижение ее исходной межчастичной пустотности (до 9%), высокий уровень наполнения ее твердой фазой, раннюю активацию реакций гидратации минералов шлака, а также наличие высокопрочных реликтов частиц клинкера. Установлено также, что комплексное применение тонкодисперсного доменного гранулированного шлака, микрокремнезема и клинкерного компонента снижают объем межчастичной пустотности многокомпонентного вяжущего до 13,6 %.

Использование золы – уноса в количестве 20-24% снижает НГЦТ относительно контрольного состава на 1-2,5 абс. %, а минимальное значение наблюдается при ее оптимальном содержании - 22% (таблица 1). Очевидно, что уменьшение водопотребности цемента с золой ТЭЦ связано с однородным более упорядоченным распределением ее частиц в упаковке частиц цемента, а также с их сферической оплавленной формой.

В составе самоуплотняющейся бетонной смеси зола ТЭС применялась в количестве 22% для замещения эквивалентного количества песка по объему, что позволило редуцировать ее водосодержание на 6 л/м³, увеличить расплыв конуса на 12 см, при отсутствии растворо– и водоотделения и расслоения, т.е. использование золы значительно улучшило ее реологические и технологические свойства. Очевидно, что в повышение качества бетонной смеси существенный вклад вносит улучшение дисперсно-гранулометрического состава растворной составляющей бетона. На поверхности бетонной смеси с расплывом конуса (РК) 88 см наблюдаются равномерно распределенные зерна крупного заполнителя, подтверждающие ее высокие вязкость и текучесть (рисунок 2).

Высокое качество самоуплотняющейся бетонной смеси с золой ТЭС, увеличение глубины протекания пуццолоновой реакции с образованием дополнительного количества прочных низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(I), а также незначительное редуцирование водосодержания обеспечили повышение прочности бетона на 3,6-9,7 %.

Для оценки качества структуры были выполнены термографические и рентгенофазовые исследования образцов бетона в возрасте 28 суток без золы и с ее содержанием в количестве 22%. Структура бетона с комплексом ММ, включающим золу-уноса отличается значимо меньшим (на 13,6%) содержанием портландита. а степень гидратации портландцемента составляет 80 -82 %, пре-

вышая аналогичный показатель для контрольного состава (без золы) на 8-12%, подтверждая его более высокую прочность.

Таблица 1. Свойства цементной пасты и бетона с золой-уноса ТЗС

№ п/п	Содержание золы, %	НГЦТ*, %	Состав бетона, кг/м ³	Распльв кону-са, см	Прочность бетона на сжатие, МПа/%, в возрасте, сут		
					1	2	28
1	20	28	Ц-420; Шлак-130; Зола-121; П-721; Щ –(фр.5-10мм)-430; микрокремнезем – 20; Ц (980 м ² /кг) -40; В-182; СП-4,9	88	<u>71,3</u> 48,0	<u>87,3</u> 58,8	<u>148,5</u> 100
	22	27					
	24	28,5					
2	-	-	Ц-420; Шлак=130кг; микрокремнезем – 20; Ц (980 м ² /кг) -40; П-830; Щ –(фр.5-10мм)-830; В-188; СП-4,9	76	<u>62,8</u> 42,3	<u>78,0</u> 55,2	<u>134,7</u> 90,7

*- НГЦТ –нормальная густота цементного теста. Для состава без золы -29,5%.



Рис. 2. SCC с РК = 88см

Выводы. Разработаны теоретические и практические основы проектирования дисперсно-гранулометрического составов самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов, в которых используются различные виды разномодульных ММ, оптимизирующих его структуру на строго определенных иерархических уровнях.

Многоуровневая дисперсно-гранулометрическая в комплексе с химической модификация состава самоуплотняющихся бетонных смесей обеспечивает получение высокопрочных бетонов с минимальным абсолютным и удельным

на единицу прочности расходом портландцемента и высокими физико-механическими показателями. Эффективными ММ для этих целей являются разномодально дисперсные доменный гранулированный шлак и микрокремнезем, а также зола-уноса ТЭС с дисперсностью, равной удельной поверхности портландцемента, и создающие плотную структуру упаковки частиц многокомпонентного вяжущего с меньшей степенью неупорядоченности и обеспечивающие снижение расхода портландцемента в бетоне до 50% и более. Прочность бетона только от применения золы-уноса ТЭС взамен эквивалентной части мелкого заполнителя увеличивается на 3,6-9,7 %.

Целесообразным является использование разномодальной клинкерной составляющей, обеспечивающей повышение концентрации твердой фазы в единице объема, однородное протекание реакций гидратации минералов клинкера и пуццолановой реакции во всех микрообъемах многокомпонентной цементной системы, а также наличие прочных крупных размеров реликтов частиц клинкера, вносящих значимый вклад в интегральную прочность высокопрочного бетона

Библиографический список:

1. Петров, А.А. Наука в обществе / А.А. Петров. – М.: Наука, 2000. 456 с.
2. Сидоров, И.П. Наука и производство / И.П. Сидоров // Экономика. 2000. № 5. С. 23-27.
3. Величко Е.Г., Дыкин И.В., Еремин А.В. Многоуровнево-модифицированные цементные системы // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 111–114.
4. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Физико-химические и методологические основы получения многокомпонентных систем оптимизированного состава // Строительные материалы. 1996. № 3. С. 27–30.
5. Leng F.F. Destruction of composites with dispersed particles in a brittle matrix // Composite material. Destruction and fatigue. 1978. №5.
6. Collepardi M. Self-Compacting Concrete: What is New // Proceedings of Seventh CANMET, ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. 2003. Pp. 1-16.
7. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
8. Шестернин А.И., Коровкин М.О., Ерошкина Н.А. Основы технологии самоуплотняющихся бетонов // Молодой ученый. 2015. № 6 (86). С. 226–228.
9. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. Сер. Нанотехнология. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 309 с.
10. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. (Химия, Москва, 1980).
11. Тарасеева Н.И., Воскресенский А.В., Тарасеева А.С. Роль безотходных технологий в расширении сырьевой базы для получения эффективных модифицирующих добавок и активных наполнителей в цементные растворы и бетоны // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2014. № 10 (32).
12. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 20–23.
13. Суздальцев О.В., Калашников В.И., Мороз М.Н., Сехпосян Г.П. Новые высокоэффективные бетоны // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2014. № 7–8 (29–30).
14. Horst G., Joerg R. Self-compacting concrete – another stage in the development of the 5 – component system of concrete // Beton technische Berichte (Concrete Technology Reports), Verein Deutscher Zementwerke. 2001. Pp. 39-48.
15. Isaeva Yu.V., Velichko E.G., Kasumov A. Sh. Optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components. Construction Materials. 2015; 8:84-87.

16. Яковлев Г.И., Федорова Г.Д., Полянских И.С. Высокопрочный бетон с дисперсными добавками // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 35–42.
17. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinievich O., Kizinievich V., Gordina A.F. Influence of dis-persions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ce-ramic // Construction Materials. 2016. Vol. 8. Pp. 20-29. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-740-8-25-29.
18. Talipov L., Velichko E. Polymer additives for cement systems based on polycarboxylate ethers // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Pp. 939-946. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_93.
19. Величко Е.Г., Шуმიлина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. С. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.

КРАЕВЫЕ УГЛЫ СМАЧИВАНИЯ НАБУХАЮЩИХ ПОРОШКОВ

В.Е. Данилов¹, канд. техн. наук

А.М. Айзенштадт¹, д-р техн. наук, профессор

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Порошки, обладающие способностью набухать, нашли широкое применение в индустрии строительных материалов при производстве древесно-полимерных композитов и эластомеров. В связи с этим важной задачей становится выбор совместимых полимерных вяжущих и набухающих порошковых наполнителей. Такой подбор возможно осуществить с использованием в качестве информационного параметра поверхностного натяжения, определяемого методом ОВРК, взяв сырьевые компоненты имеющие близкие значения полярной и дисперсионной составляющих, устранив возможный дисбаланс межмолекулярных сил на границе раздела фаз «наполнитель-полимерное связующее». Однако при использовании подобного подхода возникает проблема получения воспроизводимых углов смачивания набухающих порошков – решение данной проблемы, в случае использования в качестве измерительной аппаратуры современных гониометров, стало целью данной работы. Установлено, что для набухающих порошковых материалов (сапонит-содержащий материал, древесная мука) в сравнении с порошком из кварцевого песка для определения псевдоравновесного краевого угла необходимо проводить коррекционное изменение положения базовой линии по уровню границы набухшего материала.

Ключевые слова: порошкообразный материал, кварц, сапонит, древесная мука, краевой угол смачивания, поверхностное натяжение.

Порошки представляют собой дисперсные системы с размером частиц в пределах от 0,1 до 1000 мкм, получаемые в процессе дробления и измельчения металлов, минералов, горных пород, полимеров, древесины, отходов различных промышленных производств. Применение данных материалов (в качестве сухих строительных смесей, компонентов вяжущего, наполнителей, активных добавок и т.д.) является основой практически всех отраслей строительства. Среди всего многообразия порошков особое место занимают набухающие, например бентонитовый порошок, который используется в качестве наполнителя эластомерных профилей, обладающих способностью набухать в воде и заполнять неплотности швов [1].

Другим примером может служить древесная мука, являющаяся наиболее распространенным наполнителем в древесно-полимерных композитах. Проектирование подобных наполненных полимерных композитов в настоящее время сводится к подбору полимерного связующего и наполнителя обладающих лучшей совместимостью и адгезией друг к другу [2, 3].

Одним из наиболее эффективных способов подбора компонентов в композиционной смеси, по нашему мнению, является устранение дисбаланса межмолекулярных сил (Ван-дер-ваальсовых и электростатических) на границе раздела фаз «наполнитель-полимерное связующее», количественное определение которого осуществляется с использованием метода ОВРК [4, 5].

Определение дисперсионной и поляризационной составляющей поверхностного натяжения по данному методу для различных типов полимеров и не набухающих порошков не представляет особой сложности, что выражается в многочисленных литературных и справочных данных накопленных по данной тематике [6-9]. Напротив, для таких наполнителей, как бентонит и древесная

мука в настоящее время получено не так много подобных экспериментальных результатов, что связано с проблемой получения воспроизводимых углов смачивания набухающих порошков, по которым впоследствии считаются составляющие поверхностного натяжения [10–12].

Таким образом, целью данной работы стало установление методических приемов, позволяющих воспроизводимо измерять краевые углы смачивания набухающих порошкообразных образцов.

В качестве объектов исследования были выбраны: кварцевый порошок (как контрольный, не набухающий), сапонит-содержащий материал выделенный из суспензии оборотной воды процесса обогащения кимберлитовых пород месторождения им. М.В. Ломоносова (представляет собой комплекс глинных минералов, в том числе смектитов, находящийся в виде геля в дисперсионной среде) и древесная мука сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Высокодисперсные порошки кварца (КП), сапонит-содержащего материала (ССМ) и древесной муки (ДМ) получали высушиванием сырья до постоянной массы с последующим помолом на планетарно-шаровой мельнице при скорости вращения ротора 420 об/мин в гарнитуре из карбида вольфрама. Полученные минеральные порошки помещали в ячейки для сыпучих проб (4 мкм майларовая пленка) и анализировали на ПРФА МетЭксперт. Элементный состав исходных порошкообразных материалов представлен в таблице 1.

Удельную поверхность, $S_{уд}$, и среднемассовый диаметр, d_m , порошков определяли методом газопроницаемости Козени-Кармана, истинную плотность, $\rho_{ист}$, определяли пикнометрическим методом, дополнительно рассчитывали среднюю плотность, $\rho_{ср}$, и пористость, P , образцов-запрессовок полученных из порошков путем их уплотнения на гидравлическом прессе ПЛГ-20 в металлических пресс-формах внутренним диаметром 30 мм при нагрузке 8 т в течении 2 минут (образцы-запрессовки были изготовлены для определения их угла смачивания). Время помола $\tau_{пом}$, характеристики порошкообразных материалов и изготовленных образцов запрессовок сведены в таблице 2.

Таблица 1. Элементный состав исходных порошкообразных материалов

Образец	Содержание, %									
	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Ni	Cr	Sn
КП	-	-	88,190	-	-	-	9,830	-	1,551	0,428
ССМ	14,112	8,185	46,457	4,276	6,076	1,748	18,882	0,264	-	-

Таблица 2. Характеристика исходных порошкообразных материалов

Образец	$\tau_{пом}$, МИН	d_m , МКМ	$S_{уд}$, см ² /Г	$\rho_{ист}$, Г/см ³	$\rho_{ср}$, Г/см ³	P , %	Набухание
КП	15	8,9	3793	2,60	1,60	38,46	отсутствует
ССМ	80	1,7	13513	2,63	1,63	38,02	умеренно
ДМ	20	6,7	5778	1,54	1,10	28,57	сильно

Краевой угол смачивания образцов-запрессовок определяли на гониометре DSA-20E (EasyDrop) методом «sessile drop» рабочими жидкостями с известными полярными и дисперсионными составляющими поверхностного натяжения: вода (В), этиленгликоль (Э), глицерин (Г), декан (Д). Данные о плотности, ди-

намической вязкости, температурах плавления и кипения, а также поверхностном натяжении использованных в исследовании рабочих жидкостей приведены в работах [13-15]. Измерения краевого угла и диаметра основания капли проводили во времени через каждые 16 мс (62 fps) с момента первого контакта рабочей жидкости с поверхностью образца. Контур каплей рабочей жидкости с краевым углом менее 30° обрабатывали сегментным методом, более 30° – тангентальным (методом эллипса). По среднему равновесному углу смачивания (не менее 3-х параллельных измерений) рассчитывали дисперсионную (σ_{sd}) и поляризационную (σ_{sp}) составляющие и суммарное значение (σ_s) поверхностного натяжения исследуемого порошкообразного материала.

Результаты измерений поверхностных свойств сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты измерений поверхностных свойств

Образец	Время и средние скорости просачивания/впитывания и растекания рабочих жидкостей															
	$\tau_{\text{прос/впит}}, \text{с}$				$\bar{v}_{\text{прос/впит}}, \text{МКЛ/с}$				$\tau_{\text{раст}}, \text{с}$				$\bar{v}_{\text{раст}}, \text{ММ/с}$			
	Д	В	Э	Г	Д	В	Э	Г	Д	В	Э	Г	Д	В	Э	Г
КП	0,3	0,54	3,3	126	18	12	1,5	0,040	0,016	0,032	0,6	16	104	5,2	2	0,1
ССМ	0,5	7	5,7	291	7	2,5	1,1	0,018	0,032	2,11	0,2	10	6,4	0,9	2	0,05
ДМ	0,3	12	12	1500	8	0,7	0,5	0,004	0,016	1,35	1,0	170	38,6	1,1	0,6	0,004

Обсуждая полученные данные на кварцевом порошке (рисунок 1) следует отметить, что экспериментальные точки «ложатся» на параболу, причем ее вершина всегда находится в точке с максимальным диаметром основания капли (капля полностью растеклась по материалу, после чего за счет испарения/просачивания жидкости ее диаметр основания начинает уменьшаться).

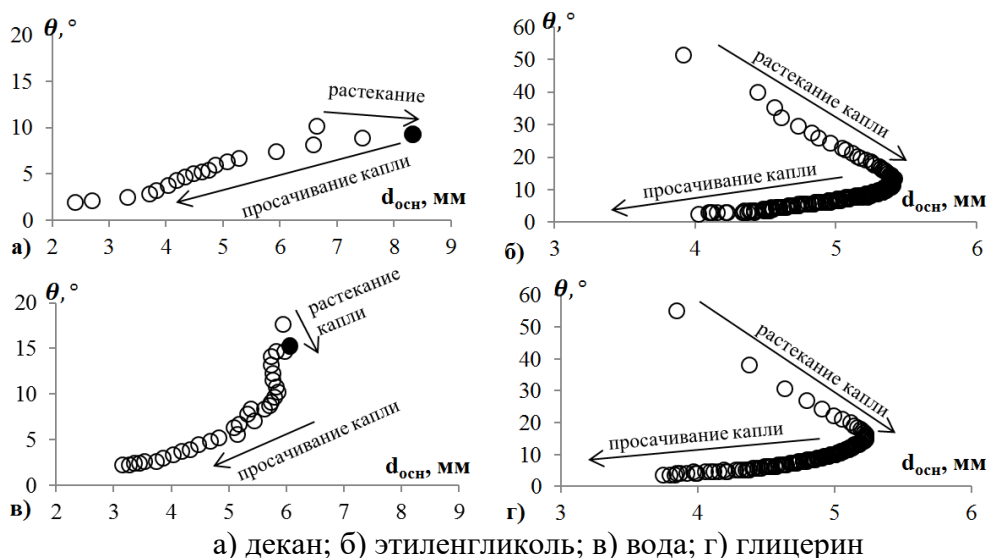


Рис. 1. Краевые углы смачивания и диаметры основания капель рабочих жидкостей на поверхности образца-запрессовки из кварцевого порошка

На подложке из умеренно и сильно набухающих порошковых материалах в процессе измерения происходит смещение границы раздела фаз под каплей рабочей жидкости и возле ее краев (рис. 2, 4). Данный эффект приводит к некор-

ректной обработке ПО контура капли (рис. 3, 5) и ошибочным значениям краевого угла и диаметра основания капли (отмечены серым на рис. 3, 5). Получение вышеуказанной параболической функции «краевой угол смачивания – диаметр основания капли» (черные точки на рис. 3, 5) на образцах-запрессовках из умеренно (или скрытно) набухающих порошковых материалах возможно при изначальной установке базовой линии на уровень набухшего материала (скорректированная базовая линия), после того как капля рабочей жидкости полностью впиталась/испарилась (рис. 2).

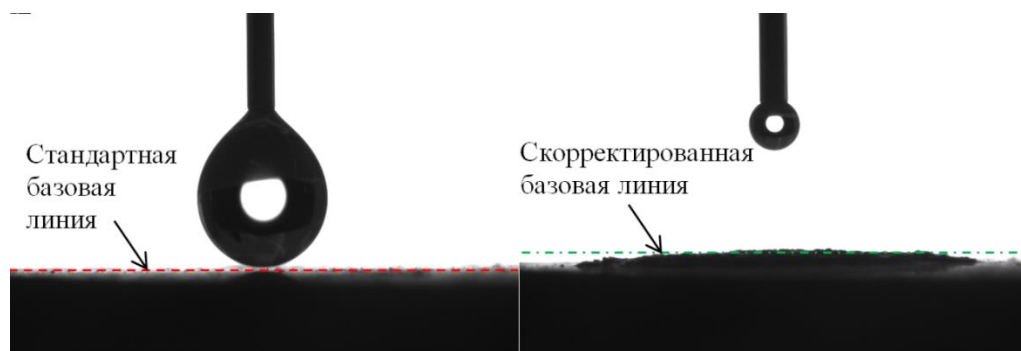


Рис. 2. Фотографии подложки образца-запрессовки из сапонита в момент предшествующий ее касанию каплей воды и после полного впитывания капли

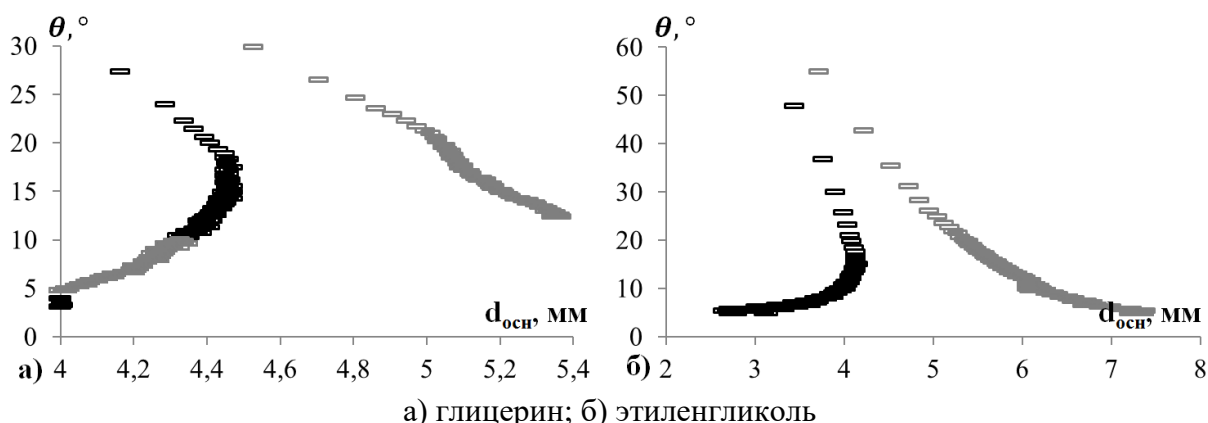


Рис. 3. Краевые углы смачивания и диаметры основания капель вязких рабочих жидкостей на поверхности образца-запрессовки из ССМ

Следует отметить, что процессы растекания и просачивания/впитывания вязких рабочих жидкостей (в частности глицерина) на набухающих материалах могут занимать более продолжительное время, чем на не набухающих (табл. 3).

В случае сильно (или интенсивно) набухающих порошковых материалов, а также при использовании воды в качестве рабочей жидкости базовую линию следует перемещать вверх по мере поднятия материала и при определении углов смачивания выбирать кадры с разными положениями набухающей подложки (рис. 4, 5).

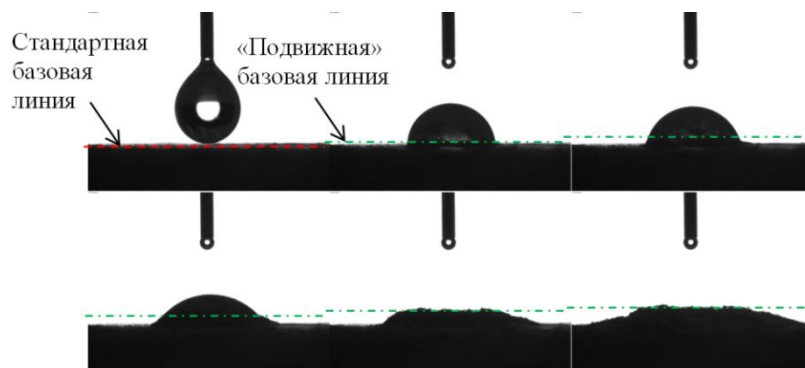


Рис. 4. Фотографии подложки образца-запрессовки из древесной муки в процессе впитывания капли воды («подвижная» базовая линия)

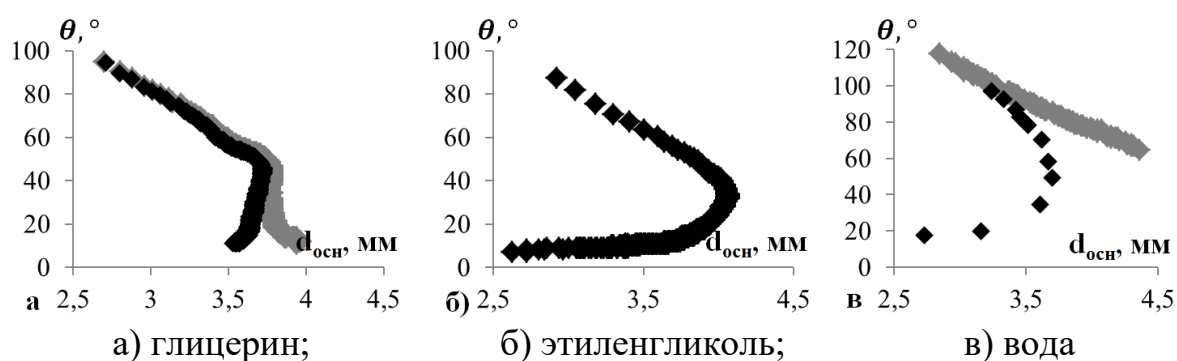


Рис. 5. Краевые углы смачивания и диаметры основания капель рабочих жидкостей на поверхности образца-запрессовки из древесной муки

Измеренные вышеописанными способами псевдоравновесные краевые углы смачивания и рассчитанные по ним значения поверхностного натяжения сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Результаты измерений псевдоравновесного краевого угла смачивания и расчета составляющих поверхностного натяжения

Образец	Краевой угол смачивания θ , °				σ_{sp} , мДж/м ²	σ_{sd} , мДж/м ²	σ_s , мДж/м ²	R^2
	Д	Э	Г	В				
КП	10,1	13,4	17,9	13,7	46,98	18,98	65,92	0,98
ССМ	10,1	14,6	18,3	23,5	43,72	19,68	63,40	0,99
ДМ	9,2	33,6	46,9	64,9	17,55	24,38	41,92	0,97

Полученные значения (0,97 и 0,99) коэффициента достоверности аппроксимации (R^2) линейных уравнений на графиках Оуэнса-Вендта для набухающих порошков свидетельствуют о применимости предложенного в статье подхода для определения краевых углов смачивания.

Таким образом, общей рекомендацией для всех видов порошковых материалов является выбор псевдоравновесного краевого угла по графику параболической функции «краевой угол смачивания – диаметр основания капли» рабочей жидкости исходя из условия $d_{очн} \rightarrow \max$. Однако, для набухающих порошков для получения вышеуказанной функции следует проводить коррекционное изменение положения базовой линии по уровню границы набухшего материала. При выполнении данных рекомендаций становится возможным полу-

чать воспроизводимые значения краевых углов рабочих жидкостей и, следовательно, составляющих поверхностного натяжения набухающих порошков.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-43-292002р_мк с использованием уникальной научной установки «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем».

Библиографический список:

1. Карманова О.В., Москалёв А.С., Шутилин Ю.Ф., Власова Л.А. Эластомерные невулканизированные гидроизоляционные материалы строительного назначения // Вестник ВГУИТ, 2016. №4. С. 228–232.
2. Вольфсон С.И., Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Лыгина Т.З., Трофимова Ф.А. Модифицированные древесно-полимерные композиты // Пластические массы. 2014. №1-2. С. 41–44.
3. Аскадский А.А., Мацеевич Т.А., Кондращенко В.И. Водопоглощение древесно-полимерных композитов на основе ПВХ с частичной заменой древесного наполнителя на минеральный. // Строительные материалы. 2019. №5. С. 62–66.
4. Данилов В.Е., Строкова В.В., Айзенштадт А.М. Роль дисперсионных и поляризационных эффектов при формировании древесно-минерального композита на основе тонкодисперсных компонентов // Физика и химия обработки материалов. 2018. №4. С. 50-56.
5. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабея–Кьельбле // Строительные материалы. 2019. №11. С. 66–72.
6. Laura Susana, Filippo Campaci, Andrea C. Santomaso. Wettability of mineral and metallic powders: Applicability and limitations of sessile drop method and Washburn's technique.// Powder Technology, 2012, Vol. 226, pp. 68–77.
7. Abdullah Alghunaim, Suchata Kirdponpattara, Bi-min Zhang Newby. Techniques for determining contact angle and wettability of powders.// Powder Technology, 2016, Vol. 287, pp. 201–215.
8. Lazghab M., K. Saleh, I. Pezron, P. Guigon, L. Komunjer. Wettability assessment of finely divided solids.// Powder technology, 2005, Vol. 157, pp. 79–91.
9. Andrea Depalo, Andrea Claudio Santomaso. Wetting dynamics and contact angles of powders studied through capillary rise experiments.// Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, Vol. 436, pp. 371–379.
10. Tommi Huhtamäki, Xuelin Tian, Juuso T. Korhonen and Robin H. A. Ras. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements // Nature Protocols. 2018. Vol. 13. Pp. 1521–1538.
11. Jaroslaw Drelich. Guidelines to measurements of reproducible contact angles using a sessile-drop technique // Surface Innovations. 2013. Vol. 1. Issue 4. Pp. 248–254.
12. Jaroslaw W. Drelich. Contact angles: From past mistakes to new developments through liquid-solid adhesion measurements // Advances in Colloid and Interface Science. 2019. Vol. 267. Pp. 1–14.
13. G. Ström, M. Frederikson, P. Stenius. Contact Angles, Work of Adhesion and Interfacial Tensions at a Dissolving Hydrocarbon Surface // Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 119. No. 2. 1987. Pp. 352-361.
14. Joseph J. Jasper The Surface Tension of Pure Liquid Compounds // Journal of Physical and Chemical Reference Data. Vol. 1. No. 841 – 1972.
15. Barsan ME (2007) NIOSH pocket guide to chemical hazards. Department of Health and Human Services, Center for Disease Control and Prevention, DHHS (NIOSH). Publication No. 2005 -149. NIOSH Publications, US.

НОВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЯЧЕЙКИ ШТЕЙНЕРА В АРМАТУРЕ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

А.И. Драцкая¹, школьник

А.А. Скворцова², студент

В.В. Лебедев³, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

¹МБОУ «Гимназия №5» городского округа Королёв Московской области

²Московский авиационный институт

³Благотворительный фонд «Образование+» при МБОУ «Гимназия №5» городского округа Королёв Московской области

Аннотация. Новая форма арматуры – это чередование ячеек Штейнера. Ячейка Штейнера – это самая короткая линия, которая соединяет четыре вершины квадрата. Квадрат как основная фигура выбран за основу, потому что обычно строительные материалы имеют такую форму. Например, традиционный кирпич состоит из двух квадратов. Новая арматура была изготовлена из проволоки и испытана на жёсткость. В разных направлениях арматура изгибается по-разному, жёсткость различается в 16 раз. Были изготовлены образцы композиционных материалов с арматурой из ячеек Штейнера. Для этого была разработана технология эпоксидного литья в парафиновые формы. Очередная решаемая задача заключается в изготовлении и изучении нового строительного кирпича с перегородкой Штейнера. Первый демонстрационный образец нового строительного блока-кирпича изготовлен из бетона для изучения.

Ключевые слова: задача Штейнера, жёсткость, строительные материалы.

Тема работы появилась после наблюдения мыльных плёнок, которые натягиваются на проволочные каркасы. Мыльные плёнки являются самыми прочными, потому что они долго не лопаются. Мыльные плёнки являются самыми лёгкими, потому что на них расходуется меньше всего мыльного раствора. Так как мыльные плёнки являются самыми лёгкими и самыми прочными, то их форму можно перенести на строительные конструкции. Сначала было изготовлено много различных проволочных рамок, которые погружались в мыльный раствор для демонстрации натяжения плёнок. Потом из всех рамок был выбран только кубический проволочный каркас. Куб был выбран по двум причинам. Во-первых, строительные конструкции в основном имеют прямые углы, поэтому их можно сложить из кубиков. Не случайно обучать детей конструированию начинают с помощью наборов из кубиков. Во-вторых, если посмотреть сбоку на мыльные плёнки, натянутые на кубический проволочный каркас, то сразу же станет видна ячейка Штейнера. Ячейка Штейнера – это линия, которая соединяет четыре вершины квадрата самым коротким способом. Эта линия самая короткая, поэтому арматура в виде ячейки Штейнера для квадрата будет самой лёгкой. Квадраты можно присоединить друг к другу, чтобы получить длинные строительные конструкции, например, для стен зданий. Арматура в длинных конструкциях тоже будет уложена и соединена множеством ячеек Штейнера. На рис.1 показана одна ячейка Штейнера и три цепочки арматуры, которые были спаяны из проволоки для изучения их свойств. Ячейка Штейнера состоит из пяти отрезков. Четыре отрезка одинаковые, начинаются из вершин квадрата и соединяются по два под углом 120° . Чтобы соединиться в центре квадрата отрезки должны иметь угол соединения 90° . Следовательно, четыре отрезка не

доходят до центра квадрата, появляется ещё один отрезок, пятый. Он соединяет углы по 120° . Штейнер решал эту задачу для соединения четырёх деревень, расположенных в вершинах квадрата, самой короткой дорогой. Оказалось, что выгоднее всего строить дорогу с двумя перекрёстками, а не в виде крестика с одним перекрёстком, как все обычно думают [1, с.27].

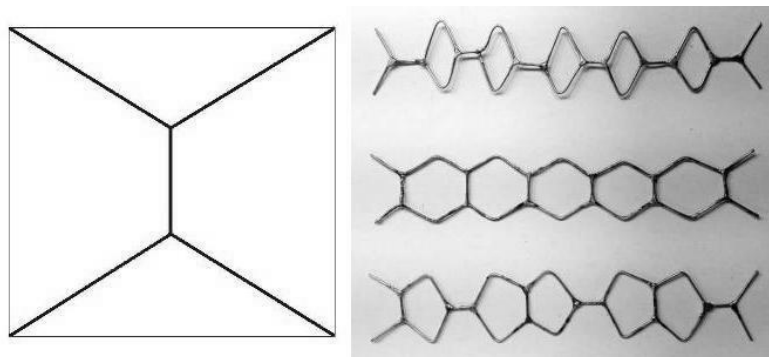


Рис. 1. Ячейка Штейнера и образцы испытанной арматуры

Результаты решения этой задачи Штейнера были применены для экономии труда работников жилищно-коммунального хозяйства и строителей при прокладке коммуникаций и линий электропередач [2]. Если сторона квадрата равна a , то длина отрезков в ячейке Штейнера равна $a(1 + \sqrt{3}) \approx 2,732a$. Длина крестика будет больше, она равна $a \cdot 2\sqrt{2} \approx 2,828a$. Значит, линия Штейнера короче крестика. Экономия материала равна разности длин линий, то есть равна $a \cdot 2\sqrt{2} - a(1 + \sqrt{3}) = a(2\sqrt{2} - 1 - \sqrt{3}) \approx (2,828 - 2,732)a \approx 0,096a$. Экономия материала можно выразить в процентах $\frac{0,096}{2,828} \cdot 100\% \approx 3,39\%$. Это очень большая экономия

для больших строек, где нужно много материалов.

Более сложной является задача Штейнера о соединении восьми вершин куба самой короткой линией [3]. Эта задача была решена оригинальным авторским способом тоже с применением мыльных плёнок [4]. Был получен результат мировой новизны. Оказалось, что восемь вершин куба самым коротким способом соединяют 13 отрезков, а не 12, как показывали мыльные плёнки, натянутые на кубический проволочный каркас.

Целью этой работы является изучение жёсткости цепочек арматуры, составленной из плоских ячеек Штейнера. В длинной арматуре ячейки Штейнера можно соединять по-разному. На рис. 1 показаны три арматурные цепочки. В первой цепочке перемычки в ячейках Штейнера расположены продольно. Во второй цепочке перемычки расположены поперечно. В третьей цепочке положение перемычек чередуется. Есть много вариантов расположения перемычек в арматуре, но для изучения были выбраны сначала эти три цепочки.

На рис. 2 показаны испытания на жёсткость трёх цепочек арматуры с ячейками Штейнера. Жёсткость показывает, какую силу надо приложить, чтобы арматура прогнулась на 1 мм. Во время опытов удобнее было измерять не жёсткость, а гибкость цепочек. Гибкость – это величина, обратная жёсткости.

Гибкость показывает, на сколько миллиметров прогнётся арматурная цепочка от силы 1 Н. Измерения проводились следующим образом.

Испытание трёх конструкций арматуры с двумя видами нагрузки (вдоль и поперёк): зависимость прогиба (мм) от числа грузов

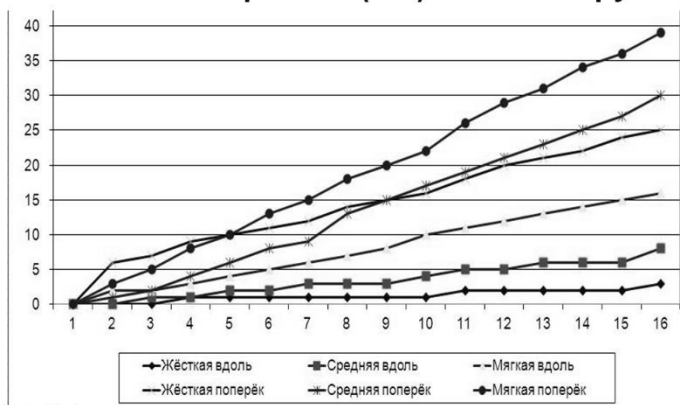


Рис. 2. Испытание трёх цепочек на жёсткость в двух направлениях

Каждая цепочка закреплялась на штативе двумя способами расположения ячеек: сначала плашмя, потом поперёк. Всего получилось 6 графиков. В каждом опыте к другому концу арматурной цепочки прикладывалась сила, которая постепенно увеличивалась. При каждом увеличении нагрузки линейкой измерялся прогиб арматурной цепочки. Верхний график соответствует самой гибкой арматуре с продольным расположением перемычек, уложенной плашмя. Нижний график – это самая жёсткая арматура с поперечным расположением перемычек, уложенная перемычками вверх. Различие в жёсткости арматуры в 7 раз. Это означает, что ячейка Штейнера обладает свойством анизотропии жёсткости (гибкости). Она по-разному изгибается в разных направлениях. Это свойство можно использовать для создания новых конструкций. Например, если нужно получить гибкую конструкцию, то надо применить арматуру с продольным расположением ячеек Штейнера и уложить её плашмя. Такая конструкция встречается в мебельных пружинных матрасах. Наоборот, если нужна жёсткая конструкция, то арматурную цепочку надо составить из ячеек Штейнера с поперечным расположением перемычек и повернуть её вертикально.

Важность полученных результатов заключается в том, что заранее можно предсказать жёсткость (гибкость) нужной для практики конструкции, а потом изготовить нужную для этого арматуру из ячеек Штейнера. Для доказательства этого была изучена жёсткости и гибкость одной ячейки Штейнера в разных направлениях. Для этого были использованы результаты испытаний первой и второй цепочек, которые показаны в правой части рис. 1. Для расчёта гибкости одной ячейки Штейнера в заданном направлении общая гибкость цепочки из шести ячеек долилась на 6. В результате было получено четыре значения гибкости для одной ячейки Штейнера, которая по-разному соединялась во всех трёх арматурных цепочках.

На рис. 3 показаны четыре значения гибкости ячейки Штейнера в различных направлениях. На этой схеме предполагается, что сила поочередно прикладывается в указанных четырёх направлениях, а ячейка Штейнера жёстко за-

крепляется на противоположной стороне. Как было показано в примере с мебельным матрасом, самая большая гибкость, то есть самая маленькая жёсткость, будет при расположении ячейки перемычкой вдоль и плашмя. При этом конструкция прогнётся на 9,7 мм от силы 1 Н. Самая жёсткая конструкция будет при расположении перемычки поперёк и вертикально, потому что прогиб составит 0,6 мм от нагрузки 1 Н. Различие в гибкости более чем в 16 раз. Это анизотропия жёсткости.

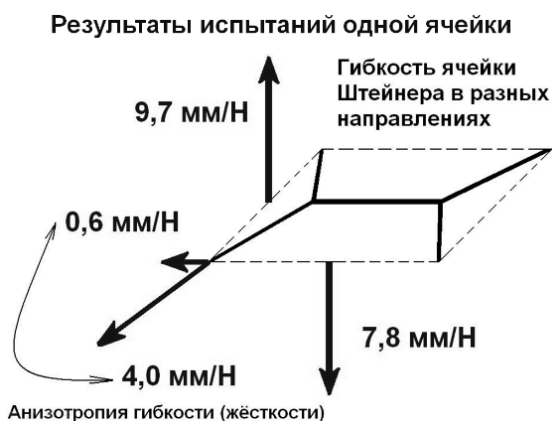


Рис. 3. Гибкость одной ячейки Штейнера в разных направлениях

Зная гибкости одной ячейки Штейнера в разных направлениях, сначала была теоретически вычислена гибкость третьей цепочки, показанной на рис.1. Потом была измерена гибкость этой арматурной цепочки, как и двух первых. Ошибка эксперимента не превышала 40%. Это удовлетворительный результат для школьного оборудования, например, для ученической линейки с классом точности 4.

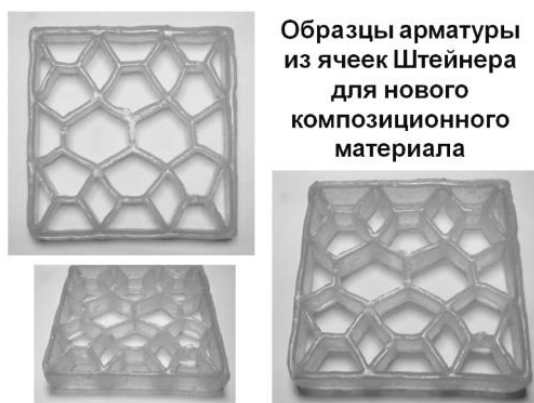


Рис. 4. Образцы арматуры с ячейками Штейнера

Практически новая арматура была изготовлена из эпоксидной смолы и капроновых нитей. На рис.4 показан пример арматуры с ячейками Штейнера. Целью изготовления этого образца было не обеспечение заданной гибкости или жёсткости, а демонстрация технологии эпоксидного литья в парафиновые формы. Эта технология была отработана. Для такого литья нужно расплавить парафин в кипящей воде, а потом вылить его в лоток. Когда парафин застынет, в нём нужно вырезать канавки в форме ячеек Штейнера. В показанном примере канавки были вырезаны в виде трёх изученных цепочек с разными положения-

ми перемычек. Канавки удобно вырезать на сверлильном станке, пользуясь сверлом как фрезой. Парафин - очень мягкий материал, поэтому легко обрабатывается. Потом в полученные канавки укладывались капроновые нити, если это требуется. Затем заливалась эпоксидная смола с добавленным в неё отвердителем. Через сутки смола застывала. Лоток опускался в кипящую воду. Парафин плавился и вытекал, оставалась арматура.

Новизна работы заключается в предложении ячейки Штейнера для применения в строительных конструкциях. Например, сейчас уже изготовлен опытный образец бетонного блока-кирпича с ячейкой Штейнера. Изготовлена форма для отливки таких блоков и завершается изготовление пресса на основе известного механизма П.Л.Чебышева [5]. Этот кирпич показан на рис.5.

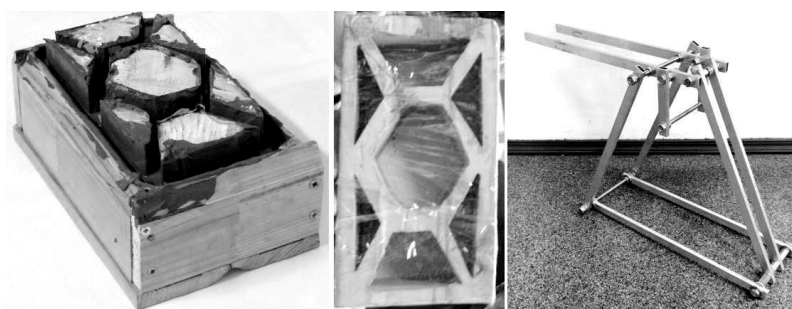


Рис. 5. Новый блок-кирпич, форма и пресс для его изготовления

Таким образом, ячейка Штейнера часто является самым рациональным решением при создании новых строительных материалов и конструкций.

Работа выполнена при поддержке Благотворительного фонда «Образование+» при МБОУ «Гимназия №5» города Королёва Московской области.

Библиографический список:

1. В.Ю.Протасов. Максимумы и минимумы в геометрии. – М.: Изд. Московского центра непрерывного математического образования (МЦНМО), 2005. – Библиотека «Математическое просвещение». – Вып.31. – 56 с. – Ил. С.27. – Электронный ресурс: <https://www.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book.31.pdf>
2. Миллионы в песочнице. – Конкурс «Я берегу энергию 2019». ЖКХ круглый год. Деньги в песочнице. – Электронный ресурс: <https://youtu.be/4yqgpON8RIw>
3. Драцкая А.И. Скворцова А.А., Якимова Е.И. Новая геометрия минимальной арматурной кубической ячейки для перспективного композиционного материала / Сборник тезисов III Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Материалы и технологии XXI века" 29-31 октября 2018. - Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018. - 326 с. - Секция 5: "Дизайн, синтез и исследование новых функциональных материалов мезо- и наноразмерных систем". - С.234. - Электронный ресурс: <http://www.mt21kpfu.com/>
4. Драцкая А.И. Задача Штейнера для нового композиционного материала / Наука и инновации в технических университетах: Материалы Двенадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных, 24-26 октября 2018 г. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - 181 с. - ББК 30.1 Н 34 - Секция "Новые материалы и технологии". - С.49-51.
5. Артоболевский И.И., Левитский Н.И. Полное собрание сочинений П.Л. Чебышева. – Т.IV. Теория механизмов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – С.221. – Пресс. – Электронный ресурс: <https://www.tcheb.ru/11>

ПРИРОДНОЕ И ТЕХНОГЕННОЕ СЫРЬЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛОВАТНОЙ ТЕПЛОЗОЛЯЦИИ

Т.А. Дроздюк¹, ассистент

А.М. Айзенштадт¹, д-р хим. наук, профессор

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Промышленность строительных материалов является одной из приоритетных отраслей, определяющих текущее состояние экономики Российской Федерации и потенциал ее развития. Поэтому актуальной задачей в области производства строительных материалов является разработка экологически безвредных с высокими эксплуатационными свойствами композиционных материалов с использованием местного сырья и отходов производства. Целью представленных исследований является разработка составов эффективной минераловатной теплоизоляции с использованием природного и техногенного сырья Архангельской области. В качестве местного и техногенного сырья для производства минераловатной теплоизоляции были исследованы базальты месторождения «Мяндуха» и сапонит-содержащий отход горнодобывающей промышленности. В результате проведенных исследований установлено, что базальты месторождения «Мяндуха» допустимо использовать для производства теплоизоляции из тонких непрерывных волокон, а с 25% добавкой доломита – для производства теплоизоляции из супертонких волокон. Обоснована вяжущая способность сапонит-содержащего материала (ССМ), как связующего для минераловатной теплоизоляции. Показано, что термическая модификация системы «базальтовые волокна-ССМ» улучшает ее механические свойства. Разработаны составы минераловатных композитов.

Ключевые слова: минераловатная теплоизоляция, сапонит-содержащий материал, отходы промышленности, строительные материалы, базальт

Одной из приоритетных отраслей промышленности, которая определяет текущее состояние экономики Российской Федерации и потенциал ее развития, является индустрия строительных материалов. Согласно Стратегии развития промышленности строительных материалов РФ на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года строительные материалы должны быть недорогими, экологически безопасными, стойкими к воздействию высоких температур, удобными при реализации процесса укладки и монтажа, иметь длительный срок эксплуатации. Кроме того, особая роль в настоящее время придается энергоэффективному строительству. При строительстве современных зданий и сооружений уделяется особое внимание новым технологиям, с учетом повышенных требований к теплозащите и улучшенных характеристик энергопотребления. Поэтому становится понятным актуальность задач, связанных с созданием новых инновационных теплоизоляционных материалов, обладающих высокими целевыми характеристиками.

Большая часть в общем объеме строительных теплоизоляционных материалов приходится на минераловатные изделия [1]. В настоящее время в качестве связующего компонента для минераловатной теплоизоляции в основном используются феноформальдегидные смолы, которые оказывают отрицательное воздействие на экологию окружающей среды и здоровье человека [2-4]. Вместе с тем существуют и альтернативные связующие компоненты [5-7], например, в Украине нашли широкое применение водные растворы бентонитовых глин в качестве связующего для минераловатной теплоизоляции. В Архангельской об-

ласти не разведаны месторождения бентонитовых глин, однако алмазодобывающая промышленность региона может обеспечить достаточное количество бентонитов. В данном случае речь идет о сапоните, который является основным компонентом суспензии оборотной воды, получаемой в процессе обогащения кимберлитовых руд горнодобывающего комплекса [8, 9]. Здесь надо также учитывать, что существенная урбанизация современных территорий независимо от месторасположения приводит к увеличению антропогенной нагрузки на окружающую среду. Это ставит задачи по снижению экологического прессинга на экосферу путем разработки способов утилизации различных видов отходов, формируемых в значительном объеме в результате различных химико-технологических процессов. Поэтому, указанное в полной мере относится к предприятиям горнодобывающего комплекса, в результате функционирования которых формируется существенный объем попутнодобываемых пород, складированных в хранилищах на больших площадях. Одним из способов утилизации таких отходов является их использование в качестве компонентов строительных материалов различного функционального назначения [10-12].

Важным фактором также является ужесточение требований по огнезащите зданий и сооружений, что в особенности касается минераловатных изделий, воздействие высоких температур на которые приводит к задымленности помещения и высокой канцерогенности воздушного пространства за счет углеводородов, содержащихся в составе их связующего. Это определяет необходимость разработки составов теплоизоляционных материалов с низкой или нулевой степенью эмиссии углеводородов при высоких показателях эксплуатационных свойств, обуславливающих эффективность их использования в регионах Крайнего Севера и Арктики.

Кроме этого, производство минераловатной теплоизоляции с экономической точки зрения должно базироваться на местной сырьевой базе. Так, например, с 2013 по 2017 гг. в Архангельске существовала линия по производству минераловатных тепло- и звукоизоляционных изделий (торговая марка «ЭКОЗАЛЬТ»). Теплоизоляционные изделия местного производителя не уступали по своим качественным характеристикам изделиям известных марок (ROCKWOOL, Технониколь и др.). Для производства минераловатных изделий предприятие использовало привозные базальты, добытые в Карелии и на Украине, что приводило к значительному увеличению себестоимости продукции за счет транспортных расходов на поставку сырья. Данный факт в конечном итоге привел к банкротству предприятия.

Поэтому актуальной задачей в области производства строительных материалов является разработка экологически безвредных с высокими эксплуатационными свойствами композиционных материалов с использованием местного сырья и отходов производства. Целью представленных исследований является разработка составов эффективной минераловатной теплоизоляции с использованием природного и техногенного сырья Архангельской области.

В качестве потенциального сырья для производства минераловатных волокон были выбраны базальты месторождения «Мяндуха» (Плесецкий район, Архангельская область) [13]. В настоящее время отсутствуют исследования по оценке пригодности базальтов этого месторождения для выделки минеральных

волокон, поэтому были проведены теоретические и экспериментальные изыскания, позволившие получить ответ на эти вопросы. Результаты исследований показали, что для оценки пригодности базальтов помимо традиционно используемых показателей, связанных с химическим составом надо дополнительно учитывать совокупность технологических свойств сырья (вязкость расплавов при различных температурах, прочность кусков, температурные показатели плавления и пр.) [14, 15]. Так установлено, что базальты месторождения «Мяндуха» допустимо использовать для производства теплоизоляции из тонких ($d = 4-12$ мкм) непрерывных волокон, а с 25% добавкой доломита – для производства теплоизоляции из супертонких ($d = 1-3$ мкм) волокон [16].

В продолжение исследований предлагается замена фенолформальдегидного связующего минераловатной теплоизоляции на сапонит-содержащий отход (трубка «Архангельская» месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова). Каждый год складывается до 1 млн. тонн сапонит-содержащих отходов, что ведет за собой постоянное увеличение площади «хвостохранилища» и значительное усиление антропогенной нагрузки на экосистему региона.

Предварительно нами была показана целесообразность применения сапонит-содержащего отхода в качестве связующего для минераловатной теплоизоляции [17]. Использование водной суспензии механоактивированного сапонит-содержащего материала (ССМ) в качестве связующего компонента позволило получить минераловатную теплоизоляцию с хорошими теплофизическими характеристиками. При этом созданный композит сохранял свои характеристики при воздействии высоких температур, не выделяя при этом вредных органических соединений в окружающую среду.

Дальнейшие исследования состава, свойств и строения ССМ позволили установить, что данный отход благодаря особенностям своего строения и содержанию химических элементов в кристаллической решетке, способен после механоактивации выступать в качестве активного вяжущего компонента гидратационного типа твердения. В наших исследованиях впервые удалось провести оценку вяжущих свойств ССМ посредством калориметрического определения величины теплового эффекта реакции гидратации [18, 19]. Экспериментально установлено, что удельная теплота гидратации (ΔH) ССМ зависит от его удельной поверхности и сравнима со значением удельной теплоты гидратации двухкальциевого силиката $\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (основного клинкерного минерала). ΔH составила 260 кДж/кг. Проведенные эксперименты позволили определить оптимальную степень дисперсности ССМ как связующего вещества для минераловатной теплоизоляции. Связующие свойства сапонита объясняются строением кристаллической решетки минерала. Так, известно, что сапонит имеет трехслойную структуру с разбухающей кристаллической решеткой. В структуре минерала выделяют три слоя: в первом слое – расположены атомы кислорода, во втором – кремния, а в третьем слое, в области вершин тетраэдров, находятся гидросильные группы. В процессе механической активации минерала происходит разрушение его слоистой структуры с частичным образованием аморфного кремнезема. Формирование аморфной фазы горных пород в процессе их механического диспергирования до ультра- и наноразмерного состояния является важной составляющей перераспределения энергетического баланса горной по-

роды в сторону увеличения свободной поверхностной энергии и повышения реакционной способности высокодисперсного материала [20]. Для количественной характеристики изменения энергетических свойств, предложен критерий активности поверхности высокодисперсной системы [21, 22].

Известно, что воздействие высоких температур на сапонит-содержащий материал изменяет его свойства – нарушается поровая структура материала путем создания более плотной упаковки частиц и таким образом значительно уменьшается влагопоглощение ССМ [23]. Этот факт может послужить предпосылкой для термомодификации минераловатной теплоизоляции на основе сапонит-содержащего связующего с целью получения композита с улучшенными водно-физическими характеристиками. Поэтому были проведены эксперименты по оценке влияния термической модификации сапонит-содержащего материала на его физическо-химические свойства. В качестве интегрального критерия количественной оценки изменения этих свойств у опытных образцов использовалась постоянная Гамакера (как физико-химическая константа, связанная с природой анализируемого объекта). Для расчета этой величины по экспериментально найденным значениям поверхностного натяжения опытных образцов применялся метод Г.А. Зисмана [24]. Проведенные эксперименты позволили установить, что в диапазоне температур от 100 до 1000°С для образцов ССМ постоянная Гамакера меняет свое значение до значений температуры 600°С. Дальнейшее увеличение температуры приводит к стабилизации данного критерия, что может свидетельствовать о завершении структурной перестройки сапонита.

Для проверки целесообразности термомодификации ССМ были изготовлены образцы теплоизоляционного композита мокрым способом из гидромасс. Исходные смеси для изготовления теплоизоляционных композитов содержали базальтовые волокна в качестве волокнистого заполнителя и сапонит-содержащий материал в качестве связующего компонента. Смеси затворялись водой и укладывались в формы, затем одна часть образцов высушивалась до постоянной массы при температуре 105°С, а другая часть образцов подвергалась термической обработке при температуре 600°С. При этом, для приготовления опытных партий использовались композиции материалов с разным процентным содержанием ССМ (от 7,5 до 25%). Нижний предел содержания ССМ обоснован самопроизвольным разрушением материала в результате термической обработки. Анализируя результаты испытаний образцов по определению коэффициента теплопроводности и предела прочности на сжатие, можно сделать заключение о том, что значение коэффициента теплопроводности у исследуемых композитов зависит только от состава смеси, а термическая обработка на данный параметр не оказывает влияния. Предел прочности на сжатие так же зависит от состава композита, причем термическая обработка исследуемых композиций значительно (до 4 раз) увеличивает данный показатель по сравнению с образцами, полученными при температуре 105°С [25]. Сравнение теплоизоляционных и прочностных характеристик показало, что опытный минераловатный композит сопоставим с газо- и пеноблоками и может выступать в качестве конструкционного теплоизоляционного материала. Следует отметить, что

полученный материал является экологически безвредным и выдерживает, не разрушаясь, воздействие высоких температур.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан экологичный с высокими эксплуатационными свойствами конструкционно-теплоизоляционных композиционных материалов на основе локально распространенного сырья и многотоннажных отходов производства. Обоснована целесообразность использования сапонит-содержащего материала в качестве связующего для минераловатных изделий, проведена оценка пригодности базальтов для выделки минеральных волокон. Предложены оптимальные составы и технологии производства минераловатных изделий.

Исследования выполнены на уникальной научной установке «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем» в рамках государственного задания № 0793-2020-0005.

Библиографический список:

1. Зиганшин, А. М. Динамика развития рынка теплоизоляционных материалов в РФ / А.М. Зиганшин, Н.Б. Болдырева // Экономика и социум. - 2018. - №. 2. - С. 214-220
2. Okhrimenko, D. V. Impact of curing time on ageing and degradation of phenol-urea-formaldehyde binder/ D.V. Okhrimenko, A.B. Thomsen, M. Ceccato, D. B. Johansson, D. Lybye, Bechgaard, Tougaard, S.L.S. Stipp // Polymer Degradation and Stability. - 2018. - Т. 152. - P. 86-94.
3. Вредные вещества в промышленности, том 1-3 / Под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. - Л., Химия. 1977 г. Том I. Органические вещества. - Л., «Химия», 1976. – 592 с.
4. Rovira, J. Human health risks of formaldehyde indoor levels: an issue of concern / J. Rovira, N. Roig, M. Nadal, M. Schuhmacher, J. L. Domingo // Journal of Environmental Science and Health, Part A. - 2016. - Т. 51. - №. 4. - P. 357-363.
5. Кузнецова, О.Н. Пропиточная композиция для теплоизоляционного материала на основе базальтового волокна / О.Н. Кузнецова // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - № 17. - С. 129-131
6. Левичев, А. Н. Новое связующее для минераловатных теплоизоляционных и огнезащитных материалов / А.Н. Левичев, П.М. Валецкий, Н.Г. Павлюкович, И.П. Сторожук // Полимерные материалы и технологии. - 2017. - Т. 3. - №. 1. - С. 78-81.
7. Юнусов, Р.И. Обзор экологически чистых связующих для производства теплоизоляционных материалов / Р.И. Юнусов // Базальтовые технологии. – 2013. - №1. - С. 64-67
8. Шпилевая (Вержак), Д.В. Алмазные месторождения Архангельской области и экологические проблемы их освоения / Д.В. Шпилевая (Вержак), К.В. Гаранин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. - 2005. - № 6. - С. 18-26.
9. Тутьгин, А.С. Осветление сапонит-содержащей суспензии методом электронной коагуляции / А.С. Тутьгин, А.А. Шинкарук, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, Т.А. Махова // Вода: химия и экология. - 2013. - № 5. - С. 93-99
10. Облицов, А. Ю. Перспективные направления утилизации отходов обогащения алмазоносной породы месторождения имени МВ Ломоносова / А.Ю. Облицов, В.А. Рогалев // Записки Горного института. - 2012. -Т. 195. - С. 163-167
11. Морозова, М.В. Применение сапонит-содержащего материала для получения морозостойких бетонов / М.В. Морозова, А. М. Айзенштадт, Т. А. Махова // Промышленное и гражданское строительство. - 2015. - № 1. - С. 28-31
12. Стенин, А.А. Минеральный модификатор поверхности строительных материалов из древесины / А.А. Стенин, А.М. Айзенштадт, А.А. Шинкарук, М. Л. Демидов, М. А. Фролова // Строительные материалы. – 2014. - № 10. - С. 51-54

1. 13. Природные сырьевые материалы строительного назначения в Северо-Арктическом регионе. Минерально-сырьевая база Архангельской области / Под ред. А.М. Айзенштадта, А.Л. Невзорова, В.С. Лесовика. - Архангельск: САФУ, 2011. - 148 с.
13. Татаринцева, О. С. Прогнозирование вязкости расплавов по химическому составу горных пород / О.С. Татаринцева // Ползуновский вестник. - 2008. - №. 3. - С. 220 – 223
14. Татаринцева, О. С. Особенности плавления горных пород и волокнообразования из расплавов/О.С. Татаринцева, Д.Е. Зимин//Ползуновский вестник. - 2006. - Т. 2. - №. 2. - С. 158-162
15. Дроздюк, Т. А. Оценка пригодности базальтов для производства минерального волокна / Т.А. Дроздюк, А.М. Айзенштадт, Т.А. Махова, М.А. Фролова // Промышленное и гражданское строительство. - 2018. - №. 7. - С. 52-56.
16. Дроздюк, Т. А. Неорганическое связующее для минераловатной теплоизоляции / Т.А. Дроздюк, А.М. Айзенштадт, А.С. Тутыгин, М.А. Фролова // Строительные материалы. - 2015. - №. 5. - С. 86-88.
17. Носуля, А. А. Калориметрическое определение теплоты гидратации механоактивированных образцов сапонит-содержащего материала / А.А. Носуля, Т.А. Дроздюк // Образование, наука, производство. - 2015. - С. 745-749.
18. Дроздюк, Т. А. Влияние механоактивации сапонит-содержащего отхода на его связующие свойства/Т.А. Дроздюк, А.М. Айзенштадт, А.С. Тутыгин, А.А. Носуля//Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. - 2015. - Т. 1. - №. 5-1. - С. 70-73
19. Глезер, А.М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходство, различия, взаимные переходы / А.М. Глезер // Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. - 2002.- т. XLVI. - №5. - С. 57-63
20. Вешнякова, Л.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов / Л.А. Вешнякова, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова // Физика и химия обработки материалов. - 2015. - № 2. - С. 68-72.
21. Лесовик, В.С. Поверхностная активность горных пород / В.С. Лесовик, М.А. Фролова, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. - 2013. - № 11. - С. 71- 74.
22. Лапунова, К.А. Фазовые преобразования при обжиге кремнистых глин / К.А. Лапунова, Я.В. Лазарева, Ю.А. Божко, М.Е. Орлова // Строительные материалы. - 2019. - № 4. - С. 8–11.
23. Фролова, М. А. Применение термодинамического подхода к оценке энергетического состояния поверхности дисперсных материалов / М.А. Фролова, А.С. Тутыгин, А.М. 25. Айзенштадт, Т.А. Махова, Т.А. Поспелова // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. - 2011. - №. 6. - С. 13-25.
24. Дроздюк, Т. А. Прочностные и теплоизоляционные свойства композита на основе базальтовых волокон и сапонит-содержащего материала / Т.А. Дроздюк //Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых учёных - 2018. - 2018. - С. 323-328.

НОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА МАТЕРИАЛА-АУКСЕТИКА НА ОСНОВЕ КОНФИГУРАЦИИ САРРЮСА

В.А. Екимовская¹, студент

В.В. Лебедев², д-р техн. наук, старший научный сотрудник

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Благотворительный фонд «Образование+» при МБОУ «Гимназия №5» городского округа Королёв Московской области

Аннотация. В настоящее время в основном изучаются плоские структуры ауксетиков, то есть материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона. При растяжении таких материалов увеличивается их ширина. Известны отдельные примеры пространственных ауксетиков. Результатом этой работы стало создание новой пространственной структуры ауксетика, расширяющегося при растяжении сразу в двух ортогональных плоскостях, перпендикулярных приложенной растягивающей нагрузке. Новая структура основана на конфигурации известного пространственного шарнирного механизма Саррюса с внутренним сложением звеньев. Полученный результат актуален для создания как новых строительных технологических конструкций, так и строительных материалов с новыми свойствами отрицательного коэффициента Пуассона. Изготовлена демонстрационная модель новой трёхмерной структуры ауксетика.

Ключевые слова: ауксетик, коэффициент Пуассона, строительные материалы.

В материаловедении ауксетические конструкции и структуры известны давно, но детальное изучение их свойств началось в настоящее время, что связано с практическим внедрением нанотехнологий [1]. Материал-ауксетик обладает отрицательным коэффициентом Пуассона, под которым понимают взятое со знаком минус отношение поперечной деформации материала к продольной деформации. Исторически знак минус появился для удобства применения этой величины на практике. Во времена Пуассона ауксетики не были открыты, поэтому деформации материалов в различных направлениях были связаны традиционным правилом: если образец растягивают в продольном направлении, то он сжимается в поперечных направлениях. Деформацию растяжения предполагали положительной, а деформацию сжатия отрицательной, поэтому коэффициент Пуассона был положительным. Однако более детальное изучение свойств различных материалов показало, что традиционное правило взаимосвязи видов деформаций материала в различных направлениях может нарушаться. Например, в работе научной группы Р.В.Гольдшейна приведён перечень материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона, то есть список ауксетиков, который стал особенно актуальным при развитии нанотехнологий [2].

Классическим примером ауксетика служит конфигурация ячеек в виде невыпуклых шестиугольников [3]. При растяжении в одном направлении такая структура расширяется, а не сжимается, в перпендикулярном приложенной нагрузке направлении, то есть обладает отрицательным коэффициентом Пуассона. Примеры двумерных ауксетиков на предмет колебаний структур изучал Д.И.Бокий в работе [4].

Цель этой работы заключается в создании и определении свойств деформации, то есть тензора Пуассона, новой трёхмерной структуры ауксетика. Такая

структура расширяется сразу в двух ортогональных направлениях, перпендикулярных приложенной растягивающей нагрузке.

Метод решения задачи основан на сравнительном анализе известной структуры пространственного шарнирного механизма Саррюса со свойствами ауксетиков [5]. Традиционный механизм Саррюса содержит цилиндрические шарниры, позволяющие плоским звеньям поворачиваться во взаимно перпендикулярных плоскостях. В процессе работы была установлена аналогия этого механизма с ячейками известного и часто цитируемого ауксетического материала [3]. Для иллюстрации этой аналогии были изготовлены модели ауксетиков, которые позволяют демонстрировать отрицательный коэффициент Пуассона, то есть расширение образца в поперечном направлении при растяжении материала в продольном направлении. Двумерные модели ауксетиков показаны на рис.1. Этот рисунок иллюстрирует процесс создания трёхмерной модели нового ауксетического материала, являющегося целью данного исследования.

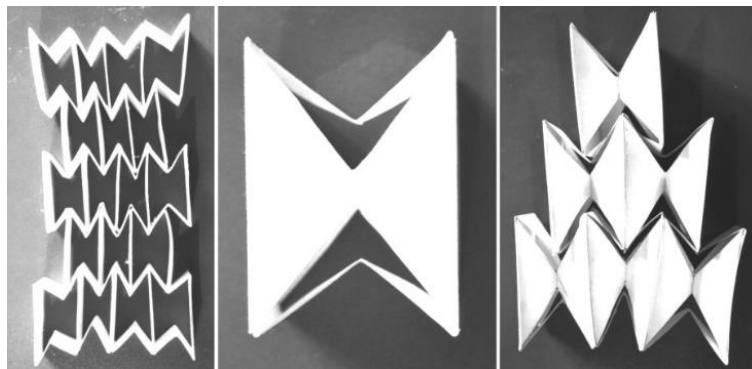


Рис. 1. Двумерные модели ауксетиков

В левой части рисунка показана традиционная схема ауксетика с шестиугольными ячейками [3]. Оказалось, что такая ячейка очень похожа на поперечное сечение механизма Саррюса со складывающимися внутрь плоскими звеньями [5]. Однако механизм Саррюса — это пространственный механизм, поэтому появилась гипотеза о возможности создании пространственного ауксетика с ячейкой на основе указанного механического устройства. Для этого сначала была изготовлена модель единичной новой ячейки, которая показана в центральной части рисунка. По сути — это известный механизм Саррюса, но только с внутренним сложением плоских звеньев. Затем были изготовлены и соединены в единую конфигурацию несколько кубических ячеек. Модель полученной новой структуры показана в правой части рисунка. Хотя единичная ячейка новой структуры является пространственной, новая модель ауксетика получилась фактически двумерной, повторяющей известный материал, изображённый в левой части рисунка. Это связано с тем, что в конфигурации кубических звеньев можно наращивать только в одной плоскости, то есть в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в противном случае они будут мешать смещению друг друга, материал потеряет свойство отрицательности коэффициента Пуассона.

Выводом из первого опыта стало обоснование следующего положения: внутреннего сложения плоских звеньев в механизме Саррюса не достаточно

для создания на его основе пространственной конфигурации ауксетика. Не только отдельные звенья механизма не должны мешать его движению в единичной ячейке, но и сами механизмы-ячейки не должны мешать друг другу в смещении, сохраняя при этом ауксетические свойства трёхмерной структуры.

Доработка звена структуры была проведена поиском и приданием плоским складывающимся рычагам механизма Саррюса специальной формы. Оказалось, что нет смысла делать эти рычаги трапецевидными. Можно выполнить их прямоугольными, но доходящими только до половины верхней и нижней квадратных граней механизма, чтобы при внутреннем сложении они не мешали друг другу. В этом случае наращивание общей конфигурации в модели ауксетика можно проводить во всех трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Демонстрационная модель нового трёхмерного ауксетика показана на рис.2.

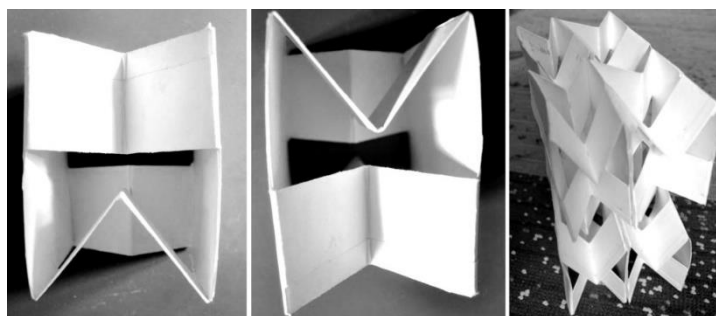


Рис. 2. Модель нового трёхмерного ауксетика

Для количественной оценки свойств нового трёхмерного ауксетика необходимо определить количественно коэффициент Пуассона. Коэффициент Пуассона – это величина, измеряемая отношением взятой со знаком минус поперечной деформации образца к его продольной деформации. Деформация растяжения предполагается положительной, а деформация сжатия – отрицательной. Понятие коэффициента Пуассона можно применять только к двумерным структурам ауксетиков. Для трёхмерных структур это понятие уточняется и переходит в тензор Пуассона, который характеризует расширение ауксетика уже не в одном, а в двух взаимно перпендикулярных растягивающей нагрузке направлениях. В случае двумерного ауксетика коэффициент Пуассона определяется

формулой $\nu = -\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_z}$. В этой формуле продольная относительная деформация обозначена символом ε_z , то есть координатная ось OZ предполагается продольной,

вдоль оси OZ действует растягивающая образец нагрузка. Координатная ось OX предполагается поперечной, вдоль неё относительная деформация образца равна ε_o . Даже для двумерного ауксетика коэффициент Пуассона удобнее

представить не скаляром, а тоже тензором вида $\nu_{ij} = \begin{vmatrix} \nu_{xx} & \nu_{xy} \\ \nu_{yx} & \nu_{yy} \end{vmatrix}$. В этом тензоре

компоненты связывают два направления деформации двумерного материала, не обязательно ауксетика, более общим соотношением $\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j}$, где символами i, j

обозначены два взаимно перпендикулярных направления. При такой трактовке тензора Пуассона два элемента главной диагонали будут единичными, то есть

$v_{ij} = \begin{vmatrix} -1 & v_{xy} \\ v_{yx}^{-1} & -1 \end{vmatrix}$, а два элемента другой диагонали будут взаимно обратными величинами.

По такой методике можно обобщить понятие тензора Пуассона на случай трёхмерного материала, в том числе ауксетика. Схема такого образца показана на рис.3.

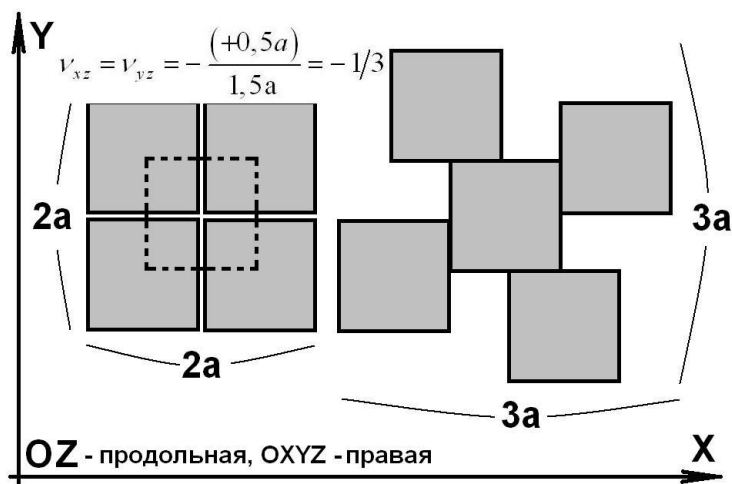


Рис. 3. Схема расчета характеристик трёхмерного ауксетика

На этой схеме координатная ось OZ, как и ранее, предполагается продольной осью, вдоль которой действует растягивающая (для определённости) нагрузка, то есть относительная деформация ε_z образца вдоль координатной оси OZ предполагается положительной. Координатные оси OX и OY образуют вместе с координатной осью OZ прямоугольную правую декартову систему координат. Для определения компонент тензора Пуассона нужно сравнить изменение размеров структуры при максимально сжатом и максимально растянутом состояниях. При этом надо рассматривать только две состыкованные ячейки с видоизменёнными механизмами Саррюса, потому что в остальной конфигурации они могут повторяться сколь угодно много раз по всем трём координатным осям. Эти две кубические ячейки пересекаются по угловому кубу с половинным ребром. В максимальном растянутом вдоль координатной оси OZ состоянии, как и по другим двум координатным осям, размер двух состыкованных кубических ячеек равен 1,5a. При максимальном сжатии по координатной оси OZ структура превращается в плоскость с нулевой высотой. Следовательно, изменение размера двух ячеек в продольном направлении OZ, параллельном приложенной растягивающей нагрузке, как элементарной конфигурации, равно $1,5a - 0 = +1,5a$. В направлениях координатных осей OX и OY при максимальном растяжении размеры структуры одинаковые, они равны 1,5a, при максимальном сжатии размеры тоже одинаковые, но равны a. Следовательно, в направлениях координатных осей OX и OY изменение размеров равно $1,5a - a = +0,5a$. На основе этих исходных данных вычисляем компоненты тензора Пуассона:

$$v_{xx} = v_{yy} = v_{zz} = v_{xy} = v_{yx} = -1; \quad v_{xz} = v_{yz} = v_{zx}^{-1} = v_{zy}^{-1} = -1/3.$$

В матричной форме тензор Пуассона для предлагаемой новой пространственной структуры можно записать в виде $\nu = \begin{pmatrix} \nu_{xx} & \nu_{xy} & \nu_{xz} \\ \nu_{yx} & \nu_{yy} & \nu_{yz} \\ \nu_{zx} & \nu_{zy} & \nu_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1/3 \\ -1 & -1 & -1/3 \\ -3 & -3 & -1 \end{pmatrix}$.

Полученный тензор Пуассона показывает, что предлагаемая новая пространственная структура является полным ауксетиком, то есть при растяжении в продольном направлении OZ одновременно расширяется в перпендикулярном ему двух ортогональных направлениях OX и OY. В плоскости OXY такая структура центрально симметрична.

Расчётный пример новой пространственной структуры ауксетика построен для частного случая, соответствующего кубической форме развёрнутого механизма Саррюса. Однако боковые шарниры этого механизма можно выполнить любой длины, от почти нулевой до половины стороны квадрата верхней и нижней граней. Точно также грани основания можно выполнять не квадратными, а прямоугольными. При изменении размеров ячейки ауксетика соответственно изменится тензор Пуассона, сохранив отрицательные значения своих компонент. Это означает создание материала с априорно заданными свойствами.

Расчёты компонент тензора Пуассона выполнены в интегральной форме, то есть в предположении, что предлагаемая структура сначала находится в максимально сжатом, то есть в плоском состоянии, совпадая с координатной плоскостью OXY. Затем структура разворачивается до максимально растянутого состояния по координатной оси OZ и максимально расширенного состояния по координатным осям OX и OY. В дифференциальной форме деформация такой ауксетической структуры происходит не равномерно. Следовательно, ближайшей задачей исследования является изучение поведения ауксетической структуры в процессе её деформации. Конечным результатом решения такой новой задачи станет установление зависимости тензора Пуассона и его компонент от продольной растягивающей деформации.

Работа выполнена при поддержке Благотворительного фонда «Образование+» при МБОУ «Гимназия №5» города Королёва Московской области.

Библиографический список:

1. Лаврентьев С.Ю., Лисовенко Д.С., Ченцов А.В. Механические свойства двумерной ауксетической конструкции / Сборник трудов. Международная молодёжная научная конференция "44-е Гагаринские чтения 2018". - М.: НИУ МАИ, 2018. - С. 76-78.
2. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С., Волков М.А. Отрицательный коэффициент Пуассона для кубических кристаллов и нано/микротрубок. – ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН. – Физическая мезомеханика. - №16 (6).– 2013. – С.13-31.
3. Ауксетики – материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона. Кафедра Статистической физики Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. – Электронный ресурс: https://vk.com/video-3519369_163344968
4. Бокий Д.И. Нелинейные колебания и ауксетические свойства двумерной решётки. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ-мат. наук. – Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И.Ползунова. – Барнаул, 2016. – На правах рукописи.
5. Механизм Саррюса. – Электронный ресурс: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/156213>

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯМИ

А.А. Леденев¹, канд. техн. наук

В.Т. Перцев², д-р техн. наук, профессор

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

²Воронежский государственный технический университет

Аннотация. Разработка модельных представлений и оценка взаимосвязи структуры и свойств цементного камня являются актуальными направлениями управления структурообразованием и получения бетонов с улучшенными свойствами.

Целью работы является моделирование и оценка взаимосвязи структурных характеристик и свойств цементного камня, модифицированного микронаполнителями.

Для изучения и анализа процессов структурообразования цементного камня модифицированного микронаполнителями реализован подход, основанный на развитии модельных представлений теории протекания (перколяции). Полученные данные разработки модельных представлений о механизмах самоорганизации модифицированных цементных систем с учетом топологии распределения и свойств микронаполнителей позволили проанализировать процессы формирования структуры и установить взаимосвязь структурных характеристик цементного камня с его свойствами.

Разработанные модельные представления и экспериментальные данные о влиянии свойств микронаполнителей на формирование структуры цементного камня позволят научно-обосновано подойти к управлению структурообразованием и получению модифицированных бетонов с улучшенными свойствами.

Ключевые слова: цементный камень, добавки для бетона, микронаполнители, моделирование, фрактально-кластерные структуры.

Процессы формирования структуры цементного камня и бетона, реализующиеся на различных масштабных уровнях, обусловлены одновременно и разнообразно направленными силами. В структуре цементного камня от нано- до мезоуровня (10^{-9} – 10^{-3} м) определяющими являются процессы агрегирования и формирования фрактально-кластерных систем, обусловленные силами физико-химической природы [1]. Актуальность развития модельных представлений о механизме самоорганизации и формировании структур цементных систем обусловлена широким применением бетонов, модифицированных микронаполнителями, органоминеральными добавками, наноструктурирующими добавками [2, 3]. В таких системах формирование структуры во многом определяется характеристиками частиц твердой фазы, которые зачастую не учитываются: форма и природа частиц, фрактальность поверхности (связанная с шероховатостью) и др., что необходимо учитывать при моделировании структуры и оценке их влияния на свойства цементных систем. При этом представляет интерес изучение перехода от раннего этапа структурообразования к готовой структуре цементного камня и бетона с учетом характеристик микронаполнителей.

При введении в цементную систему микронаполнителей реализуются условия, при которых топологическое распределение частиц соответствует образованию объединенного фрактального кластера [1]. Сформированные из частиц микронаполнителя кластеры, имеющие так называемую «цепочную струк-

туру», являются структурообразующими связными элементами наполненной цементной системы [1]. Задачи изучения и анализа, сформированных перколяционных фрактальных кластеров, могут быть решены с применением модельных представлений, изложенных в теории протекания (перколяции) [1, 4]. В данном случае применяют понятия протекания как по касающимся, так и по перекрывающимся сферам – моделям частиц твердой фазы микронаполнителя (рис. 1).

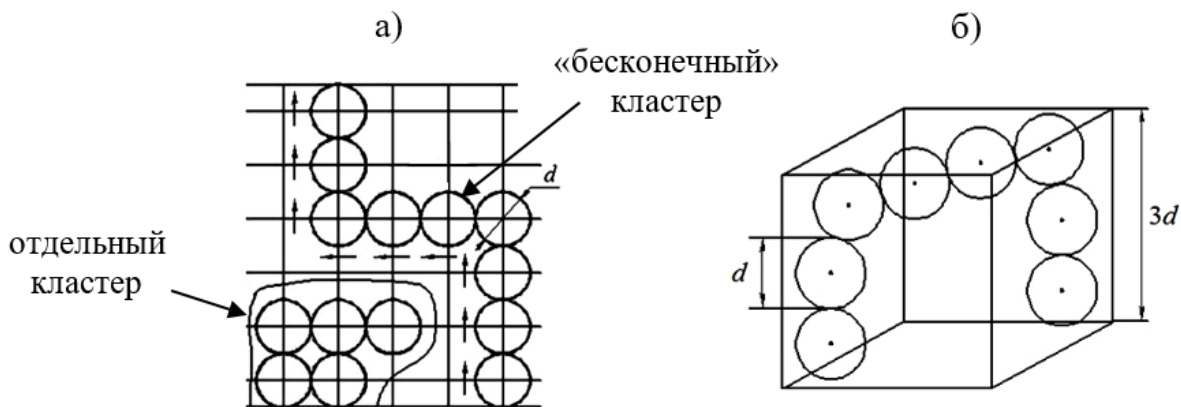


Рис. 1. Схема (а) и объемная модель (б), описывающая протекание частиц по касающимся сферам [1]

С использованием численного моделирования было рассчитано объемное количественное соотношение, определяющее процесс протекания касающихся и перекрывающихся сфер – моделей частиц твердой фазы [1]:

$$v = \frac{N_c \pi d^3}{6} \approx 0,076 \dots 0,16 \quad (1)$$

где v – объемная доля сфер, которая обеспечивает условие протекания;
 N_c – число сфер, соответствующее критической объемной величине;
 d – диаметр сферы (модели частиц твердой фазы).

Можно предположить, что полученная величина $v = 0,076 \dots 0,16$ характеризует оптимальную долю микронаполнителя, влияющую на процессы формирования структуры и свойства наполненной цементной системы.

В реальных условиях процессы формирования структур осложняются анизотропией поверхности частиц микронаполнителя, фрактальностью (связанной с шероховатостью), формой поверхности, что потребовало уточнения существующих данных о влиянии свойств микронаполнителей на структурные характеристики и свойства цементного камня.

В исследованиях для оценки микроструктуры цементного камня применяли показатель фрактальности D , который является количественным фундаментальным показателем, характеризующим свойство самоподобия неупорядоченных структур [1, 5]. Определение фрактальности осуществлялось методом островов среза по бинаризованному изображению структуры [6, 8].

В качестве исследуемых микронаполнителей в работе применяли материалы различной природы – кварцевый песок, известняк, зола ТЭЦ, туф вулкани-

ческий. Тонкость помола составляла $7000 \text{ см}^2/\text{г}$, дозировка варьировалась в интервале 5 – 20 % от массы цемента.

С целью моделирования и визуализации формирующихся структур применяли программный продукт, разработанный в среде Unity3d, позволяющий моделировать процесс взаимодействия частиц [7]. В ходе моделирования создаются сферы – модели частиц твердой фазы компонентов. Задаются характеристики компонентов: размер частиц, плотность, массовая доля и др. На основании задаваемых характеристик выводятся расчетные параметры структуры и визуализируется модель структуры.

Для анализа структурных характеристик формирующихся систем определено соотношение частиц исследуемых микронаполнителя дозировкой 10 % к частицам цемента:

$$c = \frac{n_{\text{МК}}}{n_{\text{Ц}}} \approx 1 \quad (2)$$

где $n_{\text{МК}}$, $n_{\text{Ц}}$ – счетные концентрации частиц микронаполнителя и цемента определялись по формулам (3, 4).

$$n_{\text{МК}} = \frac{6 \cdot m_{\text{МК}}}{\pi \cdot d_{\text{МК}}^3 \cdot \rho_{\text{МК}}} \quad (3)$$

$$n_{\text{Ц}} = \frac{6 \cdot m_{\text{Ц}}}{\pi \cdot d_{\text{Ц}}^3 \cdot \rho_{\text{Ц}}} \quad (4)$$

где $m_{\text{МК}}$, $m_{\text{Ц}}$ – массовая доля частиц микронаполнителя и цемента; $d_{\text{МК}}$, $d_{\text{Ц}}$ – средний диаметр частиц микронаполнителя и цемента, мкм; $\rho_{\text{МК}}$, $\rho_{\text{Ц}}$ – плотность частиц микронаполнителя и цемента, $\text{г}/\text{см}^3$.

При рассчитанном соотношении $c \approx 1$ топологическое распределение частиц может быть следующим: агрегированные частицы микронаполнителя размещаются в пустотах частиц цемента; частицы цемента окружены частицами микронаполнителя; реализуются условия, при которых образуются отдельные кластеры и смешанные кластеры «микронаполнитель-цемент» (рис. 2).

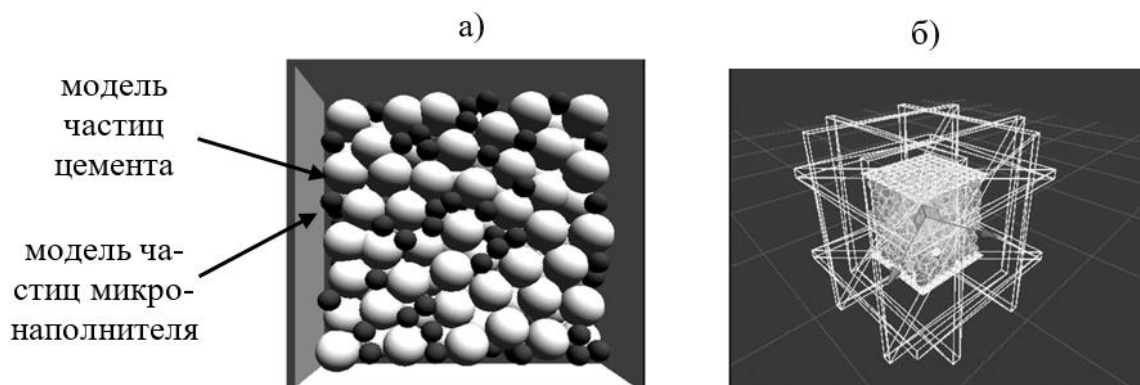


Рис. 2. Фрагмент программы для моделирования в Unity3d: а) визуализация 3D модели структуры цементной системы с микронаполнителем; б) схема моделирования взаимодействия частиц в цементной системе

Как было отмечено выше, процессы формирования структур осложняются анизотропией поверхности частиц микронаполнителя, шероховатостью, фрак-

тальной формой поверхности и другими характеристиками, что подтверждается результатами микроскопических исследований (рис. 3) [8].

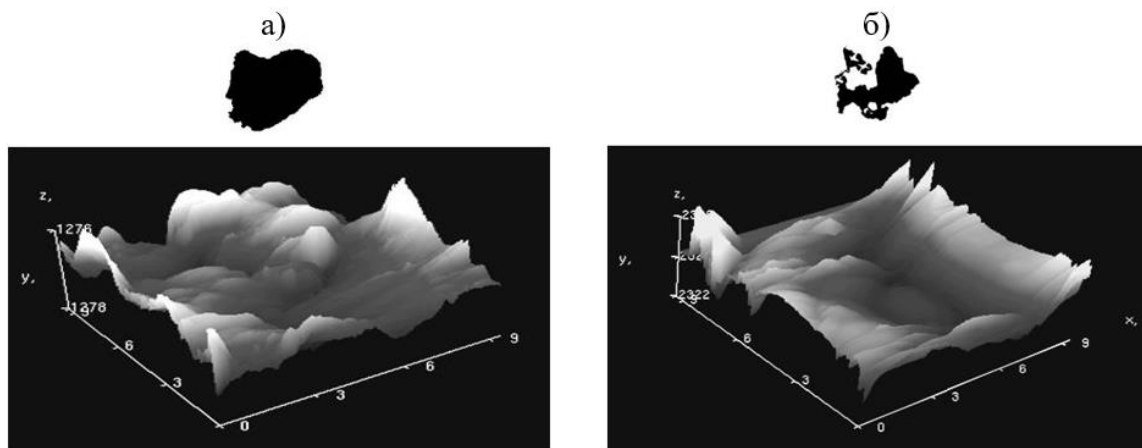


Рис. 3. Оптическое изображение проекции ($\times 400$) и атомно-силовое изображение поверхности частиц микронаполнителей (по осям X, Y – мкм, Z – нм): а) проекция и поверхность частицы песка; б) проекция и поверхность частицы золы

Результаты физико-механических испытаний позволили оценить взаимосвязь структурных характеристик и свойств цементного камня (рис. 4). При введении микронаполнителей в количестве близком к значениям модельных систем $\nu = 0,076 \dots 0,16$ получена самая высокая прочность. При введении кварцевого песка в количестве $\nu = 0,104$, прочность цементного камня составила 87,6 МПа; при введении известняка $\nu = 0,11$, прочность 79,0 МПа; при введении золы $\nu = 0,06$, прочность 70,2 МПа; при введении вулканического туфа $\nu = 0,147$, прочность 91,8 МПа (рис. 4). Можно предположить, что при данном объемном содержании обеспечивается оптимальное топологическое распределение микронаполнителей в структуре наполненных цементных систем.

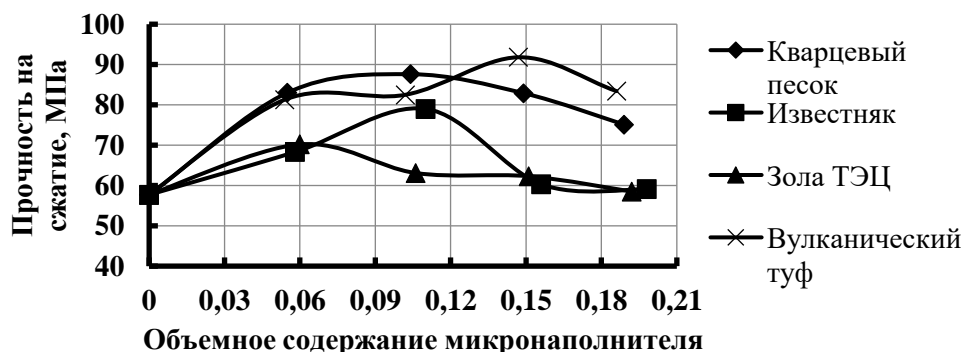


Рис. 4. Прочность цементного камня при различном объемном содержании микронаполнителя ($B/C = 0,37$)

Следует отметить, что, несмотря на высокую активность в процессах гидратации цементных систем, зола показала наименьшую эффективность по сравнению с другими микронаполнителями. Полученные данные могут быть объяснены свойствами поверхности частиц золы (см. рис. 3), которые имеют более развитую и шероховатую поверхность и способствуют формированию

более разветвленной, менее плотной и менее прочной структуры, что подтверждается электронно-микроскопическими исследованиями микроструктуры цементного камня, модифицированного добавками на основе микронаполнителей (рис. 5) [8].

При использовании кварцевого песка сформированная микроструктура визуально является более плотной (рис. 5а) по сравнению с микроструктурой цементного камня с добавкой золы (рис. 5б). Применяемый для количественной оценки структуры показатель фрактальности D соотносится с изменением свойств цементного камня: для структуры с молотым песком $D = 1,85$, в отличие от структуры цементного камня с золой $D = 1,62$ (табл.) [8].

а)

б)

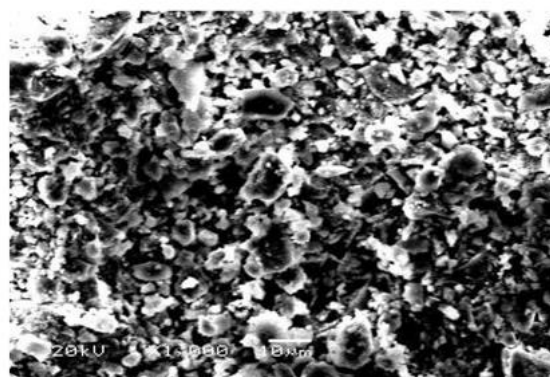
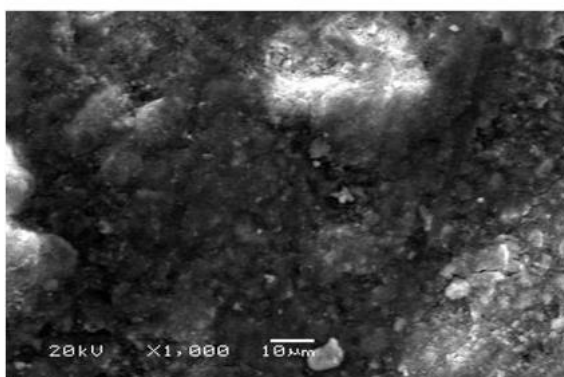
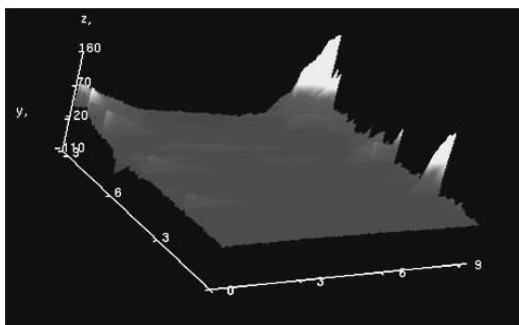


Рис. 5. Изображения микроструктуры цементного камня, полученные электронно-микроскопическим методом ($\times 1000$): а) микронаполнитель – песок; б) микронаполнитель – зола

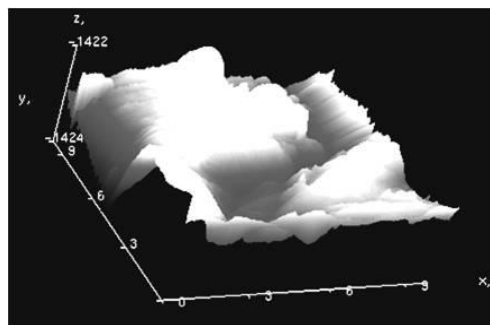
Данные электронно-микроскопических исследований соотносятся с результатами, полученными методом атомно-силовой микроскопии (рис. 6). Установлено, что микроструктура «среза» поверхности цементного камня с песком является более плотной и однородной (рис. 6а), шероховатость поверхности составила 0,16 мкм, в отличие от поверхности цементного камня с золой, которая характеризуется более сложным рельефом «среза» поверхности (рис. 6б) и большей шероховатостью 1,4 мкм [8]. Полученные результаты исследований показали взаимосвязь структурных характеристик со свойствами цементного камня. Установлено, что чем меньше шероховатость «среза» поверхности и выше значение показателя фрактальной размерности D , тем цементный камень является более плотным и прочным (см. табл.1).

Таблица 1. Характеристики структуры и свойства цементного камня

Микронаполнитель	Характеристики структуры		Свойства	
	фрактальность, D	шероховатость поверхности, мкм	плотность, кг/м ³	прочность, МПа
кварцевый песок	1,85	0,16	2280	87,6
известняк	1,73	1,4	2210	79,0
зола ТЭЦ	1,62	1,4	2140	70,2



а)



б)

Рис. 6. Изображения микроструктуры поверхности цементного камня, полученные методом атомно-силовой микроскопии (по осям X , Y – мкм, Z – нм): а) микронаполнитель – песок; б) микронаполнитель – зола

Таким образом, изложенные модельные представления о механизмах самоорганизации модифицированных цементных систем с учетом топологии распределения и свойств микронаполнителей позволили проанализировать процессы формирования структуры цементного камня на микроуровне, а также установить взаимосвязь структурных характеристик цементного камня с его свойствами. Модельные представления и экспериментальные данные о влиянии свойств частиц микронаполнителей на формирование структуры цементного камня позволят научно-обосновано подойти к получению модифицированных бетонов с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Библиографический список:

1. Структурно-реологические свойства дисперсно-зернистых систем: Монография / Е.В. Алексеева [и др.]. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2010. 196 с.
2. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. 368 с.
3. Шейнфельд, А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций / А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. 2014. № 3. С. 16 – 21.
4. Тарасевич, Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002. 112 с.
5. Химия привитых поверхностных соединений / Г.В. Лисичкин [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 592 с.
6. Головинский, П.А. Теория фрактального роста трещин и сопутствующая акустическая эмиссия / П.А. Головинский, И.И. Ушаков // Сборник тезисов ФиПС. – М.: Интерконтакт-наука, 1999. С. 20 – 24.
7. Хокинг, Д. Unity в действии. Мультиплатформенная разработка на C# (пер. с англ. И.Рузмайкиной) / Д. Хокинг. – СПб.: Питер, 2016. 336 с.
8. Перцев, В.Т. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей: монография / В.Т. Перцев, А.А. Ледечев. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2012. 136 с.

РОЛЬ ГИДРОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА В ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ БЕТОНА

Г.И. Овчаренко¹, д-р техн. наук, профессор

Е.Е. Ибе², канд. техн. наук, доцент

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

²*Хакасский технический институт – филиал СФУ*

Аннотация. Образующиеся в камне в процессе гидратации цемента с добавками специальных шлаков гидроксиды алюминия и железа существенно улучшают свойства бетонов. Добавление низкоосновных алюминатов кальция CA_2 и CA_6 в виде высокоглиноземистого шлака, выделяющих при гидратации большое количество $Al(OH)_3$, повышает прочность, плотность, водонепроницаемость, морозо- и коррозионную стойкость гидротехнического бетона. Прессованная смесь бетонного лома и высокоглиноземистого шлака на основе низкоосновных алюминатов позволяет получить прочные и морозостойкие материалы и конструкции дорожных одежд. Специальный никелевый шлак повышенной основности в смеси с портландцементом обеспечивает при гидратации формирование гидроксида трехвалентного железа. Бетон на таком ШПЦ показывает морозостойкость более 500 циклов без специальных мероприятий.

Ключевые слова: высокоглиноземистый шлак, высокожелезистый шлак, контактная прочность, гидроксид алюминия, гидроксид железа, высокоморозостойкий бетон.

Как известно, структура цементного камня представляет собой совокупность не до конца прогидратированных исходных частиц цемента, образующихся продуктов гидратации, а также пор различного размера. Состав новообразований при гидратации портландцемента зависит от химического и минералогического составов цемента, а также от ряда других факторов, в том числе от температуры, при которой взаимодействуют компоненты, и от степени влияния окружающей среды.

Эксплуатационные свойства бетонов напрямую определяются свойствами цементного камня; к числу наиболее важных можно отнести прочность, морозо- и коррозионную стойкость. В связи с низкой морозо- и коррозионной стойкостью бетонов, используемых в строительстве, зачастую происходят аварийные ситуации и недопустимые деформации ответственных конструкций, работающих в особых условиях. Это обуславливает необходимость и актуальность поиска решений, связанных с повышением долговечности бетонных композитов.

Поскольку основную роль в вопросах долговечности играет структура цементного камня, то особое внимание, помимо снижения В/Ц и технологии правильной укладки бетона, необходимо уделять именно формированию структуры.

Во многих работах говорится о том, что наиболее долговечным является бетон, имеющий плотную, непроницаемую для агрессивных компонентов структуру цементного камня [1], которая, согласно известным положениям о кольматации пор цементного камня [2, 3], может образоваться за счет формирования в процессе гидратации гелевидных фаз-кольматантов.

Авторами [4–7] показано, что в качестве таких фаз могут выступать гидроксиды алюминия и железа, образующиеся в процессе гидратации композици-

онных вяжущих, содержащих различные шлаки. В работах рассматривались высокоглиноземистый и высокожелезистые шлаки.

Высокоглиноземистый шлак (ВГШ), вводимый в качестве компонента вяжущего для производства гидротехнического бетона, изменяет и реологические свойства бетонной смеси, и состав новообразований портландцемента. Водоотделение бетонной смеси, изготовленной с использованием композиционных портландцементов с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, в 14 раз ниже, чем водоотделение бетонной смеси на бездобавочном портландцементе; происходит быстрое образование гелевидной фазы.

Алюминаты кальция типа CA_2 и CA_6 , содержащиеся в высокоглиноземистом шлаке, при гидратации образуют сложные гидратные фазы типа алюмосиликатов, а также некоторое количество гидроксида алюминия. Имеющийся эндотермический эффект при температуре $310^\circ C$ с потерей массы $5,6\%$ доказывает образование гидроксида алюминия (рис. 1).

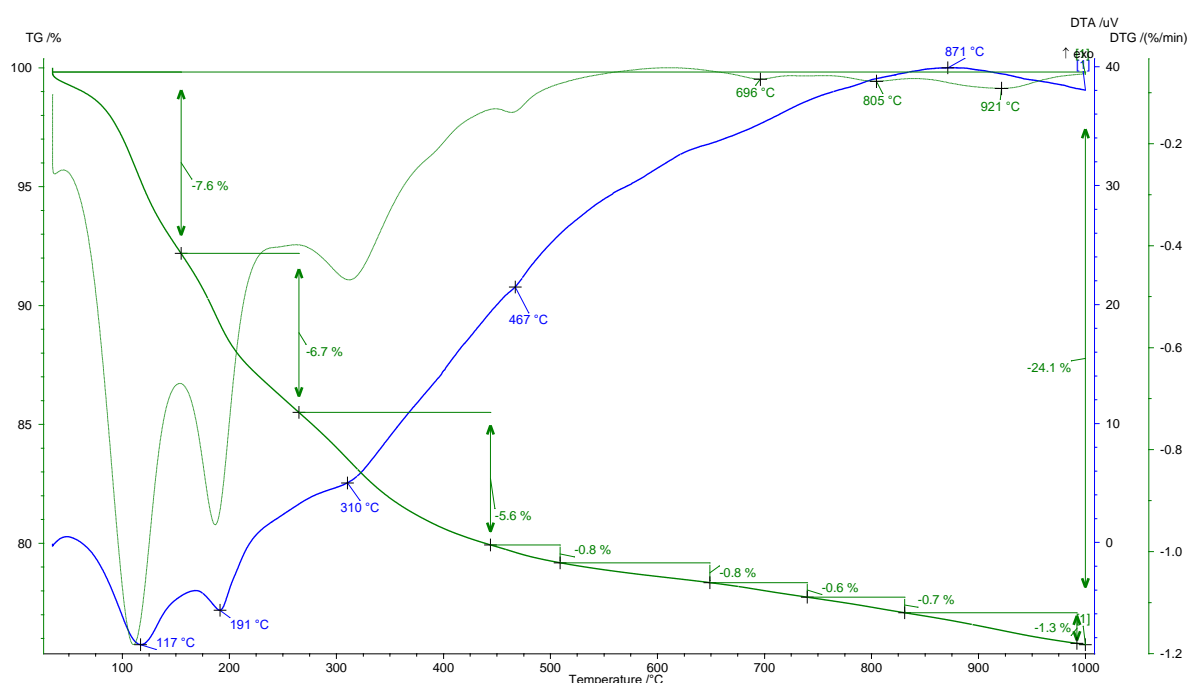


Рис. 1. Дериватограмма цементного камня, полученного при гидратации композиционного портландцемента с добавкой высокоглиноземистого шлака

Этот факт обуславливает эффект кольматации пор, за счет чего происходит снижение проницаемости бетона и повышение эксплуатационных свойств. Бетоны, изготовленные с использованием ВГШ, характеризуются высокой коррозионной стойкостью и прочностью в поздние сроки твердения.

Однако введение ВГШ в состав вяжущего для твердения в нормальных условиях имеет некоторые ограничения за счет частичного спада прочности при гидратации в результате перекристаллизации гидроалюминатов кальция. Если для гидротехнических бетонов массивных конструкций это менее важное ограничение, поскольку прочность оценивается в возрасте 180 сут., то для обычных конструкций данный фактор имеет большое значение.

Для устранения проблемы спада прочности при перекристаллизации необходимо создать условия, в которых данный процесс будет происходить быстро, без ухудшения строительно-технических свойств. Проведенные исследования по разработке материалов для дорожных оснований из бетонного лома [5, 6] показали, что применение ВГШ весьма эффективно сказывается на свойствах материалов, получаемых прессованием при высоком давлении.

В данном случае влияние низкоосновных алюминатов кальция в составе ВГШ имеет исключительно положительный эффект, поскольку при прессовании сырьевой смеси под давлением 60–100 МПа происходит быстрая перестройка гексагональных гидроалюминатов в кубический C_3AH_6 и параллельное образование геля гидроксида алюминия $Al(OH)_3$. Гель $Al(OH)_3$ способствует формированию плотной, упрочнённой структуры прессованных изделий.

Композиции из бетонного лома с добавкой ВГШ обеспечивают необходимые характеристики дорожных изделий по прочности и морозостойкости при давлении 20 МПа (рис. 2).

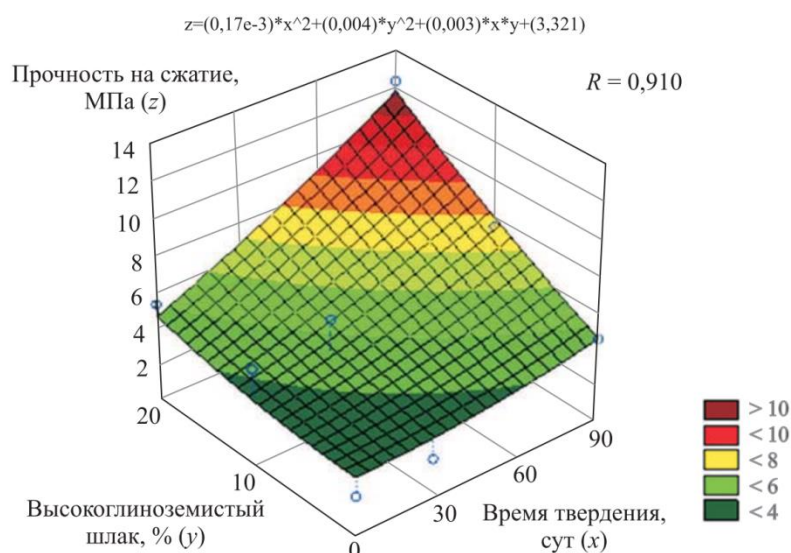


Рис. 2. Прочность при сжатии прессованной композиции из бетонного лома и ВГШ

Применение солей железа (сульфатов, хлоридов, нитратов) при изготовлении бетона также обосновано упрочняющим эффектом, однако химические добавки не могут так активно участвовать в процессе гидратации, как минеральные, например, высокожелезистые шлаки.

Применение до 30 % высокожелезистого никелевого шлака в составе шлакопортландцемента (ШПЦ) позволило увеличить прочность бетона от 32 до 46 МПа после 523 циклов испытания на морозостойкость без признаков разрушения. Данный факт позволяет сделать вывод о непосредственном участии оксидов железа в гидратации и формировании структуры цементного камня. Помимо основных гидратных фаз, при гидратации рассматриваемого ШПЦ образуются ферригидраты $Fe(OH)_3$, что подтверждают данные мессбауэровской спектроскопии (рис. 3).

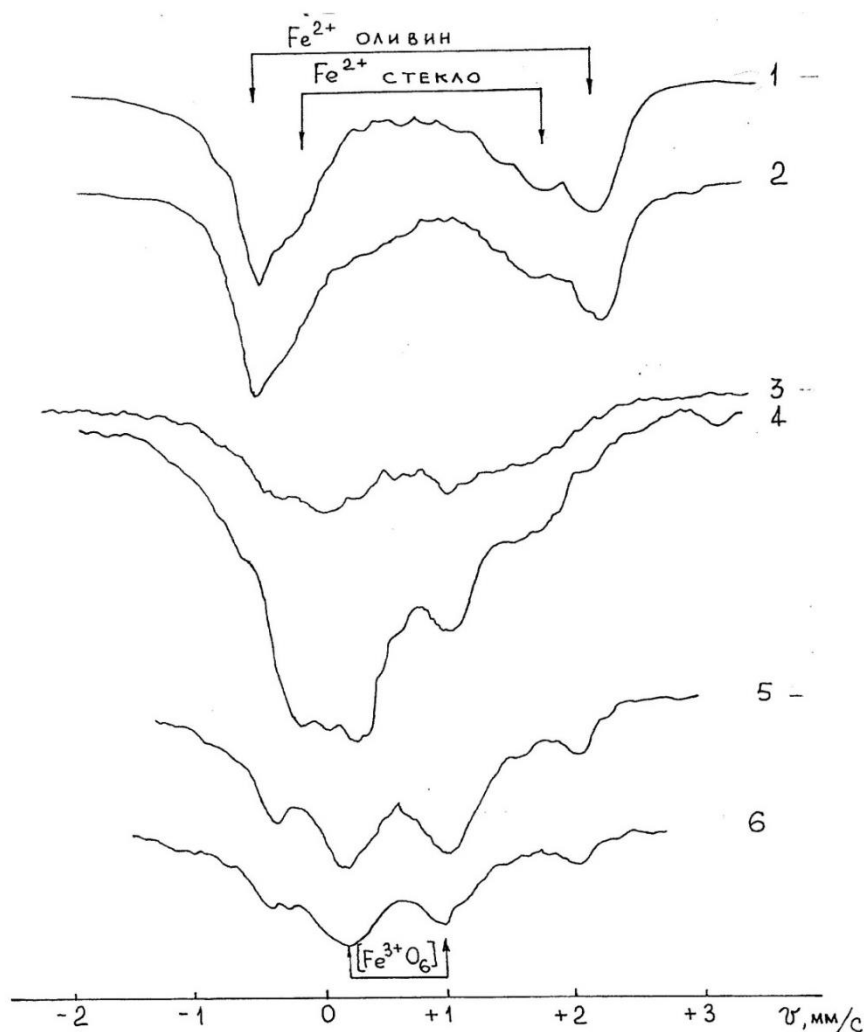


Рис. 3. Мессбауэровские спектры исходных и гидратированных ШПЦ на шлаках разной основности (1,3,5 – исходные ШПЦ; 2,4,6 – гидратированные ШПЦ в возрасте 28 суток)

Образующиеся при гидратации ШПЦ тонкодисперсные ферригидраты трёхвалентного железа так же, как и в случае $\text{Al}(\text{OH})_3$, коагулируют поры и дефекты микроструктуры цементного камня, значительно упрочняя его.

Таким образом, по результатам многочисленных экспериментов можно утверждать, что для повышения эксплуатационных свойств бетонов (морозо- и коррозионной стойкости) необходимо формирование плотной упрочненной структуры, которая может быть обеспечена за счет формирования гелевидных тонкодисперсных гидроксидов алюминия и железа, образующихся при гидратации портландцементов, содержащих добавки высокоглиноземистых и высокожелезистых шлаков. При этом высокоглиноземистые шлаки особую роль играют в обеспечении свойств контактно-конденсационных материалов.

Библиографический список:

1. Кузнецова, Т.В. Структура цементного камня при коррозионном воздействии / Т.В. Кузнецова. // Цемент и его применение. 2007. №6. С. 98–100.
2. Рахимбаев, Ш. М., Толыпина, Н. М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей / Ш. М. Рахимбаев, Н. М. Толыпина // Белгород: Изд-во БГТУ. – 2015.

3. Федосов, С. В. К вопросам теории кольматации цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, А.С. Евсяков //XXIV Международная научно-техническая конференция «Информационная среда вуза»: сборник материалов. 2017. Т. 1. №. 1. С. 403.
4. Ибе Е. Е. Гидротехнический бетон на композиционном портландцементе с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки: дис. – Барнаул: дис.... канд. техн. наук, 2016.
5. Овчаренко, Г.И., Дорожные основания из укрепленного бетонного лома / Г.И. Овчаренко, Е.Е. Ибе, А.В. Викторов //Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. №. 11. С. 50-57.
6. Патент RU 2679198 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/00 С04В 40/00 С04В 18/16 С04В 22/00 С04В 111/20. Способ переработки бетонного лома [Текст] / Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Назаров Д.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2017129217; заявл. 15.08.2017; опубл. 06.02.2019, Бюл. №4.– 9 с.
7. Овчаренко, Г.И. Высокоморозостойкий шлакосодержавный бетон / Г.И. Овчаренко // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. №. 11-12. С. 15-21.

ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗАТОРОВ В СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ: ВИДЫ И МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ

Ю.Н. Огурцова¹, канд. техн. наук

В.С. Огурцова¹, студент

А.А. Литая¹, студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Аннотация. В статье рассмотрено состояние разработки фотокаталитических композиционных материалов на основе диоксида титана и их применения на поверхности и в объеме строительных композитов: технологии нанесения TiO_2 на различные подложки, диапазон возможных подложек и их влияние на фотокаталитическую активность конечного материала. Увеличение фотокаталитической активности TiO_2 при использовании подложек обусловлено следующими факторами: упрощение разделения (диспергации) частиц TiO_2 для увеличения площади поверхности, увеличение фазовой стабильности TiO_2 , облегчение адсорбции и переноса органических молекул на активные центры TiO_2 , увеличение количества поверхностно адсорбированной воды и гидроксильных групп, участвующих в реакциях фотокатализа и др. Критериями выбора подложки являются: доступность сырьевых компонентов, тип конструкций и вид загрязнителей при эксплуатации, влияние на физико-механические характеристики строительного материала, экономическая целесообразность.

Ключевые слова: фотокатализ, диоксид титана, структура, кремнезем, фотокаталитическая активность, вяжущее вещество

Направление разработки и эффективного применения фотокаталитически активных строительных материалов является одним из наиболее актуальных на настоящий момент, так как подразумевает решение возрастающей проблемы загрязнения воздуха густонаселенных и промышленных территорий. Одной из многочисленных задач к решению в рамках данного направления является разработка фотокатализаторов как простых, так и композиционных, сохраняющих высокую фотокаталитическую активность на поверхности или в объеме строительного материала.

Целью данного обзора являлось изучение состояния разработки фотокаталитических композиционных материалов на основе диоксида титана и их применения на поверхности и в объеме строительных композитов: технологиями нанесения диоксида титана на различные подложки, диапазоном возможных подложек и их влиянием на фотокаталитическую активность конечного материала.

Многokратно доказано, что для повышения фотокаталитической активности TiO_2 требуется его модификация. В дополнение к легированию и структурной модификации частиц TiO_2 предлагается использование подложек. Целесообразность применения подложек или носителей TiO_2 для последующего его нанесения на поверхность или введения в объем строительных композитов обосновывают несколькими факторами:

1. Упрощение разделения (диспергации) частиц TiO_2 при синтезе для увеличения площади поверхности [1],
2. Увеличение фазовой стабильности TiO_2 при синтезе [2].
3. Облегчение и поддержание образования высокоэнергетических анизотропных $\{001\}$ граней наряду с термодинамически стабильными $\{101\}$ [3], рав-

ное соотношение которых обеспечивает увеличение активности фотокатализа из-за преимущественного потока фотогенерированных дырок и электронов к окислительным граням {001} и восстановительным граням {101}, на которых происходит окисление и восстановление соответственно [4].

4. Облегчение адсорбции и переноса органических молекул на активные центры фотокатализатора [5],

5. Увеличение количества поверхностно адсорбированной воды и гидроксильных групп, участвующих в реакциях фотокатализа [6],

6. Увеличение адгезии фотокатализатора к цементной матрице за счет высокого сродства последней с материалом подложки, например, при использовании SiO_2 [7].

Наиболее исследованными на данный момент являются фотокаталитически активные системы состава $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ [7, 8]. Их получают различными способами, среди которых: каталитический гидролиз, прививка алкоксидов титана на поверхность кремнезема, соосаждение, пропитка, химическое осаждение из паровой фазы и гидролиз в гидротермических условиях [3]. В основном синтез может идти по двум схемам: либо нанесение TiO_2 на готовую кремнеземную подложку, либо одновременный (поэтапный) синтез композита $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$.

При выборе материала кремнеземной подложки (силикагель, диатомит и др.) важно учитывать необходимость формирования иерархичной структуры композита, которая будет обеспечивать не только эффективную сорбцию загрязнителей, но и способность переносить электроны. Перспективными с экологической точки зрения являются материалы подложки, которые могут быть получены из кремнеземных пород, накапливаемых в отвалах, например, опока, либо получаемых из растений или других материалов биомассы (биогенный диоксид кремния) [8].

При направленном синтезе кремнеземной подложки подходы основаны на предварительном получении наноразмерных сфер SiO_2 из прекурсора – тетраэтоксисилана и последующего их смешивания с раствором прекурсора TiO_2 – тетрабутоксититаном. После обязательных этапов центрифугирования и сушки порошки прокаливают при температуре около 500–550°C [3, 7]. Таким образом могут быть получены порошки, частицы которых представляют собой сферы SiO_2 диаметром около 95 нм, частично покрытые наночастицами TiO_2 (анатаз) диаметром около 25 нм. Введение синтезированных порошков в состав цемента обеспечило не только высокую способность поверхности цементного камня к самоочищению, но и реализацию пуццолановой реакции аморфного SiO_2 , не покрытого частицами TiO_2 , с образованием C–S–H геля [7].

При поэтапном синтезе SiO_2 и TiO_2 были получены порошки, частицы которых представляли собой сферы SiO_2 диаметром около 60 нм, частично покрытые удлиненными нанокристаллами TiO_2 (анатаз) размером около 10–12 нм. Полученные наноконпозиты $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ проявили высокую фотокаталитическую активность при видимом свете, оцененную по скорости разложения метиленового синего, превышающую на 24 % активность контрольного образца – коммерческого фотокатализатора P25 TiO_2 (метиленовый синий выступает фотосенсибилизатором, поэтому фотокатализ протекает даже при видимом свете). Стоит отметить, что на фотокаталитическую активность таких наноконпозитов

влияет молярное соотношение SiO_2 и TiO_2 (в данном случае оптимальным считается $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2=1:3$), как фактор площади поверхности TiO_2 . Чем более граненые и разделенные структуры TiO_2 формируются, тем большей свободной поверхностью и, следовательно, фотокаталитической активностью они обладают [3].

Свою эффективность показали фотокаталитические композиционные материалы системы Zn-Al-Ti, представляющие собой наноразмерные порошки смешанных оксидов ZnO, Al_2O_3 и TiO_2 . Их введение в портландцемент не только придало цементному камню высокую способность к самоочищению за счет синергетического эффекта между TiO_2 и слоистыми двойными гидроксидами Zn-Al, но и положительно повлияло на процессы его фазо- и структурообразования. В частности, эти порошки участвуют в гидратационных процессах цемента, увеличивая степень гидратации в качестве затравок кристаллизации, встраиваясь в структуры C-S-H, улучшая их распределение. Высокую фотокаталитическую активность в данном случае объясняют диффузией и разделением электронно-дырочных пар, обусловленных слоистым строением материалов, или эффективностью разделения фотогенерированных носителей заряда и быстрой и легкой миграцией фотогенерированных электронно-дырочных пар. Межслоевые пространства облегчают реакции между фотогенерированными парами e^-/h^+ и снижают скорость рекомбинации носителей заряда. Кроме того, активация TiO_2 -генерированного фотокатализа в присутствии слоистых двойных гидроксидов Zn-Al обусловлена богатством их поверхности группами OH. Поверхностные гидроксильные группы легко преобразуются в радикалы HO•, которые являются основными группами, ответственными за деградацию красителя [9].

Известно также, что даже раздельное введение фотокатализатора и минерального компонента, в частности, доломита, позволяет увеличить способность к самоочищению цементного камня. Авторы объясняют это тем, что наличие доломита приводит к равномерному распределению более мелких пор на поверхности цементного образца, что увеличивает площадь поверхности фотокаталитической реакции и светопропускание. Кроме того, авторы говорят об увеличении гидрофильности поверхности, что не только улучшает процесс ее очищения после осадков, но и способствует «обновлению» поверхности для протекания фотокаталитических реакций [10].

Отдельного внимания заслуживают подложки, которые могут являться источниками света для продолжения реакций фотокатализа при прекращении освещения. К таким материалам относятся люминофоры с послесвечением, например, двойной перовскит $\text{La}_2\text{MgGaO}_6:\text{Eu}^{2+}$. Для проведения исследований изготавливался композиционный материал $\text{La}_2\text{MgGaO}_6:\text{Eu}^{2+}/\text{TiO}_2$ с использованием: порошка $\text{La}_2\text{MgGaO}_6:\text{Eu}^{2+}$ со средним размером частиц около 10 мкм, порошка TiO_2 и каолина при массовом содержании компонентов (масс. %) 5:3:1. Смесь была спрессована и обожжена при 800°C в течение 45 мин. Полученный композиционный материал проявлял фотокаталитическую реакцию в течение 2,1 ч после выключения источника УФ-излучения. Это обусловлено тем, что материал сначала поглощал ультрафиолетовый свет, а затем эффективно испус-

кал энергию ультрафиолетового послесвечения, которая была повторно поглощена диоксидом титана [11].

Помимо минеральных доказана эффективность и органических компонентов в составе фотокаталитических композиционных материалов. Предлагается получение гидрофобных образцов TiO_2 путем сольвотермального синтеза. Синтезируемый материал имеет структуру «ядро – оболочка», получаемую путём использования бензойной кислоты в качестве поверхностно-активного вещества, что также обуславливает более равномерное распределение частиц TiO_2 . Поверхностное связывание между TiO_2 и бензойной кислотой обуславливает гидрофобность композита, которая сохраняется, когда его наносят на поверхность цементных материалов. Увеличение фотокаталитической активности последних в данном случае связывают с высокой площадью поверхности по БЭТ и меньшим размером кристаллов TiO_2 , что обеспечивают большее количество активных участков для деградации загрязнителей [12].

Значение имеет также состав и структура матрицы строительного материала. Например цементные растворы со значительным преобладанием нанопор (в данном случае имеются в виду поры менее 0,05 мкм), сдерживают диффузию газообразных загрязняющих веществ в объем материала, тем самым снижая их фотокаталитическую активность. Помимо обычного портландцемента, показана потенциальная возможность использовать в качестве носителя TiO_2 матрицы на основе глиноземистого и высокоглиноземистого цемента. Такие материалы характеризуются высокой способностью сорбировать NO_2 под действием УФ-излучения: образующиеся дырки на алюминатах кальция (кислотные центры Льюиса) активно взаимодействуют с основными центрами Льюиса NO_2 . При использовании известковых вяжущих высокую скорость удаления оксида азота объясняют особенностями поровой структуры – сообщающиеся поры размером около 0,7–0,8 мкм и практически унимодальным распределением обеспечивают максимальную перколяцию загрязнителя к поверхности частиц фотокатализатора. Карбонат кальция в составе вяжущего реагирует с азотной кислотой – конечным продуктом фотоокисления NO , что приводит к образованию нитратов кальция, которые легко удаляются с поверхности фотокатализатора, тем самым сохраняя уровень фотокаталитической активности. В противном случае образование азотной кислоты на поверхности фотокатализатора приводило бы к дезактивации фотокатализа [13, 14]. Также доказано, что фотокаталитические цементные материалы, полученные с использованием белого цемента, имеют более высокую эффективность фотокаталитического разложения NO_x , чем на основе серого портландцемента. Авторы объясняют данное явление тем, что серый портландцемент обладает большей способностью поглощения света и более высоким сопротивлением переносу заряда на межфазовой границе между ним и частицами TiO_2 , меньшей интенсивностью фотолюминесценции [15].

Таким образом, подложки для фотокатализаторов в строительных материалах могут быть как природными, так и синтетическими, как неорганическими, так и органическими, и за счет различных эффектов, перечисленных в данной статье, они способствуют повышению фотокаталитической активности материала. Критериями выбора той или иной подложки являются: доступность сырьевых компонентов, тип конструкций и вид загрязнителей при эксплуатации, вли-

яние на физико-механические характеристики строительного материала, экономическая целесообразность.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00263).

Библиографический список:

1. Hirano, M. Hydrothermal synthesis of TiO₂/SiO₂ composite nanoparticles and their photocatalytic performances / M. Hirano, K. Ota, M. Inagaki, H. Iwata // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2004. Vol. 112. P. 143–148.
2. Hirano, M. Direct formation of anatase (TiO₂)/silica (SiO₂) composite nanoparticles with high phase stability of 1300 °C from acidic solution by hydrolysis under hydrothermal condition / M. Hirano, K. Ota, H. Iwata // *Chemistry of Materials*. 2004. Vol. 16. P. 3725–3732.
3. Pal, A. Silica supported TiO₂ nanostructures for highly efficient photocatalytic application under visible light irradiation / A. Pal, T.K. Jana, K. Chatterjee // *Materials Research Bulletin*. 2016. Vol. 76. P. 353–357.
4. Roy, N. Synergy of low-energy {101} and high-energy {001} TiO₂ crystal facets for enhanced photocatalysis / N. Roy, Y. Sohn, D. Pradhan // *ACS Nano* 7. 2013. P. 2532–2540.
5. Cendrowski, K. Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of core/shell mesoporous silica nanospheres supporting nanocrystalline titania / K. Cendrowski, X. Chen, B. Zielinska, R.J. Kalenczuk, M.H. Rummeli, B. Büchner, R. Klingeler, E. Borowiak-Palen // *Journal of Nanoparticle Research*. 2011. Vol. 13. P. 5899–5908.
6. Hirano, M. Preparation of photoactive anatase-type TiO₂/silica gel by direct loading anatase-type TiO₂ nanoparticles in acidic aqueous solution by thermal hydrolysis / M. Hirano, K. Ota // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. P. 1841–1844.
7. Wang, D. Photocatalytic activities and chemically-bonded mechanism of SiO₂@TiO₂ nanocomposites coated cement-based materials / D. Wang, P. Hou, L. Zhang, N. Xie, P. Yang, X. Cheng // *Materials Research Bulletin*. 2018. Vol. 102. P. 262–268.
8. Fatimah, I. Physicochemical characteristics and photocatalytic performance of TiO₂/SiO₂ catalyst synthesized using biogenic silica from bamboo leaves / I. Fatimah, N. I. Prakoso, I. Sahroni, M. Miqdam Musawwa, Y.-L. Sim, F. Kooli, O. Muraza // *Heliyon*. 2019. Vol. 5. № 11. Article e02766.
9. Amor, F. Development of Zn-Al-Ti mixed oxides-modified cement phases for surface photocatalytic performance / F. Amor, A. Diouri, I. Ellouzi, F. Ouanji // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 9. Article e00209.
10. Ratan, J.K. Enhancement of photocatalytic activity of self-cleaning cement / J. K. Ratan, A. Saini // *Materials Letters*. 2019. Vol. 244. P. 178–181.
11. Zhang, J. Fabrication and characterization of Eu²⁺-doped lanthanum-magnesium-gallium/TiO₂-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation / J. Zhang, Z. Liu // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. № 8. P. 10342–10347.
12. Wang, D. Photocatalytic and hydrophobic activity of cement-based materials from benzyl-terminated-TiO₂ spheres with core-shell structures / D. Wang, P. Hou, L. Zhang, P. Yang, X. Cheng // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 148. P. 176–183.
13. Pérez-Nicolás, M. Atmospheric NO_x removal: Study of cement mortars with iron- and vanadium-doped TiO₂ as visible light-sensitive photocatalysts / M. Pérez-Nicolás, I. Navarro-Blasco, J.M. Fernández, J.I. Alvarez // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149. P. 257–271.
14. Lucas, S.S. Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars – Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity / S. S. Lucas, V. M. Ferreira, J. L. Barroso de Aguiar // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 43. Pages 112–120.

15. Guo, M.-Z. Superior photocatalytic NO_x removal of cementitious materials prepared with white cement over ordinary Portland cement and the underlying mechanisms / M.-Z. Guo, C. S. Poon // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 90. P. 42–49.

ВЛИЯНИЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА СВОЙСТВА БЕТОНОВ

Ю.В. Пухаренко¹, д-р техн. наук, профессор, член-корр. РААСН

И.У. Аубакирова¹, канд. техн. наук, доцент

В.И. Хирхасова¹, аспирант

¹*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В результате анализа литературных данных установлена целесообразность и эффективность применения нанофибриллированной целлюлозы в качестве модификатора цементных композитов, улучшающего условия взаимодействия цементных зерен с водой и обеспечивающего повышение степени их гидратации в процессе твердения. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния нанофибриллированной целлюлозы на реологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства бетона.

Ключевые слова: нанофибриллированная целлюлоза, бетон, реологические характеристики, свойства.

Определенные успехи развития строительного материаловедения последнего десятилетия связаны с такими понятиями, как наноматериалы, наночастицы, наномодифицирование, нанокпозиционное материаловедение [1, 2, 3, 4]. При этом весьма активно, с учетом обострившихся экологических проблем, ведется поиск возобновляемых ресурсов для получения наноматериалов, способных выполнять роль модификаторов в процессе формирования структуры и свойств строительных материалов. В частности, на сегодняшний день известно о введении в состав цементных бетонов нано- или микрофибриллярной целлюлозы.

Известно, что натуральные целлюлозные волокна обладают высокими механическими свойствами, экологичностью и могут быть получены из отходов многих производств, что делает их весьма привлекательными для использования в составе строительных композитов. Целлюлоза является классическим примером продукта непрерывного биосинтеза, позволяющего получать модифицирующие, в том числе упрочняющие добавки, в виде микро- и нанофибрилл в необходимых количествах и по минимальной цене [5]. Смысл извлечения волокон целлюлозы заключается в удалении матричных веществ, таких как лигнин и гемицеллюлоза. При сильном механическом разрушении исходная структура целлюлозного волокна разрушается, и волокна превращаются в отдельные нанофибриллы или их пучки с диаметром в диапазоне 1–100 нм в зависимости от степени распада. Таким образом, целлюлоза – это самый распространённый в мире природный возобновляемый биоразлагаемый полимер, позволяющий получать наномодификаторы строительных композитов в промышленно значимых объемах.

По информации канадских ученых [6] при добавлении в смесь нанофибриллированной целлюлозы, полученной от компании Kruger Biomaterials Inc, имеет место улучшение свойств цементного композита. Так, при введении указанной добавки в количестве 0,05-1,0% по массе прочность образцов на сжатие увеличивается до 26%. Повышение прочности при изгибе достигает 21%, при-

чем максимальное значение было получено при добавлении 0,1% наноцеллюлозы по массе.

Аналогичные исследования с наноцеллюлозой проводили ученые в США [7] и получили схожие результаты. В своих опытах они использовали наноцеллюлозу в виде 5,38%-ной суспензии, произведенную в лаборатории USDA Forest Service-Forest Products. Было отмечено, что при введении наноцеллюлозы до 0,2% по объему прочность образцов при изгибе возрастает на 20-30%, но в дальнейшем, при больших концентрациях добавки, снижается.

Отмеченный эффект, авторы работ связывают с более глубокой гидратацией, степень которой увеличилась к 28 суткам твердения до 15%, по сравнению с аналогичными образцами без наноцеллюлозы. Такое поведение системы может быть обусловлено гидрофильностью и гигроскопичностью волокон целлюлозы, которые создают канал для транспортировки воды через слой продуктов гидратации к частицам цемента. Об этом свойстве наноцеллюлозы косвенно свидетельствует повышенное водопоглощение образцов.

Ученые из Китая [8] также изучали механические свойства цементных композитов при добавлении наноцеллюлозы в различных концентрациях (0,05-0,4% по массе). По окончании эксперимента были опубликованы следующие выводы:

- при добавлении целлюлозы 0,15% по массе увеличение прочности образцов на сжатие и на изгиб составляет 15% и 20% соответственно;

- время схватывания цементной смеси увеличивается пропорционально с повышением концентрации наноцеллюлозы.

Кроме этого, Jiao, L., Su, M., Chen, L. и др. [8] провели сравнительный анализ эффективности наноцеллюлозы и стальных волокон в бетоне, в результате которого установлено, что образцы с наноцеллюлозой в количестве 0,8% по массе обладали самыми низкими значениями усадочных деформаций. Снижение усадки относительно состава со стальными волокнами и контрольного состава (без волокон) составило в среднем 50%. При этом прочность образцов с наноцеллюлозой были выше относительно образцов контрольного состава, но ниже, чем у образцов со стальными волокнами.

На кафедре технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО СПбГАСУ также проводятся исследования по определению потенциальных возможностей целлюлозных нановолокон и целесообразности их использования в качестве наномодифицирующей добавки в бетонах.

В ходе исследования были использованы следующие материалы:

- Портландцемент ЦЕМ-I 42,5 Н производства ООО «Петербургцемент» с удельной поверхностью 419 м²/кг, равномерностью изменения объема равной 0,2 мм, средней активностью в возрасте 28 суток – 49,4 МПа, нормальной густотой цементного теста 29,8%;

- Песок карьерный с модулем крупности $M_{кр}=2,3$, насыпной плотностью 1480 кг/м³, истинной плотностью 2500 кг/м³, водопотребностью 5%, с содержанием пылевидных и глинистых частиц 0,3 %;

- Щебень гранитный фракции 5-20 мм, насыпной плотностью 1400 кг/м³, истинной плотностью 2650 кг/м³, с содержанием зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм 12%;

– Суспензия 2% нанофибриллированной целлюлозы *BETULIUM MFC N-25*, производитель: компания Bang and Bonsomer (Финляндия) с истинной плотностью 1,56 г/см³.

Анализ микроструктуры нанофибриллированной целлюлозы, используемой в данном исследовании, представлен на рис. 1.

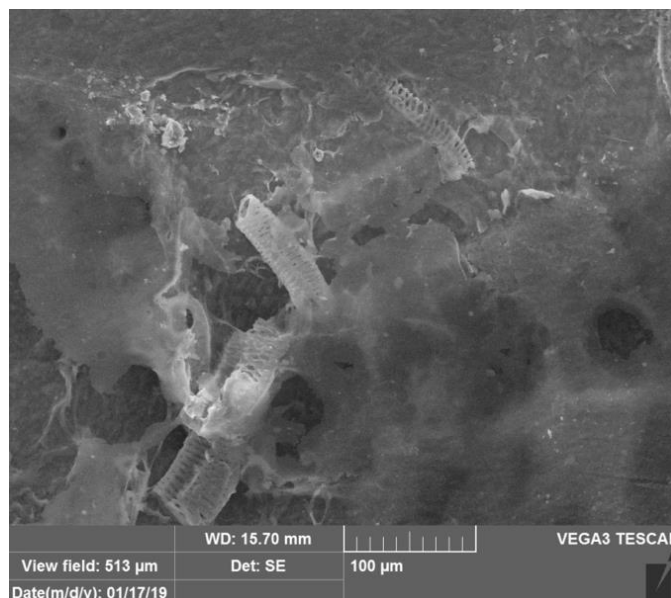


Рис. 1. Микроструктура наноцеллюлозы

Из рисунка видно, что нанофибриллированная целлюлоза представляет собой длинные пучки волокон диаметром около 2 нм с примесью крупных микрофибриллярных структур размером в среднем 100 нм.

В экспериментальной части работы были изготовлены бетонные смеси, составы которых отражены в табл. 1.

Таблица 1. Составы бетонных смесей

№ п/п	Вид бетона	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси, кг				
		цемент	песок	щебень	вода	суспензия наноцеллюлозы
1	бетон без наноцеллюлозы	340	800	1040	190	0
2	бетон с наноцеллюлозой	340	800	1040	190	0,476

Приготовление бетонных смесей осуществлялось в лабораторном бетоносмесителе в следующей очередности загрузки компонентов: щебень, песок, портландцемент и вода с растворенной в ней суспензии наноцеллюлозы. Перемешивание продолжалось до обеспечения равномерного распределения всех компонентов в бетонной смеси.

Уплотнение бетонных смесей осуществлялось вибрированием в течение 10 сек. Из полученных бетонных смесей изготавливались образцы-кубы с ребром 100 мм и образцы-призмы с размерами 70x70x280 мм. Процесс твердения и набор прочности, изготовленных образцов осуществлялся в камере нормального твердения при температуре 18...20°C и относительной влажности воздуха (95±5) % в течение 28 суток.

Влияние nanoцеллюлозы на реологические свойства бетонной смеси отражено в таблице 2.

Таблица 2. Реологические характеристики бетонной смеси

№ п/п	Вид бетона	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	Подвижность по осадке конуса, см
1	бетон без nanoцеллюлозы	2440	4,5
2	бетон с nanoцеллюлозой	2500	9

Испытания по определению прочности бетона при сжатии и на растяжение при изгибе выполнялись в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Водопоглощение бетона определялось по ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Методы определения водопоглощения», деформации усадки – по ГОСТ 24544-81 «Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести».

Результаты влияния концентрации волокон nanoцеллюлозы на прочность бетона при сжатии, при изгибе и усадку бетона в процессе твердения представлены на рис. 2 – 4. Концентрация nanoцеллюлозы $0,84 \cdot 10^{-4}$ приведена в % на сухое вещество.

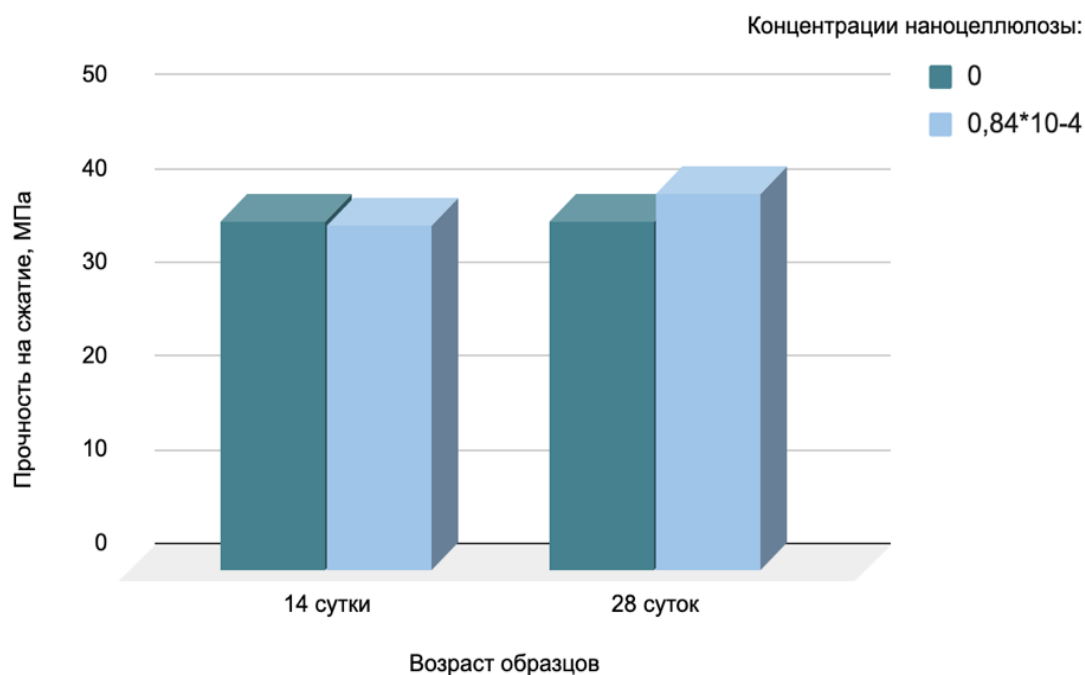


Рис. 2. Влияние количества волокон nanoцеллюлозы на прочность бетона при сжатии

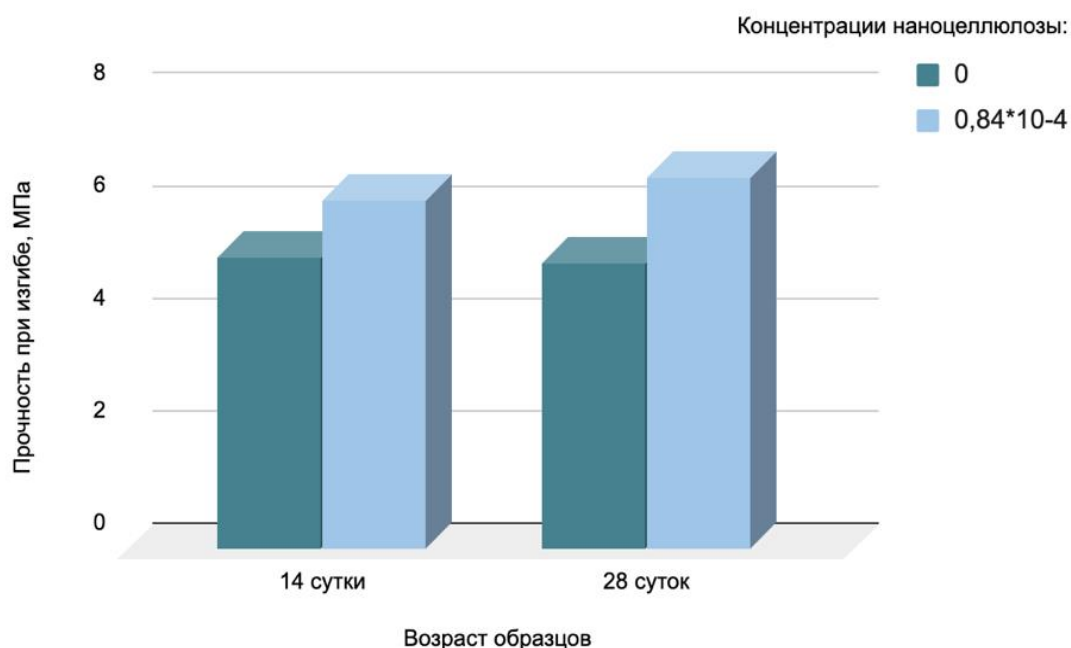


Рис. 3. Влияние количества волокон наноцеллюлозы на прочность бетона при изгибе

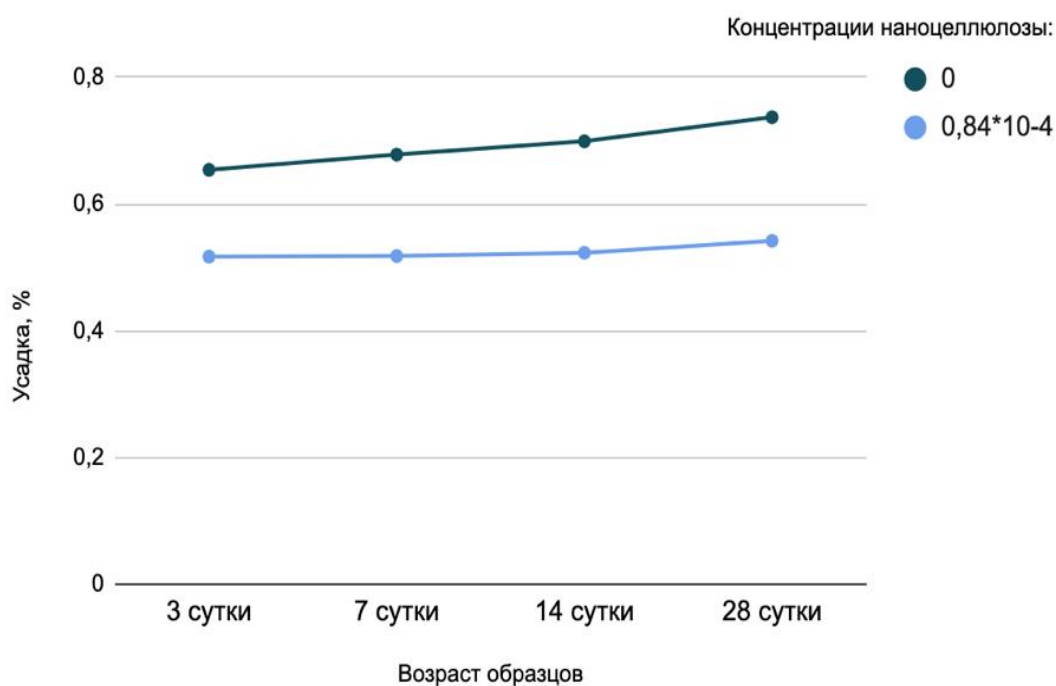


Рис. 4. Влияние количества наноцеллюлозы на усадку бетона в процессе твердения

По полученным данным были сформулированы следующие выводы:

1. В контрольном возрасте прочность образцов, модифицированных наноцеллюлозой, превышает прочность исходного бетона на 8% при сжатии и на 20% при изгибе.
2. Усадка бетона в присутствии целлюлозных нановолокон снижается на 26%.
3. Водопоглощение образцов с наноцеллюлозой увеличивается в сравнении с контрольным составом на 62%.

Таким образом, следует отметить определенное совпадение полученных данных с результатами зарубежных исследователей. Установлено положительное влияние наноцеллюлозы на свойства цементных бетонов, что указывает на определенные перспективы ее использование в качестве наномодификатора и определяет необходимость дальнейших исследований.

Библиографический список:

1. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем // Международный конгресс «Наука и инновации в строительстве SIB-2008». Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. – Воронеж, 2008. – Т. 1, кн. 2, с. 424-429.
2. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Летенко Д.Г. Модифицирование цементных композитов смешанным наноуглеродным материалом фуллероидного типа // Технология бетонов. 2013. № 12 (89). С. 13-15.
3. Ковалева А.Ю., Беляева Ж.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей // Популярное бетоноведение, 2008. № 3(23). С. 28-29.
4. Бальмаков М.Д., Пухаренко Ю.В. Нанокпозиционное материаловедение // Вестник гражданских инженеров, 2005. № 3(4). С. 53-57.
5. Angeles Blanco, M. Concepcion Monte, Cristina Campano, Ana Balea, Noemi Merayo and Carlos Negro. Nanocellulose for Industrial Use: Cellulose Nanofibers (CNF), Cellulose Nanocrystals (CNC), and Bacterial Cellulose (BC)// Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications. 2018.
6. Hisseine, O. A., Wilson, W., Sorelli, L., Tolnai, B., & Tagnit-Hamou, A. (2019). Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. *Construction and Building Materials*, 206, 84–96.
7. Cao, Y., Zavaterra, P., Youngblood, J., Moon, R., & Weiss, J. (2015). The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 56, 73–83.
8. Jiao, L., Su, M., Chen, L., Wang, Y., Zhu, H., & Dai, H. (2016). Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement. *PLOS ONE*, 11(12), e0168422.

ГРУНТОБЕТОН НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕР-ОРГАНИЧЕСКОГО СВЯЗУЮЩЕГО С МИНЕРАЛЬНЫМ МОДИФИКАТОРОМ

Ю.В. Соколова¹, ассистент

А.М. Айзенштадт¹, д-р хим. наук, профессор

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Неблагоприятные инженерно-геологические условия являются сдерживающим фактором для развития Северных и Арктических регионов. Поэтому актуальной задачей является внедрение инновационных технологий, которые обеспечивают улучшение физико-механических свойств грунтов и позволяют создавать структуры по типу грунтобетона. Целью исследований являлась разработка составов эффективных грунтобетонов для песчано-глинистых грунтов на основе широкого использования многотоннажных отходов промышленного производства. В качестве компонентов полимер-органического вяжущего были использованы глиоксаль и тонкодисперсная кора, в качестве минерального модификатора – карбидный ил. Для изучения влияния вяжущего на основные породообразующие минералы грунтов была создана модельная система грунта на основе полиминерального песка и сапонит-содержащего материала. В результате проведенных исследований разработаны и научно обоснованы принципы проектирования грунтобетонов на основе полимер-органического связующего с минеральным модификатором. Показана эффективность применения разработанной композиции для стабилизации как модельной системы, так и реальных песчано-глинистых грунтов. Разработаны оптимальные составы и технология введения полимер-органического связующего для получения грунтобетонов на основе алюмосиликатных дисперсных грунтов различных генетических типов.

Ключевые слова: грунтобетон, полимер-органическое вяжущее, песчано-глинистый грунт, глиоксаль, тонкодисперсная кора, карбидный ил, эксплуатационные характеристики.

Развитие Северных и Арктических регионов сдерживается неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, которые связаны с преобладанием алюмосиликатных грунтов, представляющих собой полидисперсные полиминеральные многокомпонентные полигенетические системы и характеризующиеся большой изменчивостью свойств под действием природно-климатических и техногенных факторов [1]. Минералогический и гранулометрический составы оказывают значительное влияние на свойства грунта. Основными глинистыми минералами являются смектит (монтмориллонит), хлорит, гидрослюда, каолинит. Неглинистые минералы: кварц, слюды, полевые шпаты, кальцит, доломит, гипс, ангидрит. Наиболее восприимчивыми к действию воды и знакопеременных температур являются такие минералы, как каолинит и монтмориллонит. Согласно литературным данным, частицы глинистых пород имеют размерные характеристики 0,1 – 1,0 мкм, что говорит о наличии рентгено-аморфного вещества, определяющего возможность протекания реакций пуццоланового типа [2-4].

Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является внедрение инновационных технологий в строительстве, которые обеспечивают улучшение физико-механических свойств дисперсных грунтов. Существуют различные способы укрепления и стабилизации грунтов, однако наиболее широкое применение находят комбинированные физико-химические методы, позволяющие создавать структуры с заданными эксплуатационными характеристиками по типу грунтобетона [4-7].

Кроме того, следует подчеркнуть, что одними из приоритетных направлений в мировой науке являются создание строительных материалов на основе нетрадиционных композиционных вяжущих; рациональное природопользование; внедрение новых «зеленых» и устойчивых материалов и технологий; рециклинг, что способствует повышению эффективности строительства в районах с различными природно-климатическими условиями.

Таким образом, целью представленных исследований являлась разработка составов эффективных грунтобетонных для песчано-глинистых грунтов на основе широкого использования многотоннажных отходов промышленного производства.

Научная гипотеза работы заключается в создании периодической коллоидной структуры (ПКС) на основе алюмосиликатных дисперсных грунтов, устойчивой к внешним температурно-влажностным воздействиям и обладающей требуемыми в начальный период изготовления реологическими характеристиками, путем использования техногенных отходов для получения нетрадиционного полимер-органического связующего и минерального модификатора. Данный эффект будет достигаться за счет функционального действия компонентов смеси. Так, ожидается, что синтез производных гидрофобных структур по типу тетрафенола [8, 9] будет осуществляться путем топохимического взаимодействия глиоксаля с поверхностно-активными лигнинными веществами предварительно механоактивированной до тонкодисперсного состояния древесной коры. Путем оптимизации водотвердого отношения за счет сорбционных процессов в объемной фазе, обеспечиваемой глинистыми частицами грунта, будет достигнута заданная подвижность реакционной системы. Улучшение механических и гидрофизических характеристик конечного продукта будет происходить за счет химического синтеза малорастворимых низкоосновных гидросиликатов группы тоберморита из компонентов карбидного ила и аморфизированного кремнезема глинистых минералов [10, 11].

Поэтому, исходя из научной гипотезы, в качестве сырьевых компонентов для разработки полимер-органического связующего были выбраны: 40 %-ный водный раствор глиоксаля (производитель ООО «Новохим», г. Томск) и кора сосны обыкновенной (отход деревообрабатывающей промышленности). В качестве минерального модификатора – карбидный ил (отход гашения карбида кальция при производстве ацетилен).

Глиоксаль представляет собой диальдегид щавелевой кислоты. Глиоксаль и соединения на его основе широко используются в ряде отраслей современной промышленности [12-15], что обусловлено повышенной химической активностью его молекул, способностью образовывать макромолекулы сетчатой структуры и низкой агрессивностью в отношении конструктивных материалов.

Для исследования влияния полимер-органического вяжущего на основные породообразующие минералы песчано-глинистых грунтов была создана грунтобетонная смесь на основе полиминерального песка (месторождение «Краснофлотский-Запад») и сапонит-содержащего материала (ССМ) (отхода промышленного обогащения руд месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова), характеризующаяся количественным варьированием последнего и обеспечивающая создание модельной системы глинистого грунта с заданным числом пла-

стичности. Основные минералы, составляющие песок: кварц, кальцит, полевые шпаты, гипс, слюда. Основным породообразующим минералом сапонит-содержащего отхода является сапонит 63 %, представляющий собой глинистый минерал, слоистый силикат из группы монтмориллонита и обладающий адсорбирующими свойствами [16]. Исследование фазово-структурной гетерогенности ССМ позволило установить содержание аморфной фазы, которое составило 60-65 %. Средний размер частиц ССМ составил 591 ± 28 нм, что обеспечивает максимальные сорбционные свойства [17]. Таким образом, выбор сырьевых компонентов теоретически обоснован проведенным обзором отечественных и зарубежных литературных источников.

Для проверки выдвинутой научной гипотезы изучены процессы взаимодействия между компонентами полимер-органического вяжущего и модельной системой песчано-глинистого грунта, исследовано влияние составляющих грунтобетонной смеси на свойства конечного композита.

Предварительные исследования, представленные в работах [18, 19], показали целесообразность использования органоминеральной добавки на основе глиоксаля для укрепления алюмосиликатных грунтов оснований дорог и инженерных коммуникаций. Исследование физико-механических характеристик показало, что модификация песчаного грунта органоминеральной добавкой оптимального состава, созданной на основе композиции глиоксаль-сапонит-содержащий материал, повышает его удельное сцепление в 50 раз. Данный эффект обусловлен формированием однородной ПКС за счет синтеза уплотняющей прослойки из органического полимера, усиливающей дисперсионное взаимодействие между частицами грунта.

Проведен анализ кинетики полимеризации глиоксаля в присутствии минеральных наполнителей. Следует отметить, что процесс полимеризации в системе «глиоксаль-мелкозернистый песок» сопровождается наличием индукционного периода продолжительностью 5 часов. Скорость реакции достигает максимума через 15 часов. Процесс полимеризации заканчивается в естественных условиях через 25 часов. Введение ССМ сокращает индукционный период и ускоряет процесс, обеспечивая равномерную полимеризацию глиоксаля по всему объему грунта, образование однородной структуры и повышение структурно-механических свойств грунта. Доказано, что изменение протолитических свойств дисперсионной среды оказывает влияние на скорость и механизм процесса поликонденсации глиоксаля, однако полученный продукт не обладает достаточной устойчивостью к внешним температурно-влажностным воздействиям [20].

Для создания устойчивой к внешним температурно-влажностным воздействиям ПКС в состав полимер-органического вяжущего входит тонкодисперсная древесная кора, механизм действия которой заключается в образовании производных гидрофобных структур по типу тетрафенола в результате топохимического взаимодействия глиоксаля с поверхностно-активными лигнинными веществами. Изучена кинетика гетерогенного процесса взаимодействия глиоксаля с тонкодисперсной корой. Установлено, что реакция поликонденсации имеет отрицательный (минус первый) порядок по глиоксалю, что подтверждает выдвинутую рабочую гипотезу о механизме структурообразования в системе

«глиоксаль – гваяцилпропановые структурные единицы лигнина механоактивированной коры». Отрицательный порядок по глиоксалу, по нашему мнению, может быть связан с тем, что лимитирующей стадией реакции является стадия, протекающая в диффузионной области. В этом случае свободные реакционные центры поверхности растительного компонента смеси блокируются продуктами первичного взаимодействия, что и вызывает замедление процесса, несмотря на увеличение концентрации глиоксала [21].

Для разработки принципов управления процессами структурообразования полимер-органического связующего было исследовано влияние основных параметров топохимического взаимодействия (реакционноактивная поверхность, концентрация глиоксала) на свойства вяжущего и рецептурных и технологических факторов на свойства конечного композита. Выявлен максимально возможный синергетический эффект и определены диапазоны варьирования содержания компонентов. Определяющим параметром, обеспечивающим прочность композиции связующего, является развитость поверхности. Кроме того, с возрастанием удельной площади поверхности увеличивается плотность упаковки частиц, тем самым улучшается взаимодействие между компонентами системы, и повышаются прочностные характеристики материала. Установлено, что влагоустойчивость композита связана с химическим взаимодействием активных центров поверхностных макромолекул лигнина с органическим субстратом. Усиление такого взаимодействия при увеличении концентрации глиоксала в системе характеризует уменьшение величины поляризационной составляющей поверхностного натяжения, являющейся количественным показателем наличия активных центров поверхности. Кроме того, на влагоустойчивость композиции в этом случае оказывает влияние процесс смачивания и быстрой пропитки поверхности жидкостью затворения. Так исследование поверхностно-активных свойств водных растворов глиоксала показало, что данное вещество относится к ПАВ [18], понижающим поверхностное натяжение растворителя (воды), увеличивая тем самым глубину проникновения связующего вещества в объем порового пространства твердой фазы (коры).

Разработаны оптимальные составы грунтобетона на основе полимер-органического вяжущего для модельных алюмосиликатных грунтов с разным числом пластичности. Установлено, что для песчано-глинистых грунтов на основе системы «мелкозернистый песок-ССМ» независимо от числа пластичности оптимальное количество глиоксала составляет 0,52 % от массы грунта. Количество коры было принято, исходя из соотношения компонентов кора-глиоксаль $K/\Gamma=40$; количество карбидного ила (И), исходя из содержания аморфной фазы и гидроксида кальция, $ССМ/И=1,33$.

Установлено, что модель грунтобетона на основе полимер-органического вяжущего оптимального состава с минеральным модификатором обладает достаточными структурно-механическими свойствами. Удельное сцепление грунта увеличивается в среднем в 25 раз, а прочность на сжатие в 2,6 раза.

Для апробации полученных результатов проведены испытания разработанной композиции на основе глиоксала, коры и карбидного ила для стабилизации песчано-глинистых грунтов в природно-климатических условиях Северных и Арктических регионов: Норвегия (в рамках совместного проекта UiT-САФУ:

SIU HNP1a-2016/10120) и Архангельская область. В качестве объектов исследования были выбраны супесь (месторождение Норвегии) и суглинок (г. Архангельск). Получены положительные результаты. Созданы грунтобетоны на основе полимер-органического связующего с минеральным модификатором. Так, например, введение в состав супеси нетрадиционного вяжущего повышает ее структурно-механические характеристики в среднем в 2,5 раза, а в суглинок – в 4,3 раза. Следует отметить, что оптимальное содержание вяжущего для различных типов грунта необходимо устанавливать путем проведения уточняющих экспериментов. Данный факт обусловлен возможными генетическими особенностями, различием минералогического и гранулометрического составов испытываемых объектов.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны и научно обоснованы принципы проектирования грунтобетонов на основе полимер-органического связующего с минеральным модификатором. Предложены оптимальные составы и технология введения полимер-органического связующего для получения грунтобетонов на основе алюмосиликатных дисперсных грунтов различных генетических типов.

Исследования выполнены на уникальной научной установке «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем» при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-43-292002 р_мк.

Библиографический список:

1. Лукина, В.А. Временное ограничение движения транспортных средств по автомобильным дорогам Архангельской области / В.А. Лукина, А.Ю. Лукин // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 44-46.
2. Осипов, В.И. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств / В.И. Осипов, В.Н. Соколов. – М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
3. Вдовин, Е.А. Взаимодействие комплексной добавки на основе октилтриэтоксисилана и гидроксида натрия с основными компонентами грунта дорожного назначения / Е.А. Вдовин, Л.Ф. Мавлиев, П.Е. Буланов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1 (31). С. 165-170.
4. Лютенко, А.О. Структурообразование грунтобетонов на основе глинистых грунтов Архангельской алмазоносной провинции при стабилизации цементом / А.О. Лютенко, М.А. Николаенко, М.С. Лебедев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С. 25-30.
5. Firoozi, A. Fundamentals of soil stabilization / A. Firoozi, C. Guney Olgun, A. Firoozi, M. Baghini // International Journal of Geo-Engineering. 2017. Vol. 8. No. 26. P. 1-16.
6. Худайкулов, Р.М. Применение стабилизаторов для улучшения прочности грунтового основания автомобильных дорог / Р.М. Худайкулов, Т.Л. Мирзаев // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 1. С. 12.
7. Pourakbar, S. A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils / S. Pourakbar, B. Huat // International Journal of Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 11. No. 2. P. 206-2016.
8. Younesi-Kordkheili, H. Improving urea formaldehyde resin properties by glyoxalated soda bagasse lignin / H. Younesi-Kordkheili, S. Kazemi-Najafi, R. Behrooz Eshkiki, A. Pizzi // Eur. J. Wood Prod. 2015. No. 73. P. 77-85.
9. Водянкина, О.В. Глиоксаль: монография / О.В. Водянкина, Л.Н. Курина, Л.А. Петров, А.С. Князев. – М.: Academia, 2007. 248 с.

10. Гришин, А.Н. Тонкодисперсное композиционное вяжущее для закрепления грунтов инъекционным способом / А.Н. Гришин, А.И. Панченко, И.Я. Харченко, М.И. Баженов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 11 (110). С. 1289-1298.
11. Černý, V. The influence of different types of siliceous raw materials on tobermorite formation in lime-silica composite / V. Černý, R. Drochytka // WSEAS Transactions on Environment and Development. 2019. No. 15. P. 57-64.
12. Новиков, В.Т. Модификация поливинилацетатной дисперсии глиоксалем для получения защитных покрытий и клеёв / В.Т. Новиков, Ал.С. Князев, Ан.С. Князев, Е.П. Фитерер, Ю.Е. Похарукова, А.В. Яркова // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 10. С. 32-33.
13. Стородубцева, Т.Н. Защитная обработка древесины глиоксалем / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный, С.С. Никулин, А.С. Губин // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 2 (26). С. 148-154.
14. Кудяков, А.И. Влияние органических добавок на свойства цементного теста и камня / А.И. Кудяков, А.С. Симакова, В.А. Кондратенко, А.Б. Стешенко, А.Д. Латыпов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 138-147.
15. Горленко, Н.П. Противоморозная добавка на основе натриевой соли глиоксалевого кислоты / Н.П. Горленко, А.В. Рубанов, Ю.С. Саркисов, Л.В. Масленицына // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5 (52). С. 110-116.
16. Везенцев, А.И. Адсорбционные свойства продуктов обогащения природных монтмориллонитсодержащих глин / А.И. Везенцев, Е.В. Кормош, Н.М. Здоренко, Л.Ф. Голдовская-Перистая // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2011. № 9 (104). С. 103-109.
17. Морозова, М.В. Водопоглощение сапонитсодержащих отходов обогащения кимберлитовых руд / М.В. Морозова, А.М. Айзенштадт, А.С. Тутыгин // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 29–31.
18. Gayda, J.V. Organic-Mineral Aggregate for Sandy Subsoil Strengthening / J.V. Gayda, A.M. Ayzenshtadt, A.S. Tutygin, M.A. Frolova // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 90–97.
19. Соколова, Ю.В. Оценка дисперсионного взаимодействия в алюмосиликатной системе под действием органической добавки / Ю.В. Соколова, А.М. Айзенштадт // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 4. С. 83-88.
20. Гайда, Ю.В. Оптимизация процесса полимеризации глиоксаля – компонента органо-минеральной добавки для укрепления песчаных грунтов / Ю.В. Гайда, А.М. Айзенштадт, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 6-10.
21. Sokolova, Y.V. Kinetic description of heterogeneous processes using surface tension as an information parameter / Y.V. Sokolova, A.M. Ayzenshtadt, M.A. Frolova, V.V. Strolova // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400. P. 077053.

КОМПОЗИТЫ ИЗ МЯГКОЛИСТВЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПОВЫШЕННОЙ БИОСТОЙКОСТИ

И.В. Степина¹, канд. техн. наук, доцент

М. Содомон¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)*

Аннотация. Мягколиственные породы древесины, такие, например, как береза, осина, тополь широко распространены на территории России, характеризуются быстрым набором древесной массы, однако весьма ограниченно используются в современных строительных технологиях. Это объясняется, в первую очередь, их уязвимостью по отношению к плесневым и дереворазрушающим грибам, т.е. низкой биостойкостью. В работе предпринята попытка повышения биостойкости указанных выше пород мягколиственной древесины путем химической модификации и модернизации в этой связи существующей технологии производства древесных композитов. В качестве модификатора использовали «Ксилостат», защитный состав на основе боразотных соединений, разработанный в НИУ МГСУ. Образцы испытываемых пород древесины, модифицированные «Ксилостатом» по результатам исследования в соответствии с ГОСТ 9.048-89 показали высший балл биостойкости. Получено соответствующее заключение лаборатории ИПЭЭ РАН. С учетом стадии антисептирования разработана технологическая схема производства биостойких композитных материалов – ДСПб.

Ключевые слова: древесина, модификация, боразотные соединения, композит, биостойкость.

Особенности макроструктуры природного полимерного древесного композита оказывают значительное влияние на сорбционную способность материала подложки в процессе модифицирования ее какими-либо защитными составами. Очевидно, что, обладая повышенной пористостью мягколиственная древесина таких пород как береза, осина и тополь за счет сил капиллярной конденсации будет наиболее интенсивно впитывать в себя молекулы модификаторов из состава используемых защитных растворов по сравнению с более плотными породами лиственной древесины, например таких как дуб, граб, ясень, а также хвойной древесины наиболее широкой используемой в строительстве сосны и ели. Это позволит неделовой древесине найти применение в современных строительных технологиях наряду с популярными природными материалами в этой области [1-3].

В работе исследовалось не только влияние химического модифицирования на свойства подложки, но и рассматривались вопросы механической обработки материала в процессе производства композитов с новыми заданными свойствами. В результате комплексного воздействия на исходное сырье предполагалось достичь существенного повышения эксплуатационных свойств конечного продукта, такие как биостойкость, прочность, стабильность размеров и формы, плотность и твердость, кроме этого - улучшить эстетические показатели [4, 5] Биостойкость материала органической природы напрямую связано с величиной влажности этого материала, которая в свою очередь определяется условиями эксплуатации и структурой. Уплотняя неделовую древесины путем химико-механического воздействия удается решить большое число важных практических задач [6, 7].

Для исследования биостойкости использовались образцы древесины березы, осины и тополя размером 50x50x10 мм. До проведения исследования часть образцов подвергалась объемной модификации боразотными соединениями, другая часть образцов оставалась немодифицированной. Эти образцы служили в качестве контрольных. Объемную модификацию осуществляли путем погружения образцов в модификатор на три часа. Затем образцы высушивались на воздухе до постоянной массы. Испытания образцов древесины на стойкость к воздействию плесневых и дереворазрушающих грибов проводили в лаборатории тропических технологий ИПЭЭ РАН по ГОСТ 9.048-89. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на биостойкость модифицированных и контрольных образцов древесины мягколиственных пород

№ п/п	Наименование образцов древесины	Внешний вид после испытаний	Балл	Биостойкость, %
1	Береза не модифицированная	80% поверхности занято мицелием и проросшими спорами грибов	4	20
2	Осина не модифицированная	85% поверхности занято мицелием и проросшими спорами грибов	5	15
3	Тополь не модифицированный	85% поверхности занято мицелием и проросшими спорами грибов	5	15
4	Береза модифицированная «Ксилостатом»	Визуально и под микроскопом отсутствие конидий и проросших спор грибов	0	100
5	Осина модифицированная «Ксилостатом»	Визуально и под микроскопом отсутствие конидий и проросших спор грибов	0	100
6	Тополь модифицированный «Ксилостатом»	Визуально и под микроскопом отсутствие конидий и проросших спор грибов	0	100

Из таблицы 1 отчетливо видно, что антисептик «Ксилостат» превосходно справился со своей задачей. 100%-ное отсутствие конидий и проросших спор грибов на обработанных образцах – прямое тому подтверждение.

Модернизация технологической схемы производства биостойких древесных плит заключается в ведении узла антисептирования в стандартную схему [8-10]. Далее представлено описание нововведенных технологических операций. Перед началом антисептирования сушка древесной стружки осуществляется в сушильных барабанах при температуре 105-350°C до влажности 3-6%. В качестве топлива используют древесную пыль, которая образуется после различных технологических операций. Высушенная стружка проходит циклон, где отделяется от воздуха, и осевшая стружка подается в бункер. Перед антисептированием стружки она проходит сортировку, а не прошедшие частицы повторно измельчаются на мельнице и снова направляются на сортировку. «Ксилостат», доставляется по ж/д дороге цистерной, оттуда перекачивается насосом на склад и далее для использования перекачивается также насосом в расходную

емкость. Нанесение антисептика на поверхность стружки древесины лиственных пород осуществляется путем вымачивания в растворе модификатора в ванне в течение трех часов, при этом расход модификатора составляет 200 г/м². После антисептирования необходимо провести повторную сушку антисептированной стружки до влажности 4-6%. Сушка стружки также осуществляется в барабанной сушилке. В топке сушилки сжигается газ или мазут, температура в ней 900—1000° С. На входе в барабан температура сушильного агента достигает 300-350° С, на выходе она от 90 до 120° С. Барабан имеет диаметр 2,2 м и длину 10 м, устанавливается он с наклоном в 2—3° в сторону входа сырой стружки. Высушенная стружка отделяется от воздуха в циклоне и далее подается в вертикальный бункер. Для подачи стружки в смеситель для смешения ее со связующим она проходит сортировку на сортировочной установке. Не прошедшие сортировку стружка проходит дополнительное измельчение на мельнице.

Библиографический список:

1. Орешкин Д.В. Теоретическое обоснование использования древесины мягколиственных пород в строительстве // Строительные материалы. 2015. №7. С. 30-33.
2. Вольфсон С.И., Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Лыгина Т.З., Трофимова Ф.А. Модифицированные древесно-полимерные композиты // Пластические массы. 2014. №1-2. С. 41–44.
3. Курьянова Т.К., Платонов А.Д., Михеевская М.А., Снегирева С.Н., Первакова Е.А. Теоретические основы получения модифицированной древесины // Лесотехнический журнал. 2018. №1. С. 146-154.
4. Кошелева Н.А., Шейкман Д.В. Улучшение эксплуатационных свойств древесины лиственных пород с целью расширения области ее применения // Леса России и хозяйство в них. 2013. №4. С. 56-58.
5. Чельшева И.Н., Плотников Н.П., Афанасьева Н.А. Совершенствование технологии получения древесных композиционных материалов // Лесной вестник. 2017. №5. С. 75–82.
6. Плотников Н.П., Плотников Г.П. Совершенствование технологии производства древесностружечных плит на основе утилизируемых отходов деревообрабатывающих производств // Системы. Методы. Технологии. 2019. №3. С. 100-104.
7. Покровская Е.Н. Получение гидрофобных биостойких материалов при поверхностной модификации древесины // Лесной журнал. 2008. № 3. С. 91—96.
8. Леонович, А. А. Новые древесноплитные материалы [Текст] / А. А. Леонович. – СПб.: Химиздат, 2008. – 160 с.
9. Рабинович, М. Л. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов [Текст] / М. Л. Рабинович, А. В. Болобова, В. И. Кондращенко. – М.: Наука, 2001. – 264 с.
10. Отлев И.А., Штейнберг Ц.Б. Справочник по производству древесностружечных плит. М.: Лесн. промышленность, 1990. 384 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Е. В. Ткач¹, доктор техн. наук, профессор

Ю. С. Шумилина¹, преподаватель

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)*

Аннотация. Рассмотрены технологические параметры получения цементных дисперсных систем для фасадных покрытий. Показано, что оптимизация технологических процессов позволяет разработать дисперсные цементные системы для покрытий с высокой защитной стойкостью при эксплуатации зданий и сооружений. Определено, что оптимизация параметров позволяет подобрать наиболее эффективное соотношение цемента и тонкомолотого наполнителя из бетонного лома, оптимального количества добавок-модификаторов, а далее соотношение коллоидного цементного клея и песка (заполнителя) с целью получения растворных составов для декоративных покрытий, обладающих высокими прочностными показателями. Установлено, что измельчение песка или дробленного бетонного лома позволяет не только повысить их удельную поверхность и получить требуемый гранулометрический состав, но и улучшить качество поверхности частиц путем удаления и разрушения поверхностных неактивных пленок, что повышает реакционную способность наполнителя в различных процессах. Исследования показали, что оптимальными являются фракционные характеристики песка, при которых обеспечиваются плотная упаковка зерен и, примерно, одинаковые доли фракций. Разработанные в процессе оптимизации параметров коллоидно-цементные растворы для декоративных покрытий обладают высокими прочностными показателями, морозостойкостью и малой усадочной деформацией.

Ключевые слова. Цементные системы, механическая активация, помол цемента, декоративные покрытия

Оптимизация технологических процессов позволяет получить максимальную поверхность твердого вещества при минимальных затратах энергии [1-6]. Механическая активация, которая позволяет в полной мере раскрыть скрытые свойства одних веществ и использовать потенциальные возможности других (вяжущих веществ) [2-5]. Среди способов механической активации смесей бетонов различают активацию прессованием, измельчением, перемешиванием и т.д. Первые попытки применить механоактивацию в технологии производства строительных материалов связаны с приготовлением вяжущих веществ, когда при повторном помолу цемента увеличивается его реакционная способность и удельная поверхность, что интенсифицирует процесс твердения изделий на таком вяжущем и сокращает его расход в них. Механоактивация в полной мере приобретает прикладное значение, совершенствуя существующие технологические схемы и раскрывая принципиально новые способы производства, целиком, основанные на технологических процессах с появлением высокоэффективного измельчающего оборудования.

Ударное и ударно-истирающее измельчение цементного порошка позволяет существенно повысить его физико-химическую активность наиболее рациональным способом, в большей мере за счет корректировки гранулометрического состава, изменения формы зерна [10,11]. С точки зрения достижения высокой интенсивности механической обработки и производительности, наиболее перспективными являются электромагнитные мельницы, в которых энергия

электромагнитного поля непосредственно преобразуется в кинетическую энергию движения размольных элементов [9-11]. Для получения осколочной формы частиц используются цилиндрические размольные элементы с острыми гранями.

Механоактивация функциональных добавок различного назначения [10] позволяет увеличить их рабочую поверхность в несколько раз, повысить их химическую активность настолько, что показатели качества сухих строительных смесей улучшаются на 15 %.

Механизм действия виброактивации цементно-песчаных смесей направлен на увеличение удельной поверхности вяжущего, изменение поверхностной структуры твердых частиц и ускорение взаимодействия компонентов системы «цемент-вода-песок».

Виброактивация вызывает изменение в системе активных составляющих цементного клинкера, и в первую очередь повышенный выход трехкальциевого алюмината (С3А), отвечающего за набор прочности в начальный период гидратации [3, 11]. Технология измельчения вяжущих материалов для повышения вязкостных и реологических характеристик тонкомолотых цементных систем реализуется в вибрационных скоростных аппаратах, что обеспечивает повышение дисперсности вяжущих материалов при меньших энергозатратах. Критериями эффективности управления процессами формирования структур в технологии получения растворов на основе коллоидных цементных систем, являются: достижение предельной однородности распределения дисперсных фаз во всем объеме дисперсной системы.

Рецептура коллоидно-цементных растворных смесей предусматривает наличие как дистрибутивных, так и дисперсионных транспортных процессов внутри смесителя [21]. Исследования [8-11] показали, что эффективность перемешивания зависит от размера частиц.

В этой связи при разработке методов их получения важно правильно определить составы смесей и подобрать условия их смешивания для получения однородного распределения дисперсных частиц во всем объеме дисперсной среде.

Для разработки декоративных покрытий на основе коллоидных цементных материалов выбраны способы переработки исходного сырья механохимической активации, виброперемешивания и модифицирования дисперсных систем ПАВ и другими добавками, позволяющие получить высококонцентрированные дисперсные коллоидные цементные материалы с низкой эффективной вязкостью и высокими эксплуатационными свойствами.

Для получения декоративных покрытий на основе коллоидных цементных смесей использовали бездобавочный портландцемент компании ТОО «Бухтарминская цементная компания», природные пески, различные наполнители (дробленный бетонный лом, метакаолин и др.), добавки и пигменты. Взамен природного песка также применяли дробленный бетонный лом. Отходы тяжелого бетона, полученного из портландцемента ПЦ400-Д0 по ГОСТ 10178, подвергали дроблению и рассеву для выделения фракции с размерами зерен менее 5 мм. Согласно химическому и минералогическому анализу, отсев дробления соответствует требованиям, предъявляемым к заполнителю, по зерновому составу модуль крупности песка ($M_k=2,8$), по полному остатку на сите 0,63 и 0,16

относится к крупному. Для получения стабильных результатов исследований смесей для декоративных покрытий песок из дробленного бетонного лома фракционировали.

Истинная плотность песка из отсева бетонного лома фракции 2,5-0,16 составила $2,64 \text{ г/см}^3$, фракции 1,25-0,16 – $2,56 \text{ г/см}^3$. Насыпная плотность песка фракции 2,5-0,16 составила 1586 кг/м^3 , фракции 1,25-0,16 – 1594 кг/м^3 . Песок обладает пустотностью 39,6 % для фракции 2,5-0,16 и 38,5 % для фракции 1,25-0,16.

Для модифицирования цементных коллоидных материалов применяли различные добавки. Для изучения основных свойств тонкомолотых цементных систем с наполнителями различного генезиса была исследована добавка редисперсный полимерный порошок (РПП). Для улучшения гидрофобных свойств коллоидных цементных систем применялись порошковые гидрофобизаторы различной химической основы. В технологии коллоидных цементных материалов использовали активные минеральные добавки (метакаолин) [7].

Характеристики и вещественный состав сырьевых материалов, добавок по результатам проведенных исследований и испытаний показывают возможность их применения для получения декоративных покрытий на основе коллоидных цементных смесей.

Проведены исследования по оптимизации основных технологических параметров производства коллоидных цементных систем для отделки наружных панелей. Ранее выполненными исследованиями было установлено, что пески и дробленный бетонный лом обладают хорошей размалываемостью. Экспериментально было определено, что оптимальная дисперсность цемента и наполнителя составляет $550\text{-}560 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Измельчение песка или дробленного бетонного лома позволяет не только повысить их удельную поверхность и получить требуемый гранулометрический состав, но и улучшить качество поверхности частиц путем удаления и разрушения поверхностных неактивных пленок. Создание вновь образованной улучшенной (без загрязнений) поверхности зерен наполнителя повышает его реакционную способность в различных процессах [8-9].

Поэтому были выполнены исследования по оптимизации параметров тонкого помола цемента и наполнителей (природного песка и дробленного бетонного лома). Ранее было установлено, что совместная активация компонентов коллоидного цементного вяжущего (клея) с модифицирующей добавкой приводит к повышению прочности образцов во все сроки твердения, особенно в первые сутки, почти в 1,5 раза. При этом ввод модифицирующих добавок обеспечивает возрастание в цементном камне количества низкоосновных гидросиликатов кальция, обладающих клеящей способностью и способствующих увеличению адгезионной прочности раствора для декоративных покрытий.

В процессе гидратации и твердения коллоидного цементного композита происходит изменение структуры цементного камня, которые сопровождаются самоорганизацией структуры на протяжении всего периода взаимодействия портландцемента с тонкомолотым наполнителем и модифицирующими добавками [7-20].

Основной задачей оптимизации составов коллоидного цементного вяжущего являлся подбор наиболее эффективного соотношения цемента и тонкомолотого наполнителя из бетонного лома, оптимального количества добавок-модификаторов, а далее соотношение коллоидного цементного клея и песка (заполнителя) с целью получения растворных составов для декоративных покрытий, обладающих высокими прочностными показателями. Исследования показали, что с увеличением содержания наполнителя отмечается замедление сроков схватывания цементного теста, связанное с тем, что в условиях изменяющегося количества цемента относительное содержание минералов в нем, вступающих в реакцию гидратации с водой, уменьшается. Выявлено, что наполнитель метакаолин и вводимая полимерная добавка с момента затворения водой оказывают на цементное тесто пептизирующее и структурообразующее действие, ускоряя тем самым процесс гидратации и твердения цементного камня.

Для оценки свойств коллоидного цементного вяжущего был выбран оптимальный состав: расход цемента в составе вяжущего принят 70 %, расход тонкомолотых бетонного лома или природного песка – 30 %. Высокая дисперсность порошка ($550 \text{ м}^2/\text{кг}$) способна обеспечить необходимую кинетику формирования свойств коллоидного цементного клея для декоративных покрытий в условиях тонкослойной технологии, при минимальном расходе модифицирующих добавок и обеспечивает повышенную пластичность и водоудерживающую способность смеси, а также позволяет снизить расход на единицу поверхности за счет нанесения тонким слоем, т.к. минеральный состав подобран таким образом, чтобы расход модифицирующих добавок был минимальным.

Формирование структуры наполненных цементных композитов – это результат совместного протекания структурообразования и формирования пространственного кристаллического каркаса [4]. Ранее проведенные исследования показали, что тонкомолотый наполнитель принимает самое активное участие в формировании прочности наполненной цементной системы и для этого необходима оптимальная концентрация дисперсной составляющей.

Структурообразование в коллоидно-цементных системах – это результат синтеза химического, физико-химического и физико-механического процессов, в результате которых формируется прочность камня, в чем песок (заполнитель) принимает самое активное участие [30]. Песок является неотъемлемым компонентом коллоидно-цементных клеевых составов. Для разных работ и слоев раствора используют песок с различным размером зерен, которые позволяют сократить расход КЦВ (вяжущего) без заметного падения прочностных характеристик цементного камня, а также снизить усадочные деформации

Для создания эффективных составов необходимо применение комбинации нескольких фракций песка, которые будут дополнять характеристики другого. В составах, предназначенных для нанесения тонким слоем, должны содержаться пески не крупнее 1,25 мм. Составы, предназначенные для нанесения фактурных, декоративных штукатурок и для нанесения толстым слоем основаны на песках с наибольшей крупностью 2,5-1,255 мм.

Для подбора оптимального состава смеси для декоративных покрытий на основе коллоидного цементного вяжущего был использован природный песок с

крупностью зерен 0,16-2,5 мм. Песок использовали сухой, чистый с оптимальной гранулометрией (зерновым составом) в соответствии с назначением изготавливаемой смеси для декоративных покрытий. Для разных слоев раствора использовали зерна песка различного размера. Для верхнего слоя использовали 1,25-0,63 мм, для первых слоев принимали песок с размером зерен 2,5-1,25 мм. Песок, используемый для экспериментов, имел остро ребристую и шероховатую поверхность, что обеспечивало хорошее сцепление с коллоидным цементным вяжущим.

Наиболее эффективным с точки зрения технологии и затрат на просеивание является разделение песка на фракции с размерами частиц 2,5-1,25, 1,25-0,63, 0,63-0,315, 0,315-0,16.

Влияние гранулометрического состава песка на прочностные характеристики декоративных покрытий на основе коллоидного цементного клея зависит от соотношения коллоидного цементного вяжущего к песку. Установлено, что наименьшей прочностью обладают образцы, полученные при использовании мелкого песка с модулем крупности 1,0-1,5, при соотношении вяжущее: песок (1:3). Наибольшей прочностью обладают образцы при использовании средних песков с модулем крупности 2,0-2,5. Исследования показали, что очень важно поддерживать оптимальные ситовые характеристики песка, при которых обеспечиваются плотная упаковка зерен и, примерно, одинаковые доли фракций.

Оптимальную гранулометрию песка определяли соотношением фракций заполнителя, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц. Максимальное значение насыпной плотности служило критерием плотной упаковки зерен песка. Измерение плотности природного песка проводили по СТ РК 1217. Истинная плотность песка фракции 2,5-0,16 мм составила 2,64 г/см³, фракции 1,25-0,16 мм – 2,56 г/см³. Насыпная плотность песка фракции 2,5-0,16 мм составила 1586 кг/м³, фракции 1,25-0,16 мм – 1594 кг/м³. Была определена пустотность крупной и мелкой фракций песка. Экспериментальные исследования показали, что наименьшим значением межзерновой пустотности обладает песок фракции 1,25-0,16 мм – 20,35 %. Песок фракции 2,5-0,16 мм обладает пустотностью 21,8 %.

Гранулометрический состав песка, обеспечивающий максимальную упаковку зерен, также представлен в таблице 2. На основе результатов исследований был выбран ряд составов (таблица 2), которые обладают наиболее улучшенными технологическими и физико-механическими характеристиками. Исследования показали, что коллоидно-цементные смеси, в состав которых входят крупные фракции песка, обладают более высокими прочностными показателями (1, 3, 4, 5, 8, 9 и 11). Фракция песка 2,5-1,25 мм создает каркас и влияет на прочностные характеристики. Более мелкие фракции песка 1,25-0,63 мм, являясь средними, заполняют межзерновое пространство более крупных фракций. Из однофракционных составов наибольшими прочностными характеристиками обладают составы 14 и 15. С увеличением содержания более мелкой фракции 0,63-0,315 мм и 0,315-0,16 мм возрастает насыпная плотность смеси за счет получения в них более плотной упаковки зерен. Увеличение в составе смеси фракции 1,25-0,63 мм и 2,5-1,25 мм, приводит к снижению плотности упаковки зерен при максимальном содержании фракции 0,315-0,16 мм.

Таблица 1. Гранулометрический состав песка, обеспечивающий максимальную упаковку зерен

Номер состава	Вяжущее	Фракции песка, мм				Насыпная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/м ³
		2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16		
для выполнения штукатурных покрытий							
1	100	100	100	100	-	1440	1510
2	100	100	-	100	100	1430	1490
3	100	100	200	-	-	1425	1485
4	100	100	-	200	-	1430	1490
5	100	200	100	-	-	1420	1495
6	100	200	-	100	-	1400	1470
7	100	200	-	-	100	1390	1460
для нанесения тонких штукатурных накрывочных покрытий							
8	100	-	100	100	100	1430	1485
9	100	-	100	200	-	1435	1495
10	100	-	100	-	200	1425	1485
11	100	-	200	100	-	1420	1490
12	100	-	200	-	100	1410	1475
13	100	300	-	-	-	1390	1460
14	100	-	300	-	-	1380	1455
15	100	-	-	300	-	1380	1450
16	100	-	-	-	300	1375	1445

Исследования показали, что коллоидно-цементные смеси, в состав которых входят крупные фракции песка, обладают более высокими прочностными показателями (1, 3, 4, 5, 8, 9 и 11). Фракция песка 2,5-1,25 мм создают каркас и влияют на прочностные характеристики. Более мелкие фракции песка 1,25-0,63 мм, являясь средними, заполняют межзерновое пространство более крупных фракций. С увеличением содержания более мелкой фракции 0,63-0,315 мм и 0,315-0,16 мм возрастает насыпная плотность смеси за счет получения в них более плотной упаковки зерен. С увеличением в составе смеси фракции 1,25-0,63 мм и 2,5-1,25 мм, наоборот, приводит к снижению плотности упаковки зерен, при максимальном содержании фракции 0,315-0,16 мм.

Как показали результаты экспериментальных исследований установлено, что наибольшей скоростью набора прочности в ранние и последующие сроки обладают составы 1, 3, 4, 5, 8, 9 и 11.

Следующим важным технологическим показателем коллоидно-цементных растворных смесей является водоудерживающая способность, обеспечение высоких показателей которой позволяет предотвратить расслоение смеси и нанести их на пористые основания. Согласно ГОСТ 31357 водоудерживающая способность должна составлять не менее 95 %. Экспериментально установлено, что все составы обладают водоудерживающей способностью 98-99 %, что значительно выше требуемых значений.

Были проведены исследования свойств коллоидных цементно-песчаных растворов в соответствии с ГОСТ 5802 и ГОСТ 31356 на образцах-кубиках размером 70×70×70 мм. Определение капиллярного водопоглощения проводили на образцах-балочках 40×40×16 мм. При изготовлении образцов сначала переме-

шивали сухие компоненты, после чего смесь затворяли водой. Подвижность смесей была одинаковой и составляла 8-9 см. Исследования затвердевших растворов проводили после 28 суточного хранения образцов в нормально-влажностных условиях. Для проведения испытаний готовили цементно-песчаные растворы при соотношении вяжущее: песок 1:3. В качестве заполнителя использовали смесь фракций песка 2,5-1,25, 1,25-0,63 и 0,63-0,315 в соотношении 40:30:30. Для растворов для нанесения тонких штукатурных покрытий использовали песок фракции 0,63-0,315 и 0,315-0,16. Результаты исследований водопоглощения приведены в таблице 3.

Исследование коллоидно-цементных растворов на основе разработанных составов показало, что водонепроницаемость полученных растворов составляет от 1,2 до 1,6 МПа, что соответствует марке по водонепроницаемости В10-В16.

Морозостойкость цементного камня на основе коллоидного цементного клея (КЦК) составляет минимум 300 циклов попеременного замораживания и оттаивания в воде. Исследования морозостойкости КЦК показали, что главным фактором, который определяет величину напряжений в стенках капилляров цементного камня при замерзании воды, определяет не только степень заполнения имеющихся капилляров водой, но и внутренние размеры капилляров и толщина стенок.

Таблица 3. Водопоглощение образцов

Наименование растворной смеси	Водопоглощение, % по массе	Водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/м ² ·ч ^{0,5}
Коллоидно-цементный раствор для штукатурных покрытий	5,5	0,35
Коллоидно-цементный раствор для тонких накрывочных покрытий	5,3	0,32

Основные свойства коллоидно-цементных растворных смесей и затвердевшего раствора представлены в таблице 4 (номера составов приведены в таблице 2).

Из результатов проведенных исследований следует (таблица 4), что разработанные коллоидно-цементные растворы для декоративных покрытий обладают не только необходимой подвижностью, но и высокими прочностными показателями: предел прочности при сжатии в 28-суточном возрасте – 59,0-59,9 МПа; прочность сцепления с основанием – 2,0-2,52 МПа. Использование тонкомолотого бетонного лома, применяемого в качестве добавки-наполнителя в портландцемент, позволяет изготавливать эффективные высокопрочные декоративные покрытия с удельным расходом коллоидно-цементного порошка от 8,7 до 11,7 кг на 1 МПа прочности. Полученный коллоидный цементный материал характеризуется малой усадочной деформацией (0,313-0,694 мм/м).

Таблица 4. Основные свойства коллоидно-цементных смесей и затвердевшего раствора

Параметр	Номер состава							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Водоудерживающая способность смеси, %	99,87	98,1	99,84	99,85	98,65	98,4	98,25	98,75

Сохраняемость смеси, мин		55	50	50	50	45	50	50	45
Марка по подвижности		Пк3							
Плотность смеси, кг/м ³		3139	2140	2136	2125	2121	2140	2152	2145
Водопоглощение, % по массе		3,2	3,9	3,3	3,5	3,4	4,5	4,7	4,0
Водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/м ² · ч ^{0,5}		0,17	0,19	0,18	0,19	0,18	0,29	0,32	0,27
Предел прочности при сжатии, МПа	1 сут	19,5	18,8	19,2	19,5	9,3	18,9	8,7	18,0
	3 сут	27,1	26,4	27,5	27,0	26,5	26,5	26,2	25,2
	28 сут	59,9	58,7	59,5	59,6	59,4	59,2	59,0	59,3
Предел прочности при изгибе, МПа	1 сут	2,52	2,43	2,50	2,51	2,51	2,32	2,2	2,51
	3 сут	4,1	3,37	3,39	3,95	2,37	3,15	3,0	3,9
	28 сут	8,1	7,9	8,0	7,8	7,9	7,4	7,2	7,8
Усадка (-) / набухание (+), мм/м		-0,315	-0,476	-0,372	-0,404	-0,388	-0,392	-0,523	-0,650
Марка по морозостойкости		F400	F350	F400	F400	F400	F300	F300	F350

Параметр	Номера составов							
	9	10	11	12	13	14	15	
Водоудерживающая способность смеси, %	98,82	98,5	98,9	98,4	97,2	98,4	98,4	
Сохраняемость смеси, мин	50	40	45	40	40	45	50	
Марка по подвижности	Пк3							
Плотность смеси, кг/м ³	2147	2150	2149	2152	2149	2155	2160	
Водопоглощение, % по массе	4,0	4,4	4,0	4,3	4,3	4,4	4,5	
Водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/м ² · ч ^{0,5}	0,26	0,29	0,25	0,28	0,29	0,30	0,31	
Предел прочности при сжатии, МПа	1 сут	18,3	18,0	18,5	17,5	15,3	0,5	0,0
	3 сут	25,25	23,6	25,1	23,5	228	22,9	22,4
	28 сут	59,0	58,6	59,5	59,0	57,6	58,2	57,8
Предел прочности при изгибе, МПа	1 сут	2,48	2,35	2,48	2,10	1,70	1,40	1,35
	3 сут	3,89	3,10	3,90	3,20	2,50	2,10	2,00
	28 сут	7,7	7,40	7,80	7,20	6,40	6,50	6,20
Усадка (-) / набухание (+), мм/м	-0,410	-0,654	-0,379	-0,588	-0,400	-	0,426	0,685
Марка по морозостойкости	F400	F350	F400	F400	F400	F300	F300	

Оптимизация основных технологических параметров позволила получить сухие строительные смеси для декоративных покрытий бетонов, обладающие высокими эксплуатационными свойствами.

Исследования показали, что с увеличением содержания наполнителя отмечается замедление сроков схватывания цементного теста, связанное с тем, что в условиях изменяющегося количества цемента относительное содержание минералов в нем, вступающих в реакцию гидратации с водой, уменьшается.

Увеличение содержания песка в растворной смеси способствует уменьшению развития деформации усадки, снижению риска распространения усадочных трещин и разрушению покрытия, а также снижению доли вяжущего, а значит и цемента, что является приоритетным направлением повышения экономической эффективности.

По своим строительно-техническим характеристикам разработанные сухие строительные смеси соответствуют требованиям, предъявляемым к этим видам строительных материалов, а по некоторым показателям значительно их превышают и могут быть рекомендованы в качестве базовых составов для производителей сухих строительных смесей. Полученные результаты подтверждают перспективность использования тонкомолотого бетонного лома, который представляет собой экологически чистый материал, в качестве наполнителей в кол-

лоидном цементном вяжущем для снижения расхода цемента, а также для стабилизации смеси и предотвращения водоотделения.

Таким образом, выполненные исследования показали, что оптимизация технологических параметров получения декоративных покрытий на основе дисперсных цементных систем приводит к улучшению технологических свойства смесей, прочностных и эксплуатационных характеристик конечного продукта.

Библиографический список:

1. Захаров С.А. Оптимизация составов бетонов высокоэффективными поликарбоксилатными пластификаторами // Строительные материалы. – 2008. № 3. – С. 42 - 43.
2. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Пуршева А.В., Ахметзянова М.А., Худовекова Е.А. Цементы низкой водопотребности центробежно ударного помола// Строительные материалы. 2019.– № 1–2.- С. 23-27.
3. Шишкин А. А., Астахова Н. В. Активированные вяжущие вещества и бетоны на их основе. – М., 2001.– 103 с.
4. Юдович Б.Э., Звездов А.И., Джантимиров Х.А. Сухие смеси на основе наномодифицированного цемента //Строительные материалы. 2019.– № 7. –С. 57-59.
5. Овчинников Д.А. Исследование конструктивно-технологических параметров установки для пневматической механоактивации цемента // Фундаментальные исследования. 2013. – № 4-3. – С. 586-591.
6. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В., Гридчин А.М. Повышение реакционной способности наполнителей в результате помола // Строительные материалы. 2010. –№ 12. – С. 81-83.
7. Морозов М.Н., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Сравнительная оценка мельниц по размолоспособности песка и его эффективности в цементных бетонах // Известия Казанского ГАСУ. 2011. – №1.– С.177-181.
8. Шишканов К.А., Дмитрак А.Ю. Анализ конструкций и основных характеристик вибрационных мельниц // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011.– № 4.– С. 324.
9. Беззубцева М.М., Волков В.С. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения // Успехи современного естествознания. 2014. – № 5–1. – С. 182–182.
10. Беззубцева М.М. Прикладные исследования энергоэффективности электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал экспериментального образования. 2016. – № 9–1. – С. 83–83.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

С.М. Усачев¹, канд. техн. наук, доцент

В.Т. Перцев¹, д-р техн. наук, профессор

Л.В. Стенюхин¹, канд. физ-мат. наук, доцент

¹*Воронежский государственный технический университет*

Аннотация. В работе представлено применение топологического научного подхода для изучения структуры строительных композитов различного состава и свойств. Данный подход применим для дискретных систем, к которым относятся практически все строительные композиты конгломератной, фрактально-кластерной структуры, наблюдаемой на различных масштабных уровнях. Реализация топологического подхода позволила создать высококачественные строительные композиты на основе минеральных вяжущих веществ при полномасштабном конструировании структуры от нано- до макромасштабного уровня с учетом влияния внутренних и внешних сил на каждом масштабном уровне структуры. Получены строительные композиты с фрактальной размерностью структуры D более 1,5-1,6 и улучшенными физико-механическими свойствами: классом по прочности В90, маркой по морозостойкости F400, с водопоглощением не более 4,2 % и истираемостью менее 0,4 г/см², водонепроницаемостью – W12.

Ключевые слова: топология, дискретные системы, строительный композит, фрактально-кластерная структура.

Теоретическая часть. Научная многогранность строительного материаловедения основывается на знаниях фундаментальных наук и охватывает широкие области исследований материалов и конструкций для строительства. Теоретическим фундаментом современного строительного материаловедения являются представления о процессах формирования структуры дисперсно-зернистых материалов, изложенные в механике гетерогенных сред, вибрационной механике, статистической физике, физической и коллоидной химии и другие. В последние десятилетия большой импульс развитию современного строительного материаловедения дали исследования [1-9], в которых реализуется подход, основанный на неформальном представлении многоуровневой структуры композиционных материалов, представлена качественная и количественная оценка структурных уровней и показана возможность управления свойствами композитов через их структуру. Развиваются новые научные подходы, знания и методы изучения структуры и свойств строительных композитов, в том числе, базирующиеся на топологии и геометрии. Здесь стоит отметить, например, непосредственное применение аппарата комбинаторной топологии к изучению качественных свойств графена [10], использование элементов общей, элементарной, метрической или алгебраической топологии [11-13], но нас в большей степени интересует структурная топология.

Структурная топология – раздел топологии, изучающий структуру и свойства геометрических объектов, их инвариантность и трансформацию при непрерывных преобразованиях в системах, наделенных дискретностью. В строительном материаловедении к дискретным системам относятся: высокодисперсные составляющие, такие как наномодификаторы, тонкодисперсные наполнители, неорганические и органические фибры, различные химические и мине-

ральные добавки, зернистые и дисперсные наполнители и искусственные композиты с их использованием. Дискретность характеризуется наличием в неупорядоченных или упорядоченных системах элементов создаваемых структур: частиц наполнителя в матричной основе, пор в ячеистых материалах, зерен наполнителей в бетонах или растворах и других.

Некоторые топологические элементы структуры, применяемые для описания систем с использованием геометрических моделей, представлены в таблице 1. Их можно разделить на три группы.

В первой группе элементы теоретико-множественной топологии - элемент и множество, с помощью которых изучаются сложные геометрические системы, обладающие дискретностью, конгруэнтностью, гомеоморфизмом и гомотопией. Это не всегда подходит для изучения реальных систем и их структуры.

Во вторую группу входят геометрические объекты и их структурные элементы, являющиеся элементами евклидова пространства, позволяющие вести описание метрических и аналитических структур. Говоря об элементах второй группы, следует отметить, что топология в исследованиях неупорядоченных систем, использует в основном, элементы, особенность которых состоит в измерении геометрических свойств в относительных величинах. Прежде всего – это плотность упаковки и координационное число. Подобный формализм в описании систем приводит к тому, что данные величины не отражают полный вид структуры системы, их трудно применить и с помощью них оценить структуру реальных дисперсно-зернистых систем, не все особенности формирования структуры композита могут быть учтены при таком подходе, особенно на различных масштабных уровнях структуры. Структурная топология не приводит к точному количественному значению параметров структуры композита, но использование её методов и принципов может дать значительные результаты в материаловедческих задачах.

Все строительные композиты, являясь дисперсными и пористыми материалами, относятся к дискретным системам, в которых твёрдая, жидкая и газообразная фазы распределены случайным образом. Такие системы обладают топологическими и геометрическими свойствами канторовских множеств, повторяющимися на разных масштабных уровнях структуры. Данные структуры называются фракталами и к ним применяются методы фрактальной геометрии. Они и формируют третью группу топологических элементов структуры.

Таблица 1. Классические и фрактальные элементы структуры композита

Наименование	Обозначение	Составные элементы	Описание
1. Топологические (математические) элементы			
Элемент	x	-	Единый компонент
Множество	A	$x \in A$	Состоящий из элементов Множеству A принадлежит элемент x
Пустое множество	\emptyset	$x \in A$	Множество без элементов
Равенство множеств	$A=B$	$\{1, 2, 3\} = \{3, 2, 1, 2\}$	Множества равны, так как содержат одинаковые элементы
2. Геометрические (евклидовы) элементы			

Наименование	Обозначение	Составные элементы	Описание
Точка	a	-	Нумерная фигура, не имеет размера
Линия	l	След движения точки	Линия имеет одну размерность
Поверхность	S	Длина без ширины, Двумерная фигура, ограниченная линиями	Поверхность имеет две размерности
Пространство	V	Объемная фигура	Пространство 3-х мерное
Случайная упаковка	η	$\eta \leq 1$	Произвольное размещение фрагментов с регулярной укладкой
Плотность упаковки	η_1	$\eta_c \leq \eta_1 \leq 1$	Плотность упаковки элементов в системе.
Критическая плотность упаковки	η_c	$\eta_c \leq \eta_1^{10/3}$	Объемная доля элементов структуры в полностью неупорядоченной системе
Координационное число	Z	$6 < Z < 12$	Число контактов элемента структуры в системе
3 Фрактальные элементы структуры			
Фрактальная размерность структуры	D	$1 \leq D \leq 2$ $2 \leq D \leq 3$	Размерность неупорядоченных дискретных систем для плоских и объемных фигур

Основы фрактально-кластерного подхода широко представлены в работах В. Мандельброта, Е. Федера, Ф. Хаусдорфа, М. Шредера и других. Применение данного подхода для описания и поведения конденсированных сред изложены в работах А.Н. Олемского, А.Я. Флата, П. Миллса и других. Изучение свойств дисперсно-зернистых систем и модельных структур с применением фрактально-кластерной теории показано в исследованиях [14-17] и других. Таким образом, можно говорить о возможности и даже необходимости применения фрактальной размерности структур D для описания неоднородных систем.

Применение фрактально-кластерной теории позволяет: 1) изучить не регулярные и не упорядоченные системы, для описания которых не применимы классические геометрические методы; 2) дать геометрические особенности строения сложно организованных систем; 3) изучить системы содержащие структуры и подструктуры, как на больших, так и на меньших масштабах; 4) оценить некоторую форму самоподобия фракталов (мультифракталов) на разных масштабных уровнях.

В научных работах существуют попытки связать топологическую и фрактальную размерность систем, применяя эмпирические зависимости. Наиболее подходящей является математическая модель [18], которая показывает зависимость фрактальной размерности D от размерности евклидова пространства, через топологический параметр структуры, плотность упаковки и класс прерывистости гранулометрического состава систем:

$$D = d \left[1 + \frac{\ln \Phi_c}{m \Phi_{кр}} \right] \quad (1)$$

где d – размерность евклидова пространства;

Φ_c – топологический параметр структуры – общая объемная доля твердой фазы ($\Phi_c = 1 - \Pi$);

Π – пористость;

$\Phi_{кр}$ – предельная доля твердой фазы в системе ($\Phi_{кр} = 0,79 - 0,97$).

$$\Phi_{кр} = \ln(10\eta_1^3) \quad (2)$$

где η_1 – наибольшая плотность упаковки монодисперсных элементов структуры ($0,41 \leq \eta_1 \leq 0,74$);

m – класс прерывистости при подборе гранулометрического состава системы:

$0 \leq m \leq 3$ – непрерывная гранулометрия зернистых систем;

$3 \leq m \leq 6$ – прерывистая гранулометрия;

$6 \leq m \leq 12$ – фильтрационная прерывная гранулометрия;

$m > 12$ – составы при отсутствии степени влияния пустот в случайной упаковке крупных зерен на плотность упаковки в них зерен мелких фракций.

В работе [18] на основе решения данного уравнения доказано, что при большом количестве фракций для заполнения системы $n \gg 1$ фрактальная размерность структуры D стремиться к евклидовой размерности d . С увеличением плотности упаковки фрактальная размерность случайно упакованных элементов структуры повышается. Также с уменьшением пористости систем фрактальная размерность повышается, и стремиться к топологической величине 2 или 3, в зависимости от рассмотрения плоского или объемного объекта для расчета.

Практическая часть. Изложенные предпосылки являются научной концепцией работы, позволяющие объединить вид структуры с её геометрическим построением и размерностью. Таким образом, проблема создания структуры композиционных материалов с требуемыми топологическими характеристиками в работе является приоритетной. Структуры, создаваемые на различных масштабных уровнях, обеспечивающие основные свойства строительных композитов, должны иметь фрактальную размерность близкую к евклидовой d . С этим научным направлением связываются возможности технического прорыва, который может обеспечить улучшение показателей свойств материалов как минимум на порядок.

Применение фрактально-кластерной теории в нашей работе и позволило оценить структурную размерность строительных композитов, используя следующие общие структурные особенности данных систем:

1. наличие конгломератной структуры (матрица + включение);

2. разделение на масштабные уровни структуры (от нано до макро);

3. формирование фрактально-кластерных структур на всех масштабных уровнях;

4. идентичность внутренних сил при формировании структуры;

5. схожесть внешних воздействий при перемешивании, транспортировании и уплотнении.

Следует отметить, что формирование структуры композиционных материалов — это сложная совокупность процессов, протекающих на фоне непрерывно изменяющихся энергетических взаимодействий фаз, составляющих компо-

зит. Ионно-электростатические и молекулярные межфазные силы проявляются в виде поверхностного натяжения, капиллярно-пленочных давлений в межчастичных, межагрегатных, межпоточных взаимодействиях частиц на различных масштабных уровнях структуры. Влияние данных сил, которые мы определяем как внутренние силы, значительно зависит от состава композита и других технологических факторов и при определенных условиях оказывает решающее влияние на получаемую структуру композита и соответственно его свойства.

Для рассмотрения действия внутренних сил, проявляющихся на межфазных границах, в межчастичном и межагрегатном взаимодействии, в современной науке и технологии обосновано отводится важная роль, но процессы рассматриваются отдельно от процессов других масштабных уровней. Полученные результаты, например, на наноуровне сразу переносятся на уровень готового изделия без описания явлений на микро- и мезомасштабных уровнях структуры. Не полно рассматриваются вопросы самоорганизации, которые протекают под действием только внутренних сил. Например, отсутствует комплексный подход к изучению структуры композитов в вопросах проектирования состава, подбора добавок, что особенно ярко проявляется в технологии самоуплотняющихся, быстротвердеющих бетонов, сухих технологиях [19, 20].

Такая фрагментарность является как минимум предпосылкой, для последовательного целенаправленного рассмотрения формирования структуры строительных композитов под влиянием внешних воздействий на всех масштабных уровнях. Именно по-масштабное рассмотрение внутренних сил, является основополагающим фактором в управлении процессами получения композитов с требуемой структурой. Соответственно, применяя различные виды внешних воздействий, можно целенаправленно изменять складывающийся баланс внутренних и внешних сил.

Исходя из озвученной проблематики вопроса, основной **целью работы** является разработка научно-практических подходов создания строительных композитов требуемой фрактально-кластерной структуры, и соответственно свойств, за счет целенаправленного управления процессами структурообразования на всех масштабных уровнях при широком варьировании составов с учетом баланса внутренних и внешних сил [18]. Предложено осуществлять «конструирование» композитов по принципу «снизу-вверх» от нано- к макроуровню с учетом физико-химических явлений, энергетических потоков, силовых взаимодействий и взаимовлияния внутренних и внешних сил на каждом масштабном уровне с оценкой геометрического построения систем (рисунок 2).

Таблица 2. Схема «конструирования» структуры строительных композитов по принципу «снизу-вверх»

Масштабные уровни структуры	Направление исследований	Объекты изучения	Входные параметры	Явления и процессы, характерные для данного масштабного уровня	Выходные параметры
МАКРОУРОВЕНЬ (более 10^{-3} м)		Структура бетона, частицы крупных заполнителей, макропоры	Режимы перемешивания бетонной смеси, формования и твердения бетона, параметры внешних воздействий, конструктивные особенности аппаратов. Баланс внутренних и внешних сил	Процессы организации структуры на макроуровне под действием внутренних и внешних сил, диссипативные и гравитационные силы	Свойства строительного композита (в зависимости от вида бетона), энергетические затраты, материальные затраты. Макроструктура композита
МЕЗОУРОВЕНЬ (10^{-6} - 10^{-3} м)		Структура МЗБ, остаточные зерна непрореагировавших частиц, частицы мелкого заполнителя, капиллярные поры	Гранулометрия и форма частиц мелкого заполнителя, свойства поверхности частиц заполнителя, плотность упаковок частиц заполнителей	Процессы межчастичного и межагрегатного взаимодействия, гравитационные силы	Структура и свойства МЗБ на мезоуровне, структура и свойства смесей
МИКРОУРОВЕНЬ (10^{-8} - 10^{-6} м)		Структура связующего вещества, отдельные частицы (микронаполнитель, макромолекулы) и агрегаты частиц (кластеры). Структура контактной зоны, фазы и фазовые контакты. Микропоры и микротрещины	Дисперсность, природа и свойства поверхности частиц твердой фазы. Количественные соотношения между жидкой и твердой фазами. Вид, свойства и количество модифицирующих добавок.	Силы межфазного взаимодействия, молекулярные, ионно-электростатические, силы поверхностного натяжения и капиллярно-пленочные силы, силы сцепления наночастиц с матрицей	Структурно-реологические свойства систем, структура и свойства матричного материала. Однородное распределение наночастиц в матрице
НАНОУРОВЕНЬ (10^{-9} – 10^{-8} м)		Наночастицы и системы с наноконпонентами, кристаллы новообразований, агрегаты наночастиц	Количество и свойства наночастиц и добавок (УНТ, ПАВ, ОМД, КОС), химическая природа и механизм действия наночастиц и добавок. Однородность и стабильные свойства наночастиц и добавок	Атомные и межмолекулярные силы, процессы адсорбции и хемосорбции, процессы зародышеобразования и кристаллизации, процессы агрегации наночастиц	Свойства и структура микропористости кристаллического сростка, структура кристаллической решетки

Данные, представленные на рисунке 2, показывают, что процессы формирования структуры строительных композитов – совокупность сложных физико-химических процессов, последовательно рассматриваемых на масштабных уровнях от нано- до макро. При этом на каждом масштабном уровне реализуются определенные входные параметры, способствующие формированию требуемой структуры с фрактальной размерностью стремящийся к топологической, и как итог создаются оптимальные выходные параметры масштабного уровня. Важное место при рассмотрении процессов структурообразования на каждом масштабном уровне занимают процессы самоорганизации, протекающие под действием только внутренних сил.

Изучение влияния внешних воздействий, применяемых в процессах приготовления строительных смесей, транспортирования, укладки, уплотнения и ухода за твердеющим композитом, позволяет установить закономерности движения компонентов, энергетические потоки, раскрыть сущность процессов структурообразования, и в общем, оценить эффективность работы внешних сил. Все это дает возможность управления балансом внутренних и внешних сил для оптимизации структуры (свойств) строительных композитов на основе минеральных вяжущих веществ.

Выводы. Для получения строительных композитов с требуемыми физико-механическими свойствами предложено по-масштабное рассмотрение их структуры с учетом баланса внутренних и внешних сил на каждом масштабном уровне. Использование топологического подхода к оценке структуры композита на всех масштабных уровнях методом фрактального анализа, дало возможность установить корреляционную зависимость между средней плотностью, прочностью и показателем фрактальной размерности D , а также связать размерность D с объемной долей твердой фазы, плотностью упаковки. Установлено, что увеличение значения фрактальной размерности D связано с повышением плотности и прочности композита, что связано с формированием качественной, более плотной структуры последнего. Можно предположить, что строительные композиты на минеральных вяжущих веществах с оптимальными свойствами будут получены при фрактальной размерности мезо и макроструктуры $D > 1,6 - 1,7$.

С учетом топологического подхода получены цементные строительные композиты с оптимизированными составами на всех масштабных уровнях структуры, со следующими физико-механическими свойствами: классом по прочности не менее В90, маркой по морозостойкости более F400, с водопоглощением не более 4,2 % и истираемостью менее 0,4 г/см², маркой по водонепроницаемости не менее W12.

Библиографический список:

1. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6-14.
2. Бобрышев, А.Н. Анализ долговечности полимерных композитов с позиции кинетической концепции разрушения / А.Н. Бобрышев, Э.Р. Галимов, А.В. Лахно, П.В. Воронов, И.А. Абдуллин // Вестник Технологического университета. 2015. Т.18. № 14. С. 23-26.

3. Комохов, П.Г. Классификация размерностей наноструктур и свойства композиционных материалов / П.Г. Комохов, А.М. Сычева, И.В. Степанова, И.П. Филатов // Academia. Архитектура и строительство. 2008. № 4. С. 90-92.
4. Королев, Е.В. Иерархическое моделирование строительных материалов как дисперсных систем: специализированная программная реализация / В.А. Смирнов, Е.В. Королев // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 43-53.
5. Перцев, В.Т. Реализация нанотехнологического подхода для вибропрессованных бетонов / В.Т. Перцев, С.М. Усачев // Строительные материалы. 2007. №1. С. 45-47.
6. Бормотов, А.Н. Синтез оптимальных управлений в задачах материаловедения / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, А.М. Данилов, И.А. Гарькина, В.И. Соломатов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2001. № 11.
7. Чернышов, Е.М. Нанотехнологические исследования строительных композитов: общие суждения, основные направления и результаты / Е.М. Чернышов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2009. Т. 1. № 1. С. 45-59.
8. Чернышов, Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как ситсема научного знания и предмет развития исследований. Часть 1. Постановка проблемы и её существо / Е.М. Чернышов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 12 (720). С. 41-51.
9. Шмитко, Е.И. Особенности структурообразования бетонов с модифицирующими добавками различных типов / Е.И. Шмитко, А.В. Крылова, Н.А. Белькова, О.Б. Рудаков // Бетон и железобетон. 2013. № 2. С. 5-7.
10. Бахштабер, В.М. Разбиения поверхностей на многоугольники и задачи, пришедшие из физики, химии и биологии / В.М. Бахштабер. - XV Летняя школа «Современная математика». Ратмино, 2015 - 43 с.
11. Лорд, Э.Э. Новая геометрия для новых материалов / Э.Э. Лорд, А.Л. Маккей, С. Ранганатан. – М.: Физматлит, 2010.
12. Виро, О.Я. Элементарная топология / О.Я. Виро, О.А. Иванов, Н.Ю. Нецветаев, В.М. Харламов. - М.: МЦНМО, 2010. 352 с.
13. Вербицкий, М. С. Начальный курс топологии в листочках: задачи и теоремы / М.С. Вербицкий. - М.: МЦНМО, 2017. 352 с.
14. Перцев, В.Т. Топологическая оптимизация процессов формирования микроструктуры цементного камня и бетона / В.Т. Перцев, С.П. Козодаев, А.А. Леденев, А.Н. Бобрышев // Научный вестник Воронежского ГАСУ. 2015. № 1. С. 21.
15. Бобрышев, А.Н. Анализ критического содержания наполнителя в композите с позиции теории перколяции / А.Н. Бобрышев, А.В. Лахно, П.В. Воронов, А.А. Бобрышев, Е.В. Новиков Е.В. // Международный технико-экономический журнал. 2013. № 6. С. 93-98.
16. Бобрышев, А.Н. Явления самоорганизации в твердеющих цементных системах / А.Н. Бобрышев, Н.И. Макридин, В.И. Соломатов. – Пенза. ПДНТП, 1989. 34 с.
17. Новиков, Е.В. Кластерои трещинообразования в композитах / Е.В. Новиков, А.В. Лахно, А.Н. Бобрышев, П.А. Зубарев // Международный технико-экономический журнал. 2012. № 5. С. 96-99.
18. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных систем / А.Н. Хархардин, В.В. Строкова. - Белгород: БГТУ, 2007. 131 с.
19. Усачев, С.М. Управление структурой высококачественных бетонов на основе минеральных вяжущих веществ / С.М. Усачев, В.В. Власов, Н.А. Беспалов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2016. №1 (41). С.56-62.
20. Леденев, А.А. Оценка реологических свойств строительных смесей с получением дополнительных количественных характеристик / А.А. Леденев, В.Т. Перцев, С.М. Усачев, А.М. Усачев // Конденсированные среды и межфазные границы. 2016. Том 18. №3. С. 394-401.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В ПРИЛОЖЕНИЯХ К ЗАДАЧАМ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

С.В. Федосов¹, академик РААСН, доктор тех. наук, профессор

Т.А. Мацеевич¹, доктор физ.-мат. наук, доцент

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы применения методов теории математической физики для разработки математических моделей процессов переноса теплоты и массы вещества в технологических схемах производства материалов, изделий и элементов строительных конструкций. Показано, что движущей силой всех процессов синтеза материалов являются термодинамические потенциалы составляющих компонентов, возникающие при соприкосновении взаимодействующих фаз, градиентов потенциалов переноса и формировании потоков теплоты и массы вещества; возникающие при этом фазовые переходы и структурообразующие процессы. Всё это приводит к появлению новых свойств, теплофизических, физико-механических и других характеристик материалов. Методологической и научной основой этого является теория математической физики, в свою очередь базирующаяся на дифференциальных уравнениях нестационарного переноса теплоты и массы вещества.

Ключевые слова: строительство, материаловедение, математические модели, уравнения математической физики.

"Пока есть силы - надо жить, а жить для учёного - значит работать"

Нобелевский лауреат Ларс Онзагер

(Прозвище от студентов "Норвежский орешек")

За миллионы лет своего существования человечество тщетно пытается ответить на банальный вопрос: "Что же первично: яйцо, или курица?" Современная живая природа нам чётко показывает: Да, эволюционный путь развития и человека и всех других особей, способных дышать и мыслить, уже исторически зафиксирован на всех этапах этого пути. И, анализируя этот путь, мы также чётко видим, что *Homo sapiens* /человек разумный/, как рождённый природой, тем не менее всегда искал защиту от катаклизмов, создаваемых этой природой: искал пещеры для того, чтобы скрыться от дождя, снегопада, ветра; а обретя огонь узнал о замечательных свойствах глины, керамики и пуццолана.

Итак, согласно былинным легендам, Прометей, принеся огонь человеку, открыл эпоху термических явлений и процессов. Смеем утверждать, что все термические процессы воздействия на дисперсные фазы (твёрдые или жидкие), всегда сопровождаются переносом массы вещества, находящегося в порах твёрдой фазы или растворённого в каплях жидкости. С абсолютной уверенностью можно также говорить о том, что тепловые процессы (нагревание, охлаждение), сопровождаемые фазовыми (кипение, конденсация) или химическими превращениями, определяют направление и скорость массообменных процессов в технологических производствах большинства строительных материалов.

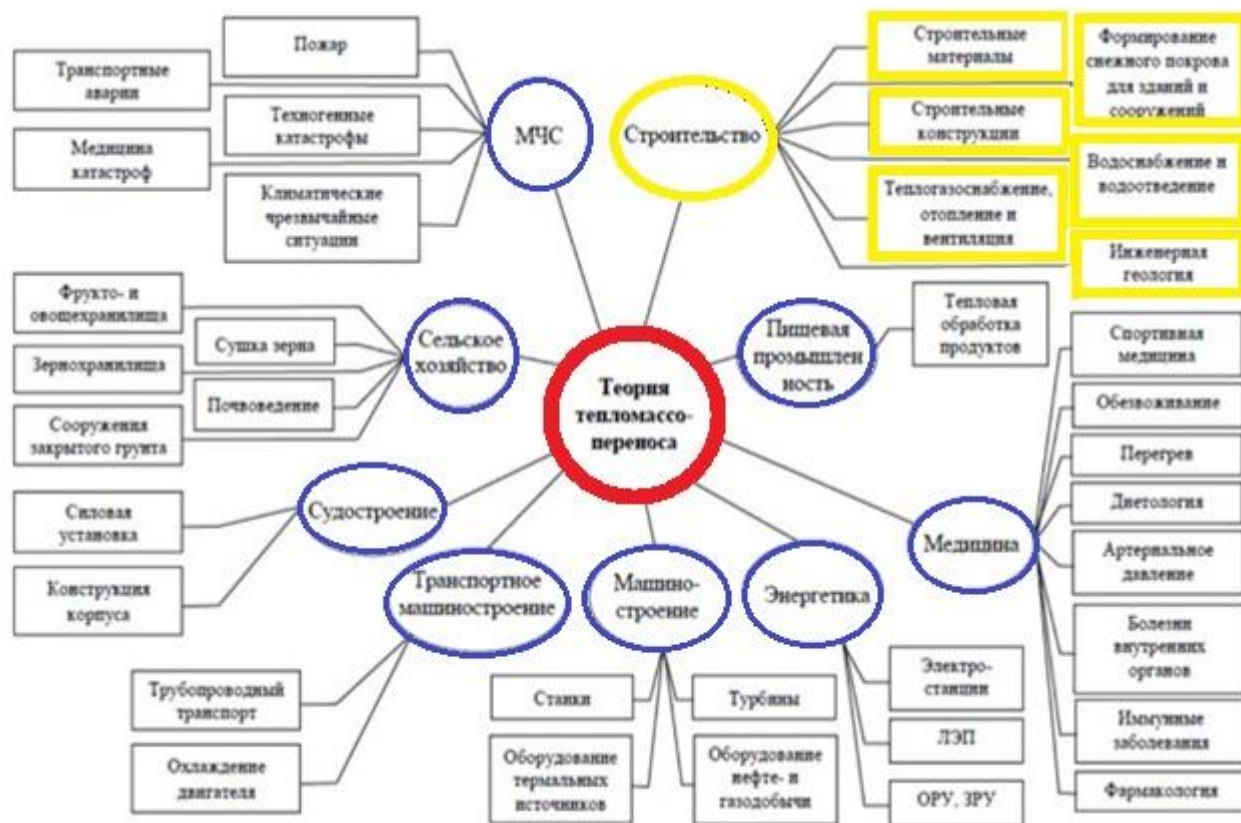


Рис. 1 Гносеологическая схема применения теории теплопереноса

Ниже мы приводим гносеологическую схему, иллюстрирующую "ареал" теории теплопереноса в явлениях, окружающих жизнь человека*.

На рисунке в красном ободке обозначено: Теория теплопереноса - фундаментальная научная основа, объясняющая все процессы переноса энергии и вещества; синим обозначены сферы её применения, жёлтым - всё, что имеет самое непосредственное отношение к проблеме строительства.

В довоенное время индустриализация страны, потребности строительства военно-инженерных объектов требовали развития отраслей промышленности и науки, связанных с разработкой новых технологий возведения строительных объектов, изучения и разработки технологий по созданию строительных материалов, обладающих новым комплексом свойств [1,2].

В послевоенное время, когда мощными темпами решалась задача восстановления разрушенного народного хозяйства страны, перед строительной наукой обществом ставилась задача обеспечения высоких темпов строительства объектов оборонного, промышленного и гражданского назначения. А для реализации этих задач требовалась разработка и новых видов бетонов, и совершенствование технологии их производства. Нужно было создание методик расчёта свойств бетонов на основании результатов экспериментальных исследований, и разработка оборудования для реализации новых технологий.

В области строительного материаловедения пионерскими в этом направлении были труды учёных Московского инженерно-строительного института им. В.В.Куйбышева: Б.Г.Скрамтаева, Ю.М.Баженова, В.А.Вознесенского, Г.И.Горчакова, Ю.П.Горлова [5-11]. В 60-70-х годах XX века начинается бурное развитие методов математического моделирования во всех сферах науки [12, 13]. Учёные МИСИ подхватывают это перспективное направление. И од-

ной из первых монографий появляется работа Ю.М.Баженова и В.А.Вознесенского [14].

С большим пиететом перед научным предвидением авторов этой работы мы цитируем их слова, не потерявшие своей актуальности и через 46 лет после выхода книги.

«Можно выделить три группы математических методов, которые, по мнению авторов, наиболее применимы для решения задач анализа и оптимизации качества материалов и технологий.

I группа - вероятностно-статистические методы, включающие общую теорию вероятностей, выборочный анализ, теорию распределений, проверку статистических гипотез, дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы, статистическое планирование экспериментов;

II группа - методы исследования операций, включающие линейное, нелинейное и динамическое программирование, теорию игр, теорию массового обслуживания, метод Монте-Карло;

III группа - **дифференциальные и интегральные уравнения математической физики**, выделено нами, С.Федосовым, Т.Мацеевич/, вариационное исчисление и некоторые другие разделы высшей математики, используемые для детерминированного моделирования технологических процессов»

Обратимся к проблеме дифференциальных уравнений математической физики. В предисловии к монографии [10] научный редактор русского перевода отмечает, что в основе методологических принципов термодинамики необратимых процессов лежат два постулата: линейный закон и соотношение взаимности Онзагера. В соответствии с линейным законом скорость приближения системы к состоянию равновесия (принцип Ле-Шателье), пропорциональна термодинамической движущей силе, которая может быть выражена через градиент потенциала переноса. В процессах переноса теплоты и массы вещества этот принцип реализуется следующим образом:

$$J_t = -\lambda gradt, \text{ закон Фурье} \quad (1)$$

$$J_m = -DgradC, \text{ закон Фика} \quad (2)$$

Отмечается, что линейные законы являются обобщением эмпирических закономерностей и строгой теоретической основы не имеют. Однако, этот закон может быть выведен из статистической теории флуктуаций [15]. В том случае, когда система близка к состоянию равновесия, и в случае действия нескольких сил скорость приближения к равновесному состоянию представляется в виде:

$$V_i = \sum_j L_{ij} X_j \quad (3)$$

Вторым принципом термодинамики необратимых процессов является соотношение взаимности:

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (4)$$

Это соотношение было доказано Онзагером и легло в основу теории скорости необратимых процессов.

Академиком А.В. Лыковым показано [16], что в субстанциях (газах, жидкостях, твёрдых телах) перенос компонентов среды описывается системой уравнений Онзагера:

$$J_t = L_{tt} \cdot X_t + L_{tm} \cdot X_m = -\frac{L_{tt}}{T} \nabla T - L_{tm} T \nabla \left(\frac{\mu}{T} \right) \quad (5)$$

$$J_m = L_{mm} \cdot X_m + L_{mt} = -\frac{L_{mt}}{T} \nabla T - L_{mm} T \nabla \left(\frac{\mu}{T} \right) \quad (6)$$

Здесь: L_{tt} , L_{mm} – коэффициенты прямой термодинамической силы (тепло- и массопроводности); L_{tm} , L_{mt} – коэффициенты взаимодействия (термодиффузии и концентрационного теплопереноса); μ – химический потенциал.

Из уравнения (5) следует, что перенос теплоты (J_t) осуществляется не только под действием прямой термодинамической силы X_t (теплопроводностью), но и в результате диффузии компонента переносимого вещества (эффект Дюфо). В свою очередь, уравнение (6) показывает, что поток массы вещества (J_m) зависит не только от действия прямой термодинамической силы X_m , (концентрационная диффузия), но и от действия силы X_t (термодиффузия, эффект Соре).

В результате дальнейших преобразований, которые мы не приводим, и получается система нелинейных дифференциальных уравнений нестационарного тепло-, влаго-, баропереноса:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}[a \cdot \text{grad} t] + \varepsilon \frac{C_m}{C_t} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \text{div}[k \cdot \text{grad} \theta + k \cdot \delta_\theta \text{grad} t + k \cdot \delta_P \text{grad} P] \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \text{div}[a_P \cdot \text{grad} P] + \varepsilon \frac{C_m}{C_t} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (9)$$

Здесь: a , k , a_P – коэффициенты температуро-, массо-, баропроводности;

ε – коэффициент фазового перехода;

r – скрытая теплота парообразования;

C_b , C_m – коэффициенты тепло- и массоемкости; δ_θ , δ_P – коэффициенты термодиффузия- и бародиффузии.

Система дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса на современном этапе развития науки и технологий позволяет прогнозировать все "сценарии" развития событий в технологиях производства практически всего спектра строительных материалов [17]. На сегодня можно констатировать, что имеющийся арсенал математических моделей процессов и разработанных на их основе инженерных методов расчёта даёт возможность не только в детерминированной постановке назначать технологические параметры ведения процессов с оптимальными /с точки зрения энерго- и ресурсосбережения/ режимными показателями, но и при возникновении экстремальных ситуаций прогнозировать развитие событий в область негативных последствий.

И ярким примером этого является возрастающий интерес исследователей к решению обратных задач тепломассопереноса, при которых из имеющейся информации о конечном состоянии объекта, например, в результате пожара, "извлекается" информация о его начальном состоянии [18].

В течение последних десятилетий большое значение приобрели строительные материалы на основе полимеров. Полимеры используются в качестве конструкционных и отделочных материалов, напольных покрытий, герметиков и пенопластов, а также для получения древесно-полимерных композитов и поли-

мербетонов. Для предсказания свойств таких материалов используются методы математической физики, основанные на анализе потоков теплоты и массы вещества [19-22]. Так, для описания процессов релаксации напряжения используется принцип неравновесной термодинамики, и ядро релаксации $T(\tau)$ в уравнении Больцмана-Вольтерры определяется функцией производства энтропии вида [17-19]:

$$T(\tau) = S_0 \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{S_{\max}} \right) \int_0^{\infty} T^*(\tau) d\tau \quad (10)$$

где S_0 – начальная энтропия, S – текущая энтропия, S_{\max} – максимальная энтропия при достижении равновесия, $T^*(\tau)$ – переменная часть ядра.

Производство энтропии определяется либо потоком массы вещества или диффузией структурных элементов.

Для описания теплопроводности полимеров используется закон Фурье, а уравнение для предсказания теплопроводности выглядит так [22]:

$$\lambda = \frac{\sum_i a_i + \sum_j b_j}{N_A \sum_i \Delta V_i} \cdot \frac{c_p \rho^{4/3}}{\left(\frac{M}{m} \right)^{1/3}} \quad (11)$$

где a_i – атомные константы, характерные для каждого атома; b_j – константы для полярных групп, приводящих к диполь-дипольному взаимодействию или к водородным связям; N_A – число Авогадро, ΔV_i – Ван-дер-Ваальсов объем i -го атома, M – молекулярная масса повторяющегося звена полимера, m – количество атомов в этом звене, c_p – теплоемкость, ρ – плотность.

Библиографический список:

1. Скрамтаев Б.Г. Бетоны различных видов. М., «Госстройиздат», 1933, 222 стр.
2. Скрамтаев Б.Г., Герливанов Н.А., Мудров Г.Г. Строительные материалы. М., «Госстройиздат», 1940, 562 стр.
3. Малбиев С.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Перекрёстно-стержневые пространственные конструкции покрытий зданий. М., Изд. АСВ, 2017, - 336 с.
4. Малбиев С.А. и др. Полимеры в строительстве. М., «Высшая школа». 2008, 456 с.
5. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М., «Стройиздат», 1981, 464 стр.
6. Горлов Ю.П., Ерёмин Н.Ф., Седунов Б.У. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы. М., «Стройиздат», 1976, 193 стр.
7. Горчаков Г.И., Строительные материалы., М., «Стройиздат», 1981, 412 стр.
8. Скрамтаев Б.Г., Шубенкин Б.Ф., Баженов Ю.М., Способы определения состава бетона различных видов., М., "Стройиздат", 1966, 160 стр.
9. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г., Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М., «Стройиздат», 1965, 194 стр.
10. Де Гроот С.Р., Термодинамика необратимых процессов. «Гостехиздат», 1956, 281 стр.
11. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М., «Наука», 1979, 368 стр.
12. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы механико-статистической теории обработки наблюдений. М., «Физматгиз», 1958, 336 стр.
13. Глинский Б.А., Грязнов В.С., Дынин Б.С., Никитин Е.П., Моделирование как метод научного исследования. Минск. Изд. МиГУ, 1965, 248 стр.

14. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А., Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. М., «Стройиздат», 1974, 192 стр.
15. Гленсдорф П., Пригожин И., Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М., «Физматгиз», 1973, 280 стр.
16. Лыков А.В., Михайлов Ю.А., Теория тепло- и массопереноса. М.-Л., «Госэнергоиздат», 1963, 536 стр.
17. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново., «ПресСто», 2010, 320 стр.
18. Чешко И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) /Под науч. ред. канд. юр. наук Н.А.Андреева. - 2-е изд., стереотип. - СПб.: СПБ ИПБ МВД России. 1997. - 562 с.
19. Askadskii A.A. Computation Materials Science of Polymers, Cambridge, «Cambridge International Science Publishing» 2003. - 695 p.
20. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. М.: «Научный Мир», 2009. – 380 с.
21. Мороз П.А., Аскадский Ал.А., Мацеевич Т.А., Аскадский А.А., Романова Е.И. Древесно-полимерные композиты: структура, свойства и применение, М.: Издательство АСВ, 2020. - 200 с.
22. Аскадский А.А., Марков В.А., Петунова М.Д. Расчетная схема для оценки теплопроводности полимеров// Высокомолек. Соед. А. 2013. Т. 55. № 12. С. 1473.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ БЕТОН С ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ

Ю.М. Баженов¹, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН

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

Нго Суан Хунг¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Потребности современного экономического развития Вьетнама вызывают необходимость строительства речных гидротехнических объектов для решения проблем энергоснабжения и развития сельскохозяйственного производства. Однако, обследование ранее построенных гидротехнических сооружений показывает, что многие из них в ходе эксплуатации в условиях жаркого и влажного климата теряют свою работоспособность раньше установленного срока. Это сокращает продолжительность межремонтного периода и увеличивает стоимость их восстановления. Для продления срока службы подобных речных объектов требуется оптимизация составов бетонов, соблюдение технологии их приготовления и применение органоминеральных модифицирующих добавок. Цель работы – разработка органоминеральной добавки – модификатора структуры мелкозернистого бетона для улучшения его эксплуатационных показателей, используемого в качестве облицовочного материала при строительстве и ремонте речных гидротехнических сооружений. Оптимизацию состава мелкозернистой бетонной смеси осуществляли с помощью математического планирования по ортогональному центральному плану второго порядка. Предложена модифицирующая добавка, состоящая из 4,5 % суперпластификатора С-3, 4 % гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости ГКЖ-11 и 91,5 % золы рисовой шелухи, с использованием которой в количестве 8 % от массы вяжущего получен мелкозернистый бетон на цементно-зольном связующем с 20%-ной заменой портландцемента золой-уноса, с прочностью на сжатие 40 МПа и водонепроницаемостью 1,4 МПа в 28-суточном возрасте, обладающий более плотной структурой по сравнению с мелкозернистым бетоном без добавки.

Ключевые слова: речные гидротехнические сооружения, мелкозернистый бетон, органоминеральная модифицирующая добавка, зола-унос, зола рисовой шелухи, водоредуцирующий суперпластификатор, гидрофобизирующая кремнийорганическая жидкость.

Гидротехнический бетон должен быть достаточно долговечным и обладать плотной структурой для того, чтобы длительно сохранять свою работоспособность и, в первую очередь, прочность и водонепроницаемость, в условиях непосредственного контакта с водной средой [1-4].

Одним из основных способов решения данной задачи является использование мелкозернистых бетонов, содержащих органоминеральные модифицирующие добавки [5-8].

Использование в составе таких бетонов золы-уноса теплоэлектростанций, работающих на угле, в качестве тонкодисперсного наполнителя, обладающего пуццоланической активностью благодаря значительному содержанию аморфного кремнезема (таблица 1), взаимодействующего с портландитом с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, позволяет снизить тепловыделе-

ние и уменьшить объемные термические деформации при твердении бетона. Кроме того, этот способ утилизации топливной золы будет способствовать экологической ситуации во Вьетнаме, поскольку такую золу в отличие от золы рисовой шелухи нельзя использовать для удобрения сельскохозяйственных полей.

Таблица 1. Химический состав золы-уноса ТЭС «Фалай» и золы рисовой шелухи

Вид золы	Содержание компонентов, % масс.								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п.
Зола-унос	52,7	17,3	3,84	1,2	0,26	2,5	-	-	22,2
Зола рисовой шелухи	87,56	1,61	0,7	1,7	1,6	0,58	2,18	0,01	4,06

Примечание. п.п.п. – потери при прокаливании.

Введение золы рисовой шелухи (таблица 1) в состав органоминеральной добавки, также обладающей пуццоланическими свойствами и большей дисперсностью по сравнению и портландцементом и золой-уноса (площадь удельной поверхности указанных сырьевых материалов составляет соответственно 14480, 3110 и 11350 см²/г), позволяет ей заполнить пространство между частицами цемента и золы-уноса, что будет способствовать уплотнению матрицы цементного камня.

Для снижения водопотребности цементно-зольной смеси необходимо использовать водоредуцирующий суперпластификатор. С этой целью в работе был использован полиметиленафталинсульфонатный суперпластификатор С-3.

Включение в состав модифицирующей добавки гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости ГКЖ-11, представляющей собой метилсиликонат натрия, обусловлено необходимостью придания увлажняемой поверхности гидротехнического бетона гидрофобных свойств для снижения капиллярного подсоса. В результате адсорбции этой жидкости на стенках пор и капилляров образуется тонкая пленка, в которой силоксановая связь кремний – кислород ориентирована к поверхности цементного камня бетона, а органический радикал - в противоположную сторону. Это придает бетону эффект водоотталкивания, который снижает водопоглощение и увеличивает его водонепроницаемость.

С помощью метода математического планирования эксперимента был оптимизирован состав мелкозернистого бетона на основе цементно-зольного вяжущего, содержащий разработанную органоминеральную добавку, представленный в таблице 2 (состав № 2). В этой же таблице приведен состав контрольного бездобавочного мелкозернистого бетона (состав № 1).

Результаты проведенных испытаний показали, что мелкозернистый бетон с органоминеральной добавкой по сравнению с контрольным бездобавочным бетоном в возрасте 28 и 60 суток нормального твердения обладает более плотной структурой из-за меньшей общей пористости, относительного объема открытых пор и среднего размера капилляров. Кроме того, было установлено, что поры в мелкозернистом бетоне, модифицированном разработанной органоминераль-

ной добавкой, более однородны по размерам. Указанные показатели пористости мелкозернистых бетонов представлены в таблице 3.

Таблица 2. Составы мелкозернистых бетонов

Составы МЗБ	Содержание сырьевых материалов, кг/м ³						
	ПЦ	ЗУ	П	В	ЗРШ	С-3	ГКЖ-11
№ 1 (контрольный)	440	-	1532	264	-	-	-
№ 2 (с органоминеральной добавкой)	350	90	1495	245	32	1,58	1,4

Примечание. МЗБ – мелкозернистый бетон; ПЦ – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н завода «Хоанг Май» (Вьетнам); ЗУ – зола-унос тепловой электростанции «Фалай» (Вьетнам); П – кварцевый песок реки Ло (Вьетнам); В – вода; ЗРШ – зола рисовой шелухи (Вьетнам); С-3 – суперпластификатор (РФ); ГКЖ-11 - гидрофобизирующая кремнийорганическая жидкость (РФ).

Таблица 3. Показатели пористости мелкозернистых бетонов

Составы МЗБ	Возраст твердения, сутки	Общая пористость, %	Объем открытых пор, %	Показатель среднего размера открытых капиллярных пор	Показатель однородности размеров открытых капиллярных пор
№ 1 (контрольный)	28	18,6	13,5	0,91	0,52
№ 2 (с органоминеральной добавкой)		16,8	7,9	0,60	0,66
№ 1 (контрольный)	60	18,2	13,0	0,87	0,55
№ 2 (с органоминеральной добавкой)		15,6	6,8	0,56	0,69

Сравнение прочности на сжатие мелкозернистого бетона, модифицированного разработанной добавкой, и бездобавочного контрольного бетона в разном возрасте твердения, а также их водонепроницаемости, определенной по методу «мокрого пятна» приведено в таблице 4.

Таблица 4. Прочность на сжатие и водонепроницаемость мелкозернистых бетонов

Составы МЗБ	Прочность на сжатие, МПа			Водонепроницаемость, МПа	
	28 суток	60 суток	120 суток	28 суток	90 суток
№ 1 (контрольный)	36,0	38,9	41,7	0,8	1,0
№ 2 (с органоминеральной добавкой)	40,0	48,0	56,0	1,4	1,6

В результате анализа приведенных в таблице 4 результатов прослеживается тенденция увеличения разницы в прочности на сжатие у модифицированного мелкозернистого бетона по сравнению с бетоном без добавок в процессе их твердения с 11 до 34 % при соответственно 28- и 120-суточном твердении.

Результаты испытаний исследованных мелкозернистых бетонов на водонепроницаемость показали ее более высокое значение у разработанного модифицированного бетона по сравнению с бездобавочным бетоном, которое сохраняется с увеличением возраста их нормального твердения с 28 до 90 суток.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что введение в состав мелкозернистой бетонной смеси разработанной модифицирующей органоминеральной добавки в количестве 8 % от массы цементно-зольного связующего и состоящей из 4,5 % масс. водоредуцирующего полиметиленафталинсульфонатного суперпластификатора С-3, 4 % масс. гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости ГКЖ-11 и 91,5 % золы рисовой шелухи в качестве тонкодисперсного наполнителя, обладающего высокой пуццоланической активностью, позволяет получить бетон плотной структуры, обладающий достаточной прочностью на сжатие и высокой водонепроницаемостью (соответственно 1,4 МПа в возрасте 28 суток и 1,6 МПа в возрасте 90 суток нормального твердения), который можно использовать в качестве облицовочного слоя, контактирующего с водой, при строительстве и ремонте речных гидротехнических сооружений в Социалистической Республике Вьетнам.

Библиографический список:

1. Ануфриева Е.В. Коррозионностойкий бетон для гидротехнического строительства // Градостроительные аспекты устойчивого развития крупных городов. 2009. № 93. С. 537-541.
2. Hosam El-Din H. Seleem, Alaa M. Rashad, Basil A. El-Sabbagh. Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures // Construction and Building Materials/ 2010. Vol. 24. Issue 6. Pp. 878-884.
3. Santhanam M., Otieno M. Deterioration of concrete in the marine environment // Marine Concrete Structures. Design, Durability and Performance. 2016. Pp. 137-149.
4. Lebedeva R. Analysis of the properties of hydrotechnical concrete employed in the marine environment // Statyba Civil Engineering. 2013. No. 5 (5). Pp. 481-486.
5. Ben Ju Yang, Qiu Yi Li, Song Gao, Tao Li. Research on the Sulfate Corrosion-Resistance Admixture for Concrete // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 250-253. Pp. 327-330.
6. Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Effect of Complex Organomineral Modifier on the Properties of Corrosion Resistant Concrete // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101005>
7. Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Нгуен Чонг Чык, Булгаков Б.И., Баженова О.Ю., Гальцева Н.А. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. №3. С. 11-21.
8. Нго Суан Хунг, Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Ха Хоа Хи, Мельникова А.И. Влияние золы рисовой шелухи на свойства гидротехнических бетонов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Выпуск 6. С. 768-777.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕСЕЙ ГИПСОВОГО КАМНЯ НА СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ ВЯЖУЩИХ

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

Н.А. Гальцева¹, канд. техн. наук

Е.Н. Булдыжова¹, инженер

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация.

В данной работе были проведены испытания гипсового и ангидритового камня Порецкого месторождения. Определены основные физико-технические характеристики щебня и молотых порошков, приготовленных из такого камня. Проведены исследования по технологии изготовления гипсовых вяжущих марок Г5 и выше и изучению их свойств. Проверено влияние различных примесей гипсового камня на свойства полученного вяжущего.

Ключевые слова: ангидритовое вяжущее, гипс, добавки, сульфаты, прочность, сроки схватывания.

Общеизвестно, что ангидритовая мука из природного ангидритового камня обычного помола (до 3000 см²/г) гидратируется медленно и не дает высоких прочностных показателей затвердевшего материала.

По П.П.Будникову, процесс твердения ангидритового вяжущего идет путем гидратации нерастворимого ангидрита с дальнейшей его перекристаллизацией. При этом образуются неустойчивые сложные гидраты, в среде воды и активаторов твердения на поверхности частиц ангидрита, гидраты распадаются на соль: $n \text{H}_2\text{O} + m \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Происходит кристаллизация двуводного гипса при гидратации ангидрита, что приводит к схватыванию и твердению затворенного водой вяжущего вещества [1-4].

В 30-ые годы прошлого столетия академиком П.П.Будниковым разработан новый вид вяжущих – ангидритовый цемент. Ангидритовый цемент получают путем тонкого помола с активаторами твердения из природного ангидритового камня или обожженного двуводного сульфата кальция, температура обжига 700-750°C. Схватывание ангидритового цемента происходит не ранее 30 минут и конец схватывания наступает не позднее 24 часов. В 30-40-ые годы ангидритовый цемент начали применять в гражданском строительстве, однако в настоящее время такое вяжущее в нашей стране практически не производится.

В то же время за рубежом ведется активное потребление ангидритовых вяжущих в строительстве. Экономическая составляющая является одной из важных причин. Энергозатратность производства ангидритового вяжущего примерно в 12 раз ниже по сравнению с энергозатратами при производстве портландцемента, а также в 3 раза ниже по сравнению с изготовлением строительного гипса. Вяжущее из природного ангидрита находит широкое применение для изготовления бесшовных наливных полов и в промышленности [5-7].

В ходе проведенных исследований отмечено, что примеси ангидрита, доломита и глины в количествах от 10% и более оказывают влияние на основные показатели, как свежеприготовленных растворов, так и затвердевших образцов. Что касается примесей глины, то при увеличении её содержания до 10% были

получены прочностные показатели близкие к марке Г10 при заметном снижении водопотребности вяжущего.

Анализ полученных результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы:

- примеси ангидрита в количестве 10-50% приводят к изменению сроков схватывания гипсового вяжущего, снижению его водопотребности при одновременной потере прочности [8], что не позволяет получать гипсовое вяжущее с маркой по прочности более Г4;

- примеси доломита в количестве 10-20% существенно увеличивают сроки схватывания, незначительно изменяют водопотребность, но также приводят к снижению марки вяжущего до Г4;

- примеси глины до 10% позволили снизить водопотребность вяжущего с 71% до 57% и получить прочность при сжатии затвердевшего гипсового раствора близкую к марке Г10, однако полученные данные требуют дополнительного изучения и обоснования.

Таблица 1. Влияние примесей гипсового камня на свойства вяжущего

№ опыта	Примеси, %			W гидрат-варки, %	В/Г, %	Сроки схватывания, мин-сек		Предел прочности при изгибе/сжатии (4x4x16), кгс/см ² , через 2 часа.		Объемное расширение, %	Уд.поверхность, см ² /г /остаток на сите №02, %	Объемная масса, кг/с м ³
	Ангидрит	Глина	Доломит			Начало	Конец	При изгибе	При сжатии			
1	-	-	-	4,75	71	7-40	11-35	27.2	50.0	0.17	4870/ 8.8	1545
2	10			5.29	78	17-15	27-45	25.0	43.5	0.137 Мах 0.147	4850/ 8.7	1530
3	20	--	--	4.72	71	11-15	17-20	26.8	43.6	0.141 Мах 0.161	4858/ 8.8	1580
4	30	--	--	4.0	65	8-40	13-25	22.6	41.2	0.132	4425/ 8.7	1600
5	50	--	--	2.97	50	7-35	10-05	22.7	41.4	0.114 Мах 0.120	6430/ 5.2	1700
6	--	3	--	4.99	76	11-10	18-45	30.8	57.8	0.138	7170/ 4.6	1563
7	--	10	--	5.37	57	10-00	12-20	46.0	99.7	0.139	5117/ 8.3	1570
8	--	--	10	4.81	70	13-05	20-30	26.1	46.2	0.140	5100/ 8.1	1564
9			20	4.66	70	16-30	25-00	25.6	44.0	0.150 мах 0.172	5600/ 6.2	1570

По данным химического анализа, проба 1 гипсового камня, по содержанию дигидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) относится к 3 сорту по ГОСТ 4013-82 «Камень гипсовый и ангидритовый для производства вяжущих материалов». Изготовленное из данного сырья гипсовое вяжущее характеризуется следующими показателями, представленными в табл.1

Таблица 2. Показатель гипсового вяжущего

В/Г, %	Сроки схватывания, мин-сек.		Прочность через 2 часа, кгс/см ²		Объемное расширение, %
	Начало	Конец	При изгибе	При сжатии	
70	7-50	12-05	27.1	46.7	0.142
71	7-40	11.35	27.2	50.0	0.17

Результаты проведенных исследований показывают, что гипсовый камень, относящийся к 3 сорту (содержание $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ – 77,0%), позволяет получать вяжущее по прочностным показателям, соответствующим марке Г5.

При выпуске опытной партии гипсового вяжущего в промышленных условиях был использован гипсовый камень 4 сорта (содержание $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ около 70,0%), однако и в этом случае было получено вяжущее не ниже марки Г5.

Таким образом, результаты экспериментальных работ в лабораторных и промышленных условиях свидетельствуют о том, что для производства вяжущего марки по прочности не ниже Г5 может быть использован гипсовый камень, начиная с 4 сорта и выше с содержанием $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ не менее 70,0%.

Библиографический список:

1. Маева И.С., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А. П., Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками, Строительные материалы, №6,2009, С.4-5
2. Белов В.В., Бурьянов А.Ф., Яковлев Г.И. и др., Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция, монография, Под общей редакцией А.Ф.Бурьянова, Изд-во «Де Нова», М., 2012, 196 с.
3. Петропавловская В.Б, Белов В.В., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П., Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения, Строительные материалы, №7, 2010, С.22-24.
4. Пустовгар А.П., Василик П.Г., Бурьянов А.Ф., Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях, Строительные материалы, №12, 2010, С.61-64
5. Бурьянов А.Ф, Гонтарь Ю.В., Чалова А.И. К вопросу использования гипсовых и ангидритовых вяжущих в сухих смесях для устройства оснований полов, Сухие строительные смеси, №1, 2010, С.11-13
6. Бурьянов А.Ф., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н., Соловьев В.Г. Использование синтетического ангидрита сульфата кальция для приготовления закладочных смесей Строительные материалы, №6, 2015,с. 76-77
7. Герасимова Л.Г., Тюкавкина В.В., Функциональные материалы из синтетических и техногенных отходов, Фундаментальные исследования, №2-10, 2015, С. 2083-2091.2.
8. Пустовгар А.П., Василик П.Г., Бурьянов А.Ф., Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях, Строительные материалы, №12, 2010, С.61-64.

МЕХАНИЗМ ПАССИВИРОВАНИЯ СТАЛИ КОМПЛЕКСНОЙ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ДОБАВКОЙ В МОДЕЛИ ПОРОВОЙ ЖИДКОСТИ БЕТОНА

Е.Г. Величко¹, д-р техн. наук, профессор

Л.Н. Талипов¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Современная цивилизация не обходится без металлов в повседневной жизни, но мало кто задумывается что все металлические приспособления в мире не разрушаются благодаря тонкому пассивирующему оксидному слою, имеющему толщину не более нескольких десятков нанометров. Явление коррозии и пассивности металлов и сплавов взаимосвязанные явления и имеют историю исследований. Несмотря на технологическую простоту внимание комплексным антикоррозионным добавкам было уделено, по нашему мнению, недостаточно, возможно, в силу сложности взаимопротекающих процессов. Комплексные антикоррозионные добавки на основе эфиров поликарбоксилатов совместно с нитритом натрия имеют потенциал взаимоусиливающего эффекта в щелочных средах. Исследование энергетическим рентгеноспектральным микроанализом поверхности стали под воздействием таких добавок подтвердило адсорбцию полимера на поверхность пассивирующего слоя. Полученные данные создали предпосылки для более детальных исследований процесса формирования тонких слоев на сталях.

Ключевые слова: коррозия, пассивация, антикоррозионные добавки, адсорбция, оксиды.

Пассивность металлов и сплавов является наиболее важным явлением, связанным с нашей цивилизацией на основе металлов. Все мы принимаем технологию металлов в нашей повседневной жизни, но немногие из нас понимают, что большинство конструкционных металлов являются технически значимыми только из-за наличия поверхностной оксидной пленки, толщина которой не может превышать нескольких нанометров (несколько десятков атомных диаметров). Эти пленки часто изолируют фазы, которые без кинетических ограничений обычно бурно реагируют.

Согласно [1] пассивность это - состояние повышенной коррозионной устойчивости металла или сплава (в условиях, когда с термодинамической точки зрения они являются вполне реакционноспособными), вызванное преимущественным торможением анодного процесса растворения металла.

Современное представление пассивности обуславливается наличием слоистой структуры окислов на поверхности стали, а именно дефектный оксидный или гидридный барьерный слой, прилегающий к металлу, и внешний слой, который образуется в результате осаждения материала в результате реакции проходящих катионов с частицами в окружающей среде [2]. В конечном счете автором было утверждено, что анализ пассивного состояния является областью электрохимической кинетики, а не электрохимической термодинамики, за исключением второго закона термодинамики. Пассивация была обусловлена балансом скорости роста и разрушения пленки. Если скорость роста барьерного слоя выше скорости его разрушения возникает пассивность металлов, если же наоборот, возникает депассивация и скорость коррозии увеличивается. Конеч-

ным результатом является то, что металл превращается в барьерный слой, который, в свою очередь, превращается во внешний слой - раствор необратимо [2].

Точечные дефекты кристаллов оксидной пленки способствуют формированию дырок и электропроводности, в результате которой электроны мигрируют сквозь толщу окислов восстанавливая деполяризаторы [3, 4].

Комплексным антикоррозионным добавкам, применяемым в составе бетона для ингибирования стальной арматуры, уделялось мало внимания. Первые исследования [5] сформировали предпосылки для применения добавок на основе нитрит-нитрата кальция и нафталинформальдегидного поверхностно-активного вещества. Позднее в работе [6] были отражены результаты исследований множества комплексных антикоррозионных добавок на основе пассиваторов и поверхностно-активных веществ. Комбинируя компоненты таких добавок можно достигать помимо основного их эффекта и экологический, за счет сокращения токсичных веществ в составе таких добавок, что является одним из приоритетных требований экологической безопасности строительных материалов [7].

Нами была предложена комплексная антикоррозионная добавка на основе эфиров поликарбоксилатов. В ее составе активный пассиватор – нитрит натрия, который инициирует рост пассивной пленки, состоящей из более устойчивых оксидов. Молекулы полимеров предположительно должны экранировать верхние слои оксидной пленки, препятствуя осаждению деполяризаторов на барьерный дефектный слой. Таким образом гипотетически возможно создание взаимно усиливающего эффекта, а именно - более устойчивые к диффузии в среду атомы барьерного слоя образуются большей толщины, а также происходит его полимерное покрытие слоями поликарбоксилатов за счет адсорбции акцепторных карбоксильных групп. Таким образом возможно формирование более диэлектрической поверхности, с одной стороны препятствующей переходу электронов от металла к деполяризатору, с другой толщина и плотность пленки препятствует переходу катионов в раствор.

Для определения экранирующего покрытия из поликарбоксилатов моделировалась поровая жидкость бетона по параметру рН=12 добавлением в водопроводную воду гидроксида натрия табл.1.

Таблица 1. Модели поровой жидкости бетона

	NaOH, г	NaNO ₂ , %	PCE, %
1	-	-	-
2	0,12	1,0	-
3	0,12	1,0	0,5
4	0,12	-	0,5

В указанных в табл. 1 моделях поровой жидкости образцы размерами 20x20x4 мм из стали марки СтЗсп шлифованные до металлического блеска 7 класса чистоты, выдерживались 10 суток.

Через 10 суток энергетическим рентгеноспектральным микроанализом «Eumex» (Германия) исследовали элементный анализ поверхности образцов с

целью идентификации защитного покрытия, по химическим элементам, входящим в его состав, и определения его сплошности.

У образца, выдержанного в модели поровой жидкости бетона с комплексной антикоррозионной добавкой 1%NaNO₂+0,5%PCE наблюдалось относительно повышенные интенсивности кислорода, углерода и натрия на поверхности. Повышенные интенсивности при рентгеноспектральном микроанализе свидетельствуют о повышенном содержании элемента в исследуемом объеме.

Такие повышения свидетельствуют об адсорбции полимера на поверхность стальных образцов. Механизм образования пассивирующего слоя в случае с идеально вычищенной поверхностью начинается с образования Fe₃O₄. Далее нитрит ионы окисляют Fe²⁺ до Fe³⁺. Пленка продолжает расти, образуя γ-Fe₂O₃. Процесс роста пленки сопровождается адсорбцией полимера и возможно, что элементы полимеров присутствуют в упаковке окислов. Завершение формирования пленки окислов сопровождается экранированием поверхности вероятно монослоем атомов полимера усиливая диэлектрические свойства пассивного слоя.

Механизм пассивации комплексными антикоррозионными добавками поверхность сталей разделен на несколько сложных процессов в силу своего комплексного состава. Данные, полученные в настоящем исследовании, создают предпосылки для более детального изучения влияния комплексных антикоррозионных добавок, а именно необходимо определить возможность пассивации в зависимости от показателя водорода и в присутствии различных деполяризаторов в среде таких как сульфиты и ионы хлора. А также необходимо определить послойную структуру пассивирующих слоев.

Библиографический список:

1. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Пассивность и защита металлов от коррозии. М.: Наука. 1965. 208 с.
2. Macdonald D. The history of the Point Defect Model for the passive state: A brief review of film growth aspects // *Electrochimica Acta*. 2011. № 56(4). С. 1761-1772.
3. Mott N.F. The theory of the formation of protective oxide films on metals. // 1947. С. 429.
4. Cohen M. The formation and properties of passive films on iron // *Canadian journal of chemistry*. 2011. №37(1). С. 286-291.
5. Алексеев С.Н., Ратинов В.Б., Розенталь Н.К., Кашурников Н.М. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях: М.: Стройиздат, 1985. 272 с.
6. Тупикин Е.И., Платонова Е.Е. Повышение способности металлов к пассивации применением комплексных добавок: М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 128 с.
7. Величко Е.Г., Цховребов Э.С. Экологическая безопасность строительных материалов: основные исторические этапы // *Вестник МГСУ*. 2017. Т.12. Вып.1 (100). С. 26-35.

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ БЕТОНА

С.О. Капустин¹, студент

М.С. Горохов¹, студент

И.Г. Джагарян¹, научный руководитель, старший преподаватель.

¹ *Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)). Институт пути, строительства и сооружений.*

Аннотация. В данной статье дано описание одного из важнейших свойств бетона- водонепроницаемости, а также метод определения марки бетона «по мокрому пятну» на установке УВБ-МГ 4. Раскрывается методика изготовления образцов с заполнителями разного качества, подбора состава бетона и непосредственно самого испытания.

Ключевые слова: бетон, водонепроницаемость, водонепроницаемость бетона, заполнитель, марка по водонепроницаемости, пористость бетона, капилляры, состав бетона.

Тема о способах повышения водонепроницаемости бетона не теряет своей актуальности по сей день, т. к. водонепроницаемость — это одно из самых важных свойств бетонов, работающих под давлением жидкости. Такой бетон широко используется в тоннелестроении, подземных бункерах, гидротехнических сооружениях, дамбах и т.д.). Но это свойство используется и как критерий плотности бетона, во многом определяющий свойства его долговечности. На нее оказывает влияние множество факторов таких, как: возраст бетона, пористость материала, скорость схватывания и твердения смеси, применяемое вяжущее, наличие или отсутствие специализированных присадок. Также необходимо учитывать качество заполнителей, ведь, как известно, чем лучше качество, тем лучше свойства бетона.

Водопроницаемость бетона обеспечивается его индивидуальным составом. Бетон в чистом виде состоит из песка, гравия(щебня), цемента и воды. Количество в бетоне воздушных пор влияет на его водонепроницаемость, но это не значит, что с увеличением числа пор водопроницаемость увеличивается, водонепроницаемость также зависит от формы и характера этих пор. Поры могут появляться от недостаточного уплотнения бетонной смеси, неправильного подбора состава бетона и от избыточного содержания водоцементного отношения, что может повлиять на удобоукладываемость смеси. Через некоторое время после твердения бетона вода испарится, а на ее месте появятся воздушные поры и капилляры. Эти поры и способствуют проникновению воды в толщу бетона. [4]

Марка по водонепроницаемости – это способность бетона сопротивляться фильтрации воды. Различают следующие марки: W2, W4, W6, W8, W10, W12, W14, W16, W18, W20. Цифры обозначают максимальное давление воды в кгс/см², которое выдерживает образец бетона и при котором нет мокрого пятна на поверхности бетона.

Повысить водонепроницаемость бетона можно следующими способами:

- снижение В/Ц, в том числе путем введения пластифицирующих добавок;
- введение органических гидрофобизирующих добавок;
- применение набухающих добавок (перекрывающих капилляры или уменьшающих их сечения);

- введение активных минеральных добавок;
- увеличение возраста бетона;
- правильный подбор компонентов бетонной смеси (качество заполнителей).

Целью исследования является определение влияния качества заполнителей на водонепроницаемость бетона. В испытаниях использовались 6 разных составов бетона, в связи с этим были определены следующие характеристики заполнителей: насыпная плотность песка, зерновой состав песка, истинная плотность песка (с помощью пикнометра), вредные примеси в песке, вредные примеси щебня, истинная плотность щебня.

Таблица 1. Характеристики составов образцов

№ состава	Песок	Щебень	Цемент	В/Ц	ОК, см	Добавки
1	Стандартный	Плохого качества, не просеянный(5-20мм)	Портланд-цемент (Цем I 42,5 F) ГОСТ 31106-2016	0,675	9,7	нет
2	Мелкий	Среднего качества, просеянный(5-20мм)		0,8	2,4	нет
3	Крупный	Хорошего качества(20-30мм)		0,83	9	нет
4	Крупный	Хорошего качества(20-30мм)		0,5	0,5	нет
5	Крупный	Хорошего качества(20-30мм)		0,3	12	Master Glenium 115 (Суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата)
6	Крупный	Хорошего качества(20-30мм)		0,4	18	Активная минеральная добавка метакаолин

Далее были изготовлены образцы в форме цилиндра диаметром и высотой 150 мм, полученные по ГОСТ 28570, и определена средняя плотность бетонных образцов.



Рис. 1. Полученные бетонные образцы

При определении марки по водонепроницаемости бетона был применен метод «мокрого пятна». Суть этого метода в измерении максимального давления, при котором через толщину бетона не просачивается вода.

Установка УВБ-МГ4 предназначена для испытания бетонных образцов-цилиндров на водонепроницаемость по методу «мокрого пятна» в соответствии с ГОСТ 12730.5. Установка автоматически управляет увеличением и поддержанием давления воды, сохранением в журнал информации о времени появления мокрого пятна и соответствующего значения ступени в Мпа и остановкой испытания в камере, где вода прошла через толщину бетона. Давление воды на ступенях в Мпа: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2. Для образцов высотой и диаметром 150 мм каждая ступень длится 16 часов соответственно [7].

6 образцов составов №1,2,3 были предварительно подготовлены в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 [2]:

- гильза и образец были нагреты в сушильном шкафу до температуры 65 °С;
- парафин, требуемый для заполнения пространства между гильзой и бетонным образцом, также был нагрет до температуры плавления (65°С);
- на гладкой ровной поверхности образец, помещенный в гильзу, был залит парафином, остужен до комнатной температуры и помещен в установку;
- 2 резиновые прокладки для плотного закрепления образца в гнезде были плотно затянуты гидравлическим ключом;
- произведен запуск установки.

После завершения эксперимента вся информация об опыте выносится на экран установки. При желании ее можно перенести на компьютер для упрощения вывода информации. По полученным результатам бетонным образцам присваивается марка по водонепроницаемости. Таким образом, бетон марки W2 имеет крайне низкий показатель и требует дополнительной гидроизоляции. Бе-

тон марки W8 и выше имеет высокий показатель водонепроницаемости и может использоваться при строительстве специальных зданий и сооружений.

Библиографический список:

1. Бетоны. Материалы. Технологии. Оборудование. - М.: Феникс, 2008.
2. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости
3. Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ. Часть 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы. Учебник для вузов. - М.: Издательство АСВ, 2012.
4. Бетон и бетонные конструкции А.Г.Зоткин,2012
5. Материаловедение в строительстве И.А.Рыбьев, Е.П.Казеннова, Л.Г.Кузнецова, Т.Е.Тихомирова,2006.
6. Гидроизоляция конструкций, зданий и сооружений Л.П.Зарубина
7. Руководство по эксплуатации для установок испытания образцов бетона на водонепроницаемость УВБ-МГ4, УВБ-МГ4.01

ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ ПОЛИСТИРОЛБЕТОН С КОМПЛЕКСНЫМ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИМ МОДИФИКАТОРОМ

Н.П. Лукутцова¹, д-р техн. наук, профессор

А.А. Пыкин¹, канд. техн. наук, доцент

С.Н. Головин¹, магистрант

¹Брянский государственный инженерно-технологический университет

Аннотация. К существенному недостатку полистиролбетона (ПСБ) относится низкая адгезия цементного камня (ЦК) с гидрофобной поверхностью пенополистирола, что способствует выкрашиванию заполнителя, приводящее к снижению физико-механических и эксплуатационных свойств бетона. Решением данной проблемы является создание прочных адгезионных связей в системе «пенополистирол – ЦК» путем структурирования и дисперсного армирования цементной матрицы высокоактивными модификаторами, макро- и микроволокнами. Цель работы – повышение свойств полистиролбетона за счет улучшения адгезии цементного камня с пенополистиролом при совместном использовании базальтовой фибры и комплексного кремнеземсодержащего модификатора (ККМ) на основе микрокремнезема и жидкого натриевого стекла. В работе применялись фотонно-корреляционная спектроскопия (размер частиц ККМ), электронная микроскопия (микроструктура ККМ и ПСБ), стандартные методы определения свойств ПСБ. Установлено, что совместное введение ККМ и базальтовых волокон в состав полистиролбетона позволяет повысить адгезию ЦК с пенополистиролом в 5,8 раза, прочность ПСБ на растяжение при изгибе в 5,6 раза, на сжатие в 2,4 раза, морозостойкость до 150 циклов.

Ключевые слова: дисперсно-армированный полистиролбетон, базальтовая фибра, комплексный кремнеземсодержащий модификатор, микроструктура, свойства, адгезия, морозостойкость.

В современных условиях развития строительного материаловедения разработка высокоэффективных бетонов [1] с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами является актуальным и перспективным научно-технологическим направлением.

К основным факторам, определяющим улучшение структуры и свойств цементных бетонов, в том числе легких, относятся:

1. Уплотнение и упрочнение цементного камня (ЦК), в частности в зоне контакта с заполнителем:

- регулированием фазового состава, пористости и плотности ЦК различными минеральными модификаторами [2], получаемыми современными способами активации [3] природного и техногенного сырья силикатного (диатомиты, трепелы, опоки и др.), алюмосиликатного (галлуазит, бентонит, метакаолин и др.), углерод-силикатного (шунгитосодержащие породы), кальций-магний-силикатного составов (волластонит, диопсид, серпентинит и др.) [4-6];

- снижением водоцементного отношения пластификаторами на основе поликарбосилатов, полиакрилатов, сульфонафталиновых формальдегидов и др.

2. Повышение адгезии ЦК с заполнителем:

- увеличением свободной поверхностной энергии заполнителя в результате механохимической обработки, воздействия электрического и магнитного полей, травления кислотными или щелочными растворами и др.;

- использованием тщательно перемешанных и уплотненных малоподвиж-

ных и жестких бетонных смесей, отличающихся практически полным отсутствием водоотделения.

3. Многоуровневое дисперсное армирование бетона, сопровождающееся синергетическим эффектом действия армирующих элементов (минеральных волокон из базальтовых [7], хризотил-асбестовых [8], волластонитовых и других горных пород; углеродных [9], галлуазитовых [10], биосилифицированных нанотрубок [11], микрокристаллической целлюлозы [12], древесных опилок и др.) на каждом масштабном структурном уровне, что позволяет увеличить сопротивление хрупкому разрушению [13].

К существенному недостатку полистиролбетона (ПСБ) относится низкая адгезия цементного камня с гидрофобной поверхностью пенополистирола, что способствует выкрашиванию заполнителя, приводящее к снижению физико-механических и эксплуатационных свойств бетона. Решением данной проблемы является создание прочных адгезионных связей в системе «пенополистирол – ЦК» путем структурирования и дисперсного армирования цементной матрицы высокоактивными модификаторами, макро- и микроволокнами.

Цель данной работы заключается в повышении свойств полистиролбетона за счет улучшения адгезии цементного камня с пенополистиролом при совместном использовании базальтовой фибры и комплексного кремнеземсодержащего модификатора (ККМ).

В качестве исходных материалов при приготовлении бетонных смесей для изготовления ПСБ использовались:

- портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2016 (АО «Мальцовский портландцемент», холдинг «Евроцемент групп») с удельной поверхностью 340 м²/кг, нормальной густотой цементного теста 24 %;

- пенополистирол – вспененный гранулированный полистирол (ПВГ) по ТУ 2214-004-48124154-05 (ООО «ЕПС-Самара») фракции 2,5-5 мм, насыпной плотностью 12 кг/м³;

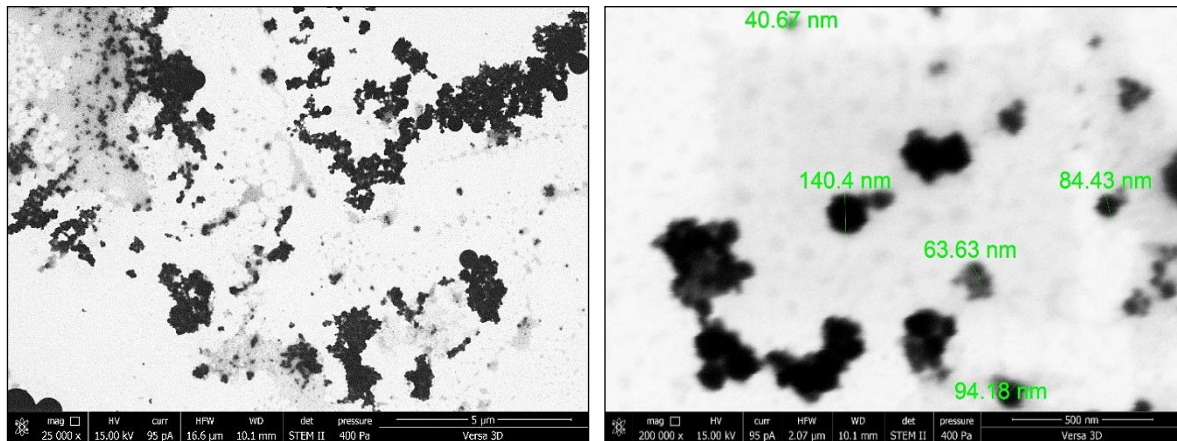
- базальтовая фибра (БФ) по ТУ 5952-036-05328981-05 (ОАО «Ивотстекло») с длиной волокна 1,5-4,5 мм, диаметром 7,5-10,5 мкм;

- комплексный кремнеземсодержащий модификатор (ККМ), полученный в лабораторных условиях высокоскоростным смешиванием конденсированного неуплотненного микрокремнезема (МК) марки МК-85 по ТУ 5743-048-02495332-96 (ООО «Микросилика») с суперпластификатором С-3 (СП С-3) по ТУ 5870-005-58042865-05 (ОАО «ГК Полипласт»), жидким натриевым стеклом (ЖНС) по ГОСТ 13078-81 (ФК «Промстеклоцентр») плотностью 1380-1420 кг/м³, силикатным модулем 2,9-3,1 и дистиллированной водой (ДВ) при следующем соотношении компонентов, % по массе: 50 – МК, 0,5 – СП С-3, 20 – ЖНС, 29,5 – ДВ.

- вода затворения, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

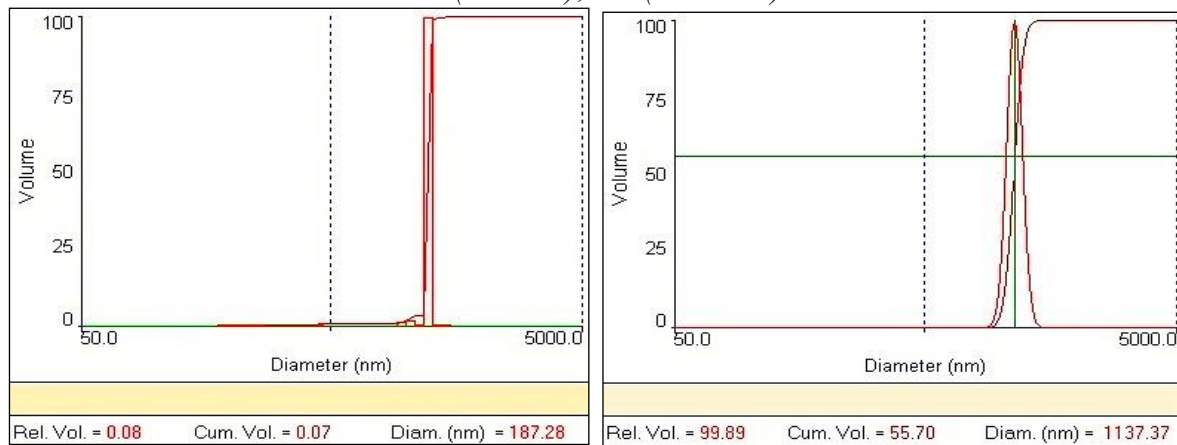
ККМ представляет собой пастообразную дисперсную систему, состоящую из цепопечных агломератов в виде совокупности слабо связанных сферических частиц МК и их агрегатов средним размером около 1137 нм в интервале от 187 до 1210 нм, что подтверждено данными электронной микроскопии (рис. 1) с помощью микроскопа Versa 3D DualBeam FEI (США) и фотонно-корреляционной спектроскопии (рис. 2) на анализаторе ZetaPlus (США). Кроме

того, содержатся отдельные частицы размером от 41 до 140 нм.



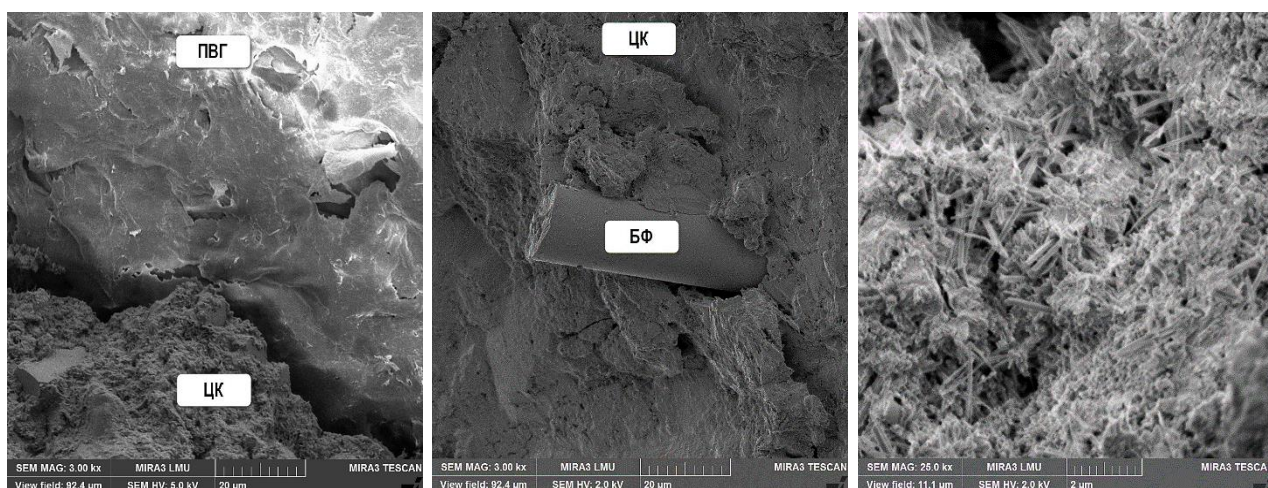
а б

Рис. 1. Микроструктура кремнеземсодержащего модификатора:
а – ($\times 25000$); б – ($\times 200000$)



а б

Рис. 2. Размеры частиц кремнеземсодержащего модификатора:
а – минимальный; б – средний



а

б

в

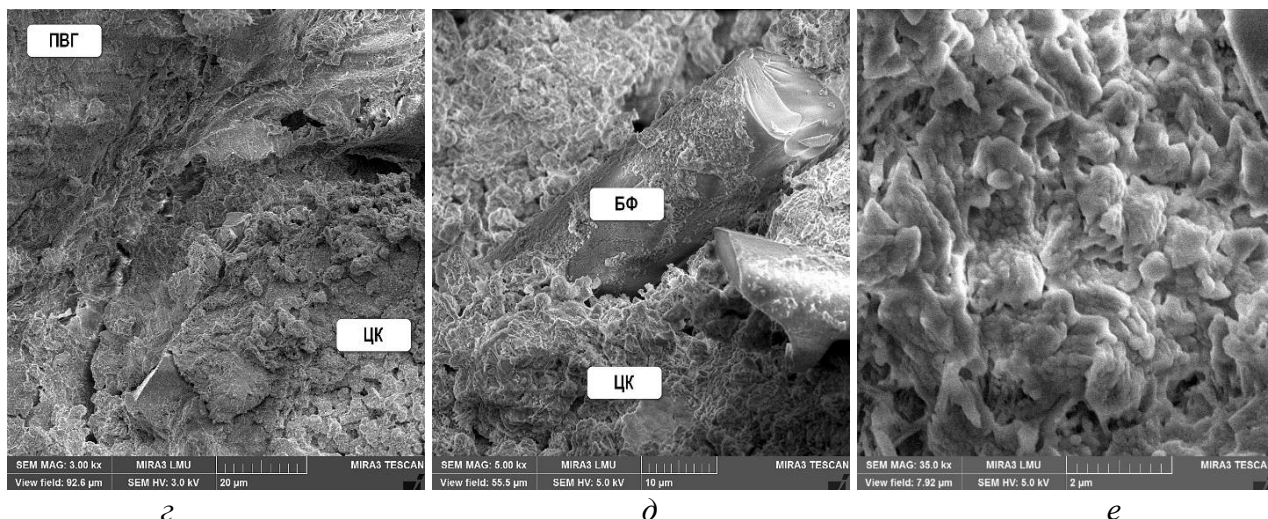


Рис. 3. Микроструктура полистиролбетона:

*а – состав [ПЦ + ПВГ] ($\times 3000$); б – состав [ПЦ + ПВГ + БФ] ($\times 3000$);
 в – новообразования в ЦК без ККМ ($\times 25000$); г – состав [ПЦ + ПВГ + ККМ] ($\times 3000$); д –
 состав [ПЦ + ПВГ + ККМ + БФ] ($\times 3000$);
 е – новообразования в ЦК с ККМ ($\times 35000$)*

Приготовление бетонных смесей (марка по жесткости Ж1) осуществлялось в лабораторном смесителе принудительного действия при следующей последовательности загрузки материалов: ККМ – ПВГ (первая стадия); БФ – 1/3 часть воды (вторая стадия); ПЦ – 2/3 части воды (третья стадия).

Для оценки эффективности действия БФ и ККМ на свойства полистиролбетона (среднюю плотность, коэффициент теплопроводности, прочность на растяжение при изгибе и на сжатие, морозостойкость) применялись стандартные методы в соответствии с ГОСТ 33929-2016.

Исследовались контрольные и модифицированные образцы ПСБ, изготовленные способом объемного вибропрессования, через 28 суток нормального твердения. Средняя плотность, коэффициент теплопроводности, прочность на сжатие, морозостойкость ПСБ определялись на образцах размерами 10×10×10 см, прочность на растяжение при изгибе – на образцах размерами 4×4×16 см.

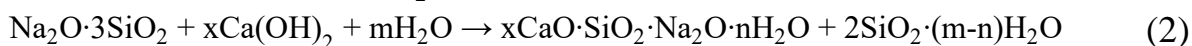
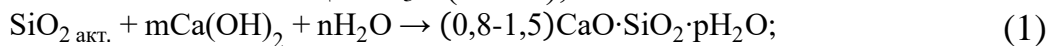
Адгезия цементного камня с ПВГ оценивалась по пределу прочности при сдвиге (по ГОСТ Р 57728-2017) испытанием образцов, изготовленных путем соединения двух слоев: нижнего – пенополистирольной подложки размерами 10×10 см с нанесением ККМ и без него; верхнего – цементного теста толщиной 1 см с введением БФ и без нее. Площадь соединения слоев при этом равнялась 9 см².

Результаты электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия) показали, что микроструктура полистиролбетона в отсутствие ККМ характеризуется относительно слабым срастанием поверхностных слоев пенополистирола (рис. 3, а) и базальтовых волокон (рис. 3, б) с цементным камнем, включающим плохо закристаллизованные и игольчатые новообразования (рис. 3, в), морфология которых идентична С-S-H-фазам и этtringитоподобным AFt-фазам [14-16].

Микроструктура полистиролбетона с ККМ отличается содержанием в цементной камне плотно упакованных новообразований пластинчато-кубической морфологии (рис. 3, е), структурирование которых наблюдается как

по поверхности пенополистирола (рис. 3, г), так и по базальтовой фибре (рис. 3, д), что обуславливает упрочнение адгезионных связей в системе «ЦК – ПВГ – БФ».

Механизм действия комплексного кремнеземсодержащего модификатора на процессы структурообразования ЦК связан с химическим взаимодействием микрокремнезема и жидкого натриевого стекла с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющимся в значительном количестве в результате гидролиза трехкальциевого силиката кальция C_3S (алита), по схемам:



При этом образуются низкоосновные кальциевые и сложные натрий-кальциевые гидросиликаты, а также кремнегель [17], способствующие уплотнению, упрочнению и снижению проницаемости цементной матрицы ПСБ.

Выявлено, что совместное введение ККМ и базальтовых волокон в состав полистиролбетона приводит к повышению:

- адгезии ЦК с пенополистиролом от 0,04 до 0,23 МПа;
- прочности на растяжение при изгибе ПСБ от 0,9 до 5 МПа, на сжатие от 2,7 до 6,5 МПа при увеличении средней плотности от 430 до 452 кг/м³, коэффициента теплопроводности от 0,125 до 0,136 Вт/(м·°С);
- морозостойкости ПСБ от 50 до 150 циклов попеременного замораживания и оттаивания (таблица 1).

Таблица 1. Состав и свойства полистиролбетона

Состав ПСБ, % по массе					Средние значения показателей свойств ПСБ					
Щ	ПВГ	ККМ	БФ	Вода	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Адгезия, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Прочность на сжатие, МПа	Морозостойкость, циклы
70,8	6,3	–	–	22,9	430	0,125	0,04	0,9	2,7	50
70,8	6,3	0,2	–	22,7	443	0,131	0,09	3,7	7,7	100
68	6	0,2	3,8	22	452	0,136	0,23	5	6,5	150

Таким образом, проведенные исследования показали, что совместное использование базальтовой фибры и комплексного кремнеземсодержащего модификатора на основе микрокремнезема и жидкого натриевого стекла позволяет повысить адгезию цементного камня с пенополистиролом в 5,8 раза, прочность полистиролбетона на растяжение при изгибе в 5,6 раза, на сжатие в 2,4 раза при незначительном увеличении средней плотности (на 5 %) и коэффициента теплопроводности (на 9 %), морозостойкость до 150 циклов.

Библиографический список:

1. Баженов, Ю.М. Обзор современных высокоэффективных бетонов / Ю.М. Баженов, Р.С. Федюк, В.С. Лесовик // Научно-технические технологии и инновации: сб. докладов междунар. научно-практ. конф., посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 29 апреля 2019 г.). – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 45-49.
2. Баженов, Ю.М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: МГСУ, 2013. 204 с.
3. 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.
4. Лукутцова, Н.П. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин. – Брянск: БГИТА, 2013. 231 с.
5. Lukutsova, N.P. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength / N.P. Lukutsova, E.G. Karpikov, S.N. Golovin // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 1005-1011.
6. Lukutsova, N.P. Fine-Grained High-Strength Concrete / N.P. Lukutsova, G.N. Soboleva, S.N. Golovin [et al.] // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 131-135.
7. Урханова, Л.А. Мелкозернистый базальтофибробетон с нанокремнеземом / Л.А. Урханова, С.А. Лхасаранов, В.Е. Розина [и др.] // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 45-48.
8. Семенов, В.С. Применение хризотилового волокна для дисперсного армирования строительных растворов / В.С. Семенов, Т.А. Розовская, А.Ю. Губский [и др.] // Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2016. № 7. С. 93-97.
9. Сарайкина, К.А. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном / К.А. Сарайкина, В.А. Голубев, Г.И. Яковлев [и др.] // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 34-38.
10. Lukutsova, N.P. The Dependence of the Aggregate Stability to Concrete of Modifying Additives Based on Halloysite Nanotubes in Water Environment on the Character of the Stabilizer / N.P. Lukutsova, I.A. Kulesh, S.N. Golovin [et al.] // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 287-292.
11. Lukuttsova, N. Concrete modified by additive based on biosilicated nanotubes / N. Lukuttsova, A. Ustinov // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10 (19). Pp. 40457-40460.
12. Pykin, A.A. Lightweight Concrete Based on Gypseous Binding Materials, Modified with Microcrystalline Cellulose, and Cavitationaly Processed Sawdust / A.A. Pykin, E.Y. Gornostaeva, N.P. Lukutsova [et al.] // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 188-192.
13. Коротких, Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании / Д.Н. Коротких // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 96-99.
14. Самченко, С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С.В. Самченко. – М.: МГСУ, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 284 с.
15. Брыков, А.С. Сульфатная коррозия портландцементных бетонов / А.С. Брыков // Цемент и его применение. 2014. № 6. С. 96-103.
16. Штарк, Й. Гидратация цемента и микроструктура бетона / Й Штарк // Цемент и его применение. 2011. № 2. С. 90-94.
17. Лотов, В.А. Механизм твердения модифицированного жидкостекольного вяжущего и композиционные материалы на его основе / В.А. Лотов, Ш.А. Хабибуллин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т.58. № 2. С. 46-50.

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСКОРЕННЫЕ СРОКИ

И.С. Пуляев¹, канд. техн. наук, доцент

А.А. Михайлова¹, аспирант, преподаватель

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. В статье рассмотрены методы обеспечения бездефектного бетонирования объектов транспортной инфраструктуры на примере строительства мостового перехода через Керченский пролив. Показано, что посредством применения современных расчётно-аналитических методов, основанных на реальном моделировании теплофизических процессов, происходящих в твердеющем бетоне как на стадии разогрева, так и на стадии остывания, в комплексе с имеющимся опытом возведения аналогичных объектов можно получить конструкции высокого качества и эксплуатационной надежности в условиях заданных темпов строительства. Поставленная проблема на сегодняшний день является актуальной в связи с бурным развитием мостостроения в нашей стране, которое имеет важное экономическое и геополитическое значение, и ее решение не представляется возможным без учёта температурного фактора твердеющего бетона. Предложенные методы позволили обеспечить требуемые потребительские свойства, предъявляемые к конструкциям указанного типа, а также выдержать установленные сроки возведения Крымского моста, и могут быть использованы при строительстве иных объектов подобного типа.

Ключевые слова: бетон, опора моста, тепловыделение, трещиностойкость, качество, срок строительства.

Развитие транспортной инфраструктуры в Российской Федерации напрямую связано с преобразованиями в финансовой сфере государства и оказывает существенное влияние на логистические процессы, которые в свою очередь обеспечивают экономическую стабильность и безопасность нашей страны. При этом важное место в этом процессе занимает обеспечение надежности и безопасности пассажирских и грузовых перевозок и, как следствие, предъявляются все более высокие стандарты и требования к обеспечению долговечности и безотказности транспортных объектов, среди которых особое место занимают мостовые конструкции. За последние десятилетия в нашей стране построено большое количество транспортных объектов, среди которых как однотипные мостовые конструкции, так и крупные строительные объекты, сооружение которых позволило внести существенные преобразования в дорожно-транспортную инфраструктуру нашей страны. Среди этих объектов – вантовый мост через р. Оку на обходе г. Муром в Владимирской области, мостовой переход через остров Русский на Дальнем Востоке, транспортные переходы в Москве и Санкт-Петербурге и, конечно же, Крымский мост – крупнейшее сооружение современности, строительство которого позволило решить сложные социально-экономические и политические вопросы полуострова.

Известно, что строительство мостовых конструкций чаще всего происходит в пересеченной местности в условиях соединения прибрежных зон, в связи с чем особые требования в этом случае предъявляются к бетону транспортных сооружений – как главному строительному материалу, используемому при воз-

ведении мостов [1]. Для строительства опорных частей мостов – ростверков, тел опор, стоек, ригелей – чаще всего применяются бетонные смеси, гарантирующих получение бетона класса В25...30, а в некоторых случаях, как например, при строительстве мостового перехода через Керченский пролив, который, как известно, возведен в пересеченной местности со сложными геологическими и гидрологическими условиями, для строительства русловых опор был запроектирован бетон класса В35. Применение бетонов таких классов напрямую приводит к повышенному тепловыделению, связанному с экзотермией цемента и определенному ранее [2], и, как следствие, необходимостью решения вопроса оптимизации температурного фактора с целью повышения эксплуатационной надежности и долговечности строительных конструкций с одной стороны и обеспечению заданных темпов строительства всего объекта с другой.

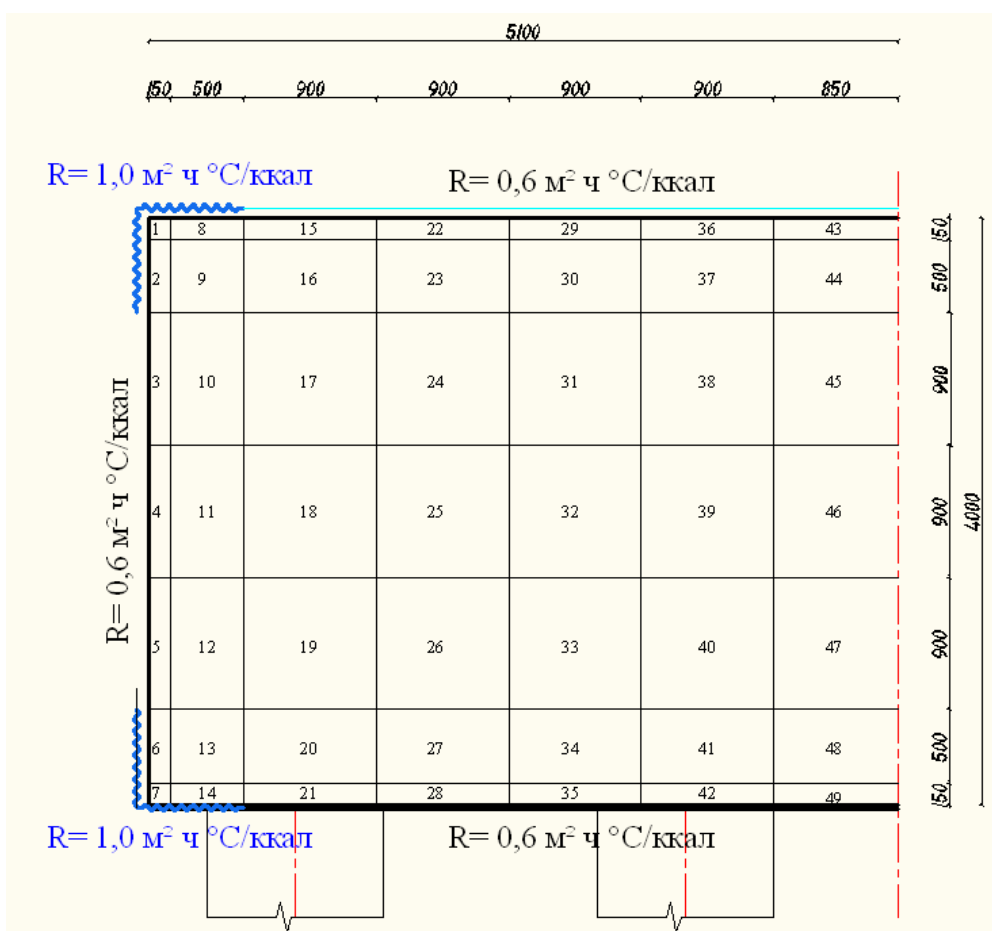


Рис. 1. Расчётная схема ростверка 19500x10200x4000 мм

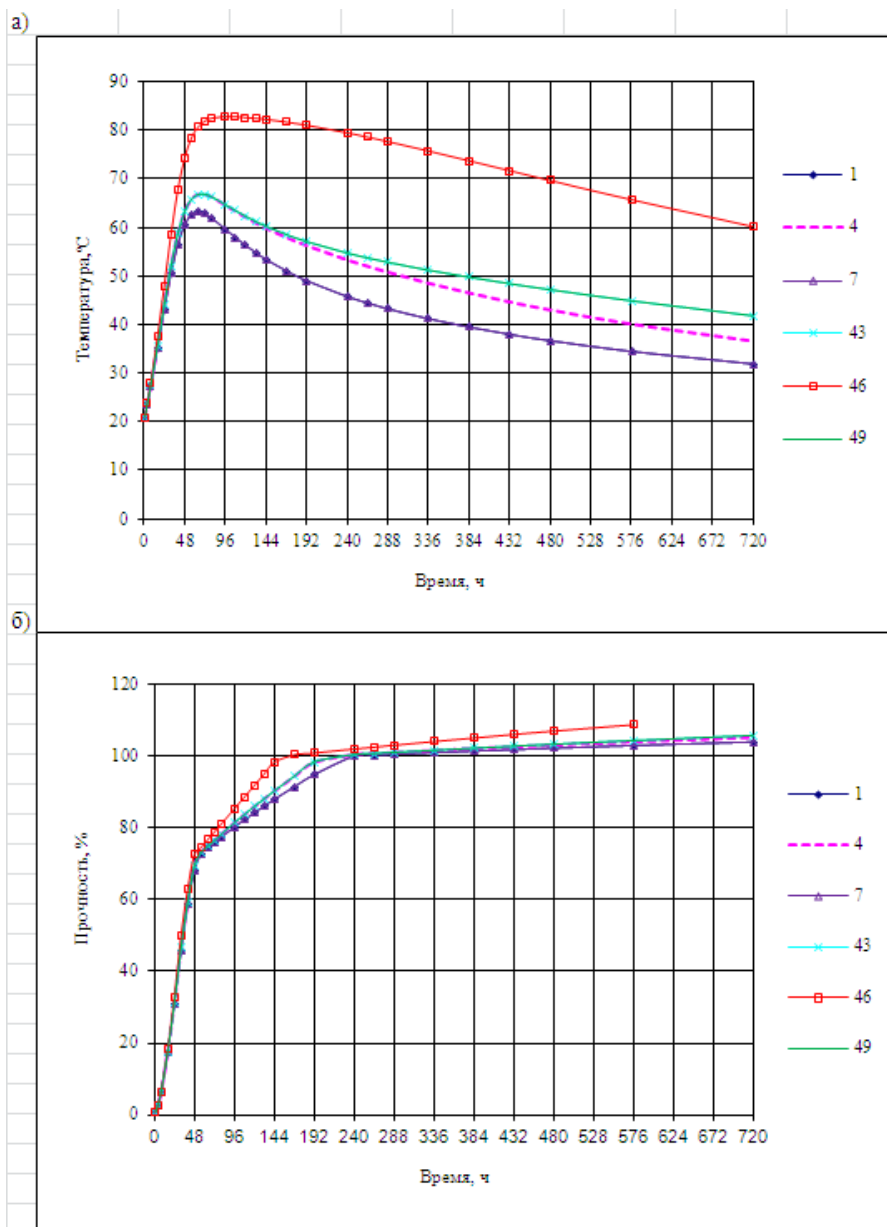


Рис. 2. График изменения температуры (а) и набора прочности (б) бетоном при температуре бетонной смеси 20°С и окружающей среды 20°С

В частности, с подобной проблемой и поиском путей ее решения строители столкнулись при возведении опор Крымского моста. Проектом было предусмотрено строительство соединенного автодорожного и железнодорожного мостового перехода в условиях сложной гидрологической обстановки, в связи с чем при проектировании объекта было принято решение об устройстве массивных ростверков опор размером 19,5x10,2x4,0 м и объемом бетонной смеси 800 м³. Учитывая экономическую и геополитическую значимость указанного объекта заказчиком строительства были обозначены сжатые сроки возведения объекта, что потребовало поиска путей оптимизации временных затрат на укладку и выдерживание бетона конструкции. Сложность поставленной задачи заключалась также в том, что возведение большего числа массивных ростверков графиком производства работ было намечено на июль – сентябрь года – время, когда на стыке Таманского и Керченского полуостровов наблюдаются наиболее высокие температуры воздуха как в дневные, так и в ночные часы суток. Пред-

варительные теплофизические расчёты, проведенные посредством расчётно-аналитического комплекса ЗА – многократно апробированного на иных аналогичных объектах [3], – показали, что срок остывания бетонной смеси, уложенной в опалубку ростверка, при бетонировании за один приём до температуры 50°C, при которой возможно устройство тел опор и стоек [4], составляет более 40 суток, что не позволяет обеспечить возведение опор в целом за временной период, регламентированный сроком строительства всего объекта. Кроме того, в бетонном массиве конструкции в период его разогрева и остывания наблюдаются большие температурные перепады и даже с учётом формирования благоприятного собственного термонапряжённого состояния в твердеющем бетоне в конструкции как в момент распалубливания, так и при последующей эксплуатации могут быть образованы температурные трещины. Связано это в том числе с тем, что основанием для устройства ростверка служило поле из буронабивных свай, температурный режим которых оказывает неравномерное воздействие на бетонный массив ростверка. Расчётная схема ростверка при бетонировании за один приём показана на рисунке 1, графики изменения температуры и набора прочности бетоном при температуре бетонной смеси 20°C и температуре окружающей среды 20°C – на рисунке 2.

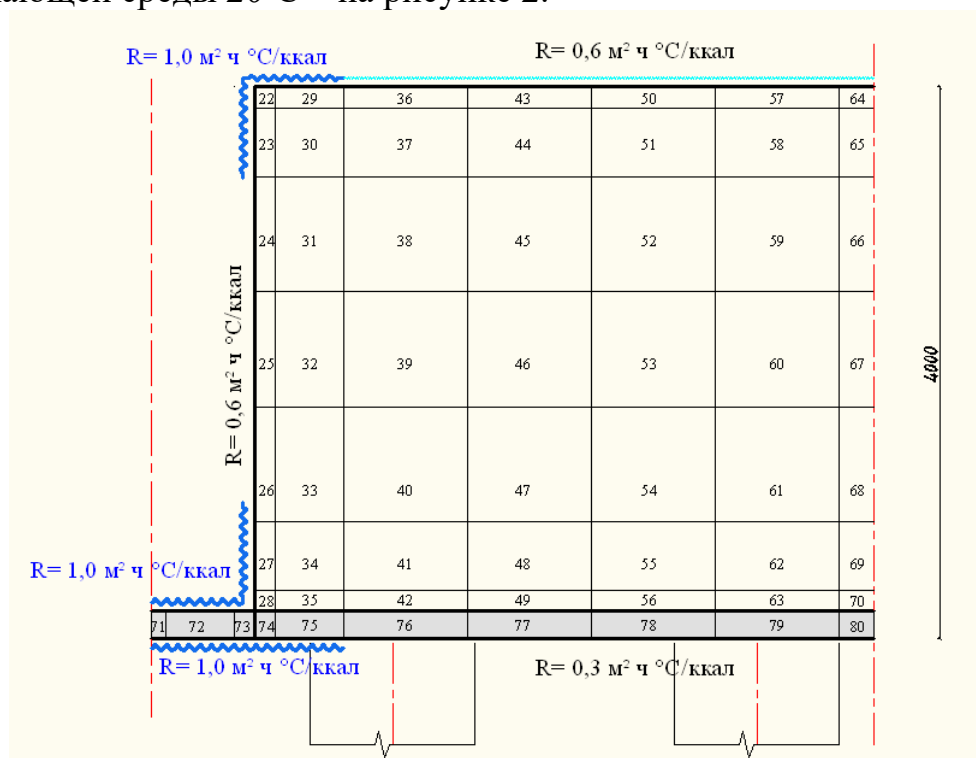


Рис. 3. Расчётная схема ростверка (при поэтапном бетонировании)

С этой целью было принято решение осуществить поэтапное бетонирование конструкции ростверков, частично основанное на примененном ранее при возведении вантового моста через реку Оку на обходе города Муроме методе, при котором массивная часть пилона разбивалась на три блока бетонирования и поэтапно возводились сначала два крайних массивных блока, а затем – тонкий блок – перемычка. Однако в случае строительства Крымского моста ввиду крайне сжатых сроков строительства объекта было принято решение возводить ростверки массивных опор захватками по высоте и с разбивкой на блоки бето-

нирования по длине, при этом первая захватка принималась высотой 0,8 м, вторая – 3,2 м. Расчётная схема ростверка (поэтапное бетонирование) показана на рисунке 3, график изменения температуры и набора прочности бетоном при температуре бетонной смеси 20°C и температуре окружающей среды 20°C – на рисунке 4.

Из представленных расчётов видно, что до заданной температуры бетон остывает в течение 24 суток и этого времени оказалось достаточным с точки зрения временной оборачиваемости опалубки ростверков моста. При этом при бетонировании блоки были укрыты слоем полиэтиленовой плёнки, двумя слоями дорнита и двумя слоями полиэтиленовой плёнки, защищающими дорнит от намокания в ненастную погоду, и обеспечивающие термическое сопротивление $R = 0,6 \dots 0,7 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C} / \text{ккал}$; по всем граням и ребрам конструкции на ширину 600 мм было создано термическое сопротивление $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C} / \text{ккал}$, которое обеспечивалось дополнительной укладкой двух слоев дорнита по забетонированной конструкции и установкой трех слоев дорнита и слоя полиэтиленовой плёнки по опалубке; по опалубке было обеспечено термическое сопротивление $R = 0,6 \dots 0,7 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C} / \text{ккал}$, которое было получено постановкой слоя дорнита и слоя полиэтиленовой плёнки по опалубке. Общая схема укрытия ростверка показана на рисунке 5.

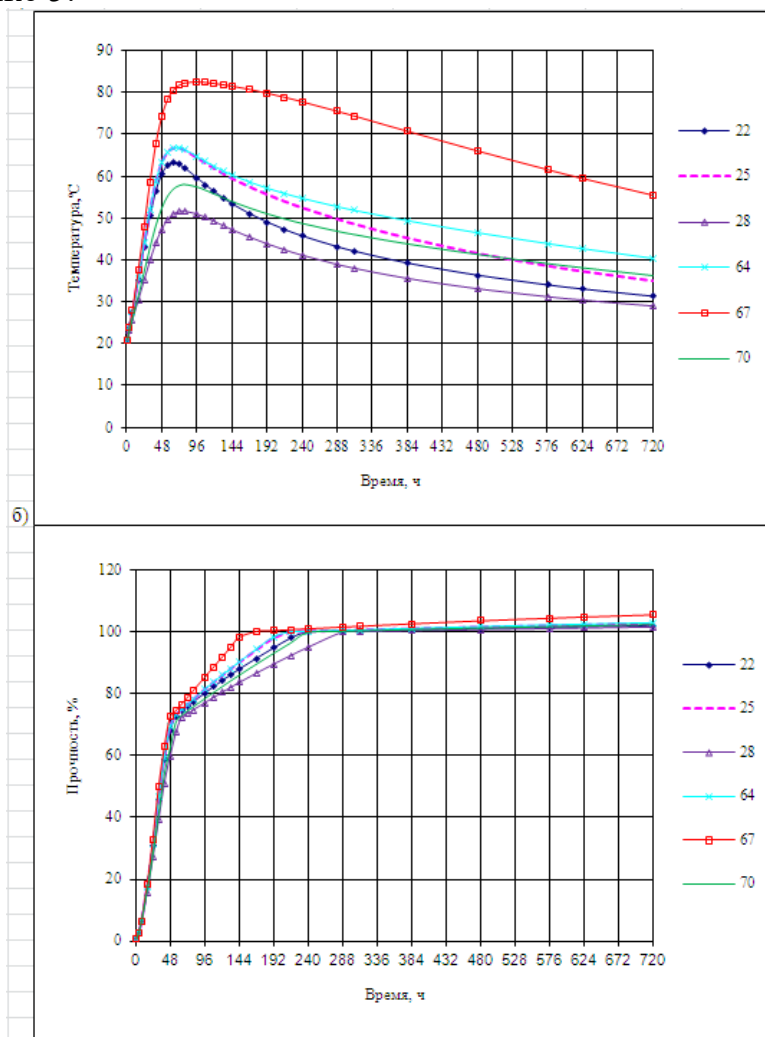


Рис. 4. График изменения температуры (а) и набора прочности (б) бетоном при температуре бетонной смеси 20°C и окружающей среды 20°C (при поэтапном бетонировании)

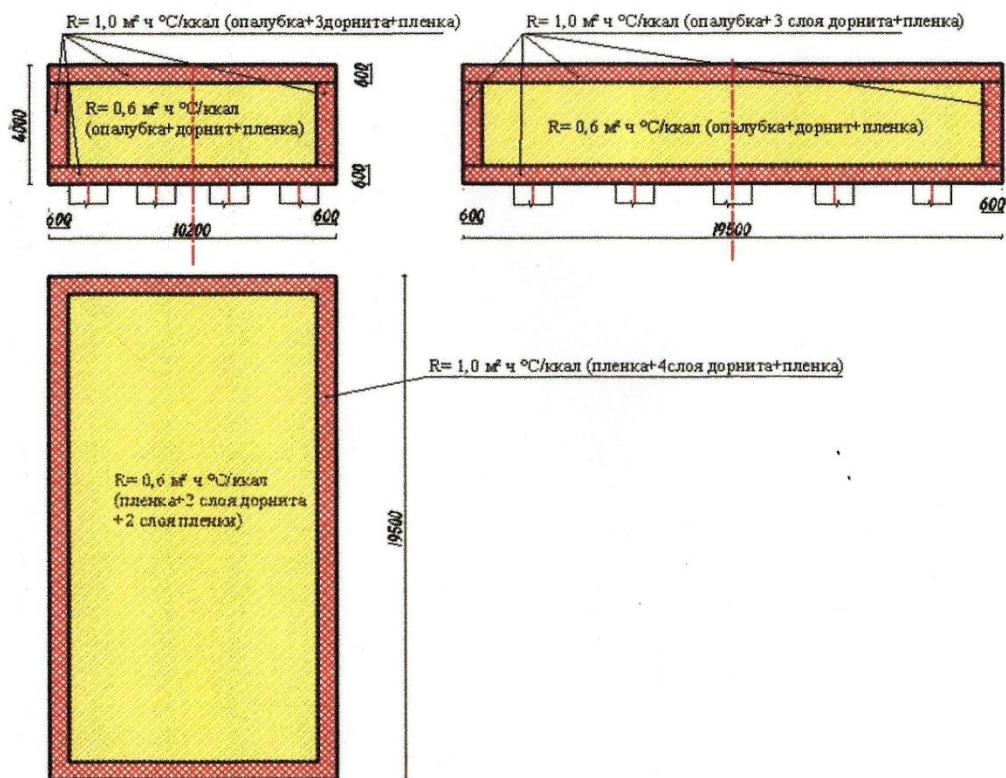


Рис. 5. Общая схема укрытия ростверка

Данная технология была согласована заказчиком строительства и позволила интенсифицировать процесс возведения объекта за счет сокращения срока выдерживания крайних массивных блоков ростверков с возможностью последовательного устройства не менее массивных тел опор и стоек параллельно с третьим блоком – перемычкой. Полученные результаты легли в основу специально разработанных технологических регламентов на производство подготовительных, арматурных, опалубочных и бетонных работ при строительстве Крымского моста, обеспечили ускоренную оборачиваемость опалубочной системы ростверков опор и, самое главное, позволили получить бездефектные конструкции с заданными потребительскими свойствами как отдельных конструктивных элементов, так и всего Крымского моста в целом.

Библиографический список:

1. Балючик, Э.А., Черный, К.Д. Повышение трещиностойкости опор мостов из монолитного бетона конструктивными методами / Э.А. Балючик, К.Д. Черный // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 257. М.: ЦНИИС, 2010. С. 49-57.
2. Соловьянчик, А.Р., Пуляев, С.М., Пуляев, И.С. Исследование тепловыделения цементов, используемых при строительстве мостового перехода через Керченский пролив / А.Р. Соловьянчик, С.М. Пуляев, И.С. Пуляев // Вестник СибАДИ. 2018. № 2. С. 283-293.
3. Соловьянчик, А.Р., Коротин, В.Н., Шифрин, С.А., Вейцман, С.Г. Опыт снижения трещинообразования в бетоне от температурных воздействий при сооружении Гагаринского тоннеля / А.Р. Соловьянчик, В.Н. Коротин, С.А. Шифрин, С.Г. Вейцман // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2002. № 3-4. С. 53-59.
4. Пуляев, С.М., Пуляев, И.С. К вопросу о максимальной температуре основания, при которой допускается укладка бетонной смеси при возведении транспортных сооружений / И.С. Пуляев, С.М. Пуляев // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2011. № 2. С. 295-304.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ С УЧЕТОМ КОЛЬМАТАЦИИ ПОР

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

В.С. Коновалова¹, канд. техн. наук

А.С. Евсяков¹, аспирант

¹*Ивановский государственный политехнический университет*

Аннотация. Проведено исследование коррозионного поведения цементного бетона из портландцемента марки ПЦ-500 Д0 в 2 %-ом растворе $MgCl_2$, в ходе которого установлено, что близкое к равновесному состояние в системе устанавливается после 70 суток воздействия на бетон жидкой агрессивной среды. С помощью математической модели коррозии II вида цементного бетона по экспериментальным данным построены профили концентраций переносимого компонента «свободного гидроксида кальция», по которым произведен расчет профилей концентраций по толщине образца поступающих в бетон хлорид-ионов. Установлено, что пороговое значение концентрации хлорид-ионов в бетоне достигается через 174 суток при коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$. Определены показатели массопереноса для исследуемой системы, анализ которых показал, что с течением времени происходит замедление процесса переноса основного компонента «свободного гидроксида кальция» по твердой и жидкой фазам.

Ключевые слова: кольматация, коррозия бетона, массоперенос, прогнозирование долговечности, математическое моделирование.

При воздействии на цементный бетон жидкой агрессивной среды происходит взаимодействие основного компонента поровой жидкости бетона «свободного $Ca(OH)_2$ » с компонентами агрессивной среды. В результате этого взаимодействия чаще всего образуются труднорастворимые или нерастворимые продукты коррозии, которые осаждаются и накапливаются на стенках пор бетона [1, 2]. Таким образом происходит процесс частичного или полного закупоривания пор бетона, который называется кольматация [3, 4]. Кольматация пор затрудняет проникновение агрессивной среды вглубь бетона, вследствие чего происходит торможение протекания процессов коррозии [5, 6].

При исследовании коррозионного поведения цементного камня, изготовленного из портландцемента марки ПЦ-500 Д0, в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ было установлено, что достижение равновесной концентрации катионов кальция происходит после 70 суток воздействия жидкой агрессивной среды на образец (рис. 1) [7]. После достижения равновесия в системе дальнейшего изменения концентрации не происходит, поскольку проникновение коррозионной среды вглубь поровой структуры цементного камня затруднено. Полученные в ходе экспериментального изучения жидкостной коррозии цементного камня результаты используются для определения значения концентраций для переносимого компонента «свободного $Ca(OH)_2$ » в произвольный момент времени по всей толщине конструкции из бетона, а также, позволяют рассчитывать кинетику процесса массопереноса в жидкой и твердой фазах [7].

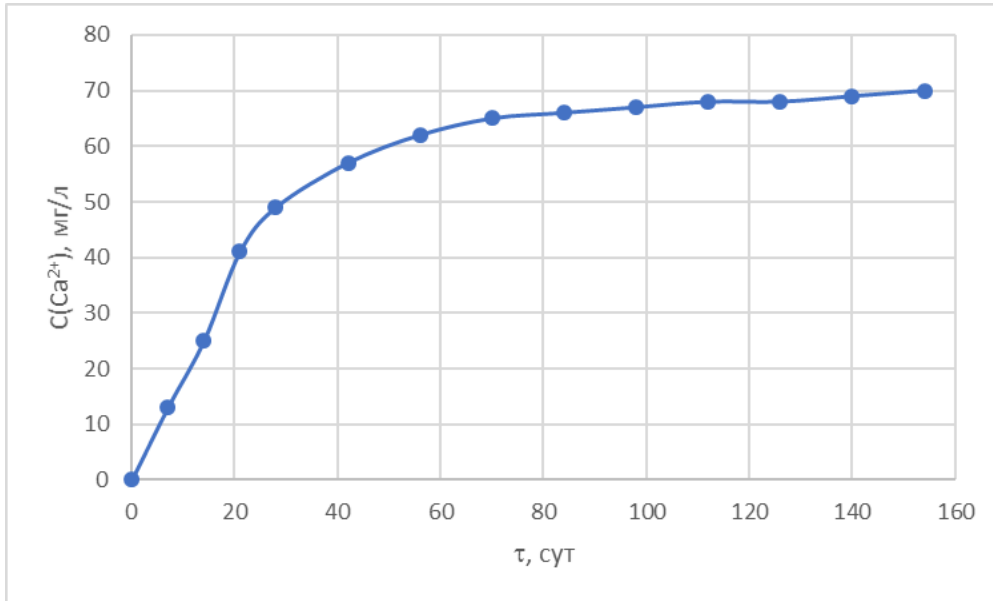


Рис. 1. Кинетическая кривая концентрации катионов кальция в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ при коррозии цементного бетона

С помощью разработанной математической модели, описывающей жидкостную коррозию II вида цементного бетона (1) [8], произведен расчет профилей концентрации «свободного $Ca(OH)_2$ » по толщине исследуемого образца цементного камня из портландцемента марки ПЦ-500 Д0 (рис. 2-а) и определены характеристики процесса массопереноса при коррозии бетона в результате воздействия на него 2 %-го раствора $MgCl_2$ [9, 10].

$$\begin{aligned}
 \theta(\bar{x}, Fo_m) = & -\frac{Ki_m^*}{6}(6Fo_m + 3\bar{x}^2 - 1) + \\
 & + \frac{2Ki_m^*}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \int_0^1 \theta_0(\xi) d\xi + \\
 & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \\
 & + \left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 + 2}{6} \right) \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi - \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cdot \xi \cdot d\xi + \\
 & + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cdot \xi^2 \cdot d\xi - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \times \\
 & \times \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь: $Ki_m^* = \frac{q_6 \delta}{k C_0 \rho_6}$ – модифицированный критерий Кирпичева; $Fo_m = \frac{k \tau}{\delta^2}$ – массообменный критерий Фурье; $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ – безразмерная координата; $\theta(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C(x, \tau) - C_0}{C_0}$ – безразмерная концентрация; $Po^*(\bar{x}) = \frac{q_v(x) \delta^2}{k C_0 \rho_6}$ – модифицированный критерий Померанцева; n – число членов ряда; ξ – координата интегрирования в диапазоне $0 \leq \xi \leq \bar{x}$.

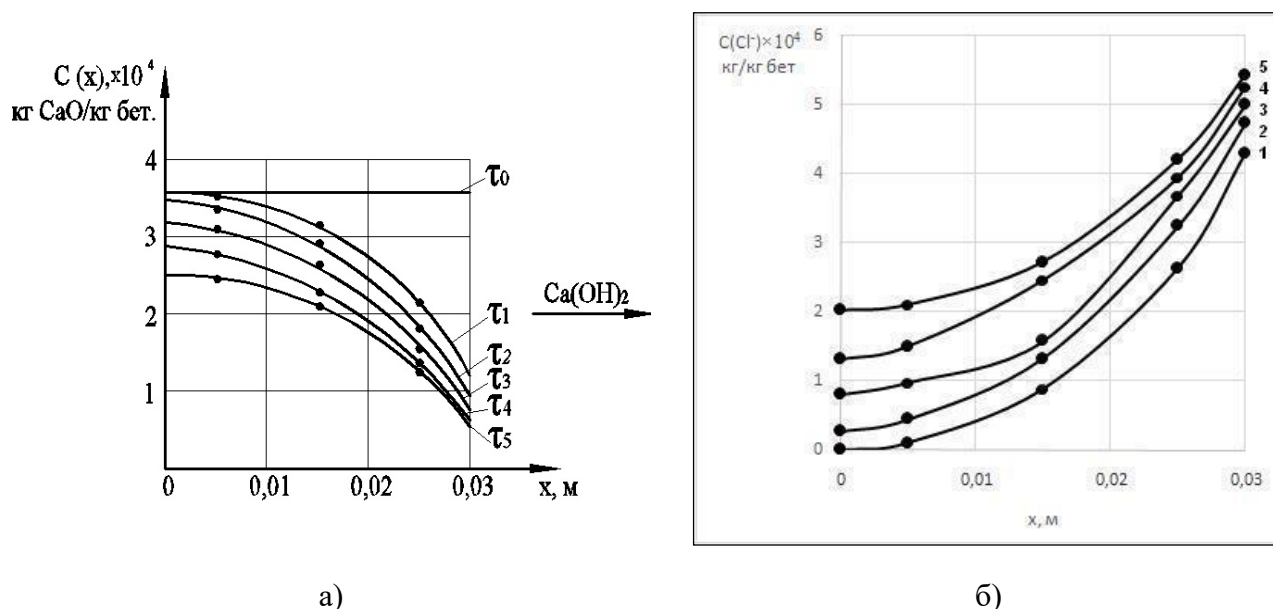


Рис. 2. Профили концентраций а) Ca(OH)_2 и б) хлорид-ионов по толщине образца цементного камня при коррозии в 2 %-ом растворе MgCl_2 при τ : 1 – 14 сут; 2 – 28 сут; 3 – 42 сут; 4 – 56 сут; 5 – 70 сут

С помощью профилей концентраций переносимого компонента «свободного Ca(OH)_2 » по толщине исследуемого образца, представленных на рис. 2-а, проведен расчет профилей концентраций хлорид-ионов, поступающих к поверхности стальной арматуры через покрытие бетона (рис. 2-б).

Полученные профили концентраций хлорид-ионов позволяют спрогнозировать время достижения концентрации агрессивных частиц, при которой нарушается пассивность поверхности арматурной стали и начинаются коррозионные процессы на ней. Традиционно пороговым значением концентрации хлорид-ионов, после превышения которого на поверхности арматуры начинают развиваться коррозионные процессы, принимается 0,4 % по массе цемента [11]. Для исследуемых в работе образцов цементного камня пороговым значением содержания хлорид-ионов является $2,36 \cdot 10^{-4}$ кг/кг бетона. Достигается такая концентрация хлорид-ионов у поверхности арматуры через 174 суток коррозии бетона в 2 %-ом растворе MgCl_2 . При этом разложение в цементном камне высокоосновных составляющих начинается через 2,5 года воздействия агрессивной среды [12].

Из данных проведенных коррозионных исследований следует, что в рассматриваемой системе «цементный бетон – 2 %-ый раствор MgCl_2 » после 70 суток начинают устанавливаться условия, близкие к равновесным (рис. 2-а). На рис. 2-а видно, что кривые 4 и 5 сходятся в одной точке, поэтому можно предположить, что именно при этом значении концентрации «свободного Ca(OH)_2 » будет достигаться равновесие в системе. Исходя из значения концентрации переносимого компонента «свободного Ca(OH)_2 » в определенный момент времени в жидкой и твердой фазах, используя уравнение закона Генри (2) [8], определяется значение константы равновесия m . Для рассматриваемой среды значение $m = 3,9683$ кг жидкости/кг бетона.

$$C_p(\tau) = mC_{ж}(\tau), \quad (2)$$

где: C_p – равновесная концентрация переносимого компонента в твердой фазе, кг СаО/кг бетона; $C_{ж}$ – равновесная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе, кг СаО/кг жидкости; m – константа равновесия (Генри), не зависящая от концентрации, кг жидкости/кг бетона.

Представленные на рис. 2-а профили концентраций позволяют проводить определение градиентов концентрации «свободного Са(ОН)₂» на границе раздела фаз и рассчитывать по формуле (3) [7] значения коэффициентов массопроводности k (таблица 1).

$$k = \frac{q}{\rho_0 \frac{dC}{dx}}, \quad (3)$$

где: q – плотность потока массы вследствие химических реакций, кг/(м²·с); dC/dx – градиент концентрации «свободного Са(ОН)₂»; ρ_0 – плотность твердой фазы, кг/м³.

Для расчета плотности потока массы вещества q из образца цементного камня в жидкую агрессивную среду используется уравнение [7]:

$$q = \frac{\Delta C_{ж}}{S \cdot \tau}, \quad (4)$$

где: $\Delta C_{ж}$ – масса вещества, перешедшего из цементного камня в жидкую среду, кг; S – поверхность образца, м; τ – время процесса коррозии, с.

Также для расчета процессов переноса «свободного гидроксида кальция» используется коэффициент массоотдачи β . Он определяется отношением диффузионного потока q к разности концентраций ΔC (кг/м³):

$$\beta = \frac{q}{\Delta C}, \quad (5)$$

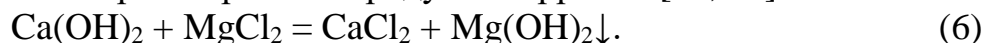
Таблица 1. Рассчитанные по экспериментальным данным характеристики массопереноса для системы «цементный бетон – 2 %-ый раствор MgCl₂»

№ п/п	Наименование показателя	τ , сут				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока «свободного Са(ОН) ₂ » в образце, кг/(м ² ·с)	4,3·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁸
2	Плотность потока Mg ²⁺ в жидкости, кг/(м ² ·с)	2,6·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁻⁸	5,1·10 ⁻⁸	5,2·10 ⁻⁸	6·10 ⁻⁹
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	1,5·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸
4	Коэффициент массопроводности, м ² /с	2,3·10 ⁻⁹	1,7·10 ⁻⁹	6,9·10 ⁻¹⁰	7,3·10 ⁻¹⁰	2,6·10 ⁻¹⁰

Полученные данные показывают, что при воздействии на бетон жидкой агрессивной среды поток массы переносимого компонента в начальный период является максимальным, а в дальнейшем происходит его значительное снижение. После резкого изменения значений всех характеристик массопереноса процесс замедляется и постепенно выходит на постоянные значения параметров [7]. Торможение процессов массопереноса при жидкостной коррозии бето-

на связано с образованием нерастворимых продуктов при взаимодействии компонентов цементного бетона с компонентами агрессивной среды.

Коррозия бетона в растворах $MgCl_2$ является примером процесса, приводящего к образованию нерастворимого продукта коррозии [12, 13]:



Таким образом, методами математического моделирования можно прогнозировать долговечность бетонов в средах различной степени агрессивности с учетом протекающих при коррозии процессов массопереноса и разрабатывать мероприятия по защите бетонных изделий и увеличению срока их службы.

Библиографический список:

1. Effective diffusivity of cement pastes from virtual microstructures: Role of gel Porosity and capillary pore percolation / R. A. Patel, J. Perko, D. Jacques, G. De Schutter, G. Ye, K. Van Bruegel // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 165. Pp. 833-845.
2. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. 524 с.
3. Перкинс, Ф. Железобетонные сооружения. Ремонт, гидроизоляция и защита / Ф. Перкинс. – М.: Стройиздат, 1980. 256 с.
4. Changes in the topology of a concrete porous space in interactions with the external medium / Y. M. Bazhenov, V. T. Erofeev, V. I. Rimshin, S. V. Markov, V. I. Kurbatov // *Engineering solid mechanics*. 2016. Volume 4. No. 4. Pp. 219-225.
5. Веселков, С. Н. Состав и свойства кольматирующих образований водозаборных скважин / С. Н. Веселков, В. Т. Гребенников // *Рациональное освоение недр*. 2013. № 6. С. 44-47.
6. Влияние суперпластификаторов на свойства бетонной смеси / Ю. Г. Барабанщиков, С. В. Беляева, И. Е. Архипов, М. В. Антонова, А. А. Школьникова, К. С. Лебедева // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 6 (74). С. 140-146.
7. Федосов, С. В. Массоперенос в процессах жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов контролируемый диффузионно-кинетическим сопротивлением / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко // *Строительные материалы*. 2011. № 1. С. 50-53.
8. Physical and Mathematical Modelling of the Mass Transfer Process in Heterogeneous Systems under Corrosion Destruction of Reinforced Concrete Structures / S. V. Fedosov, V. E. Roumyantseva, I. V. Krasilnikov, V. S. Konovalova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 012039.
9. Управление процессами массопереноса при коррозии цементных бетонов / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова, И. В. Караваев, А. С. Евсяков // *Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук»*. Москва, 2019. С. 14-18.
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. Алексеев, С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С. Н. Алексеев. – М.: Стройиздат, 1968. 232 с.
12. Damage in cement pastes exposed to $MgCl_2$ solution / C. Qiao, P. Suraneni, M. T. Chang, J. Weiss // *Materials and Structures*. 2018. Volume 51. 74.
13. Corrosion Mechanism of Cemented Soil in $MgCl_2$ Solution / P. J. Han, W. B. Zhang, X. H. Bai and T. Tong // *Kemija u industriji/Journal of Chemists and Chemical Engineers*. 2014. Volume 63. Issues 9-10. Pp. 311-316.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПЕНОБЕТОНА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ

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

П.С. Горбач¹, канд. техн. наук, доцент

¹*Ангарский государственный технический университет*

Аннотация. Неавтоклавный пенобетон является эффективным и достаточно востребованным строительным материалом, однако его производство связано с такой проблемой как отсутствие точной методики оптимизации состава, основанной на выявлении необходимой подвижности смеси. Предлагается концепция точного расчета состава пенобетона легких марок по плотности, основанная на реализации экспериментальных данных и их полной компьютерной обработке. При этом наиболее полно проявляются свойства компонентов пеносмеси и их влияние на качество готового пенобетона. Концепция реализована с помощью программы Excel пакета Office. Получение бездефектных изделий из пенобетона возможно лишь при правильном подборе соотношения сырьевых компонентов, гранулометрического состава заполнителя, технологии приготовления пенобетонной смеси. Благодаря данной программе, в условиях производства можно отработать составы пенобетонов различных плотностей, что явится хорошим подспорьем для технологов и специалистов предприятий, производящих товарный пенобетон и изделия из него.

Ключевые слова: Пенобетон, состав пенобетона, водотвердое отношение, оптимизация состава, компьютерная программа.

Неавтоклавный пенобетон в настоящее время широко используется в строительстве как хороший теплоизоляционно-конструкционный материал для устройства ограждающих конструкций. Но в условиях стройплощадки его производство связано с такой проблемой как неточность современной методики оптимизации состава, основанной на усредненных показателях без выявления фактической подвижности растворной смеси, определяемой опытным путем по её распылу в вискозиметре Суттарда согласно СН-277-80. Этот показатель является в данном случае функцией многих факторов, таких как водотвердое отношение (В/Т), процентное содержание пластификатора, качества вяжущего, доли и природы заполнителя, наличия добавок [1-3].

Предлагается концепция точного расчета состава пенобетона легких марок по плотности, в диапазоне от 400 до 900 кг/м³, и опирающаяся на результаты экспериментальных данных при их полной компьютерной обработке. При этом наиболее полно проявляются свойства компонентов пеносмеси и их влияние на качество готового пенобетона. Концепция реализована с помощью программы, написанной на Excel пакета Office. Подход к определению состава пенобетона заключается в научно-обоснованном выборе компонентов исходной смеси с эмпирически выявленными характеристиками при помощи компьютерной программы для определения оптимального состава растворной смеси с целью повышения технологичности и качества пенобетона.

Получение бездефектных изделий из пенобетона возможно лишь при правильном подборе соотношения сырьевых компонентов, гранулометрического состава смеси, технологии подготовки пенобетонной смеси [1, 2]. Так, от количественного соотношения кремнеземистого компонента и вяжущего (З/Ц) зависит средняя плотность и прочность пенобетона: с увеличением содержания

кремнеземистого компонента средняя плотность пенобетона увеличивается, а прочность – уменьшается.

По параметру прочности на сжатие весьма значимым фактором является водотвердое или для легких марок пенобетона - водоцементное отношение В/Ц (Рис 1). Первоначально при В/Ц в диапазоне 0,3 до 0,5 прочность растет, что связано с обеспечением достаточной подвижности смеси. При В/Ц от 0,45 до 0,55 – достигается оптимальный диапазон параметра В/Ц, следовательно, при оптимизации состава необходимо выдерживать В/Ц отношение в таком диапазоне, но в дальнейшем, прочность снижается по причине избыточного разжижения раствора, поскольку при увеличении подвижности смеси наблюдается явление расслаивания ячеистой массы и большие усадки. [4,5].

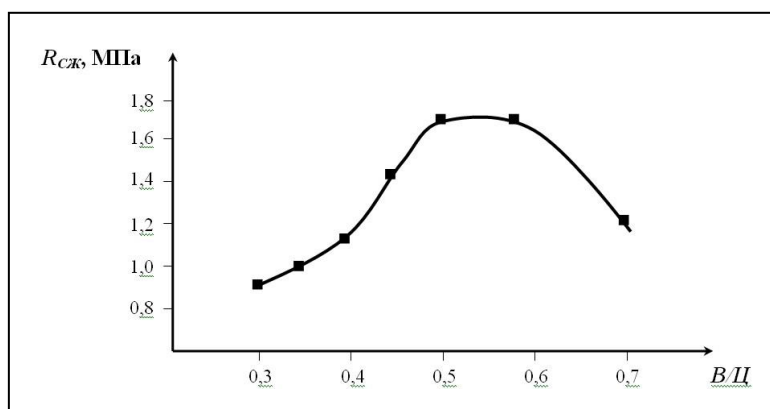


Рис. 1. Зависимость прочности ячеистого бетона $R_{сж}$ от водоцементного отношения В/Ц

Для начала расчета вводятся характеристики пенобетона, которыми необходимо задаться как исходными: средняя плотность D , соотношение заполнителя к вяжущему З/Ц. Заполнителем может приниматься мелкий песок модулем крупности не более 0,8; отсев дробления горных пород, прошедший сито 0,63; зола-унос ТЭЦ, микрокремнезем и т.д. Каждый из заполнителей специфически влияет на подвижность растворной смеси, выраженную в сантиметрах по вискозиметру Суттарда и которую следует определить. Согласно нормативным документам, состав компонентов задается на один кубометр пенобетона сорбционной влажностью.

Согласно таблице 3 из СН-277-80 вводится подвижность смеси, соответствующая марке по средней плотности. Здесь приведена выдержка из этой таблицы, соответствующая легким пенобетонам, изготовленным на клинкерном цементе (Таб. 1). При данном подходе, для точного определения водотвердого отношения, необходимого для расчёта состава, такой показатель как диаметр расплыва растворной смеси матрицы, выраженный в сантиметрах, будет являться целевой функцией.

Таблица 1. Подвижность растворной смеси по Суттарду

D , кг/м ³	400	500	600	700	800
d_c , см	38	30	24	20	18

Поскольку подвижность смеси зависит от нескольких факторов, следовательно, необходимо выявить из них два наиболее значимых и предложить их

как две независимые переменные функции подвижности растворной смеси: $d_c=f(X_1; X_2)$.

Для точного определения фактической вязкости смеси, экспериментально определяются значения d_c в зависимости от двух параметров, заданных по трем значениям определенного диапазона: нижней, средней и верхней точке согласно плану Бокса 2x3 [6]. Каждый опыт проводится в трех повторениях и полученные результаты вводятся в программу (Рис. 2). По введенным экспериментальным результатам оценивается погрешность и производится аппроксимация по полиномиальному типу в условных координатах с вычислением фактических коэффициентов регрессии. В общем виде уравнение подвижности смеси в условных координатах представляется следующим образом:

$$d_c = V_0 + V_1 X_1 + V_2 X_2 + V_{12} X_1 X_2 + V_{11} X_1^2 + V_{22} X_2^2 \quad (1)$$

При введении данных, полученных экспериментально, одновременно производится их проверка по нахождению в границах доверительного интервала, а также проверяется адекватность аппроксимированной модели по критерию Фишера [7].

Таблица 2. Шаблон для введения экспериментальных данных по трем результатам из каждого опыта

N оп	переменн фактор		Целевая функция				Для расчета коэфф. регрессии					Y"	(Y"-Y1)^2	Y"-Y2	отклонение	
	X1	X2	Y1	Y2	Y3	Усред	X1Y	X2Y	X1X2 Y	X1^2 Y	X2^2 Y				Y"-Y3	(Yер-Y")^2
1	-1	-1	15,1	15,3	15,4	15,3	-15,3	-15,3	15,3	15,3	15,3	16,19	0,978	0,79	0,622	0,789766
2	-1	0	23,4	23,7	23,9	23,7	-23,7	23,3		23,7	0	23,7	0,01	5E-06	0,01	0,4516
3	-1	1	31,1	32,9	33,2	32	-32	32	-32	32	32	31,2	0,04	0,639	3,238	0,639303
4	0	-1	22,5	22,8	22,9	22,8	0	22,1	21,6	21,1	22,8	21,34	1,86	2,143	2,446	2,143208
5	0	0	30,4	30,5	32,1	30,5	30,2	30,04	30,1	29,90	0	30,12	0,015	0,141	0,767	0,14102
6	0	1	36,2	37,9	38,5	37	0	37	39,2	30,9	37	38,9	8,397	3,602	0,806	3,601561
7	1	-1	26,4	26,8	27,6	26,5	26,5	26,5	-26,5	26,5	26,5	27,17	1,365	0,447	0,028	0,446534
8	1	0	36,1	36,8	36,3	36,8	36,8	0	0	36,8	0	37,23	0,283	0,186	0,11	0,186344
9	1	1	48,2	48,3	48,4	48,3	48,3	48,25	48,3	48,3	48,3	47,28	0,846	1,04	1,254	1,040441
						272,9	40,6	52,7	5,1	182,6	181,9		13,8	8,988	9,281	8,988182
			29,9	30,3	30,7	30,32	4,51	5,856	0,567	20,29	20,21			5,344		
						b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₂	b ₁₁	b ₂₂				Эксперим критерий	1,6812
						30,1	6,78	8,781	1,275	0,342	-0,01				Табличный критерий	2,24
															модель адекватна	

Далее вводятся эмпирические данные, полученные экспериментально при помощи вискозиметра Суттарда в лаборатории или непосредственно на стройплощадке по трем значениям, которыми являются две крайние и средние точки диапазонов входных параметров. Программа выдает в цифровой и графической форме значения целевой функции, необходимых для дальнейшего расчета состава пенобетона (Рис. 2,3). Для плоского изображения виртуальной пространственной модели производится три среза поверхности функции – при минимальном, среднем и максимальном значении параметра.

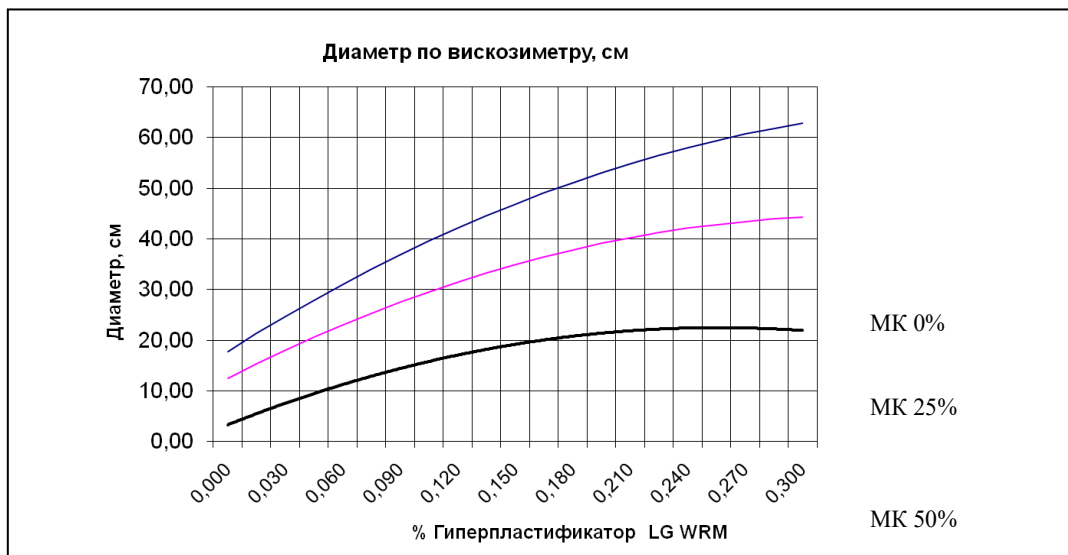


Рис. 2. Подвижность раствора матрицы по вискозиметру Суттарда в присутствии гиперпластификатора LG WRM – 505 при содержании в смеси микрокремнезема 0%, 25%, 50%.

В данном случае, в качестве переменных факторов представлены – концентрация гиперпластификатора LG WRM. Помимо двухмерного изображения, результаты также могут быть представлены в трехмерном виде (Рис. 4). Это более наглядно показывает закономерности функции подвижности $d_c=f(X_1; X_2)$.

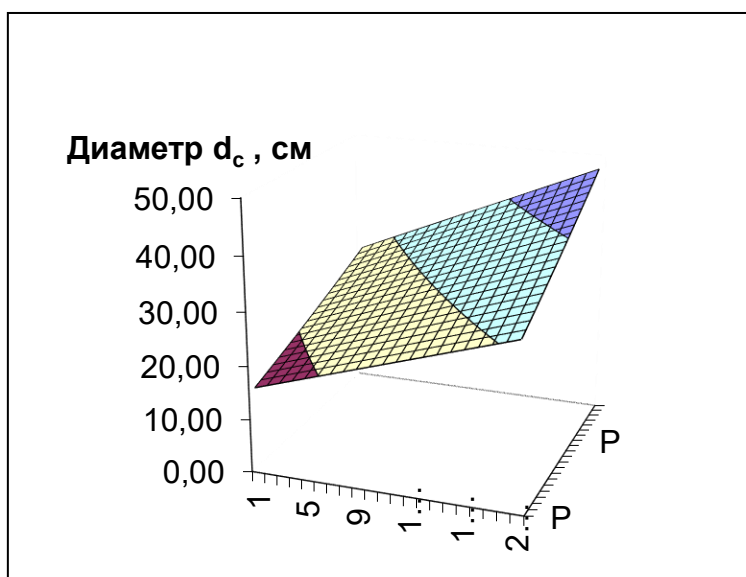


Рис. 3. Пространственный график подвижности раствора матрицы по вискозиметру Суттарда

Кроме того, выводится поле численных значений целевой функции d_c , которая может быть удобной для количественной оценки всех промежуточных результатов расчета подвижности по аппроксимированным данным и соответствующих им условных координат (Табл. 2).

Таблица 2. Поле числовых значений аппроксимированной функции подвижности (фрагмент)

	C, %	0,25	0,288	0,325	0,363	0,400	0,438	0,475	0,513	0,550	0,588	0,625
В/Т	x1\х2	-1,00	-0,90	-0,80	-0,70	-0,60	-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00
0,35	-1,00	16,19	16,94	17,69	18,44	19,20	19,95	20,70	21,45	22,20	22,95	23,70
0,36	-0,90	16,67	17,44	18,20	18,97	19,73	20,49	21,26	22,02	22,79	23,55	24,31
0,37	-0,80	17,16	17,94	18,72	19,50	20,27	21,05	21,83	22,60	23,38	24,16	24,93
0,38	-0,70	17,66	18,45	19,24	20,03	20,82	21,61	22,40	23,19	23,98	24,77	25,56
0,39	-0,60	18,17	18,97	19,77	20,57	21,38	22,18	22,98	23,78	24,59	25,39	26,19
0,4	-0,50	18,68	19,49	20,31	21,12	21,94	22,75	23,57	24,38	25,20	26,01	26,83
0,41	-0,40	19,19	20,02	20,85	21,68	22,51	23,34	24,16	24,99	25,82	26,65	27,47
0,42	-0,30	19,72	20,56	21,40	22,24	23,08	23,92	24,77	25,61	26,45	27,29	28,13
0,43	-0,20	20,25	21,11	21,96	22,81	23,67	24,52	25,37	26,23	27,08	27,93	28,79
0,44	-0,10	20,79	21,66	22,52	23,39	24,26	25,12	25,99	26,85	27,72	28,59	29,45
0,45	0,00	21,34	22,22	23,09	23,97	24,85	25,73	26,61	27,49	28,37	29,25	30,12

Из двух параметров, назначенных переменными - X_2 задается, исходя из условий производства, другой параметр, X_1 – находится из уравнения:

$$X_1 = \frac{1}{2B}(-B_1 - B_{12}X_2) \pm \sqrt{(-B_1 - B_{12}X_2)^2 - 4B_{11}(B_{22}X_2 + B_2X_2 - d_c)^2} \quad (2)$$

Из вычисленных корней уравнения (2) учитываются только действительные. Согласно найденной величине X_1 , вычисляется соответствующее ему значение водотвердого отношения в растворе. Оно находится при переходе от условных координат к действительным линейным интерполированием действительных значений переменного фактора X_2 в заданном диапазоне, согласно их соответствию [6].

Определив водотвердое отношение, вычисляется необходимое количество затворителя, вяжущего и заполнителя в расчете на кубометр пенобетонной смеси:

Масса вяжущего вещества в килограммах на кубометр пенобетонной смеси

$$\text{Ц} = \frac{D}{1.2 + \frac{3}{\text{Ц}}} \quad (3)$$

Где D - средняя плотность пенобетона, кг/м^3 ; $\frac{3}{\text{Ц}}$ - отношение заполнителя к вяжущему, заданное изначально.

Масса заполнителя на кубометр пенобетонной смеси, килограмм:

$$З = \frac{3}{\text{Ц}} \text{Ц} \quad (4)$$

Количество затворителя от найденного водотвердого отношения, литров:

$$В = \frac{В}{Т} \quad (5)$$

Необходимо определить состав пены. Требуемый объем пены, литров:

$$V_{\text{п}} = 1000 - \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} - \frac{З}{\rho_{\text{з}}} - В \quad (6)$$

В данном объеме содержится раствор пенообразующего препарата заданной кратности $K_{\text{п}}$.

Объем воды в пене, литров:

$$V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{K_{\text{п}}} \quad (7)$$

Содержание пенообразователя в растворе составляет (2-2,5)% по жидкой фазе и от этой концентрации определяется необходимое его количество. Следует подчеркнуть, что обеспечение заданной кратности концентрация пенообразователя в жидкой фазе зависит, от его природы, от температуры, от минерального состава воды в пене и должна составлять не менее величины мицеллообразования (ККМ), что лучше всего определять по месту.

В результате расчета выдается вычисленный состав пенобетона с учетом всех данных, введенных первоначально и полученных по аппроксимированным результатам (Табл. 3).

Таблица 3. Вычисленный состав пенобетона

Заданная плотность ячеистого бетона, кг/м ³	500	600	700	800	900
Коэфф., учитыв. гидратную воду $K_{\text{г}}$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Водотвердое отношение В/Т	0,44	0,4	0,44	0,40	0,35
Диаметр расплыва по Сутгарду, см	30	26	22	18	14
К-во воды на куб.м, кг В	198	216	277	288	284
Расход пенообразователя, л/куб.м	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
Масса сухих компонентов на куб.м Т	450	540	630	720	810
Доля кремнезем/вяжущее $m=З/Ц$	0	0,5	0,75	0,75	0,75
К-во цемента на куб.м, кг Ц	450	365	360	411	463
К-во заполнителя на куб.м, кг З	0	183	270	308	347
Расход пластификатора, кг/куб.м	1,15	1,20	1,25	1,25	1,20

В условиях производства и на строительной площадке, благодаря данной программе, можно быстро отработать составы пенобетонов различных плотностей. Помимо ноутбука с программой потребуются только любая горизонтальная плоскость и вискозиметр Сутгарда, очень простой конструкции. Это может послужить хорошим подспорьем для технологов и специалистов предприятий, производящих товарный пенобетон и изделия из него.

Библиографический список:

1. Савенков А.И., Горбач П.С., Щербин А.С. Неавтоклавный пенобетон. Факторы качества. Монография. / А.И. Савенков - Ангарск: Издательство Ангарской государственной технической академии, 2013 – 96 с.
2. Шахова Л.Д. Технологии пенобетонов. Теория и практика. / Л.Д. Шахова – М.: АСВ, 2010 – 290 с.
3. Савенков А.И., Баранова А.А. Прочность и подвижность пеноцементной матрицы в присутствии пенообразователей // Материалы I международной научно-практической конференции «Теория и практика внедрения новых технологий и материалов в производстве и строительстве». Москва. 2012. с. 83-88.

4. Иваницкий В. В., Сапелин Н. А., Бортников А. В. Теоретические и практические аспекты оптимизации структуры пористых бетонов // Строительные материалы. — 2002. — № 3. — С. 32–33.
5. Королев А. С., Волошин Е. А., Трофимов Б. Я. Оптимизация состава и структуры конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона // Строительные материалы. — 2004. — № 3. — С. 30–32.
6. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. — М.: НИИЖБ, 1982.
7. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы. -М.: Статистика, 1979. -447с.

СВОЙСТВА ЛЕГКОГО КЛАДОЧНОГО РАСТВОРА ДЛЯ ЗИМНЕГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В.С. Семенов¹, канд. техн. наук, доцент

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Возведение ограждающих конструкций зданий из эффективных мелкоштучных элементов определяет необходимость применения легких кладочных растворов, получаемых, как правило, из сухих смесей. Одним из наиболее эффективных способов получения таких растворов является введение в их состав полых керамических микросфер в качестве легкого заполнителя. Для климатических условий Российской Федерации в зимнем варианте актуально использование сухих кладочных смесей, набирающих прочность при отрицательных температурах. Основной целью данной работы была разработка составов модифицированных сухих кладочных смесей с полыми керамическими микросферами и противоморозными добавками для использования в зимних условиях. Определение основных свойств сухих смесей и кладочных растворов проводилось по стандартным методикам. Для исследования микроструктуры образцов использовался метод сканирующей электронной микроскопии. В результате исследований были разработаны составы легких сухих кладочных смесей для зимних условий. Определены основные свойства растворных смесей и растворов, а также изучены структура и состав новообразований цементного камня.

Ключевые слова: сухая смесь, кладочный раствор, легкий раствор, керамические микросферы, модификаторы, противоморозные добавки, зимнее строительство.

Современные требования в области энерго- и ресурсосбережения определяют необходимость применения эффективных ограждающих конструкций зданий, в частности, с использованием штучных стеновых изделий. И это особо актуально для малоэтажного строительства. Нормативные требования по обеспечению теплозащиты ограждающих конструкций в Российской Федерации достаточно жесткие. Для обеспечения термической однородности таких ограждающих конструкций применяют легкие кладочные растворы. Многокомпонентность легких растворов определяет использование, в основном, готовых сухих смесей для их получения. Такие растворы (сухие смеси) дороги, в ряде случаев обладают только минимальными физико-механическими и эксплуатационными показателями. При этом характеристики кладочного раствора в части средней плотности и прочности, а также морозостойкости должны находиться на уровне значений этих показателей для основного материала стены. Получить такие облегченные растворы можно введением в их состав облегчающих заполнителей, к которым можно отнести вспученный перлитовый песок, вспученный вермикулитовый песок, гранулы пеностекла или пенополистирола и т.д.

В последнее время можно наблюдать тенденцию к применению в цементных композициях с целью снижения их средней плотности полых стеклянных и алюмосиликатных (керамических) микросфер [1-7]. Это касается строительных и тампонажных растворов, огнезащитных материалов на минеральной основе, ячеистых бетонов, легких бетонов, в т.ч. высокопрочных. В частности, и для получения облегченных кладочных растворов (сухих смесей) довольно эффективным приемом может оказаться введение в их состав в качестве заполнителя полых керамических микросфер (КМС) и комплекса модифицирующих доба-

вок. Отметим, что керамические микросферы являются, по сути, промышленным отходом. Поэтому дальнейшая разработка данной темы актуальна и позволяет достигать показатели вышеупомянутой Стратегии – повышение энергоэффективности и доступности строительных материалов, применение отходов в качестве сырьевой базы.

Климатические условия России определяют необходимость производства строительных работ в зимний период, в т.ч. и работ, связанных с применением кладочных растворов. Анализ имеющихся на рынке облегченных сухих кладочных смесей для зимних работ показал, что прочность растворов на сжатие обычно не превышает 5 МПа, средняя плотность составляет не менее 700 кг/м³, температурный диапазон применения смесей составляет –10...+5°С, а при отрицательных температурах после 28 суток твердения растворы гарантированно набирают только 30% прочности. В действительности растворы могут не достичь минимальной прочности на сжатие 1 МПа, регламентированной нормативными документами. Кроме того, растворы с противоморозными добавками могут давать высолы на поверхности кладки.

Ранее автором, в работе [8] были исследованы свойства, состав и строение облегченных сухих строительных смесей с КМС для кладочных работ. Был получен рациональный состав сухой смеси, содержащий 60% КМС от массы вяжущего, а также комплекс модификаторов – суперпластификатор (0,4% массы вяжущего), воздухововлекающую добавку (0,02% массы вяжущего) и диспергируемый полимерный порошок (РПП) – 3% массы вяжущего. Оптимальный расход микросфер определен в результате компьютерного моделирования структуры композита с учетом известного гранулометрического состава заполнителя и вяжущего [9]. Оптимальные расходы модификаторов определены в результате экспериментальных исследований [8]. Данный состав принят в качестве контрольного, и его основные свойства приведены в табл. 1-2. По всем характеристикам разработанный состав существенно превышает аналоги.

Наиболее простым и экономически целесообразным способом, обеспечивающим протекание процессов гидратации в цементных системах при отрицательных температурах, является введение в их состав противоморозных добавок (ПМД), что реализуется в частности и в составах сухих смесей для кладочных работ. Ранее автором в работе [10] были приведены результаты исследований свойств растворов с КМС и различными противоморозными добавками – карбонат лития (Li₂CO₃), карбонат калия (K₂CO₃), тринатрийфосфат (Na₃PO₄), формиат натрия (HCOONa), нитрит натрия + сульфат натрия (NaNO₂ + Na₂SO₄), тиосульфат натрия + роданид натрия + сульфат натрия (Na₂S₂O₃ + NaSCN + Na₂SO₄). Расход противоморозных добавок определялся по методике [10] расчётным образом в зависимости от водоцементного отношения растворных смесей. Известно, что введение противоморозных добавок в состав строительных растворов и сухих строительных смесей может приводить к образованию высолов на поверхности строительных конструкций, вследствие того, что сами противоморозные добавки и некоторые продукты из взаимодействия с портландцементом являются водорастворимыми. Для снижения вероятности образования высолов в состав сухих смесей также вводился гидрофобизатор в количестве 0,3% массы портландцемента.

Целью данной работы явилась разработка и оптимизация составов эффективных сухих смесей для кладочных работ с КМС и ПМД для применения в зимних условиях строительства, а также исследование их основных свойств, структуры и состава новообразований цементного камня.

В исследованиях в качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. В качестве облегчающего заполнителя применялись полые керамические тонкостенные микросферы марки ИНОТЭК, Сибирь Кузнецкая. Фракция микросфер 1...500 мкм, средний диаметр 300 мкм, толщина стенки 0,1...10 мкм. Насыпная плотность 370...390 кг/м³, прочность при гидростатическом сжатии (10% разрушение) 15...28 МПа. В качестве модификаторов структуры использовались: суперпластификатор PERAMIN SMF 10, воздухоовлекающая добавка (ВВД) ASCO 93, редиспергируемый полимерный порошок Vinnapas 8034. Были применены следующие противоморозные добавки: карбонат калия (K₂CO₃), формиат натрия (HCOONa), комплекс «нитрит натрия + сульфат натрия» (NaNO₂ + Na₂SO₄). В качестве гидрофобизирующей добавки использовался порошковый гидрофобизатор на основе органосилоксанов Sitren P 730. Для замедления схватывания растворных смесей с K₂CO₃ использовалась винная кислота.

Определение основных свойств растворных смесей и кладочных растворов выполнялось в соответствии со стандартными методиками (ГОСТ). Микроструктурный анализ образцов выполнялся с использованием растрового электронного микроскопа FEI Quanta 200.

Были исследованы технологические свойства растворных смесей с полыми керамическими микросферами, комплексным модификатором и противоморозными добавками – средняя плотность, водоудерживающая способность и сохраняемость первоначальной подвижности. Для всех составов указанные характеристики соответствуют требованиям нормативных документов и по времени жизнеспособности растворов (не менее 4 часов) позволяют проводить кладочные работы. Для обеспечения жизнеспособности растворов с карбонатом калия в указанный состав сухой смеси также вводился замедлитель схватывания в количестве 0,3% массы вяжущего. Также были изучены физико-механические свойства модифицированных сухих смесей с полыми керамическими микросферами и различными противоморозными добавками в затвердевшем состоянии. Результаты приведены в табл. 1.

Анализ таблицы 1 позволяет сделать следующие выводы. При положительных температурах твердения раствора наиболее эффективна добавка поташа с замедлителем схватывания. Она обеспечивает наибольший рост прочности. Добавка тринатрийфосфата, а также карбоната лития (с замедлителем схватывания) дают примерно равный прирост прочности относительно контрольного состава. Формиат натрия, а также комплекс «нитрит натрия + сульфат натрия» ускоряют твердение раствора незначительно. Наименее эффективным оказался комплекс «тиосульфат натрия + роданид натрия + сульфат натрия». Добавка поташа также оказалась наиболее эффективной и для раствора, твердеющего при отрицательной температуре, обеспечив набор порядка 60% прочности контрольного состава, твердеющего в нормальных условиях. Примерно равные результаты показали добавки комплекса «нитрит натрия +

сульфат натрия» и формиата натрия, обеспечивая набора прочности на уровне порядка 40% от контрольного состава. Эти 3 состава можно считать наиболее рациональными и дальнейшие исследования проводились применительно к ним.

Таблица 1. Составы и свойства кладочного раствора с КМС, РПП, ВВД и ПМД

Расход противоморозного компонента, %	Средняя плотность раствора ρ_m , кг/м ³	Водоудерживающая способность, %	Жизнеспособность растворовой смеси	Предел прочности на сжатие, МПа				Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа			
				t = (20±2) °С		t = - 10 °С		t = (20±2) °С		t = - 10 °С	
				14 сут	28 сут	14 сут	28 сут	14 сут	28 сут	14 сут	28 сут
Контрольный состав (КС)	835	93,5	4 ч 50 мин	7,0	8,4	-	-	1,6	1,9	-	-
5% ФН	881	93,0	4 ч 40 мин	8,1	10,2	3,4	4,3	1,6	2,6	1,6	2,0
5% ФН + 0,3% ГФ	857	94,0	4 ч 50 мин	8,0	10,0	2,5	3,0	1,6	2,6	1,6	2,1
4,5% НН + 1,5% СН	866	94,0	5 ч 20 мин	9,2	11,6	3,4	4,1	1,6	2,6	1,8	2,2
4,5% НН + 1,5% СН + 0,3% ГФ	880	94,0	5 ч 30 мин	8,0	10,1	2,8	3,6	1,8	2,8	1,6	2,0
5% КЛ + 0,15% ЗС	987	95,0	4 ч 00 мин	11,0	13,9	0,3	0,4	2,6	3,8	0,1	0,1
5% КЛ + 0,15% ЗС + 0,3% ГФ	983	95,0	4 ч 00 мин	5,5	6,9	0,0	0,0	2,3	2,2	0,0	0,0
6% ТНФ	867	93,0	5 ч 10 мин	10,2	13,6	0,0	0,2	3,3	3,6	0,0	0,0
7% П + 0,3% ЗС	954	95,0	4 ч 00 мин	14,7	18,5	5,5	7,0	2,5	3,7	2,3	2,9
7% П + 0,3% ЗС + 0,3% ГФ	916	95,0	4 ч 00 мин	14,2	17,9	5,9	7,4	2,6	3,9	2,4	3,0
0,45% ТСН + 0,75% РН + 0,3% СН	855	93,0	4 ч 50 мин	6,2	8,4	0,4	0,6	1,4	2,0	0,3	0,4
0,45% ТСН + 0,75% РН + 0,3% СН + 0,3% ГФ	856	94,0	5 ч 00 мин	7,6	9,6	0,9	1,1	1,8	2,5	0,5	0,6

где: ФН – формиат натрия; НН – нитрит натрия; СН – сульфат натрия; КЛ – карбонат лития; ТНФ – тринатрийфосфат; П – поташ (карбонат калия); ТСН – тиосульфат натрия; РН – роданид натрия; ГФ – гидрофобизатор; ЗС – замедлитель схватывания.

Таблица 2. Гидрофизические свойства кладочного раствора с КМС, РПП, ВВД и ПМД

№ п/п	Расход противоморозного компонента, %	Водопоглощение, %		Капиллярное водопоглощение, кг/(м ² ·ч ^{0,5})	Коэффициент размягчения	Марка по морозостойкости
		по массе	по объему			
1	Контрольный состав (КС)	9,0	5,4	0,3	0,88	75
2	5% ФН	10,6	7,0	0,3	0,82	50
3	5% ФН + 0,3% ГФ	5,0	3,2	0,2	0,89	75
4	4,5% НН + 1,5% СН	11,2	7,2	0,3	0,80	50
5	4,5% НН + 1,5% СН + 0,3% ГФ	5,6	3,7	0,2	0,82	75
6	7% П + 0,3% ЗС	7,6	5,9	0,2	0,86	75
7	7% П + 0,3% ЗС + 0,3% ГФ	4,0	2,9	0,1	0,91	100

В таблице 2 представлены результаты исследования гидрофизических свойств кладочных растворов с КМС, РПП, ВВД и ПМД.

Как видно из таблицы 2, добавление в состав раствора добавки нитрита натрия совместно с сульфатом натрия, а также формиата натрия, приводит к некоторому увеличению водопоглощения, снижается коэффициент размягчения, марка по морозостойкости раствора уменьшается на одну ступень относительно контрольного состава. Добавка поташа, наоборот, приводит к уплотнению структуры и снижению водопоглощения относительно контрольного состава, однако коэффициент размягчения несколько снижается. Ситуацию меняет введение в состав раствора гидрофобизатора, который для всех примененных противоморозных добавок приводит к снижению водопоглощения, повышению водостойкости и морозостойкости растворов относительно составов, не содержащих гидрофобизатора.

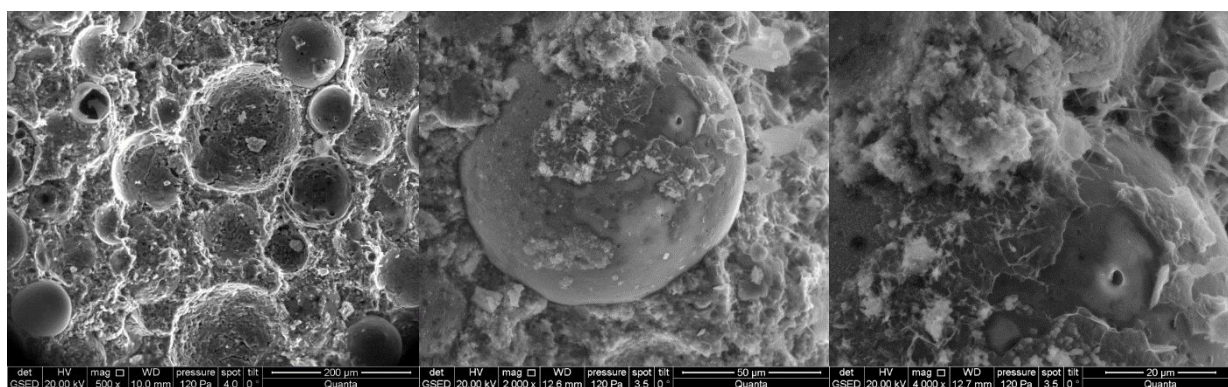


Рис. 1. Микроструктура облегченного кладочного раствора с КМС, ВВД, РПП, формиатом натрия и гидрофобизатором

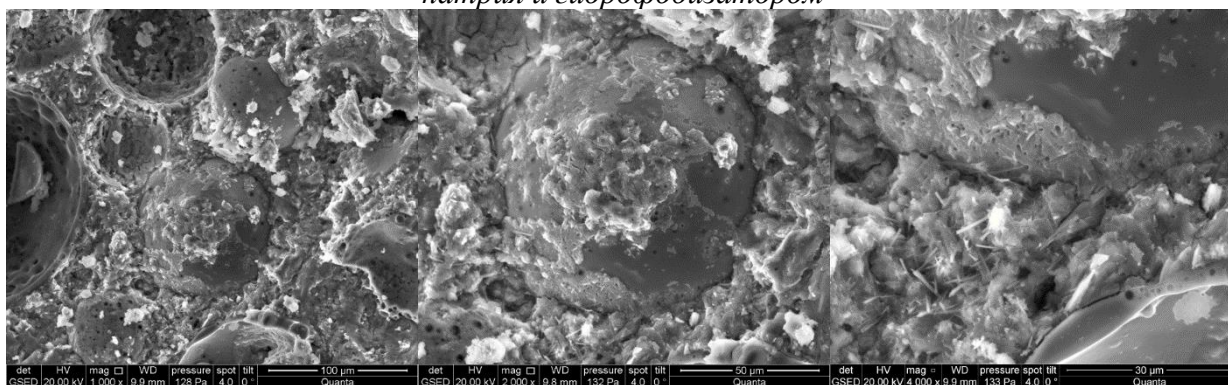


Рис. 2. Микроструктура облегченного кладочного раствора с КМС, ВВД, РПП, карбонатом калия (поташ) и гидрофобизатором

На рисунках 1 и 2 приведена микроструктура облегченного кладочного раствора с КМС, ВВД, РПП и различными противоморозными добавками. Микроструктура представлена в основном полыми керамическими микросферами, равномерно распределенными по объему, и плотной цементной матрицей, состоящей в основном из твердых слабо закристаллизованных высокоосновных гидросиликатов кальция с соотношением $\text{CaO} / \text{SiO}_2 = 1,88$ (CSH (II)) с включениями закристаллизованных низкоосновных соединений – прочные гидросиликаты кальция игольчатого типа. Отмечены также кристаллы портландита. Разрушение происходит в основном по контактной зоне «керамическая мик-

росфера - цементная матрица» и по цементной матрице. Отмечено, что поверхность микросфер покрыта слоем новых фаз толщиной не более 1 мкм, что свидетельствует о физико-химическом взаимодействии высокоосновных гидросиликатов кальция с керамической микросферой.

В результате проведенных исследований определены типы противоморозных добавок и их оптимальный расход для модифицированных облегченных сухих кладочных смесей с полыми керамическими микросферами, воздуховлекающей добавкой и релаксируемым полимерным порошком. Эти модификаторы обеспечивают набор строительным раствором минимально необходимой прочности при температурах $-10 \dots + 5$ °С при обеспечении требуемых технологических свойств растворных смесей. Наиболее эффективной из рассмотренных добавок является карбонат калия, который целесообразно использовать совместно с замедлителем схватывания. Формиат натрия и нитрит натрия в сочетании с сульфатом натрия имеют примерно одинаковый эффект. Введение гидрофобизатора в сухую кладочную смесь с противоморозными добавками позволяет существенно снизить высолообразование на поверхности раствора и снизить водопоглощение. Растворы всех составов являются водостойкими (коэффициент размягчения более 0,8), а морозостойкость составов с гидрофобизатором соответствует контрольному образцу или превышает её.

Библиографический список:

1. Семенов В.С., Розовская Т.А. Сухие кладочные смеси с полыми керамическими микросферами // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 195-199.
2. Inozemtcev, A.S., Korolev, E.V., Smirnov, V.A. Nanoscale modifier as an adhesive for hollow microspheres to increase the strength of high-strength lightweight concrete // Structural Concrete. 2017. Vol. 18 (1) Pp. 67-74.
3. Семенов В.С., Орешкин Д.В., Розовская Т.А. Свойства облегченных кладочных растворов с полыми стеклянными микросферами и противоморозными добавками // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 9-11.
4. Huang, Z., Padmaja, K., Li, S., Liew, J.Y.R. Mechanical properties and microstructure of ultra-lightweight cement composites with fly ash cenospheres after exposure to high temperatures // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 164. Pp. 760-774.
5. Inozemtcev, A.S., Korolev, E.V. Features of the defectiveness of nanomodified high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743. Pp. 68-72.
6. Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семенов В.С. Полые стеклянные микросферы и прочность цементного камня // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2010. № 11. С. 45-47.
7. Brooks, A.L., Zhou, H., Hanna, D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 159. Pp. 316-328.
8. Semenov, V. Structure and properties of masonry mortars based on ceramic microspheres // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. 01045.
9. Смирнов В.А., Розовская Т.А., Семенов В.С. Компьютерное моделирование структуры строительных растворов с полифракционным наполнителем // Научное обозрение. 2015. № 10-2. С. 78-83.
10. Semenov, V., Rozovskaya, T. Light-weight Dry Masonry Mixes with Hollow Ceramic Microspheres for Winter Conditions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 623-629.

ОЦЕНКА И УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНОЙ ВОДОРОДНОЙ СРЕДЫ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

А.А. Трещев¹, д-р техн. наук, профессор

В.О. Кузнецова¹, аспирант

¹Тульский государственный университет

Аннотация. В данной работе построена математическая модель напряжённо-деформированного состояния с выполнением расчёта круговой цилиндрической оболочки из титанового сплава ВТ1-0, нагруженной внутренним равномерно распределённым давлением. Для этого использована нелинейная модель, представленная в нормированных пространствах напряжений. Загружение принято таким образом, чтобы прогибы оболочки оказались большими. Закрепление по контуру оболочки жёсткое. Получены нелинейные разрешающие уравнения расчёта оболочки, описано построение математической модели поставленной задачи изгиба цилиндрической оболочки с учетом влияния агрессивной водородной среды на её напряженно-деформированное состояние. Модель рассматриваемой задачи основана на эмпирических данных деформирования титанового сплава при различной концентрации коррозионной среды. Разработан алгоритм решения проблемы наводороживания оболочек из титанового сплава. Практическое решение производилось двухшаговым методом последовательных возмущений параметров с использованием пакетов прикладных программ MatLab и Maple.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, титановый сплав, конечные разности, нелинейное деформирование, изотропный материал, наводороживание.

В современном мире конструкторы создают здания и детали аппаратов, которым не существует аналогов: новые спортивные комплексы, концертные залы, исключительные небоскрёбы, современные торговые и развлекательные центры, трубопроводы нефтегазовой промышленности, элементы авиакосмических аппаратов и т.д. Титановые сплавы широко применяют в конструировании для химической, авиационной, ракетной отрасли, и, конечно, в строительстве. Всё это исходит от большого набора ценных свойств титана, к которым относят: высокую коррозионную стойкость, малый удельный вес, большую прочность и жаропрочность, достаточную пластичность при криогенных температурах, значительную распространенность титана в природе [1].

Первой моделью расчёта деталей конструкций, которые работают в коррозионных водородных средах, учитывающей трансформацию свойств материала во времени, была модель, предложенная в работах В.В.Петрова, И.Г.Овчинникова, А.Б.Рассады [1-3]. Согласно исследованиям [1] для построения математических моделей поведения материалов в водородосодержащей среде предложено использовать теорию структурных параметров Ю.Н.Работнова с учётом физико-химических эффектов на поверхности и в объёме деформируемого твёрдого тела. Определяющими параметрами, кроме напряжения и деформации, введены дополнительные параметры q_i , учитывающие взаимодействие материала со средой. Так $q_1 = \lambda$ – параметр, характеризующий распределение коррозионной водородной среды по всему объёму элемента; $q_2 = \xi$ – параметр вида напряжённого состояния.

Взаимосвязь деформаций и напряжений строится в рамках теории малых упругопластических деформаций А.А.Ильюшина [4]. Интенсивность напряжений представлена функцией интенсивности деформаций, концентрации водорода и параметра ξ [2-3]. Выбранный подход к решению задач влияния наводороживания на НДС круговой цилиндрической оболочки из титанового сплава представляет собой численный метод, основанный на замещении производных разностными схемами. Для решения задачи с тройной нелинейностью примем двухшаговый метод последовательных возмущений параметров [9], позволяющий линеаризовывать разрешающие уравнения, а также обладающий высокой точностью. В процессе решения данной задачи конечными разностями на расчётной схеме строится сетка, формируется система линеаризованных алгебраических уравнений, решение которой позволяет получить приближённые значения в дискретных узлах.

Объектом данного исследования является круговая цилиндрическая оболочка, выполненная из титанового сплава ВТ1-0, нагруженная внутренним давлением до 5 МПа, жёстко закреплённая по контуру. Длина оболочки 3 м, радиус 0,5 м. Положение любой точки срединной поверхности оболочки определяется гауссовыми координатами α_1 и α_2 , с учётом: u – осевых перемещений, v – касательных перемещений, w – радиальных перемещений при действии поперечной нагрузки q , как показано на рисунке 1. В рассматриваемой задаче коэффициенты Ляме и главные кривизны имеют вид:

$$\tilde{A} = 1; \quad \tilde{B} = R; \quad k_1 = 0; \quad k_2 = R^{-1}, \quad (1)$$

где R – радиус оболочки.

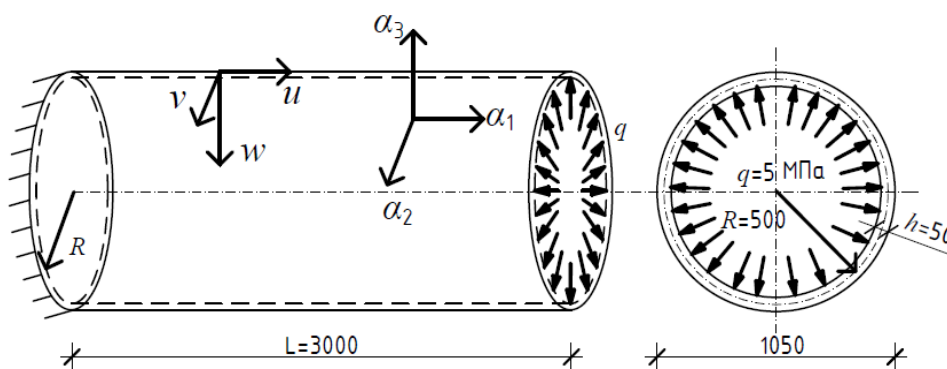


Рис. 1. Схема задачи

В поставленной задаче рассматриваем равновесие цилиндрической оболочки, имеющей толщину h , находящуюся под воздействием поперечной осесимметричной равномерно-распределённой нагрузки q и коррозионной водородной среды, концентрацию которой обозначим λ . Тогда, принимаем кинетический потенциал деформаций в следующем виде [11]:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2 + [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2]^n. \quad (2)$$

Здесь $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – функции кинетического потенциала деформаций квазилинейной и нелинейной частей, которые зависят от степени насыщения материала водородом. Взаимосвязь механических характеристик материала вычислена с помощью интерполяции коэффициентов на заданном уровне концентрации среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05%), для сплава ВТ1-0 они запишутся в виде:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k} \cdot \lambda + e_{2k} \cdot \lambda^2; \quad V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k} \cdot (p_{2k})^\lambda; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_e(\lambda) &= V_{e1}(\lambda); & B_e(\lambda) &= V_{e3}(\lambda); & C_e(\lambda) &= V_{e2}(\lambda); & D_e(\lambda) &= V_{e4}(\lambda); \\ E_e(\lambda) &= V_{e5}(\lambda); & A_p(\lambda) &= V_{p1}(\lambda); & B_p(\lambda) &= V_{p3}(\lambda); & C_p(\lambda) &= V_{p2}(\lambda); \\ D_p(\lambda) &= V_{p4}(\lambda); & E_p(\lambda) &= V_{p5}(\lambda), \end{aligned} \quad (4)$$

Взаимосвязь тензоров деформаций и напряжений определим из потенциала деформаций (2) по формулам Кастильяно:

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

$$e_{ij} = 2C_e(\lambda)\sigma_{ij} / 3 + 2(A_e(\lambda) - C_e(\lambda))\sigma\delta_{ij} / 3 + T_{ij}(\lambda),$$

где $T_{ij}(\lambda)$ - нелинейная составляющая уравнений состояния.

В теории цилиндрических оболочек [10, 11] используются следующие зависимости:

а) составляющие деформации срединной поверхности:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = v_{,2} + kw + 0,5(-w_{,2} + kv)^2; \quad \gamma = v_{,1} + u_{,2} - w_{,1}(w_{,2} + kv); \quad (5)$$

б) составляющие изгибающей деформации средней поверхности, которые определены изменением кривизн и кручением. Они связаны с перемещениями следующими соотношениями:

$$\chi_1 = -w_{,11}; \quad \chi_2 = -w_{,22}; \quad \chi_{12} = -w_{,12} = -w_{,21}, \quad (6)$$

где ε_1 , ε_2 – удлинения оболочки;

Составляющие деформации в точках, расположенных на расстоянии α_3 от средней поверхности, выразим через составляющие тангенциальных и изгибных деформаций:

$$e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2 + \alpha_3\chi_2; \quad \gamma_{12} = \gamma + 2\alpha_3\chi_{12}. \quad (7)$$

Принимая во внимание осесимметричность задачи нагружение оболочки внутренним давлением q , кинематические зависимости принимают вид:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = kw; \quad \chi_1 = -w_{,11}; \quad e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2. \quad (8)$$

Ввиду того, что поставленная задача обладает тройной нелинейностью, производим построение разрешающих уравнений в линеаризованной форме с использованием двухшагового метода последовательных возмущений параметров. Физические зависимости представим в следующем виде [12]:

$$\delta e_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}} \delta \sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} \delta \sigma_{22} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \lambda} \delta \lambda; \quad (9)$$

$$\delta e_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}} \delta \sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}} \delta \sigma_{22} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \lambda} \delta \lambda;$$

$$\delta \varepsilon_1 = \delta u_{,1} + \delta w_{,1}; \quad \delta \varepsilon_2 = k \delta w; \quad \delta \chi_1 = -\delta w_{,11} \quad (10)$$

$$\delta \chi_2 = -\delta w_{,22}; \quad \delta \chi_{12} = -\delta w_{,12} = -\delta w_{,21}$$

Связь приращений деформаций через приращения деформаций средней поверхности $\delta \varepsilon_1$ и $\delta \varepsilon_2$ и кривизн $\delta \chi_1$, $\delta \chi_2$ и $\delta \chi_{12}$ представим следующим образом:

$$\delta e_{11} = \delta \varepsilon_1 + \alpha_3 \delta \chi_1; \quad \delta e_{22} = \delta \varepsilon_2 + \alpha_3 \delta \chi_2; \quad \delta \gamma_{12} = \delta \gamma + 2\alpha_3 \delta \chi_{12}.$$

Взаимосвязь напряжений с деформациями в линеаризованной форме примут вид:

$$\delta \sigma_{11} = C_{11} \delta e_{11} + C_{12} \delta e_{22}; \quad \delta \sigma_{22} = C_{21} \delta e_{11} + C_{22} \delta e_{22}, \quad (11)$$

где

$$C_{11} = \frac{A_{22}}{\Delta}; \quad C_{12} = C_{21} = \frac{-A_{21}}{\Delta} = \frac{-A_{12}}{\Delta}; \quad C_{22} = \frac{A_{11}}{\Delta}; \quad \Delta = A_{11}A_{22} - A_{12}^2;$$

$$A_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}}; \quad A_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}}; \quad A_{12} = A_{21} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}}.$$

Внутренние усилия и моменты приводим к срединной поверхности $\alpha_3 = 0$ и с учётом условия $\alpha_3 k_2 \ll 1$ определим их:

$$\delta N_{11} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_1 d\alpha_3; \quad \delta M_{11} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_1 \alpha_3 d\alpha_3; \quad \delta Q_1 = \delta M_1 \quad \delta Q_{1,1} = \delta M_{1,1}, \quad (12)$$

где h – толщина оболочки.

Уравнения связи внутренних усилий с деформациями срединной поверхности:

$$\begin{aligned} \delta N_1 &= D_{11} \delta \varepsilon_1 + D_{12} \delta \varepsilon_2 + P_{11} \delta \chi_1 + P_{12} \delta \chi_2; \\ \delta N_2 &= D_{12} \delta \varepsilon_1 + D_{22} \delta \varepsilon_2 + P_{21} \delta \chi_1 + P_{22} \delta \chi_2; \\ \delta M_1 &= P_{11} \delta \varepsilon_1 + P_{12} \delta \varepsilon_2 + B_{11} \delta \chi_1 + B_{12} \delta \chi_2; \\ \delta M_2 &= P_{21} \delta \varepsilon_1 + P_{22} \delta \varepsilon_2 + B_{21} \delta \chi_1 + B_{22} \delta \chi_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где с учётом влияния степени наводороживания материала при концентрации λ материальные функции имеют вид:

$$D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij}(\lambda) dz; \quad P_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij}(\lambda) z dz; \quad B_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij}(\lambda) z^2 dz.$$

Заметим, что оболочка нагружена внутренним давлением q_3 , тогда уравнения равновесия и уравнение совместности деформаций запишем в виде:

$$\delta N_{1,1} = 0; \quad \delta M_{1,1} - \delta Q_1 + w_{,1} \delta N_1 + N_1 \delta w_{,1} = 0;$$

$$\delta Q_{1,1} - k \delta N_2 + \delta q_3 = 0; \quad k \delta \chi_1 + \delta \varepsilon_{2,11} = 0.$$

Степень проникновения коррозионной среды по толщине получается из решения уравнения диффузии. Ввиду одномерности задачи по диффузии водо-

рода, уравнение соответствует второму закону Фика, а решение может быть построено по двойным преобразованиям Фурье [13] (прямым и обратным):

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2},$$

где $D = const$ – коэффициент диффузии, t – текущее время.

$$\lambda(r, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)}{\Psi_k} K_0 \exp(-\gamma_k^2 \frac{Dt}{R_2^2}),$$

где функция $\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)$ зависит от направления воздействия водорода.

Расчёты производились с использованием пакетов математических прикладных программ Maple и MATLAB. На рисунках представлены результаты расчёта круговой цилиндрической оболочки, работающей в агрессивной водородосодержащей среде с разной концентрацией от 0 до 0,05%, используя предложенную модель.

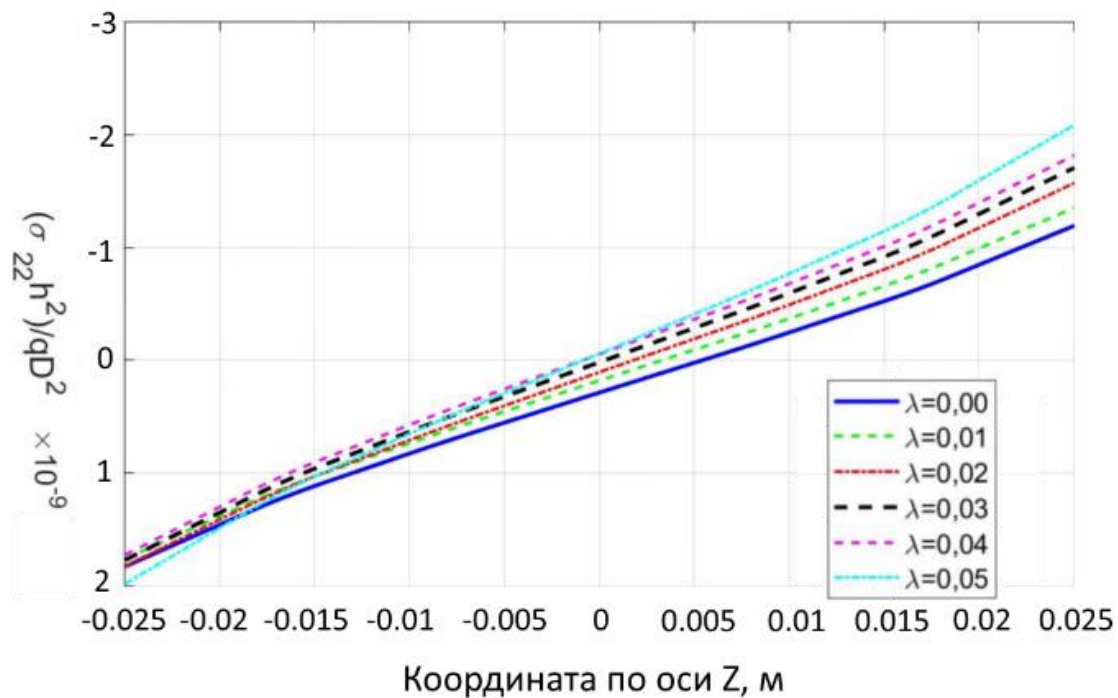


Рис. 2. Напряжения σ_{22} в точке края цилиндра (по толщине)

В работе представлены и некоторые результаты расчёта круговой цилиндрической оболочки, эксплуатирующейся в агрессивной водородосодержащей среде с разной концентрацией водорода, с использованием соотношений Л.А.Кирилловой и И.Г.Овчинникова [6].

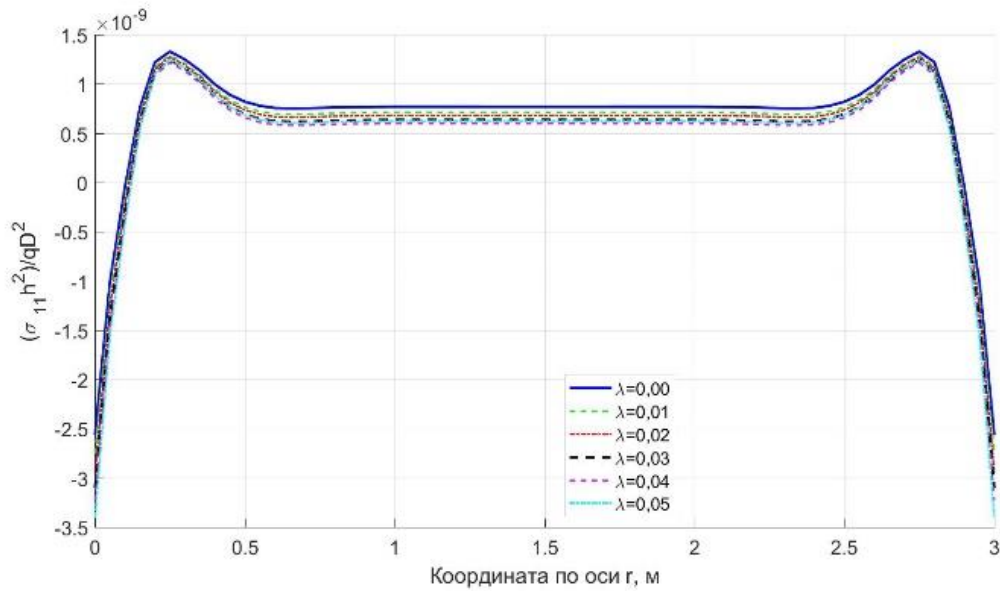


Рис. 3. Напряжения σ_{11} сверху вдоль образующей

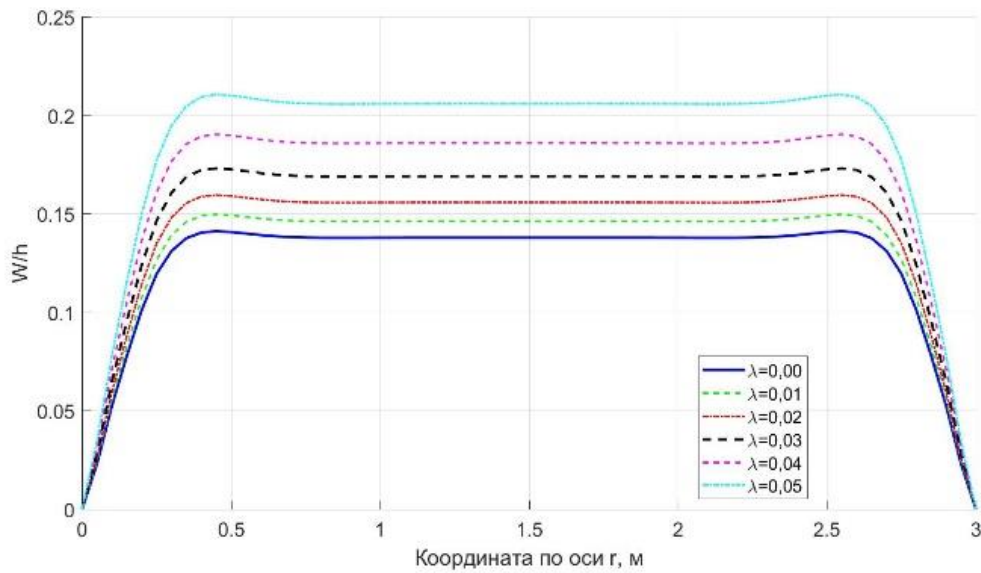


Рис. 4. Прогобы в оболочке

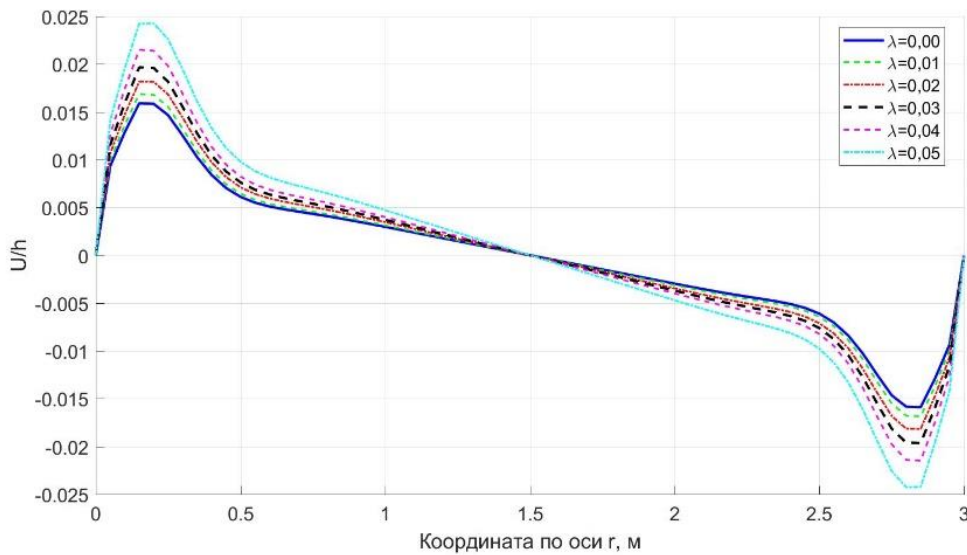


Рис. 5. Горизонтальные перемещения

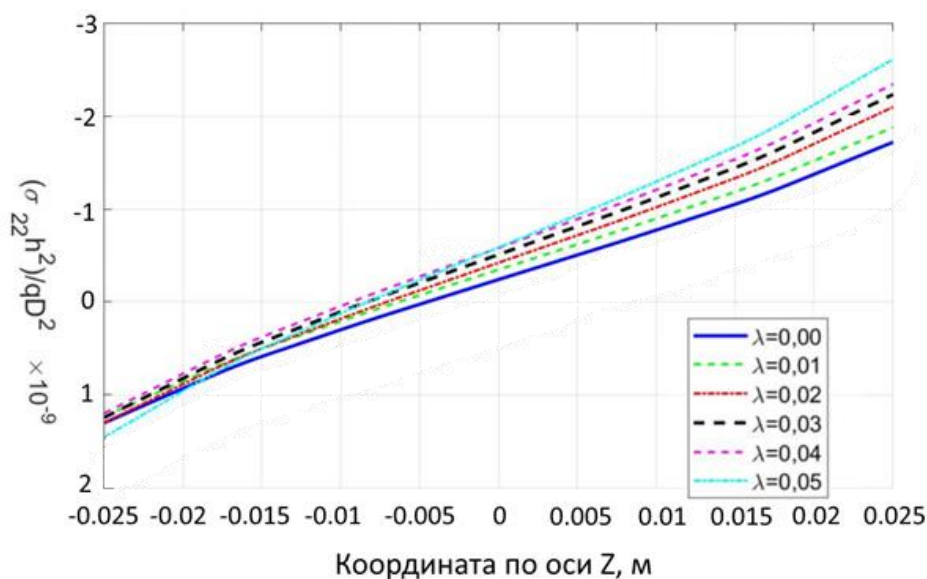


Рис. 6. Напряжения σ_{22} в точке края цилиндра (по толщине)

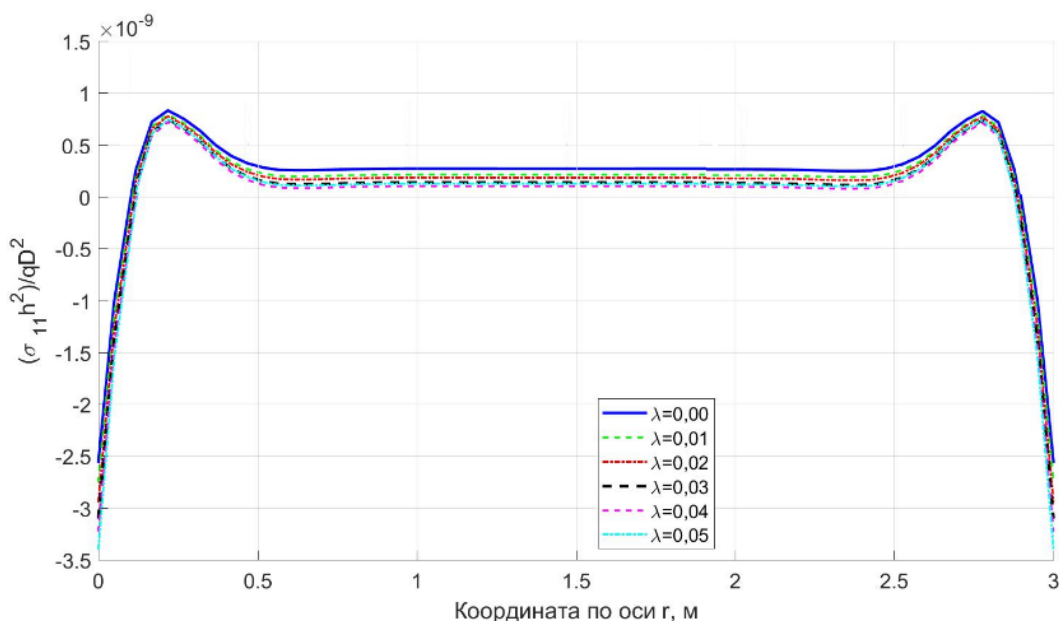


Рис. 7. Напряжения σ_{11} сверху вдоль образующей

Проанализировав представленные графические зависимости, можно отметить сходство качественных картин, рассчитанных по двум моделям. Однако, все эти зависимости для заданных моделей не сходятся по количественным показателям. В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что за некоторый период, соответствующий достаточно большим градиентам концентрации агрессивной водородной среды, прослеживается активное изменение вида напряженно-деформированного состояния, которое достигает для напряжений 20% в сжатых и 24% в растянутых зонах. Изменения в напряжениях, полученные Овчинниковым И.Г. и Кирилловой Л.А., достигают величин 15% и 34%, соответственно. Длительность периода активного изменения напряжений по предложенной модели составляет 30% и 35% от времени полного насыщения для одностороннего и двухстороннего диффундирования водородосодержащей среды. В то время как по модели [9] эти значения не превышают 10% и

15%. Кроме того, по предложенной модели конкретизация напряжений в результате оценки и учета влияния коррозионной среды после регулирования напряженного состояния составляет 13%, а в работе [9] эта величина достигает 30%.

Различия количественных и качественных показателей, полученные в результате сравнения, объясняются не идентичными механизмами учета влияния вида напряженного состояния. Модель влияния газонасыщения, которая построена в данной работе, основана на подходах построения определяющих соотношений разносопротивляющихся материалов, предложенных в работах Корнеева А.В. и Трещева А.А. [9, 12]. В этом подходе используется достаточно гибкий механизм учета разносопротивляемости, и демонстрируется высокая точность согласования получаемых гипотез с экспериментальными данными по деформированию огромного многообразия материалов при сложных видах напряженного состояния. Модель учета НДС материалов в работах Л.А. Кирилловой и И.Г. Овчинникова [6], построена на простейшем нелинейном законе упругости с учетом одноосного напряженного состояния. Поэтому, она менее точно учитывает влияние вида напряженного состояния на жесткость и прочность материалов.

Библиографический список:

1. Овчинников, И.Г. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами / И.Г.Овчинников, В.В.Петров // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1983. С. 3-11.
2. Овчинников, И.Г. Анализ экспериментальных данных по влиянию водорода при нормальных температурах на механические свойства металлов и сплавов к построению модели взаимодействия конструктивных элементов с водородом. Ч. 1. Проблема взаимодействия водорода на металлы и пути её решения. Закономерности проникания водорода в конструктивные элементы / И.Г.Овчинников, А.Б.Рассада. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1989. – 28 с.
3. Овчинников, И.Г. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородосодержащей средой и её приложения / И.Г.Овчинников, А.Б.Рассада. // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1989. С. 12-16.
4. Ильюшин, А.А. Пластичность. Ч. 1. Уругоупругие деформации / А.А.Ильюшин. – М. –Л.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.
5. Кириллова, Л.А. Напряжённо-деформированное состояние гибкой круглой пластины в водородосодержащей среде с учётом наведённой неоднородности. Дисс. к.т.н. Саратов, 1990. – 163 с.
6. Кириллова, Л.А. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию / Л.А.Кириллова, И.Г.Овчинников // Сарат. политехн. ин-т. – Саратов, 1989. – 15 с. Деп. В ВИНТИ 07.02.90, №698-В90.
7. Матченко, Н.М. Определяющие отношения изотропных разносопротивляющихся сред. Ч. 1. Квазилинейные соотношения / Н.М.Матченко, Л.А.Толоконников, А.А.Трещёв // Изв. РАН. МТТ. – 1995. – №1. – С. 73 – 78.
8. Корнеев, А.В. Учет влияния водородосодержащей среды на напряженно-деформированное состояние материалов на основе титановых сплавов / А.В.Корнеев, А.А.Трещев // Известия высших учебных заведений. Сер.: Строительство, 2009. №3-4. С. 23-29.
9. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек / В.В.Новожилов. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 332 с.

10. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П.Тимошенко, С.Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
11. Трещёв, А.А. Изотропные пластины и оболочки, выполненные из материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния: монография / А.А.Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2013. – 249 с.
12. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А.Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВНЕЦЕНТРЕННОЙ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ НА ДЕФОРМАТИВНОСТЬ, ЖЕСТКОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КОРРОЗИОННЫМИ ПРОДОЛЬНЫМИ ТРЕЩИНАМ

К.В. Шамшина¹, преподаватель-исследователь

¹ГБУ при Губернаторе и Правительстве Пензенской области

Аннотация. С помощью экспериментальных исследований изучено влияние коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона прямых моделей железобетонных колонн на изменение их деформативности, жёсткости и прочности при действии центральной и внецентренной сжимающей нагрузки. Определён характер изменения кинетики геометрических параметров коррозионных продольных трещин во времени. Представлены расчетные функциональные зависимости изменения деформативности, жесткости и прочности опытных образцов, имеющих и не содержащих коррозионные продольные трещины, в зависимости от относительных значений величины разрушающей сжимающей нагрузки и значений эксцентриситета. Получены относительные количественные данные уменьшения деформативности, жесткости и прочности опытных образцов с коррозионными продольными трещинами. Обоснована возможность повышения жесткости и прочности внецентренно сжатых железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинами за счет изменения величины эксцентриситета. Выявлен механизм протекания коррозии арматуры в коррозионных продольных трещинах как незатухающий электрохимический процесс.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозионные трещины, деформативность, жесткость, прочность.

Коррозионные продольные трещины в защитном слое бетона образуются в железобетонных элементах, эксплуатирующихся в агрессивных хлоридсодержащих средах [1]. Продольные трещины в железобетонных конструкциях являются предвестниками их катастрофы типа «Экстремум» [2]. Может быть в том числе поэтому в России ежегодно происходит обрушение однопроцентного количества железобетонных мостов от общего их количества, не достигших половины нормативного периода эксплуатации [3].

Теоретический прогноз коррозии арматуры в коррозионных продольных трещинах дает необъективные результаты из-за трудности физико-математического моделирования процесса электрохимического взаимодействия агрессивной среды со стальной арматурой. В тоже время сведений о проведении комплексных экспериментальных исследований на железобетонных конструкциях с коррозионными продольными трещинами, полученными естественным путём, в зарубежных и Российских научных изданиях практически нет.

Экспериментальные исследования влияния центральной и внецентренной сжимающей нагрузки на работоспособность железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинами в защитном слое бетона проведены в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства [4,5]. Железобетонные образцы были выполнены из тяжёлого бетона, с несущей арматурой диаметром $\phi = 8$ мм класса А400, которые по конструктивному реше-

нию и геометрическим размерам представляют прямые модели железобетонных колонн [6].

Опытные бесконсольные призматические и одноконсольные колонны имели геометрические размеры по длине и поперечному сечению соответственно 1000 мм и 120×120 мм и толщину защитного слоя бетона $\delta_{зсб} = 15$ мм. Одноконсольные колонны, с одной стороны, содержали в верхней и нижней части по высоте консоли длиной 100 мм.

В бетонную смесь изготавливаемых конструкций вводилась добавка в виде 5 % NaCl от массы цемента для получения коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона естественным путём вследствие коррозии арматуры. Контрольных опытные образцы добавку не содержали.

В экспериментальных исследованиях с учётом требований математической статистики для получения объективных опытных данных участвовали тридцать четыре бесконсольных призматических и тридцать девять одноконсольных колонн.

Натурные испытания железобетонных конструкций осуществлены на опытном полигоне в атмосферных условиях города Пензы в период с 2010 по 2015 годы при периодическом увлажнении всех образцов водопроводной водой не менее трёх раз в сутки в тёплый период года.

После натурных испытаний классы бетона по прочности на сжатие не нагруженных образцов, имеющих и не содержащих коррозионные продольные трещины, соответственно составляли значения В49,4 и В50, со средней глубиной карбонизации бетона 4 мм. После пяти лет натурального испытания максимальная средняя ширина раскрытия коррозионных продольных трещин на образцах, содержащих агрессивную добавку, составила $a_{T_{ср}}^{\max} = 1,1$ мм.

В результате проведенных натурных исследований определены линейные функциональные зависимости геометрических параметров коррозионных продольных трещин относительно времени испытания, которые показывают на отсутствие влияния продуктов коррозии стали в коррозионных продольных трещинах на уменьшение скорости электрохимического процесса на поверхности арматуры [7].

По окончании натурных испытаний образцы в лабораторных условиях подвергались воздействию кратковременной сжимающей нагрузки. Работоспособность бесконсольных призматических колонн исследовалась при действии центрально сжимающей нагрузки, а одноконсольных колонн при наличии внецентренной сжимающей нагрузки, прикладываемой с малым $e_1 = 40$ мм, средним $e_2 = 80$ мм и большим $e_3 = 120$ мм эксцентриситетами.

Полученные функциональные зависимости изменения относительных среднеарифметических значений абсолютных деформаций опытных образцов как имеющих, так и не содержащих коррозионные продольные трещины, в зависимости от относительных параметров разрушающей кратковременной сжимающей нагрузки показывают, что увеличение эксцентриситета способствует росту относительных значений абсолютных деформаций δ/δ^k при всех относительных величинах разрушающей сжимающей нагрузки [7].

Относительное изменение абсолютных деформаций при значении разрушающей сжимающей нагрузки $P/P_{\text{разр}} = 1$ на бесконсольных призматических и на одноконсольных образцах как не имеющих, так и содержащих коррозионные продольные трещины для эксцентриситетов $e = 0\text{см}$, $e = 4\text{см}$, $e = 8\text{см}$ и $e = 12\text{см}$ соответственно составляет 85,3%, 102,7%, 110,3% и 148,0% с получаемой функциональной зависимостью $f(\delta/\delta_k) \cdot 100 = 85,3 + 4,35 \cdot e$. Принимая значение 85,3% за единицу, в случае рассмотрения центрально приложенную сжимающую нагрузку с $e = 0\text{см}$, величина выражения $(\delta/\delta^k) \cdot 100$ для эксцентриситетов $e = 4\text{см}$, $e = 8\text{см}$ и $e = 12\text{см}$ возрастает соответственно в 1,20; 1,29 и 1,74 раза.

Изменение относительной жёсткости образцов, содержащих и не имеющих коррозионные продольные трещины, нагруженных сжимающей нагрузкой с соответствующими эксцентриситетами $e = 4\text{см}$, $e = 8\text{см}$, $e = 12\text{см}$ в зависимости от напряжённого состояния изображено на рис. 1.

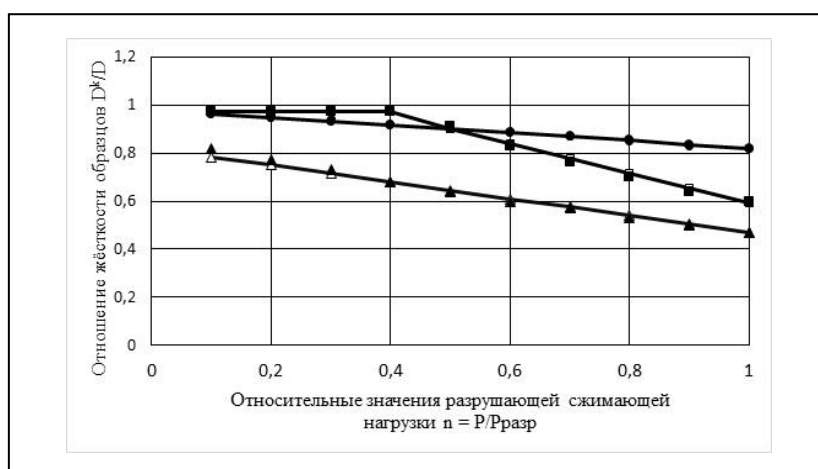


Рис. 1. Изменение относительной жёсткости образцов в зависимости от напряжённого состояния

На рисунке 1 установлены следующие условные обозначения: ●, ○ – соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, определенные по функциональной зависимости $D_4^*/D_4 = 0,98 - 16 \cdot n$, полученные с образцов, нагруженных сжимающей нагрузкой с эксцентриситетом $e = 4\text{см}$; ▲, △ - соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, определенные по функциональной зависимости $D_8^*/D_8 = 0,82 - 0,35 \cdot n$, полученные с образцов, нагруженных сжимающей нагрузкой с эксцентриситетом $e = 8\text{см}$; ■, □ - соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, определенные по функциональной зависимости $D_{12}^*/D_{12} = 0,97$ при $n \geq 0,1$, $n < 0,4$, а также по функциональной зависимости $D_{12}^*/D_{12} = 1,21 - 0,617 \cdot n$ при $n \geq 0,4$, $n \leq 1$, полученные с образцов, нагруженных сжимающей нагрузкой с эксцентриситетом $e = 12\text{см}$.

При значении разрушающей сжимающей нагрузки $P/P_{\text{разр}} = 1$ относительные величины разности между значениями жёсткости образцов без коррозионных продольных трещин и образцами с коррозионными продольными трещинами, нагруженных с эксцентриситетами $e = 4\text{см}$, $e = 8\text{см}$ и $e = 12\text{см}$, соответственно составляют 18,1%; 55,4% и 42,2% (рис.1).

Изменение относительной величины разности значений жёсткости соответствующих образцов как без коррозионных продольных трещин, так и с ними, имеющих соответствующие эксцентриситеты $e = 4\text{ см}$, $e = 8\text{ см}$, $e = 12\text{ см}$ и нагруженные сжимающей нагрузкой, начиная с $P/P_{\text{разр}} = 0,4$ и заканчивая $P/P_{\text{разр}} = 1$, в зависимости от значений эксцентриситета отражено на рис. 2.

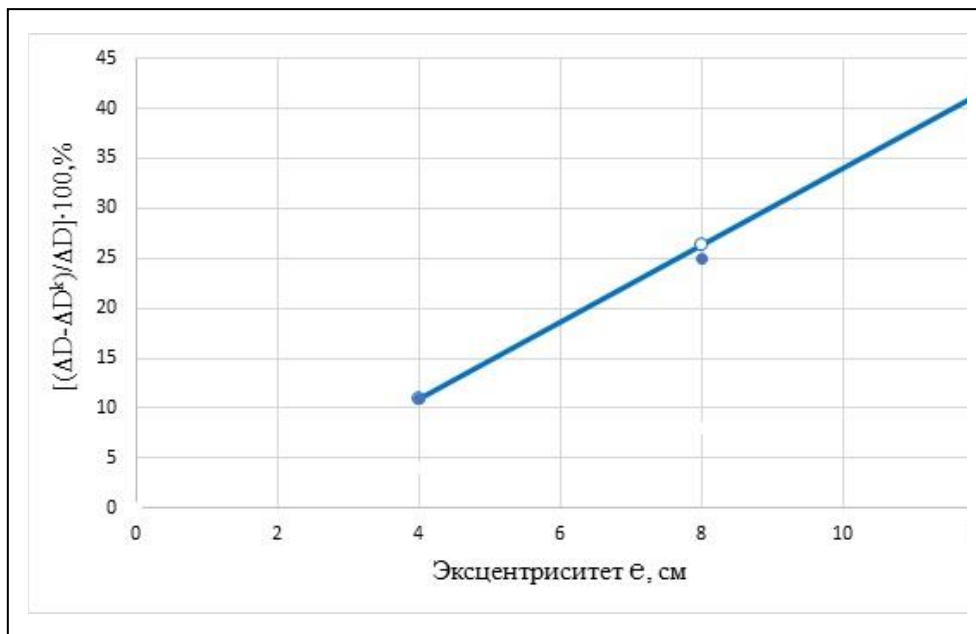


Рис. 2. Изменение относительной величины разности значений жёсткости образцов в зависимости от значений эксцентриситета

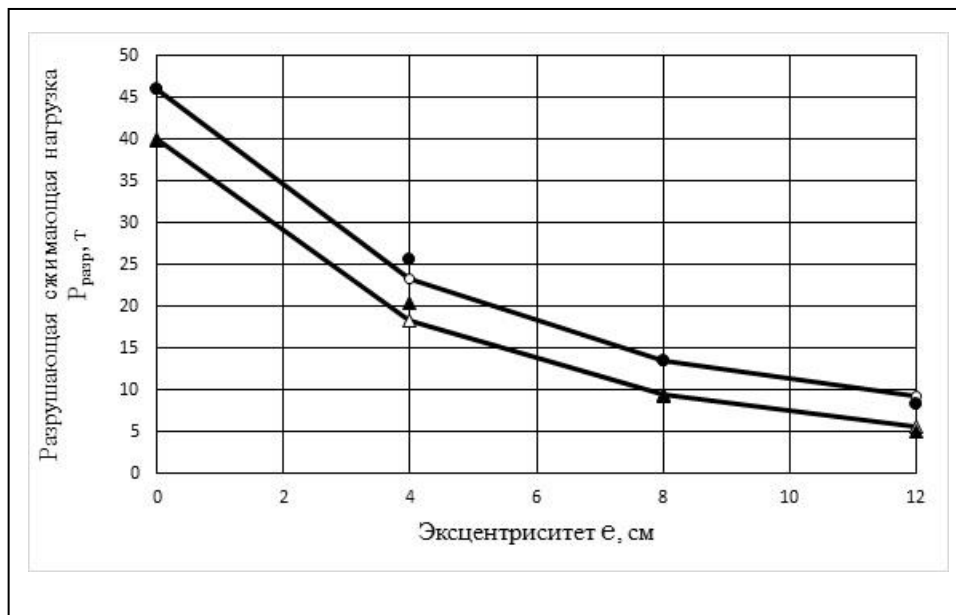


Рис. 3. Изменение абсолютной величины разрушающей сжимающей нагрузки, приложенной к образцам, в зависимости от значений эксцентриситета

Условные обозначения: ●, ○ – соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, полученные по функциональной зависимости $f\left[\frac{(\Delta D - \Delta D^k)}{\Delta D}\right] \cdot 100 = 3,863 \cdot e - 4,55$

Индекс К относится к образцам с коррозионными продольными трещинами

При наличии прямо пропорциональной зависимости относительной величины разности жёсткости между образцами без коррозионных продольных трещин и образцами с коррозионными продольными трещинами от величины эксцентриситета это приращение для значений эксцентриситетов с $e = 4$ см, $e = 8$ см и $e = 12$ см соответственно составляет 10,9%; 25,0% и 41,8%.

Изменение абсолютной величины разрушающей сжимающей нагрузки, приложенной к образцам как с коррозионными продольными трещинами, так и без них в зависимости от значений эксцентриситета показано на рис.3.

На рисунке 3 представлены следующие условные обозначения: ●, ○ – соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, определенные по функциональной зависимости $fP_{разр} = 6 + 2,718^{-0,21 \cdot e}$, полученные с образцов без коррозионных продольных трещин; ▲, Δ - соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, определенные по функциональной зависимости $fP_{разр}^k = 3 + 37 \cdot 2,718^{-0,22 \cdot e}$, полученные с образцов с коррозионными продольными трещинами. Индекс К относится к образцам с коррозионными продольными трещинами.

При выводе экспоненциальных функциональных зависимостей по данным с рис.3 использовались среднеарифметические абсолютные значения разрушающей сжимающей нагрузки для отдельных групп образцов, загруженных с соответствующими значениями эксцентриситетов.

Изменение относительной величины разрушающей сжимающей нагрузки опытных образцов с коррозионными продольными трещинами по отношению к экспериментальным конструкциям без них в зависимости от значений эксцентриситета приложенной сжимающей нагрузки представлено на рис.4.

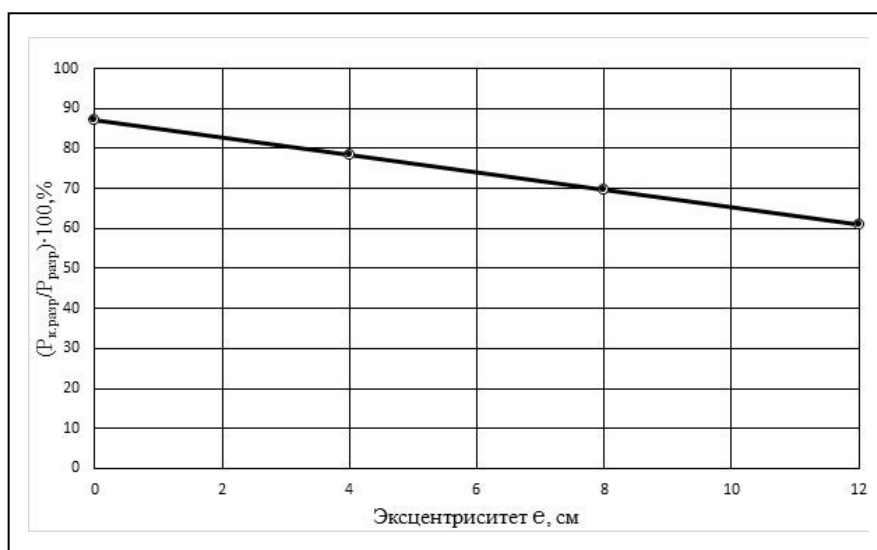


Рис. 4. Изменение относительной величины разрушающей сжимающей нагрузки образцов в зависимости от значений эксцентриситета приложенной сжимающей нагрузки

На рисунке 4 отмечены следующие условные обозначения: ●, ○ – соответственно аналитические экспериментальные данные и расчётные значения, полученные по функциональной зависимости $fP_{к,разр}/P_{разр} \cdot 100 = 87 - 2,175 \cdot e$. Индекс К

означает, что разрушающая нагрузка относится к образцам с коррозионными продольными трещинами.

При обратно пропорциональной функциональной зависимости относительной величины разрушающей сжимающей нагрузки между опытными образцами с коррозионными продольными трещинами и экспериментальными конструкциями без них относительно значений эксцентриситета это отношение составляет для эксцентриситетов $e = 0$ см, $e = 4$ см, $e = 8$ см и $e = 12$ см соответствующие величины 87,0%, 78,5%, 69,6 и 60,9%.

Выводы:

1) в коррозионных продольных трещинах не загруженных железобетонных конструкциях коррозионный процесс на арматуре не замедляется во времени;

2) увеличение эксцентриситета способствует росту относительных значений абсолютных деформаций δ/δ^k при всех относительных величинах разрушающей сжимающей нагрузки;

3) жёсткость образцов без коррозионных продольных трещин имеет более высокие величины, чем жёсткость опытных конструкций с коррозионными продольными трещинами при всех относительных значениях от разрушающей сжимающей нагрузки с наличием тенденции повышения этого количественного показателя при увеличении эксцентриситета;

4) кинетика приращения значений увеличения относительной величины разности жёсткости между образцами без коррозионных продольных трещин и образцами с коррозионными продольными трещинами имеет прямо пропорциональную зависимость от возрастания величины эксцентриситета;

5) абсолютная величина разрушающей сжимающей нагрузки образцов, содержащих и не имеющих коррозионные продольные трещины, изменяется по экспоненциальной зависимости относительно значений эксцентриситета с наличием более низких числовых показателей для образцов с коррозионными продольными трещинами;

6) относительная величина разрушающей сжимающей нагрузки между образцами как с коррозионными продольными трещинами, так и без них составляет для значений эксцентриситетов $e = 0$ см, $e = 4$ см, $e = 8$ см и $e = 12$ см соответствующие величины 87,0%; 78,5%; 69,6% и 60,9%.

Библиографический список:

1. Овчинников И.Г. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания/ И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, О.Н. Распоров и др.- Саратов: Изд-во «Кубик», 2014.504с.
2. Скоробогатов С.М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории)/С.М. Скоробогатов. – Екатеринбург: УрГУПС. 2009. 485с.
3. Маринин А.Н. Соппротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации/ А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г.Овчинников. Саратов: «Рата». 2008. 259 с.
4. Мигунов В.Н. Длительные экспериментальные исследования моделей железобетонных конструкций с трещинами в агрессивной хлоридсодержащей среде: моногр. /В.Н. Мигунов. – Пенза: ПГУАС. 2016. 404с.

5. Шамшина К.В. Влияние коррозионных продольных трещин на деформационные и прочностные свойства железобетонных конструкций: Научно-квалификационная работа (диссертация)/ К.В. Шамшина; Пенза. Гос. ун-т архитектур. и строит. Пенза, 2019. 145с.
6. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Часть 2: моногр./ В.Н. Мигунов. - Пенза: Изд-во ПГУАС, 2013.-304 с.
7. Шамшина К.В. Результаты экспериментальных исследований деформационных свойств сжимаемых железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинами в защитном слое бетона/ К.В. Шамшина // Инженерно-строительный Вестник Прикаспия: научно-технический журнал АГАСУ. 2020. - №1 (31). С. 26-33.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УКАТАННОГО БЕТОНА В ПЛОТИНОСТРОЕНИИ

Яра Юссеф¹, аспирант первого года обучения

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

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

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Совершенствование технологии строительного производства должно способствовать повышению качества строительства гидротехнических сооружений и их надежности. Для возведения плотин, которые являются одними из наиболее ответственных гидротехнических сооружений, необходим тщательный выбор исходных компонентов, который бы основывался на обеспечении необходимой прочности, долговечности, водонепроницаемости трещиностойкости и морозостойкости. В последние десятилетия не только в России, но и во всем мире получило широкое распространение применение укатанного бетона в плотиностроении. Технология применения укатанного бетона в гидротехническом строительстве имеет ряд преимуществ: способствует снижению трудозатрат и стоимости, позволяет полностью механизировать процесс бетонирования при использовании высокопроизводительной техники, и, тем самым, увеличивает темпы строительства массивных сооружений. В статье приводятся данные о материалах и основные требования к ним в случае использования укатанного бетона в гидротехническом строительстве.

Ключевые слова: гидротехнический бетон, укатанный бетон, плотиностроение, бетонная смесь, подвижность, расход цемента.

В последние годы плотиностроение из укатанного бетона становится широко распространенным во всем мире благодаря низкой стоимости и высокой скорости строительства по сравнению с другими типами плоти [1].

Укатанный бетон представляет собой бетонную смесь особо жесткой консистенции с пониженным расходом цемента и повышенным содержанием пуццоланы (золы-уноса), не поддающийся уплотнению глубинными вибраторами и уплотняемой укаткой вибрационными катками, тяжелыми автомашинами, пневмокатками и др. Смеси для укатанного бетона укладываются слоями толщиной 0,25 – 0,75 м с условием перемещения по ним тяжелых машин [2].

Укатанный бетон обладает широким спектром физико-механических свойств, которые зависят от состава и однородности бетонной смеси, технологии его вибрационной укатки в плотине. В этой связи укатанный бетон приближается к виброукатанному гравелистому грунту, упроченному цементом. Однако, плотины из укатанного бетона не считаются плотинами нового типа, а представляют собой бетонные плотины, построенные с использованием новой технологии строительства [2].

Впервые укатанный бетон был применен в Японии при строительстве гравитационной плотины в 1980 году (плотина Симадзигава высотой 89 м, объемом укатанного бетона 165000 м³ при общем объеме бетона 317000 м³) [1, 2].



Рис. 1. Плотина Симадзигава - первая в мире плотина из укатанного бетона (Япония)

Основными критериями, которыми руководствуются при выборе материалов для укатанного бетона, являются требования по прочности, долговечности, водонепроницаемости и трещиностойкости плотины. Особую роль играют свойства бетонной смеси непосредственно на объекте, в том числе в горизонтальных швах между слоями укатанного бетона, отличающиеся значительно от свойств бетонной смеси в лаборатории.

Выбор вида и гранулометрического состава заполнителей является важным фактором, влияющим не только на качество бетонной смеси перед ее укладкой, но и на свойства бетона. Неоднородность свойств заполнителей во время бетонирования массивной конструкции оказывает влияние не только на расход цемента и водопотребность смеси, но на выход бетона и его прочность.

Наиболее часто используется кривая гранулометрического состава заполнителей, имеющая следующий вид [3, 4]:

$$p = (d/D_{\max})^n \cdot 100\% \quad (1)$$

где p – процентное содержание частиц, проходящих сквозь сито с величиной отверстий d ;

d – величина отверстий сит;

D_{\max} - максимальный размер заполнителя с основным размером, используемым в смеси заполнителей;

n – степень, находящаяся в пределах 0,33 - 0,50.

Большинство плотин из укатанного бетона были построены с использованием природных заполнителей, отвечающих всем требованиям обычного бетона. Однако, следует использовать заполнители, имеющие наилучшие физико-механические показатели, высокую плотность, низкий модуль упругости и низкий коэффициент теплового расширения.

В качестве вяжущего в укатанных бетонах применяются портландцемент, шлакопортландцемент и пуццолановый портландцемент. Невысокий расход вяжущего и сыпучая консистенция бетонных смесей укатанного бетона обуславливает их повышенную склонность к расслоению при перегрузке, подаче в блоки и распределении. Склонность к расслоению особенно возрастает при увеличении максимальной крупности зерен заполнителей свыше 40 мм [5]. Поэтому при применении смесей с низким расходом цемента и крупностью зерен заполнителей с крупностью заполнителя 100 - 120 мм необходимо принимать

специальные меры по предотвращению расслоения смесей при их укладке, к которым можно отнести снижение высоты падения смеси, разгрузку порций смеси с частичной пригрузкой их друг к другу, использование добавок ПАВ, повышающих их связность [4].

Широкое распространение получило применение активных минеральных добавок, которые вводятся в цемент и представляют собой тонкодисперсные кремнеземистые материалы. Применение пуццолановых добавок в гидротехнических бетонах массивных конструкций является общеизвестным и преимущественно составляет около 15-25% от массы цемента. Однако, распространение технологии укатанного бетона в области гидротехнического строительства привело к увеличению содержания в них пуццолановых материалов [6].

Обычно используются активные минеральные добавки природного и искусственного происхождения для улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик укатанного бетона, повышения его долговечности, водонепроницаемости и трещиностойкости и понижения усадкой и тепловыделения.

В состав смесей из укатанного бетона могут входить химические добавки, повышающие подвижность бетонной смеси и замедляющие схватывание, особенно в условиях жаркого климата.

Укатанный бетон отличается от обычного бетона аналогичных марок следующим [6]:

- меньшим расходом вяжущего;
- высокой первоначальной прочностью, обеспечивающей возможность перемещения по нему тяжелых машин и механизмов (с удельным давлением до 1,0 МПа) сразу же после укладки и уплотнения;
- малой усадкой $(1 - 5) \cdot 10^{-4}$;
- низкое тепловыделение, адиабатический подъем температуры для бетона с содержанием вяжущего 100 - 130 кг/м³ не превосходит 12-14 °С;
- пониженная на плотность? - 5%;
- более высокий коэффициент фильтрации $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-8}$ см/с;
- меньший модуль деформации на 10 - 20%;
- повышенная неоднородность; при крупности заполнителей до 40 мм коэффициент вариации C_v значений прочности составляет 0,2 - 0,22; при крупности заполнителей 100 - 120 мм - 0,27 - 0,3.

Особожесткие смеси укатанного бетона отличаются от смесей обычного бетона пониженным расходом цемента. Поскольку смеси укатанного бетона уплотняются виброкатками, они должны иметь высокую начальную прочность, необходимую для обеспечения перемещения техники в момент их уплотнения. Смесей укатанного бетона также имеют сыпучую консистенцию в связи с низким содержанием вяжущего, что обуславливает их склонность к расслоению.

Принято выделять пять типов плотин из укатанного бетона в соответствии с расходом вяжущего, состоящего из цемента и пуццолановых добавок [2]:

1. Плотины первого типа из тощего укатанного бетона с расходом вяжущего в пределах 55-99 кг/м³.
2. Плотины второго типа из пластичного укатанного бетона со средним расходом вяжущих в пределах 100-149 кг/м³.

3. Плотины третьего типа из высокопластичного укатанного бетона с высоким расходом вяжущего, находящегося в пределах 150-270 кг/м³ и содержанием пуццолановых добавок (золы-унос) в количестве 50-60% от содержания вяжущих.

4. Плотины четвёртого типа, или японские плотины, возводимые в стране с высокой сейсмической активностью, в которых расход вяжущих в среднем составляет 120-130 кг/м³, из которых: 90 кг/м³ - цемент, 30 кг/м³ - зола-унос.

5. Плотины пятого типа из укатанного бетона, классифицируемые как твёрдые насыпы представляют собой плотины из особого тощего укатанного бетона с минимальным расходом вяжущих до 60-70 кг/м³.

В таблице 1 представлены статистические данные о построенных плотинах из укатанного бетона различных типов в мире в 2008 году в процентах [7]. Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что большинство построенных плотин относится к плотинам третьего типа с высоким расходом вяжущих, находящимся в пределах 150-270 кг/м³.

Таблица 1. Статистические данные построенных плотин из укатанного бетона в 2008 году

Тип плотины из укатанного бетона	I тип	II тип	III тип	IV тип	V тип
Процент типов построенных плотин	14%	17%	53%	13%	3%

В таблице 2 представлены составы бетонных смесей трёх, успешно возведённых, больших плотин без применения ПАВ: Аппер-Стилуотер (США), Бени-Харун (Алжир) и Оливенхейн (США) [7]. При анализе данных таблицы 2 можно сделать вывод об эффективном использовании кислых зол-уноса.

Таблица 2. Составы бетонных смесей плотин из укатанного бетона [9]

Название плотины	Высота, м	Крупный заполнитель, кг/м ³	Мелкий заполнитель, кг/м ³	Цемент, кг/м ³	Зола-унос, кг/м ³	Вода, кг/м ³
Аппер Стилуотер	91	1325	680	79	173	98
Бени-Харун	97	1335	750	82	143	101
Оливенхейн	118	1390	740	74	121	124

В последние годы были разработаны и успешно внедрены новые составы укатанного бетона для плотин с использованием ПАВ и низкими расходами цемента [8, 9], разработанные в КНР. Например, авторами предложен состав укатанного бетона (таблица 3), в составе которого применяется зола-унос, суперпластификатор и воздухововлекающая добавка. В таблице 4 представлен многокомпонентный состав укатанного бетона плотин с использованием золы бурых углей, метакаолинита и водоредуцирующей добавки.

Таблица 3. Состав укатанного бетона для плотин в КНР [8]

Расход материалов, кг/м ³	Крупный заполнитель	Кварцевый песок	Цемент	Вода	Зола-унос	СП	Воздухововлекающая добавка
		1400-1500	500-700	51-59	60-110	70-120	0,876-1,46

Таблица 4. Состав укатанного бетона для плотин в КНР [9]

Расход материалов, кг/м ³	Крупный заполнитель	Кварцевый песок	Цемент	Вода	Зола бурых углей	Метакаолин	СП
		1950 -2050	850- 900	100	110-140	90-110	40-70

На основе приведенных данных можно сделать вывод об актуальности использования укатанного бетона в плотиностроении, который становится все более широко распространенным во всем мире. Применяются смеси с различным содержанием цемента, пуццолановых добавок различного происхождения, водоредуцирующих и воздухововлекающих добавок.

Библиографический список:

1. Судаков, В.Б., Толкачев, Л.А. Современные методы бетонирования высоких плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Ляпичев, Ю.П. Проектирование и строительство современных высоких плотин / Ляпичев Ю.П. – М.: РУДН, 2009. 343 с.
3. Andriolo, Fr. R. Materials and RCC quality requirements // Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams, 17–19 november. 2003, Madrid, Spain. Pp. 61-70.
4. Ortega, F., Andriolo, F.R. Discussions regarding the use of materials and the design of RCC dams // Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams, 17–19 November. 2003, Madrid, Spain. Pp. 829-837.
5. Рекомендации по применению укатанных бетонов в гидротехническом строительстве. ВНИИГ. 1985. 21 с.
6. Yerramala, A., Ganesh Babu, K. Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33, Iss. 10. Pp. 1057-1062.
7. Dolen, T.P., Ibáñez-de-Aldecoa, R., Eharz, J.L., Dunstan, M.R.H.. Successful large RCC dams – what are the common features? // Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams, 17–19 November. 2003, Madrid, Spain. Pp. 127-137.
8. Патент на изобретение, Китай, МПК C04B28/00. Novel roller-compacted concrete for dams and preparation method thereof / Zhan Qinhui, Lu Bin, Zhao Pibiao, Ji Ping, Tang Min, Guo Shaobin, Zhou Fushun; заявитель Guangdong NO 3 Water conservancy and hydro electric engineering Bureau. No CN103253898(A); дата приоритета 14.05.2013; опубл. 21.08.2013.
9. Патент на изобретение, Китай, МПК C04B28/04. Roller compacted concrete and preparation method thereof / Xie Xiangming, Yu Qingshan, Zhao Yaling, Chen Zai, Xie Xiaoming, Yao Chukang, Liu Canling; заявитель Guangdong NO 2 Hydropower ENG BUREAU CO LTD, Guangdong YSD Surveying, Designing CO LTD. No CN107021698 (A); дата приоритета 05.04.2017; опубл. 08.08.2017.

ПОЛУЧЕНИЕ ГИПСОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДВУВОДНОГО ГИПСА
В СВЧ-ПОЛЕ

Н.С. Дмитриев¹, аспирант

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

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Повышающиеся требования к охране окружающей среды делают актуальной разработку энергоэффективных технологий строительных материалов, совмещая ряд этапов производства материалов в один технологический передел с применением более эффективных методов их тепловой обработки. В статье рассмотрена возможность получения гипсовых изделий из двуводного гипсового камня, минуя производство гипсового вяжущего, применяя при этом СВЧ-нагрев как наиболее эффективный и удобный из существующих способов нагрева, не требующий непосредственного подключения внешних электродов к внутренним электродам формы, к которым может пригорать материал, приводя электроды в негодность. За счёт совмещения процессов производства вяжущего (дегидратация молотого двуводного гипса с отщеплением 1,5 молекулы воды) и готового изделия (реакция полуводного гипса с водой с образованием монолита из двуводного гипса) в одном аппарате сильно сокращается общее время производства изделия, начиная с добычи гипса с карьеров.

Ключевые слова: Двуводный гипс, сверхвысокочастотное излучение, вода, полистирол, герметичная форма.

В связи с повышением требований к охране окружающей среды целесообразна разработка новых строительных материалов с применением энергоэффективных технологий и экономией топливно-энергетических ресурсов. Гипсополистиролбетон, теплоизоляционный материал на основе гипсового вяжущего, содержит в себе компонент – гипсовое вяжущее, которое требует затрат топлива на его производство [1]. В связи с этим актуальным является вопрос о замене вяжущего на компонент, требующий значительно меньших энергетических затрат.

Существующие способы производства гипсовых вяжущих требуют значительных затрат времени для дегидратации гипса: β -гипс (структура мелкокристаллическая с развитой удельной поверхностью и неоднородностью минерального состава по зерну, удаление воды происходит в парообразном состоянии, в негерметичных аппаратах, связанных с атмосферой – гипсоварочный котёл, вращающаяся печь, мельница совмещённого помола и обжига, печь кипящего слоя, труба-сушилка) – 2,5-3 часа при температуре 160-180 °С, α -гипс (структура крупнокристаллическая с малой удельной поверхностью и большей однородностью минерального состава по зерну, удаление воды происходит в капельно-жидком состоянии, в герметичных аппаратах, закрытых от атмосферы – автоклав, самозапарник, демпфер) – 6-8 часов при температуре 124 °С [2]. Прогрев с помощью СВЧ (сверхвысокочастотное излучение) позволяет сократить время изотермической выдержки в 18-24 раз. Это позволяет сократить использование топливо-

энергетических ресурсов в разы и обойтись без использования твёрдого и жидкого топлива. За счёт совмещения процессов производства вяжущего (дегидратация молотого двухводного гипса с отщеплением 1,5 молекулы воды) и готового изделия (реакция полуводного гипса с водой с образованием монолита из двухводного гипса) в одном аппарате сильно сокращается общее время производства изделия, начиная с добычи гипса с карьеров.

В наше время существует огромное количество вариантов тепловой обработки строительных материалов. Чаще всего в производстве изделий используется конвективный теплообмен, где в качестве теплового агрегата служит разогретый пар. Такой способ прогрева материалов на цементном вяжущем, ведет к образованию микротрещин, которые ухудшают основные его параметры, такие как морозостойкость, водопроницаемость, прочность и трещиностойкость. Так же очень часто технологи встают перед выбором: высокая подвижность и низкие основные параметры или низкая подвижность и более высокие основные параметры. Плюс ко всему пост прогрева материалов на заводах занимает не малую площадь. Сейчас все чаще и чаще на производстве используют электропрогрев при помощи электродов. Во многом данный способ превосходит конвективный прогрев материала. Но есть несколько нюансов, не заметных с первого взгляда. Во первых, сложность производства форм с большими электродами к которым время от времени пригорает материал, во вторых, это невозможность использования данного способа в конвейерной технологии, тем самым нивелируя преимущество в скорости прогрева изделия.

При использовании СВЧ энергии в производстве строительных материалов, мы можем сэкономить время, денежные средства, дорогостоящие вяжущие и увеличить основные параметры материалов, на основе минеральных вяжущих веществ. Более того данный способ может быть пригоден для производства пенополистирола и других изделий взаимодействующих с водой в процессе твердения. Основным плюсом данного способа является возможность использования в конвейерной технологии, что сильно сократит затраты временные интервалы на производство изделий. Например, в бытовых условиях, при использовании обычной СВЧ печи, можно получить пенополистирол 5х5х5см за 1-2 минуты.

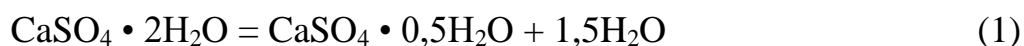
Что такое СВЧ? СВЧ (сверхвысокочастотное излучение) - излучение, представленное электромагнитными волнами следующих характеристик: частота колебаний 300 МГц - 30 ГГц, длина волны 1м - 1мм. Данный вид волн схож со следующими видами электромагнитного излучения:

- радиоволны (30кГц – 30МГц, 10м – 10 км);
- инфракрасное (тепловое) излучение (10^{12} – $1,5 \cdot 10^{14}$ Гц, 2 мкм – 760 нм);
- видимый свет ($1,5 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{16}$ Гц, 760 нм – 400 нм);
- ультрафиолетовое излучение (10^{16} – 10^{18} Гц, 400 нм – 50 нм);
- рентгеновское излучение (10^{18} – 10^{20} Гц, 50 нм – 0,001 нм);
- гамма- излучение (10^{20} Гц, меньше 0,001 нм) [3].

Как осуществляется нагрев в СВЧ поле? Не каждое вещество подвержено нагреву в этом поле. Необходимо наличие полярных диэлектриков в веществе. Одним из самых распространённых полярных диэлектриков является вода.

Если постоянный магнит или другой источник магнитного поля поднести к стрелке компаса, то она повернётся северным полюсом к южному полюсу магнита, т.е. противоположно действию поля этого магнита. Подобным образом ведут себя полярные молекулы по отношению к внешнему электрическому полю. А в СВЧ поле происходит высокочастотная смена направлений внешнего поля, поэтому полярная молекула с такой же высокой частотой поворачивается против направления действия этого поля. В то же время молекула во время поворотов задевает соседние так же колеблющиеся молекулы, что вызывает рост кинетической энергии движения молекул и, соответственно, рост температуры в веществе-диэлектрике. Неполярные диэлектрики слабо подвержены действию электромагнитного поля. Такие материалы будут разогреваться в СВЧ-поле, если они будут смешаны с полярными диэлектриками. Например, металлический порошок или уже обозначенная выше вода, следовательно, любой влажный материал. Значит, в прогреваемых в СВЧ массах обязательно присутствие полярных диэлектриков. В молекуле двуводного гипса он есть – это 2 молекулы воды ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Достаточно ли кристаллизационной воды для нагрева в СВЧ – предстоит исследовать.

Научная новизна заключается в том, что путём совмещения производства гипсового вяжущего вещества и непосредственно изделия из него в одной форме-аппарате отпадает необходимость в использовании энергозатратного вяжущего вещества. Вместо него используется двуводный гипс с карьеров, который в ходе тепловой обработки непосредственно в герметичной форме изделия при температуре выше 100°C переходит в полугидрат, выделяя при этом воду в количестве, соответствующим 1,5 молекулам воды по уравнению химической реакции (1) [4].



Затем образовавшаяся система при понижении температуры до 40°C схватывается и твердеет с образованием вторичного двуhydrата по реакции (2).



Подвспененный полистирол выступает в качестве активного заполнителя, уплотняющего и сближающего частицы гипса за счёт вспенивания в водяном пару. Вторым аспектом научной новизны является применение СВЧ поля для тепловой обработки гипсополистирольных масс, что позволит организовать конвейерное производство изделий, т.к. источник СВЧ-излучения не требует непосредственного контактного подключения к форме с сырцом изделия.

Практическая значимость данной работы состоит в том, что гипсополистиролбетонные изделия, произведённые по данной технологии, лишены промежуточного этапа – производства вяжущего вещества. А использование малого количества воды, необходимого исключительно для нагрева смеси при действии СВЧ излучения, позволяет повысить прочность изделий в сравнении с существующими пористыми гипсовыми изделиями.

Библиографический список:

1. Соков, В.Н., Мишина, Г.В. Самоуплотнённый гипсополистиролбетон / В.Н. Соков, Г.В. Мишина. – М.: МГСУ, 1999. 128 с.
2. Шкляр, А. С., Высокопрочный гипс / А.С. Шкляр. – М.: Стройиздат Наркомстроя, 1943. 56 с.
3. Пчельников, Ю. Н., Свиридов, В. Т. Электроника сверхвысоких частот / Ю. Н. Пчельников, В. Т. Свиридов. – М.: Радио и связь, 1981. 96 с.
4. Ферронская, А. В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. / А. В. Ферронская. – М.: АСВ, 2004. 488 с.

СПОСОБЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО АНГИДРИТОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕНОВЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.А. Аниканова¹, канд. техн. наук, доцент

О.В. Волкова¹, канд. техн. наук, доцент

А.И. Кудяков¹, д-р. техн. наук, профессор

¹*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

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. Восребованность 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 созданием безотходных производств по переработке минерального природного и вторичного сырья. Для реализации вторичного сырья, в том числе и ангидритового, для производства стеновых и отделочных материалов необходимо научное обоснование применения техногенного сырья, связанное с его химическим, минералогическим составом, способами образования с целью прогнозирования определенных типов структур материалов и технологий их производства [1-5]. Необходимость использования вторичных ресурсов является важной экологической задачей, решение которой позволит полностью или частично ликвидировать отвалы и снизить загрязнение окружающей среды. 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 фторангидритового сырья, 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), минералогическому и гранулометрическому составу. 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 отвалный фторангидрит [2, 6]. Фторангидритовое вяжущее с модифицирующими добавками авторы рекомендуют использовать в качестве готового продукта в производстве стеновых материалов. Кислый фторангидрит может модифицироваться в заводских условиях или использоваться как дополнительный компонент, содержащий серную кислоту, при получении легких бетонов для стеновых материалов [9]. Отвалный фторангидрит, содержащий в основном растворимый и нерастворимый ангидрит рекомендовано использовать в качестве вяжущего вещества для производства стеновых и отделочных материалов. Длительное время и условия хранения в отвалах способствуют образованию двуhydrата сульфата кальция, поэтому областью применения такого сырья являются строительные материалы с фторангидритовым наполнителем и заполнителем (рис. 1).



Рис. 1. Классификация фторангидрита по вещественному составу и применению

Исходя из химического и гранулометрического состава отвального фторангидрита, представленного в основном двухводным 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 [6-11]. Исходя из нестабильного состава отвального фторангидрита, меняющегося при заполнении отвала, а также существенным усложнением технологии, связанной с использованием прессового оборудования, исследована возможность использования отвального 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).

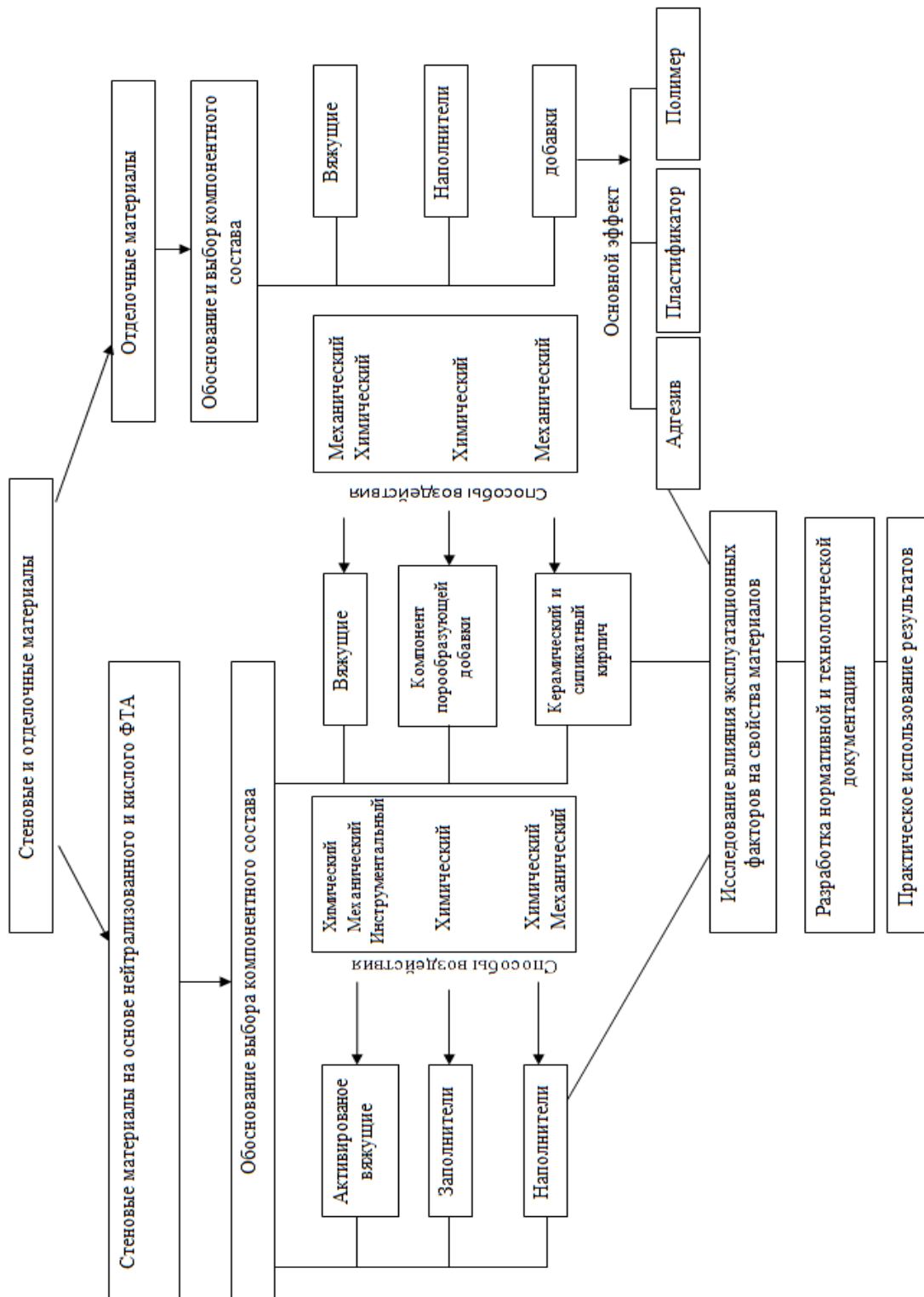


Рис. 2. Структурно-методологическая схема исследований ФТА для производства стеновых и отделочных материалов

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

- выбор микронаполнителей, обеспечивающих химическое взаимодействие с вяжущим за счет образования экранирующих соединений и являющихся центрами кристаллизации для твердеющего ангидрита;

- выбор зернового состава заполнителей, обеспечивающих создание пространственного каркаса с минимальной межзерновой пустотностью, требуемой прочностью и плотностью затвердевшего раствора из сухих строительных смесей и дополнительно обеспечивающих химическое сродство с подложкой;

- выбор химических и минеральных добавок к вяжущему для улучшения контактного взаимодействия и функциональных добавок для повышения эксплуатационных характеристик материалов;

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., Потамошнев 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. Кудряков, 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., Кудряков 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.
11. 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 ПЕРЛИТА И НАНОКРЕМНЕЗЕМА НА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ И ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ

С.А. Лхасаранов¹, канд. техн. наук, доцент

Л.С. Гиркикян¹, магистрант

¹Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Аннотация. В статье приведены результаты исследований композиционных вяжущих для бетонов гидротехнических сооружений. Показано, что при введении стекловидного перлита в количестве 30% происходит максимальный рост физико-механических показателей, в то время как при увеличении содержания перлита до 50-70% физико-механические показатели ниже, чем у контрольного состава. Изучено влияние нанокремнезема на прочность при сжатии композиционных вяжущих. Исследована кинетика выделения тепла при гидратации цемента и композиционных вяжущих. При введении стекловидного перлита происходит значительное изменение температуры при гидратации. Наибольшее снижение тепловыделения при гидратации композиционных вяжущих наблюдается у составов с содержанием стекловидного перлита 70 мас. %. Дополнительное введение нанокремнезема приводит к сокращению индукционного периода гидратации за счет взаимодействия нанокремнезема с продуктами гидратации цемента и композиционных вяжущих.

Ключевые слова: Портландцемент, перлит, нанокремнезем, гидратация, тепловыделение, прочность

Решение задач улучшения эксплуатационных свойств бетона для гидротехнических сооружений, повышение долговечности и коррозионной стойкости таких сооружений является актуальным [1-6]. Немаловажным аспектом является подбор вяжущего для гидротехнических сооружений, поскольку необходимо достичь умеренного тепловыделения при обеспечении заданных физико-механических свойств [2, 3, 5].

В проводимых исследованиях использовались следующие материалы: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Н, перлит стекловидный Мухор-Талинского месторождения (Республика Бурятия), пирогенный нанокремнезем (НК) «HDK Wacker», получаемый в результате сжигания тетрахлорсилана (SiCl_4) в токе водорода и кислорода. Содержание аморфного кремнезема в нем составляет 99,8%, средний размер первичных частиц 5-50 нм, удельная поверхность 150 $\text{м}^2/\text{г}$. Композиционные вяжущие получали совместным помолом портландцемента и стекловидного перлита (30, 50, 70 мас. %) в стержневом виброистирателе до удельной поверхности 400-450 $\text{м}^2/\text{кг}$.

Проведенные эксперименты показали, что в разные сроки твердения происходят изменения физико-механических показателей композиционных вяжущих при варьировании содержания перлита и нанокремнезема (рис. 1).

При содержании перлита 30% получены наивысшие показатели прочности в возрасте 7 и 28 суток, в то время как при содержании перлита 50% и 70% прочность при сжатии ниже прочности контрольного состава (бездобавочного портландцемента) на 13% и 55 % соответственно. Введение в состав композиционных вяжущих нанокремнезема в количестве 0,1 мас. %, прочность при сжатии повышается на 10-15% по сравнению с бездобавочными составами, что

говорит об интенсификации процессов гидратации цемента, снижении пористости и дефектности структуры твердеющего композита.

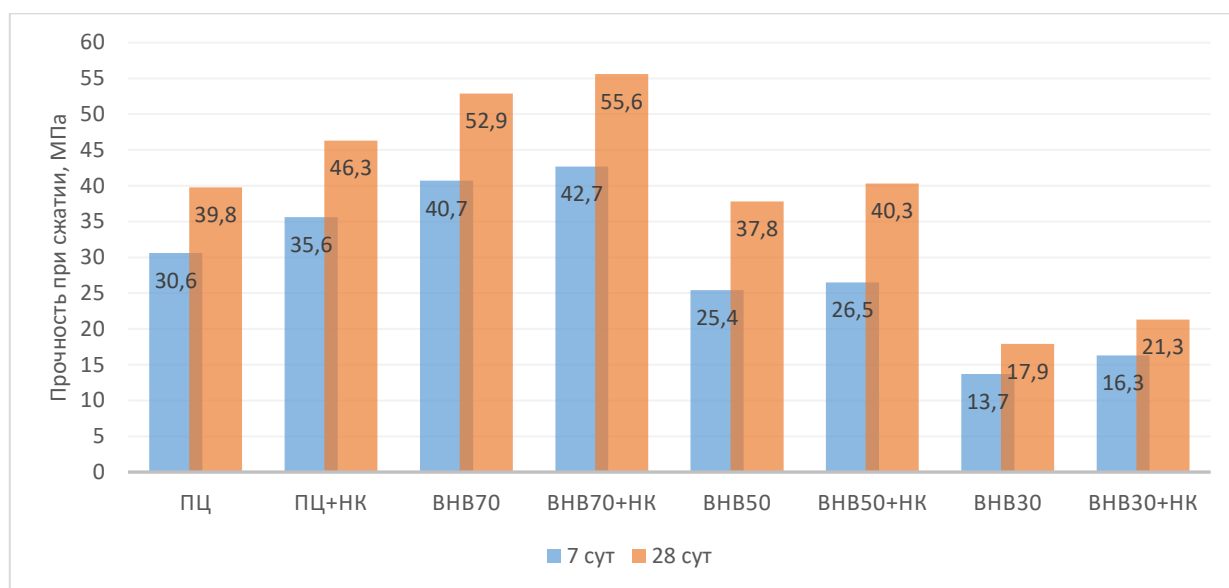


Рис. 1. Физико-механические показатели композиционных вяжущих в возрасте 7 и 28 суток твердения

Возведение массивных гидротехнических конструкций, из бетонов на обычных цементах приводит к их нагреванию из-за высокого тепловыделения. Тепловыделение при гидратации композиционных вяжущих исследовали логгером температуры Testo-176Т4 (рис. 2).

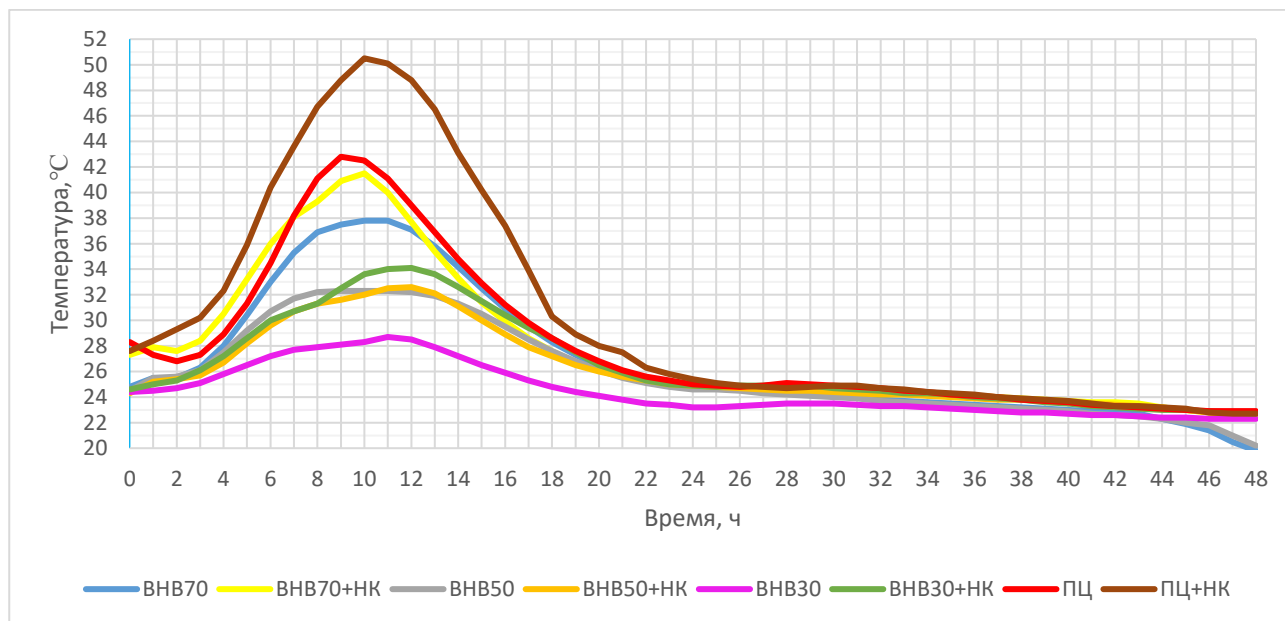


Рис. 2. Температура при гидратации композиционных вяжущих

Анализ графиков показывает, что наибольшее повышение температуры наблюдается у составов с обычным портландцементом. При этом по графику видно, что уже на ранней стадии наблюдается интенсификация процессов гидратации составов композиционных вяжущих с НК. В преиндукционный период составы с НК показывают интенсивный рост температуры, что обусловлено

с активным взаимодействием НК с гидратирующимися клинкерными минералами.

Введение перлита в состав композиционных вяжущих приводит к снижению максимальной температуры при гидратации, изменению времени индукционного и постиндукционного периодов. Наибольший индукционный период наблюдается у составов с содержанием перлита 70%. Оптимальными с точки зрения темпов тепловыделения можно считать составы с 50% содержанием перлита, однако стоит отметить, что физико-механические показатели у таких составов ниже по сравнению с обычным портландцементом и ВНВ70. Это необходимо учитывать при подборе составов бетонов для гидротехнических сооружений и детально исследовать по показателям морозостойкости, водонепроницаемости и коррозионной стойкости.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при введении в состав композиционных вяжущих перлита в количестве до 30 % получены физико-механические показатели, превышающие прочность исходного портландцемента. При увеличении содержания перлита до 50-70% происходит снижение физико-механических показателей на 13 и 55% соответственно;

- введение в состав композиционных вяжущих нанокремнезема приводит к увеличению прочности при сжатии на 10-15%, что говорит об интенсификации процессов гидратации;

- исследование тепловыделения составов композиционных составов показало значительные изменения при увеличении содержания перлита и наличия нанокремнезема.

Библиографический список:

1. Сафаров, К.Б. Регулирование реакционной способности заполнителей и повышение сульфатостойкости бетонов путем совместного применения низкокальциевой золы-уноса и высокоактивного метаксаолина / К.Б. Сафаров, В.Ф. Степанова // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 70-73.
2. Сафаров, К.Б. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС / К.Б. Сафаров, В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 20-25.
3. Григорьев, В.Г. Композиционные портландцементы для гидротехнического строительства / В.Г. Григорьев, В.К. Козлова, Е.Е. Андрияшина, Е.В. Шкробко, А.А. Лихошерстов // Ползуновский вестник. 2012. №1. С. 62–64.
4. Козлова, В.К. Улучшение свойств композиционного цементного камня повышенной коррозионной стойкости / В.К. Козлова, Е.Е. Ибе // В мире научных открытий. Научно-инновационный центр, Красноярск. 2013. №7 (43). С. 321-331.
5. Нго, С.Х. Влияние золы рисовой шелухи на свойства гидротехнических бетонов / С.Х. Нго, В.Л. Танг, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, О.А. Ларсен, Х.К. Ха // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 6 (117). С. 768-777.
6. Алексагин, С.В. Мелкозернистый бетон для гидротехнического строительства, модифицированный комплексной органоминеральной добавкой / С.В. Алексагин, Б.И. Булгаков // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 97-103.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ НАНОКРЕМНЕЗЕМА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

О.О. Масанин¹, аспирант

С.А. Усиков¹, аспирант

В.В. Нелюбова¹, к.т.н, доцент

¹*Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г.Шухова.*

Аннотация: в статье описывается ряд экспериментов, направленных на получение стабильных суспензий нанокремнезема посредством физико-механического воздействия. Изложены особенности, проведен анализ и сравнение методов. Описано влияние суспензий, полученных различными методиками, на прочностные характеристики конечного продукта. Оценены возможные варианты проведения исследований в этом направлении.

Ключевые слова: цементный композит, наноматериал, суспензия нанокремнезема

Экономное и эффективное использование ресурсов является на данный момент основополагающим принципом в любом промышленном производстве, от медицины до строительной индустрии.

Также весьма актуальным направлением развития строительной индустрии является разработка новых высокоэффективных строительных композитов, которые позволят одновременно как повысить эксплуатационные характеристики, так и снизить потребление цемента в конечном продукте. Снижение объемов использованного цемента, в свою очередь, благоприятно отразится на стоимости продукции. Неочевидным на первый взгляд, но еще одним весьма важным аспектом в этом вопросе становится экологическая составляющая. Производство цемента крайне негативно влияет на окружающую среду, выбросы промышленных организаций по производству цементного сырья загрязняют атмосферу. Действенным методом одновременно для повышения эксплуатационных характеристик и потенциального снижения потребления цемента в строительных изделиях является использование модификатора в виде нанокремнезема.

Высокая пуццолановая активность нанокремнезема объясняется его крайне малым размером частиц [1]. Зона межфазного перехода, которая считается слабой зоной, также упрочняется, так как эти частицы заполняют все пустоты и поры из-за их малого размера, что в конечном итоге снижает проницаемость. Нанокремнезем является очень активным материалом, который ускоряет процесс гидратации бетона [2] и продуцирует дополнительный гель CSH, который, помимо прочего, отвечает за обеспечение прочности на бетон [2]. Содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне снижается по мере того, как нанокремнезем вступает в реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образует более плотный продукт [3]. Несколько исследований показали, что до 4% замены цемента нанокремнеземом может улучшить механические свойства, эксплуатационные характеристики и долговечность бетона в тяжелых условиях, таких как коррозия и высокие температуры. Хотя использование нанокремнезема было подтверждено рядом исследователей по конкретным характеристикам бетона, оно оказалось наиболее эффективным в диапазоне от 0,5 до 4% замены цемента, так как избыточное количе-

ство нанокремнезема может привести к агломерации из-за плохой дисперсии [4,5], тем самым снижая подвижность [6]. К тому же, сам процесс равномерного диспергирования нанокремнезема в объеме цементного композита не отличается должной стабильностью и зависит от множества факторов. Таким образом, был проведен ряд экспериментов с целью стабилизации нанокремнезема в воде посредством физико-механического воздействия различного рода, а также анализ влияния полученных суспензий на прочностные показатели образцов. Зависимость прочностных показателей от методики приготовления суспензии, вводимой в состав образцов, позволит оценить качество и равномерность распределения модификатора в матрице.

На базе исследовательской лаборатории кафедры материаловедения и технологии материалов БГТУ им. В.Г. Шухова был проведен ряд экспериментов с целью установления зависимости стабильности изготавливаемой суспензии нанокремнезема от методики диспергирования модифицирующего агента в ней. В качестве методик физического воздействия были приняты 3 способа: стандартное механическое перемешивание нанокремнеземистого компонента в воде, перемешивание с помощью магнитной установки, а также кратковременное воздействие ультразвуком фиксированной частоты. Для проведения эксперимента использовалась обычная проточная вода и нанокремнеземистый порошок «Орисил», полученный пиролизом четыреххлористого кремния высокой чистоты (производство Украины). Для эксперимента опытным путем было принято оптимальным соотношение 10г. сухого вещества на 100мл. воды, соотношения с большим насыщением суспензии твердым веществом затрудняют равномерное перемешивание. Меньшая же концентрация, в свою очередь, не позволяет четко оценить стабильность суспензии во времени, а также, начало расслоения посредством визуальной оценки.

В ходе эксперимента было установлено, что первые два способа воздействия работают весьма схоже, это подтверждают и результаты контроля стабильности суспензии с течением времени. Вымешивание производилось до полной гомогенизации приготавливаемой смеси, однако уже на второй час отстаивания суспензии при комнатной температуре (20 ± 2 C°) без каких-либо воздействий заметно выпадение в осадок твердой фракции, характеризующееся обесцвечиванием верхних слоев суспензии. С течением времени, осаждение твердой фазы стабильно усугубляется до приобретения в осадке формы геля.

При исследовании воздействия ультразвука на стабильность суспензии, рабочим режимом обработки бы принят 3-х минутный интервал при частоте 27кГц. Результат такого воздействия кардинально отличен от первых двух методик. Суспензия стабильна во времени на протяжении 48 часов, равномерная гомогенизация не нарушается, не замечено даже незначительных расслоений в объеме приготовленной смеси.

Следующим этапом проводимых экспериментов было установление характера влияния приготовленных суспензий на физико-механические характеристики цементного композита. Для проведения эксперимента использовался цемент La Farge марки 50Н, производства Франции. Были изготовлены образцы размером 2x2x2 см. Наряду с контрольными образцами, была произведена партия образцов, содержащих в себе суспензию нанокремнеземистого модифика-

тора, изготовленного тремя описанными ранее методиками. Образцы были обработаны посредством ТВО на протяжении 8 часов. По истечении данного срока обработки, образцы извлекались из камеры для просушки в нормальных условиях. Прочностные показатели изготовленных с применением нанокремнеземистого модификатора образцов напрямую зависят от гомогенизации смеси и равномерности распределения исследуемой суспензии в системе. Таким образом можно считать, что прочностные показатели готовых изделий напрямую зависят от эффективности диспергирования нанокремнезема.

Образцы, содержащие в составе суспензию нанокремнезема, полученную первыми двумя методами, показывают снижение прочности порядка 20%. Сходимость отрицательных результатов физико-механических испытаний образцов, содержащих в составе суспензию, полученную в результате механического перемешивания, обусловлена нестабильностью самой суспензии. Достигнуть равномерного распределения нанокремнезема в матрице полученных образцов не представляется возможным. Иные результаты показывает ряд испытаний образцов с суспензией, полученной посредством ультразвукового воздействия. Снижение прочностных показателей не столь значительно, что свидетельствует о более равномерном распределении наномодификатора в матрице композита. Однако, прироста прочности такие образцы, так или иначе, не проявляют. Таким образом, исследования в этом направлении весьма актуальны, но выходят за рамки текущего эксперимента. Следующим этапом в исследовании путей достижения стабильности суспензий нанокремнезема является теоретический и практический анализ возможных путей стабилизации с применением химического воздействия различных поверхностно-активных веществ.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ, проект № 19-19-00263

Библиографический список:

1. Потапов В. В., Горев Д. С. Физико-химические характеристики нанокремнезема (золь, нанопорошок) и микрокремнезема. *Фундаментальные исследования*. -2018. -№. 6. -С. 23-29.
2. Ходыкин Е. И., Соловьёва Л. Н., Огурцова Ю. Н., Гринёв А. П. Сравнительный анализ процессов гидратации цементного камня при введении тонкомолотых добавок // *Технологии бетонов*. 2014. № 5 (94). С. 18-19.
3. Потапов В., Кашутин А., Сердан А., Шалаев К., Горев Д. Нанокремнезем: повышение прочности бетонов. *Наноиндустрия*. 2013. № 3 (41). С. 40-49.
4. A.M. Sharkawi, M.A. Abd-Elaty, O.H. Khalifa, *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 579–588.
5. S. Erdem, S. Hanbay, Z. Guler, *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 634–642.
6. S.A. Zareei, F. Ameri, N. Bahrami, P. Shoaiei, H.R. Moosaei, N. Salemi, *J. Build. Eng.* 25 (2019) 100791

ПОЛУЧЕНИЕ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ВЯЖУЩИХ С ВЫСОКИМИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МЕТОДОМ АКТИВАЦИИ И ДЕТОКСИКАЦИИ

Ю.А. Соколова^{1,2}, д-р техн. наук, профессор

М.В. Акулова^{2,3}, д-р техн. наук, профессор

Б.Р. Исаколов^{2,4}, д-р техн. наук, доцент

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

²*Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН*

³*Ивановский государственный политехнический университет*

⁴*Казахстан. «Баишев Университет»*

Аннотация. Работа направлена на решение важной научной задачи, связанной с детоксикацией серосодержащих и железосодержащих отходов нефтеперерабатывающей и металлургической промышленности путем механохимической их активации, формирования термодинамически устойчивых соединений, установления механизма и условий осуществления процесса с получением новых вяжущих веществ для современных строительных материалов. В работе приводится методика получения серосодержащего, вяжущего с помощью механической активации и детоксикации отходов промышленности. Показано изменение предела прочности камня вяжущего от его состава и величины удельной поверхности.

Ключевые слова: серосодержащее вяжущее, детоксикация, активация, методика, свойства.

Вопросы комплексной переработки отходов нефтеперерабатывающей, металлургической, химической и других отраслей промышленности в настоящее время играют ключевую роль для обеспечения необходимых условий безопасной жизнедеятельности современной цивилизации. Весьма актуальной представляется разработка принципиально новых подходов к методам детоксикации указанных отходов и дальнейшего их использования в промышленности. Несмотря на попытки применения в производстве вяжущих веществ для современных строительных материалов, высокая токсичность перерабатываемого сырья выступает лимитирующим фактором. Анализ новейших достижений в указанной области приводит к выводу о том, что их использование для решения конкретных практических задач представляется проблематичным. При этом, согласно теоретическим воззрениям, невозможно претендовать на решение вопроса о механизме взаимодействия компонентов системы друг с другом при получении новых вяжущих систем.

Отечественный опыт, накопленный на рубеже столетий [1], свидетельствует об эффективности использования шлаков для получения вяжущих масс и композиционных материалов с высокой прочностью и водоустойчивостью. Использование энергетического подхода [2] к механохимической активации и сравнительный анализ термодинамических характеристик исходных и получаемых материалов [3] позволяют утверждать, что одним из перспективных путей утилизации серосодержащих отходов является применение их в производстве строительных материалов и изделий. При этом повышенные адгезионные свойства [4], прочность при сжатии, химическая устойчивость в растворах кислот, солей и щелочей, а также низкая водопроницаемость получаемых веществ

предоставляют широкие возможности для использования их в качестве перспективных вяжущих нового поколения. В составе серосодержащих строительных материалах можно использовать различные отходы нефтегазовой и топливно-энергетической промышленности Казахстана и РФ [5].

В качестве крупных и мелких заполнителей можно использовать природные, искусственные и целлюлозные органические материалы с различной фракции и крупностью зерен [5].

Строительно-эксплуатационные свойства серосодержащих легких бетонов во многом зависят от его рецептурного состава и составляющих вяжущих компонентов. Каждый компонент, входящий в состав серосодержащих строительных материалов, оказывает очень сильное влияние, как на реологические, так и на их физико-механические и эксплуатационные свойства.

В настоящее время проведено мало исследований влияния добавок технической серы на технологические параметры изготовления серосодержащей вяжущей композиции и на ее физико-механические свойства. Введение в состав легкого бетона различных волокнистых наполнителей и добавок позволяет повысить прочностные свойства и предотвратить негативные влияние неравномерного охлаждения крупноразмерных строительных материалов и изделий. Так, при введении в состав серосодержащего вяжущего компонента целлюлозных органических волокнистых материалов предел их прочности повышается, соответственно при изгибе на 50% и при сжатии на 120% [5]. Однако в последнее время отсутствуют систематические исследования и наработки по влиянию добавок технической серы на физико-механические и строительно-эксплуатационные свойства арболитовых композитов на основе измельченной фибры тростника со средней плотностью 600 – 630 кг/м³.

Совместный помол добавки серы с железосодержащими сырьевыми материалами в присутствии воды может привести к детоксикации и взаимной нейтрализации химически токсичных веществ, находящихся в составе промышленных отходов и получению совершенно нового вяжущего вещества с улучшенными строительными свойствами. Процессы взаимной нейтрализации и механохимической активации вяжущего состава, приведенные в работе [6], приводят к повышению физико-механических и эксплуатационно-строительных характеристик существующих и получению новых строительных материалов.

Целью данной работы является получения вяжущих с улучшенными адгезионными свойствами к минеральным и органическим материалам путем совместной механохимической активации серосодержащих отходов различных отраслей промышленности с термодинамически совместимыми химическими и металлургическими отходами повышенной прочности, что позволит, применительно к бетонам, достичь экономии цемента до 30%.

Решение проблемы базируется на теоретических подходах к описанию механизма детоксикации серосодержащих отходов на основании реализации методов неравновесной статистической термодинамики, положений нестационарной нелинейной теории тепло- и массопереноса, теории случайных процессов и фрактального материаловедения. Это приведет к развитию статистической теории прочности и долговечности серосодержащих конструкционных материалов

на базе получаемых вяжущих веществ. Методы неравновесной термодинамики и оценки электрохимических свойств новых соединений обеспечат разработку моделей определения теплот образования вяжущих веществ.

Для проведения исследования использован портландцемент марки 400. В качестве модифицирующей и дополнительной добавок использованы техническая сера и пиритные огарки.

Образцы серосодержащих вяжущих смесей изготавливались в следующей технологической последовательности:

- помол, просеивание, взвешивание и дозирование серосодержащих добавок на основе пиритного огарка и технической серы;
- подготовка и дозирование серосодержащих добавок по фракционному составу и удельной поверхности;
- подготовка и дозирование серосодержащих добавок в соотношении технической серы к пиритному огарку $\frac{100}{200}$, $\frac{100}{250}$, и $\frac{150}{250}$ по массе, размол до тонкости, характеризующейся 8 - 10% остатка на сите № 008;
- подготовка и дозирование портландцемента по расчету;
- загрузка в барабанную мельницу серосодержащих добавок и провести совместный мокрый помол в течение 20 мин;
- добавка к серосодержащей смеси 67-70% портландцемента и расчетное количество воды при В/Ц = 0,6;
- загрузка в барабанную мельницу серосодержащих добавок и портландцемента домолот мокрым способом в течение 20 мин;
- загрузка в бетоносмесителю серосодержащих добавок совместно с портландцементом и перемешивание в течение 15 мин;
- остановка бетоносмесителя и выгрузка серосодержащего вяжущего состава.

При проведении опытных работ по предварительному определению состава и по активации серосодержащих добавок влажное измельчение происходило на конструкциях барабанной мельницы, за счет ударных и истирающих воздействий.

По итогам опытных работ установлено, что трехвалентное железо в виде пиритного огарка способно окислять техническую серу, переходя в двухвалентное железо. Также замечено, что цвет обрабатываемой серосодержащей смеси изменялся от желтоватого до серо-зеленого цвета. Совместное измельчение серосодержащих компонентов с портландцементом положительно влияет его физико-механические и строительно-технические характеристики.

Оценка влияния добавок на прочностные характеристики серосодержащих вяжущих в зависимости от удельной поверхности, времени помола, фракций и составляющих компонентов приведены в таблице.

Из таблицы видно, что пиритный огарок играет роль инициатора физико-химического процесса коагуляции серосодержащей вяжущей смеси. В процессе коагуляции серосодержащих смесей происходит поляризация дисперсных частиц вяжущего и взаимное притяжение их между собой, что усиливает процесс структурообразования вяжущего.

Таблица 1. Влияние удельной поверхности добавок на физико-механические свойства серосодержащего вяжущего различного состава

Удельная поверхность, см ² /см ³	Состав вяжущего, % (цемент: пиритный огарок: сера)	Предел прочности при сжатии, МПа через сут.:		
		7	14	28
2860	74:18:8	8,8	9,3	10,4
4435	70:18:12	8,85	9,3	10,4
4660	67:20:13	8,9	9,4	10,5
4715	74:18:8	9,3	9,95	10,9
4860	70:18:12	9,6	10,6	11,3
4950	67:20:13	9,8	10,8	11,6
4825	74:18:8	9,4	9,97	11,1
4930	70:18:12	9,6	10,6	11,6
4970	67:20:13	9,9	11,2	11,9

Для определения влияния водотвердого отношения на физико-механические свойства серосодержащего цементного камня изготовлены образцы с размерами 100x100x10000 мм при водотвердом отношении 0,385, при котором обеспечивалось растекание серосодержащей растворной смеси 200 мм на встряхивающем столике. Для сравнения результатов исследований также изготавливались образцы с размерами 100x100x10000 мм из цементных растворов, имеющие равную подвижность с бездобавочным составом при водотвердом отношении, равном 0,385. Техническая сера вводилась в состав смесей в количестве 8-13% в комбинациях с пиритным огарком (18% пиритный огарок+8% сера), (18% пиритный огарок+12% сера), (20% пиритный огарок+13% сера) от массы сухих компонентов. Как видно из таблицы, при активации серосодержащего вяжущего и увеличения удельной поверхности предел прочности при сжатии серосодержащего цементного камня повышается на 30 %.

В исследованиях определено [5, 7], что повышение реакционной способности компонентов вяжущего при мокром помоле достигается не только за счет повышения дисперсности в жидкой фазе, но и изменением кристаллической структуры, формы частиц, что является предпосылкой интенсификации процесса коагуляции серосодержащей смеси. При этом, минералогический и химический состав исходного вяжущего состава остаются неизменными. Можно предположить, что механизм активации заключается в повышении сил межмолекулярных взаимных притяжений и возникновении поверхностных валентных сил при сближении наночастиц коллоидной системы. Полученные результаты экспериментальных работ можно использовать при разработке оптимальных составов серосодержащих смесей арболитовых композитов различного назначения. Как видно из полученных данных, введение добавки из технической серы в количестве 8-13 % увеличивает предел прочности образцов при сжатии, приготовленных из растворов при водотвердом отношении равном 0,385 во влажном и сухом состоянии. Дальнейшее увеличение добавки приводит к снижению прочностных характеристик раствора, при этом закономерности изменения прочности для всех образцов имеют сходный характер. При добавке технической серы в количестве 8% прочность серосодержащих образцов в 28 суточном возрасте повышается от 9,4 МПа до 11,1 МПа, а при 13 %-ной добавке прочность повышается соответственно от 9,9 МПа до 11,9 МПа.

Установлено, что при введении технической серы в количестве 8 и 13 % плотность серосодержащих образцов увеличивается в среднем на 9 - 10 %, при этом предел прочности при сжатии возрастает в среднем на 17 %.

Таким образом результаты показали, что рациональным количеством добавки серы при принятом способе ее введения в состав, является 10 - 13 % от массы сухих компонентов смеси, обеспечивающее наибольшее повышение прочностных показателей серосодержащего цементного камня.

Библиографический список:

1. Малбиев С.А., Горшков В.К., Разговоров П.Б. Полимеры в строительстве: учеб. пособие для студ., обучающихся по направл. «Строительство». М.: Вышш. шк., 2008. 456 с
2. Schenker I., Filser F.T., Herrmann H.J., Gauckler L.J. // *Granular Matter*. 2009. № 11. P. 201-208
3. Кухаренко Л.В., Личман Н.В., Никитин И.В. // *Строительные материалы*. 2005. № 8. С. 38-41.
4. Kendall K. *Molecular Adhesion and Its Applications. The Sticky Universe*. N.Y.: Kluwer Academic Publishers, 2004. 448 p.
5. Акулова, М.В. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов // *Вестник ВолГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. Волгоград, 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 75–80.
6. Каскин, К.К. Комплексное использование сырья и отходов при переработке хромитовых руд / К.К. Каскин, А.М. Сарсенов. Актобе: Актюбинский центр науч.-техн. инф., 2003. 20 с.
7. Акулова М.В. Разработка и исследование свойств вяжущих на основе отходов промышленности /М.В. Акулова, Б.Р.Исакулов, М.Д.Джумабаев[и др.] // *Вестник РААСН*. Курск; Воронеж, 2013. С. 256–260.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕАВТОКЛАВНЫХ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Р.С. Федюк¹, канд. техн. наук

¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Эффективные бетоны с улучшенными акустическими характеристиками имеют потенциал для применения в различных сферах строительства: как в градостроительстве (например, для ограждения высокоскоростных дорог), так и в гражданском строительстве - для защиты людей в жилых помещениях и на рабочих местах от воздушного, ударного и структурного шума, в том числе и в условиях воздействия акустического оружия. разработана широкая номенклатура ячеистых бетонов на разработанном полиминеральном вяжущем, обеспечивающих заданные характеристики прочности и звукопоглощения. Оптимальные составы были запроектированы на основе определенных природных и техногенных ресурсов Приморского края, которые имеют высокую адгезию к цементной матрице, одновременно обеспечивая высокопористую структуру.

Ключевые слова: ячеистый бетон, портландцемент, активная добавки, кварцевый песок, вермикулит, звукопоглощение.

Проектирование материалов с улучшенными акустическими характеристиками возможно лишь при использовании новейших достижений строительного материаловедения и управления процессами структурообразования за счет создания пористой структуры с преобладанием открытой пористости. Таким образом, представляется целесообразной разработка ячеистых бетонов с учетом повышения их эффективности за счет применения перспективных композиционных вяжущих с использованием местного сырья и отходов производства [1-3].

В работе изучали физико-механические и химические свойства золошлаковых смесей (ЗШС) крупнейших ТЭС Приморского края: Владивостокской ТЭЦ-2 и Приморской ГРЭС. В ходе исследования удельной эффективной активности исследуемых зол, выявлено, что зола Владивостокской ТЭЦ-2 содержит повышенный радиоактивный фон и не пригодна для применения в строительстве, в то время, как зола Приморской ГРЭС имеет удельную эффективную активность в пределах нормы (табл. 1).

Таблица 1. Удельная эффективная активность золошлаковых смесей ТЭС Приморского края

Наименование показателя	Результат измерения (А), Бк/кг	
	Владивостокская ТЭЦ-2	Приморская ГРЭС
Активность ⁴⁰ K	496,9±101	392±89
Активность ²³² Th	153,6±20,3	31,5±19,7
Активность ²²⁶ Ra	163,1±9,36	37,63±6,32
$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K$	>398	80±30

Очистка ЗШС проводилась по технологии, разработанной автором совместно с международным центром технологий обогащения минерального сырья и использования вторичных ресурсов. Технология включает в себя 3 ступени

очистки: выделение недожога, выделение железосодержащих фракций и выделение благородных металлов.

Для создания изоляционных и конструктивно-изоляционных материалов применялся вспученный вермикулит Кокшаровского месторождения (Приморский край) фракцией 1,25 мм. Выявлено хорошее совпадение химических составов ЗШС и вспученного вермикулита. Согласно закону подобия, предложенному В.С. Лесовиком, для создания эффективных композитов необходимо применения сырьевых материалов, обладающих схожим составом и физико-механическими характеристиками.

В различных областях техники важно правильно оценивать акустические характеристики пористых сред, однако, сложная форма пористых сетей в среде обычно затрудняет эффективный анализ характеристик. Упрощенной, но адекватной моделью, применяемой в диссертации, является модель многослойной перфорированной панели с воздушными прослойками между слоями, предложенная Д. Маа [4-5]. Данная модель была принята для моделирования звукопоглощения разработанного бетона из-за ее простоты; воздушные полости предполагаются однородной формы с одинаковым диаметром d .

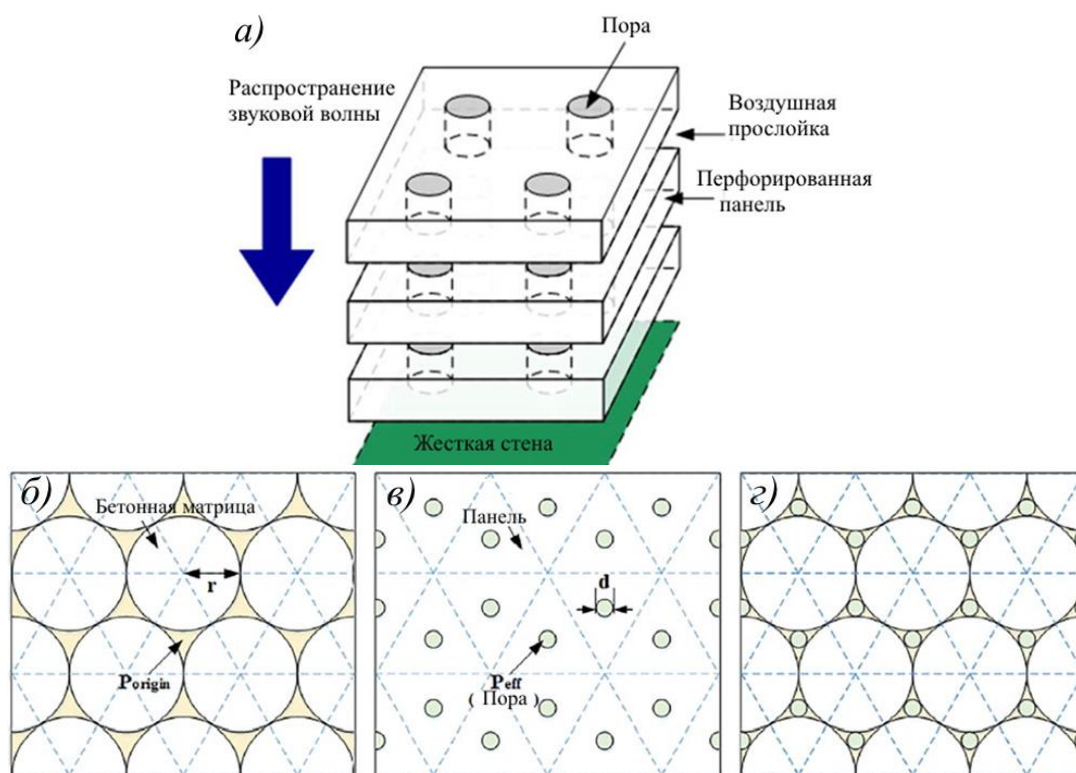


Рис. 1. Модель многослойной перфорированной панели: а) схематическое представление ячеистого бетона в виде панели, б) упрощенное представление бетонной матрицы, в) упрощенное представление эффективного диаметра пор, г) приведенная пористость панели

На основе этой модели может быть вычислен коэффициент звукопоглощения α [6-7]:

$$\alpha = \frac{4R/\rho_0 c_0}{(1 + R/\rho_0 c_0)^2 + (M/\rho_0 c_0)^2} \quad (1)$$

где R и M обозначают действительные и мнимые компоненты уравнения соответственно, c_o – скорость звука в воздухе (340 м/с), а ρ_o – плотность воздуха (1,2 кг/м³). Расчётные коэффициенты звукопоглощения приведены на рис. 2

Для планирования экспериментов и определения порядка рандомизации использовалось статистическое программное обеспечение «Design-Expert version 10» (Stat-Ease, Inc.) с использованием методологии Тагучи (рис. 3).

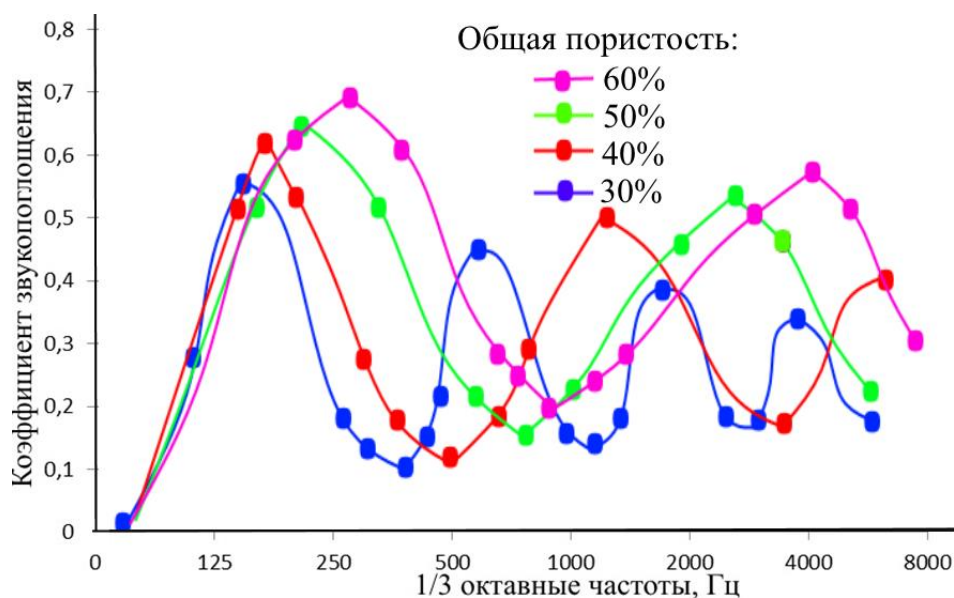


Рис. 2. Расчетные коэффициенты звукопоглощения

Проектировались 3 класса образцов по ГОСТ 25485: теплоизоляционные (составы 1-4), конструкционно-теплоизоляционные (составы 5-8) и конструкционные (составы 9-12) (табл. 2). Теплоизоляционные составы содержали вермикулитовый наполнитель, конструкционно-теплоизоляционные – и вермикулит, и кварцевый песок, а конструкционные – только кварцевый песок. При этом замещение портландцемента золой осуществлялось на уровне 40% (составы 1, 5, 9) и 50% (остальные составы). Соответственно, учитывая повышенную водопотребность золы, водовяжущее отношение для первого замещения было 0,4, а для второго – 0,45 (оптимальные значения для ячеистых материалов, для которых подвижность является одним из основных показателей, обеспечивающих рациональную поризацию системы). Составы 1, 3, 5, 7, 9, 11 использовались для изготовления пенобетона, а составы 2, 4, 6, 8, 10 и 12 – газобетона. Дисперсное армирование применялось для составов 3, 4, 7, 8, 11, 12. В качестве объекта сравнения был изготовлен контрольный состав газобетона марки D600.

Несмотря на то, что все смеси были запроектированы из условий равноподвижности, дополнительно были получены реограммы, отображающие результаты поведения систем при прямом ходе, т.е. период воздействия от состояния покоя до максимально заданной скорости. Исследуемые пробы на всем диапазоне измерения (т.е. при градиенте скорости сдвига от 5 до 25 с⁻¹) характеризуются свойственным для данных систем тиксотропным типом течения с плавным снижением вязкости: наблюдается равномерное падение начальной вязкости до минимального значения при приложении нагрузки.

Таблица 2. Разработанные составы ячеистых бетонов

Компоненты, кг/м ³	Номер состава												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	контр.
ПЩ	150	105	125	85	192	130	160	110	240	170	200	140	225
Известь	-	45	-	40	-	62	-	50	-	70	-	60	100
ЗЩС	100	100	125	125	128	128	160	160	160	160	200	200	-
Вода	100	100	112,5	112,5	128	128	144	144	150	150	180	180	182
Пенообразователь «Эталон»	0,8	-	0,8	-	1	-	1	-	1,2	-	1,2	-	-
Алюминиевый порошок	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	0,5
Двуводный гипс	-	2,5	-	2,1	-	3,2	-	2,7	-	4	-	3,5	4
Хлористый кальций	-	1,5	-	1,3	-	2	-	1,7	-	2,5	-	2,2	3,5
Суперпластификатор	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2	-
Вспученный вермикулит	35	35	35	35	20	20	20	20	-	-	-	-	-
Кварцевый песок	-	-	-	-	180	180	180	180	335	335	335	335	205
Полипропиленовая фибра	-	-	12	12	-	-	12	12	-	-	12	12	-
В/Т	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,45	0,56

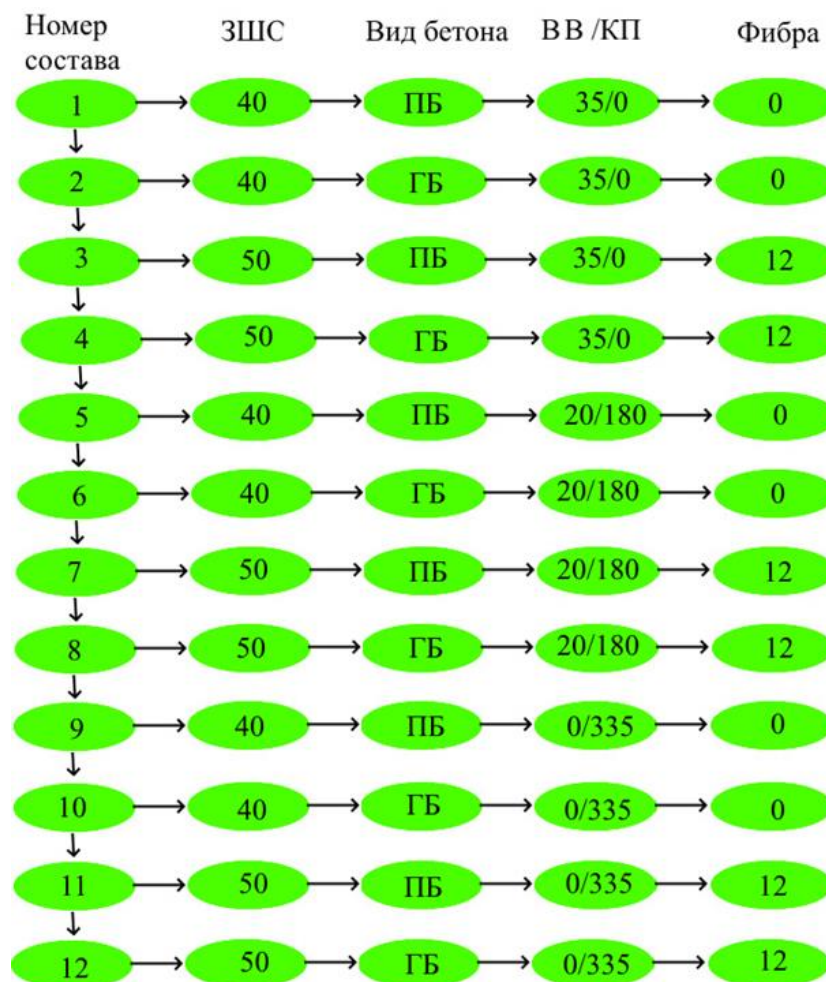


Рис. 3. L_{12} стандартный ортогональный массив

В табл. 3 приведены средние значения прочности на сжатие и пустот, включая открытую и закрытую пористости для всех составов по табл. 2, разработанных в этом исследовании.

Таблица 3. Плотность, прочность и пористость ячеистых бетонов

Номер состава	Прочность на сжатие	Плотность, кг/м ³	Общая пористость	Открытая пористость	Закрытая пористость
1	5,1	315	85,1	40,0	45,1
2	5,1	322	85,2	61,9	23,2
3	5,5	331	87,0	39,8	47,2
4	5,0	329	85,0	62,1	22,9
5	6,0	584	69,8	30,1	39,7
6	6,3	592	70,0	42,3	27,7
7	6,9	602	69,7	26,0	43,7
8	6,0	601	70,7	50,8	19,9
9	7,6	815	63,6	23,9	39,7
10	7,5	826	63,9	36,8	27,1
11	7,8	836	65,4	25,8	39,6
12	7,6	834	63,3	41,1	22,2
контр.	2,1	591	72,7	41,9	30,8

Экспериментальные результаты звукопоглощающих характеристик разработанных ячеистых бетонов полученных на установке БЖ2М приведены на рис. 4.

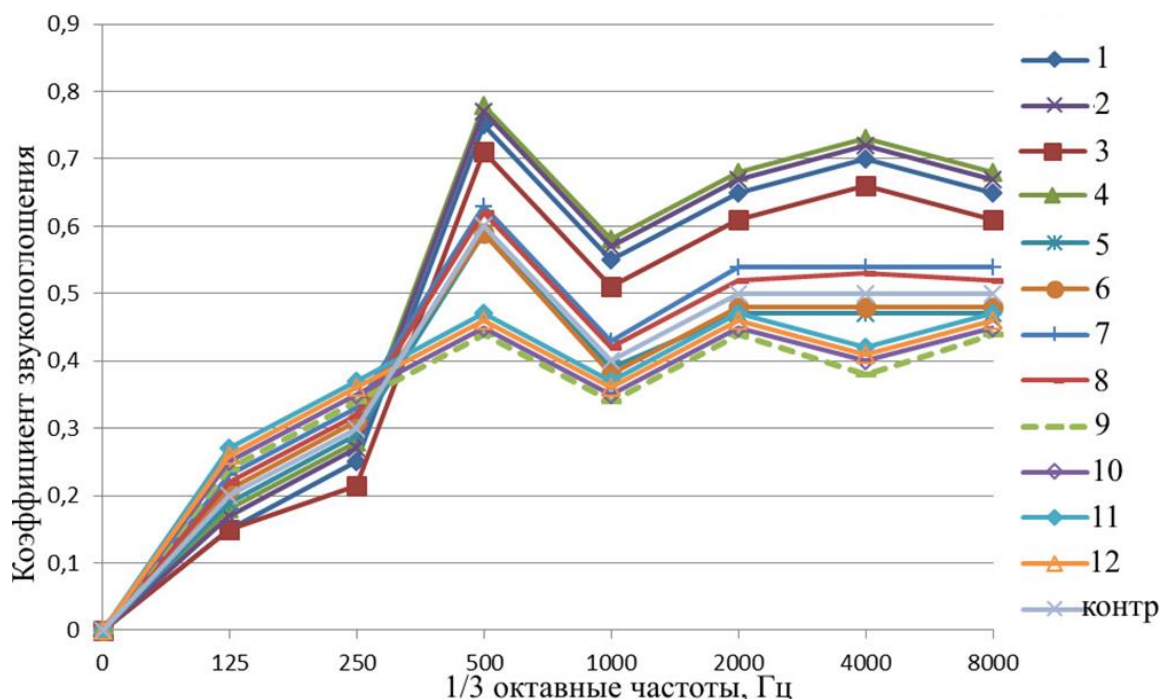


Рис. 4. Результаты коэффициентов звукопоглощения разработанных составов

Таким образом, выявлены особенности влияния состава бетонной смеси на микроструктуру композита. Наличие в системе наряду с цементом очищенных алюмосиликатов и комплекса добавок способствуют синтезу матрицы с открытой пористостью, за счет чего возрастает коэффициент звукопоглощения.

Библиографический список:

1. Федюк, Р.С. Вопросы управления структурообразованием композиционного вяжущего / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов // АЛИТИнформ. № 2 (51). 2018. С. 2-10.
2. Федюк, Р.С. Композиционные вяжущие для бетонов защитных сооружений / Р.С. Федюк, В.С. Лесовик, А.В. Мочалов, К.А. Оцоков, И.В. Лашина, Р.А. Тимохин // Инженерно-строительный журнал. 2018. №06 (82). С.208-218.
3. Федюк, Р.С. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся бетоны для защитных сооружений / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов, В.С. Лесовик, А.М. Гридчин, Х.-Б. Фишер // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 7. С. 75-85.
4. Маа, D.Y. Microperforated panel wideband absorber // Noise Control Engineering Journal 1987. №29. P. 77–84.
5. Kim, H. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete / H. Kim, J. Hong, S. Pyo // Applied Acoustics. 2018. №138. P. 171–178.
6. Kim, H.K. Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio / H.K. Kim, H.K. Lee // Journal of Sound and Vibration. 2010. № 329. P. 866–79.
7. Lu, T.J. Sound absorption of cellular metals with semiopen cells / T.J. Lu, F. Chen, D. He // Journal of Acoustic Society of America. 2000. №108(4). P. 1697–1709.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПЕНОБЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

В.В. Белов¹, д-р техн. наук, профессор

М.А. Смирнов¹, канд. техн. наук, доцент

¹*Тверской государственный технический университет*

Аннотация. В поисках стройматериала XXI века архитекторы, инвесторы и строители все чаще приходят к одному недавно успешно утвержденному решению – использованию эффективного пенобетона в строительстве, который в силу своих исключительных характеристик отвечает многосторонним требованиям строительной отрасли. Статья представляет способ использования техногенных отходов при производстве неавтоклавного пенобетона.

Ключевые слова: пенобетон, техногенные вторичные ресурсы, комплексная добавка, тонкомолотый известняк, отработанный текстильный корд.

В настоящее время во всем мире нарастает тенденция к энергосбережению. Введение в действие новых требований к повышению теплозащитных свойств ограждающих конструкции зданий и сооружений различного функционального назначения требует постоянного расширения номенклатуры теплоизоляционных материалов повышенного качества, создания новых технологий производства высокоэффективных пенобетонов. Однако большинство существующих в настоящее время технологий их производства требует применения достаточно дорогостоящих сырьевых материалов (портландцемент, молотый кварцевый песок и др.), что негативно отражается на стоимости и конкурентоспособности материала. Поэтому представляются актуальными исследования в области разработки композиционного неавтоклавного пенобетона с применением техногенных вторичных ресурсов, в том числе в качестве микронаполнителей и волокнистых добавок.

Использование техногенных вторичных ресурсов в качестве наполнителя при производстве неавтоклавного пенобетона позволяет экономить часть цемента без снижения его характеристик, а применение техногенных вторичных ресурсов в качестве дисперсного армирования улучшает структуру и эксплуатационные свойства неавтоклавного газобетона, позволяет значительно снизить деформации усадки.

Для модификации структуры и улучшения физико-механических свойств бетонов, в том числе с возможностью замены части цемента, применяют тонкомолотый известняк [1]. Это объясняется способностью тонкомолотого известняка взаимодействовать с компонентами клинкера бетона на физическом и частично химическом уровнях, образуя монолит [2, 3]. Положительное влияние карбонатных наполнителей объясняется тем, что они имеют с цементом химическое средство, что при естественном твердении ведет к образованию плотного контакта между ними и срастанию продуктов гидратации цемента с наполнителем. Важной особенностью карбонатных пород является то, что они не инертны, а вступают в активное физико-химическое взаимодействие с клинкер-

ными минералами цемента, участвуя в формировании структуры цементного камня.

Кроме того, известно, что тонкомолотый известняк способствует уменьшению водоотделения, водопотребности и расслаиваемости смеси, повышению их водоудерживающей способности, пластичности, а также улучшает водо- и морозостойкость материала [4].

Физическая и химическая совместимость наноразмерной составляющей тонкомолотого известняка с вяжущим и твердыми компонентами бетона технологически проявляется в следующих эффектах: микроармирование структуры цементного камня и бетона, появление дополнительного количества цементирующих новообразований. Положительное влияние карбонатного микронаполнителя усиливается за счет синергетического эффекта при оптимизации granulometрии зернового состава минеральной части путем реализации модели наиплотнейших упаковок частиц [5].

Таким образом, использование тонкодисперсного известнякового наполнителя из отходов дробления этой горной породы в сочетании с суперпластификатором в качестве комплексной добавки при изготовлении пенобетона может существенно улучшить технологические и эксплуатационные свойства этого материала, а также повысить его долговечность за счет формирования более качественной микроструктуры межпоровых перегородок.

Практически все пенобетоны естественного отверждения имеют низкую трещиностойкость и повышенную хрупкость, в результате чего изделия часто оказываются малопригодными с точки зрения не только монтажа, но даже транспортировки до места строительства. Основной причиной малой трещиностойкости неавтоклавных ячеистых бетонов является высокая усадка, приводящая к микротрещинам в процессе твердения, которые в дальнейшем, особенно под действием растягивающих напряжений, переходят в магистральные трещины. Наиболее эффективным способом, обеспечивающим уменьшение деформаций усадки, существенное улучшение прочностных и деформационных свойств материала, а также повышение эксплуатационной надежности изделий, является дисперсное армирование пенобетона волокнами [6].

Установлено, что введение полимерных волокон в пенобетонные смеси позволяет увеличить прочность на изгиб в 2–2,5 раза, прочность на сжатие – в 1,5 раза. Волокнистое дисперсное армирование тормозит появление и развитие трещин усадки в процессе отверждения материала [7].

В данной работе изучалось влияние комплексной добавки, включавшей тонкомолотый известняк с удельной поверхностью $310 \text{ м}^2/\text{кг}$ по ПСХ-2, суперпластификатор С-3, волокнистый компонент в виде отработанного текстильного корда, получаемого при переработке старых шин, а также ускоритель твердения, на свойства пенобетона, полученного способом «сухой минерализации» [8].

Пенобетон «сухой минерализации» получали в формах кубов с размером ребра 100 мм. Применяли следующие основные сырьевые материалы: кварцевый песок с модулем крупности 1,25; портландцемент марки ПЦ-500 Д0 и пенообразователь ПП-2000. Отдозированное количество воды (исходя из $V/T=0,64$) перемешивали в вертикальном смесителе (1000 мин^{-1}) с добавкой

0,33 % пенообразователя в течение 3 мин, затем при непрерывном перемешивании в течение 1 мин (200 мин^{-1}) в пену равномерно добавляли сухую смесь цемента, песка и комплексной добавки в соотношении 1: 0,18: 0,064 соответственно, полученную однородную формовочную смесь разливали в формы. Твердение образцов происходило при температуре 60°C в течение 3 суток.

Анализ полученных данных (табл. 1) показывает, что применение описываемой добавки при одной и той же прочности пенобетона позволяет снизить среднюю плотность материала на 100 кг/м^3 и коэффициент теплопроводности на 13,3 %.

Таблица 1. Сравнительные свойства пенобетона с комплексной добавкой и без нее

Состав пенобетона «сухой минерализации»	Средняя плотность образцов, кг/м^3	Средняя прочность при сжатии в возрасте 3 суток, МПа	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$
Без добавки	600	1,2	0,15
С добавкой	500	1,2	0,13

Введение армирующей волокнистой добавки в пенобетон в количестве 1-2 % увеличивает его предел прочности на сжатие на 20-44 % при практически постоянной плотности по сравнению с пенобетоном без волокнистой добавки, а также предотвращает осаждение вспененной смеси, сохраняя газовые пузырьки в объеме бетона. Если содержание волокон из отработанного текстильного корда меньше 1 %, положительный эффект становится небольшим. Когда концентрация волокнистой добавки составляет более 2 %, структура пенобетона характеризуется наличием большого количества крупных пор, снижается прочность бетона.

Ячеистые бетоны относятся к трехфазным дисперсным системам. В таких системах устойчивость и связность обеспечиваются при равновесии капиллярного и расклинивающего давлений пленочной воды в зонах капиллярных менисков, а также силами поверхностного натяжения [9]. Наиболее существенным фактором, обеспечивающим повышение прочности ячеистого бетона при заданной плотности, является «бронирование» воздушных ячеек цементными частицами [8]. Указанное «бронирование» по своей сути является проявлением процессов капиллярного структурообразования, сходных с глобулированием в сырьевых смесях строительных материалов [9] при условии своеобразной инверсии – замены крупных зерен заполнителя на воздушные (в пенобетонах) или газовые (в газобетонах) ячейки.

С учетом этого признаком оптимальной структуры ячеистого бетона может являться максимум коэффициента эффективности (в МПа), определяемого по формуле:

$$K_{\text{эфф}} = R_{\text{сж}} / (\rho_0)^2 \quad (1)$$

где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие, МПа; ρ_0 – средняя плотность ячеистого бетона в сухом состоянии (в безразмерном выражении по отношению к плотности воды).

На основе применения планированных экспериментов и оптимизации полученных математических моделей, выражающих зависимости средней плот-

ности, предела прочности на сжатие и коэффициента эффективности от факторов состава был подобран состав пенобетона, отвечающий требованиям, предъявляемым ГОСТ 25485 к конструкционно-теплоизоляционному неавтоклавному бетону марки по средней плотности D500 и класса по прочности на сжатие В1.

Использование техногенных отходов в производстве неавтоклавного пенобетона, таких как отходы дробления известняка в качестве тонкодисперсного наполнителя и отработанный текстильный корд в качестве дисперсного армирования, улучшает структуру и эксплуатационные свойства неавтоклавного пенобетона, позволяет значительно снизить деформации усадки этого материала.

Кроме того, использование техногенных вторичных ресурсов в составе неавтоклавного пенобетона будет способствовать экономии энергетических и сырьевых ресурсов, а также капитальных вложений без снижения качества материала. При этом решаются экологические проблемы региона, расширяется сырьевая база для производства строительных материалов, снижается себестоимость производимой продукции.

Библиографический список:

1. Хозин В.Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков // Технологии бетонов, 2009. № 11-12. С. 25.
2. El Shamy U, Denissen C. Microscale energy dissipation mechanisms in cyclically-loaded granular soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 2012; 30(2):343–361.
3. Г. Де Шуттер. Влияние известнякового наполнителя как минеральной добавки в самоуплотняющийся бетон / Belgium Magnel laboratory of concrete re-search / 36 Conference on Our World in concrete & Structures, Singapore. 14-16/08/2011.
4. Зинов И.А. Высокопрочный бетон с добавкой микрокремнезема // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1990. № 4. С. 55.
5. Moser B; Pfeifer C: Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.
6. Моргун Л.В. Эффективность применения фибропенобетона в современном строительстве // Строительные материалы. № 3. 2002. С. 16-17.
7. Моргун Л.В., Моргун В.Н. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей // Строительные материалы. № 1. 2003. С. 33.
8. Меркин А.П. Ячеистые бетоны научные и практические предпосылки дальнейшего развития // Строительные материалы. 1995. № 2. С. 11-15.
9. Белов В.В. Капиллярная аутогезия в трехфазных сырьевых смесях. В сборнике: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва, 2019. С. 58-68.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕСКА РЕКИ ДА БАК (ВЬЕТНАМ) ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОБЕТОНА

Ву Ким Зиен¹, аспирант

Баженова С.И.¹, канд. техн. наук, доцент

Танг Ван Лам², канд. техн. наук

Нгуен Конг Ли³, канд. техн. наук

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Ханойский горно-геологический университет, Вьетнам

³Колледж промышленности и строительства, Вьетнам

Аннотация. В статье представлено использование песка реки Вьетнам Да Бак для производства пенобетона с плотностью $<1000 \text{ кг/м}^3$ и прочность на сжатие $3 \div 4 \text{ МПа}$ через 28 дней. В работе использован экспериментальный метод получения данных и метод регрессионного анализа для их обработки найти оптимальный состав. Кроме того, прочность бетонов на сжатие в возрасте 28 дней определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012.

В результате получены максимальные значения прочности на сжатие пенобетона в возрасте 28 дней, определенные с помощью компьютерной программы в уравнении регрессии второго порядка, составляет $X_1^{\text{opt}} = -1,000$ и $X_2^{\text{opt}} = -0,125$, $R_{\text{сж}} = 3,775 \text{ МПа}$.

Ключевые слова. пенобетон, песка, река Да Бак, прочность на сжатие.

Введение. Во Вьетнаме, используется в строительстве в основном керамический кирпич, но производство керамического кирпича ведет к активному загрязнению окружающую среду и затрате большего количества ресурсов [1]. Поэтому, правительство Вьетнама вынесло решение 567/QĐ-ТТg 28/4/2010, чтобы к 2020 году при возведении зданий кирпич из легкого бетона с плотностью $<1000 \text{ кг/м}^3$ заменил $30 \div 40\%$ керамического кирпича, а в будущем вообще не использовать данный тип кирпича при возведении зданий [2]. По данным исследования [1, 3] для возведения не несущих стен прочность на сжатие у кирпича должна быть $3 \div 4 \text{ МПа}$.

По данным [4] река Да Бак во Вьетнаме имеет большой запас песка, около 700 млн. м^3 , а пески данной реки используются в рецептурах тяжелого бетона и строительного раствора, но исследований по применению данного песка в технологии пенобетона нет.

Преимуществом пенобетона, считается надежность его работы в конструкциях и сооружениях, которая непосредственно зависит от его свойств, важнейшим из которых является прочность на сжатие [5-6].

Поэтому целью настоящего исследования обосновать использование речного песка Да Бак в качестве мелкого заполнителя в пенобетоне с плотностью $<1000 \text{ кг/м}^3$ и прочностью на сжатие $3 \div 4 \text{ МПа}$.

1. Исследовательские программы

1.1. Материалы:

- песок (П) реки Да Бак (Вьетнам) с модулем крупности $M_K = 3,0$ истинной плотностью $2,64 \text{ г/см}^3$, зерновой состав песка приведены в табл. 1;

Размер отверстия, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
Полный остаток, %	0	0	0,83	15,06	88,26	94,54

- портландцемент (Ц) ЦЕМ I 42,5 Н производства завода «Там Диеп» (Вьетнам). Результаты испытаний его свойств приведены в табл. 2;

Таблица. 2. Свойства цемента

Свойств	ЦЕМ I 42,5 Н «Там Диеп» (Вьетнам).
Истинная плотность, г/см ³	3,11
Нормальная густота, %	29,4
Сроки схватывания (начала отверждения), мин	115
Сроки схватывания (конец отверждения), мин	226
Прочность на сжатие в возрасте 28 дней, МПа	48,24

- пенообразователь (ПЕ) производства завода «EABASSOC» (Англия) с истинной плотностью 1,02 г/см³.

- Водопроводная вода в качестве воды затворения для получения бетонной смеси.

1.2. Методы:

- прочность на сжатие пенобетона проводили через 28 дней с использованием образцов-кубов размером 150×150×150 мм в соответствии с российским стандартом ГОСТ 10180-2012.

- влияние соотношения ($\frac{В}{Ц}$) и количества пенообразователя (ПЕ) на прочность

при сжатии пенобетона с помощью метода рототабельного центрального композиционного планирования для двух факторов.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Определить соотношение воды и цемента

Из результатов исследования, авторы обнаружили связь между отношением В/Ц и прочностью на сжатие. Результат показан на рисунке 1

На рис. 1 показано, что для оптимизации состава пенобетона использовали метод математического планирования эксперимента выбрав соотношение В/Ц от 0,5 до 0,56.

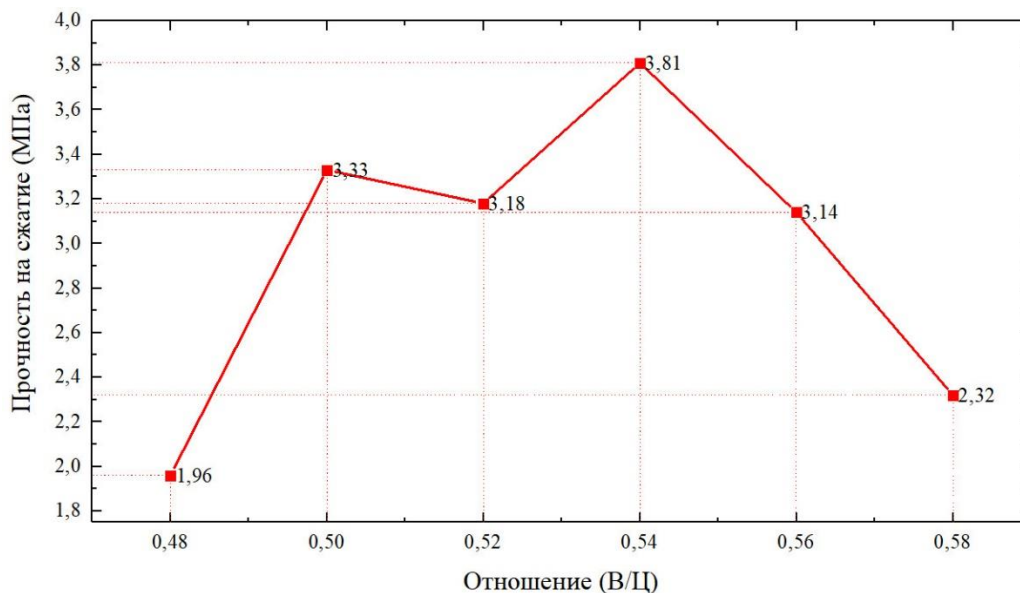


Рис. 1. Соотношение между соотношением В/Ц и прочностью на сжатие в возрасте 28 дней

2.2. Определить расход пенообразователя

Авторы провели эксперимент по определению расхода пенообразователя (рис.2)

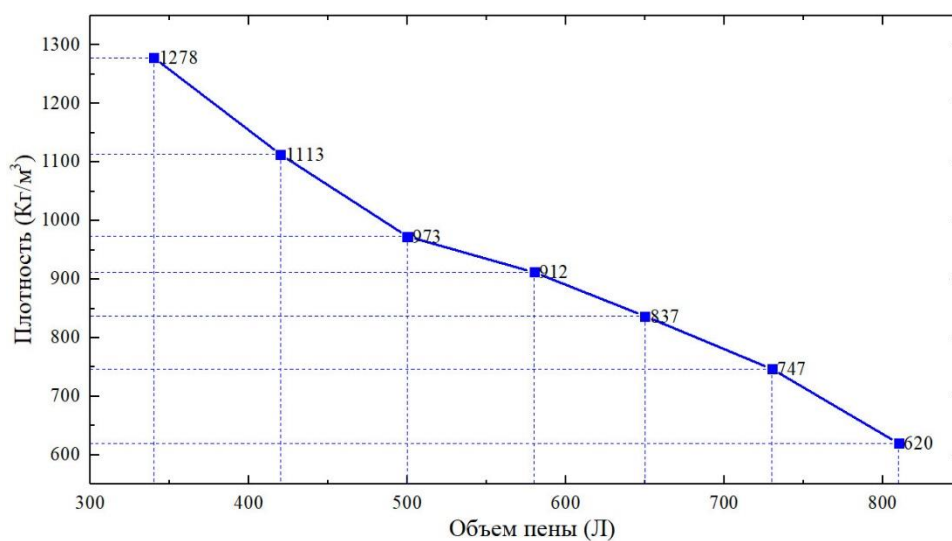


Рис. 2. Соотношение между плотностью и количеством пенообразователя

На рис. 2 ясно видно, что при плотности образцов $800 \div 900 \text{ кг/м}^3$ пенообразователя необходимо от 570 до 670 л.

2.3. Подбор оптимального состава пенобетона

В виде входных факторов были выбраны:

X_1 - отношение $\frac{В}{Ц}$ в пределах от 0,50 до 0,56;

X_2 - отношение ПЕ в пределах от 570 до 670 л;

Согласно [7], масса портландцемента фиксируется как $\rho = 365 \text{ кг/м}^3$ для всех пенобетонных смесей. Кроме того, по данным [1] лучше всего соотношение песок/цемент = 1. Составы пенобетонных смесей и прочность на сжатие в возрасте 28 дней, рассчитанные с использованием метода математического планирования второго порядка, представлены в табл. 3

Таблица 3. Состав и свойства пенобетона

п/п	В натуральном виде		В качестве пенобетонных		Составы образцов пенобетона, кг/м ³				Прочность на сжатие в возрасте 28 дней МПа
	$\frac{B}{\rho}$	ПЕ	X ₁	X ₂	Ц	П	В	ПЕ (Л)	
1	0,56	670	+1	+1	365	365	212	670	2,74
2	0,50	670	-1	+1	365	365	175	670	3,61
3	0,56	570	+1	-1	365	365	212	570	3,45
4	0,50	570	-1	-1	365	365	175	570	3,57
5	0,572	620	+1,414	0	365	365	219	620	3,52
6	0,488	620	-1,414	0	365	365	167	620	3,74
7	0,53	690,7	0	+1,414	365	365	193	690,7	2,63
8	0,53	549,3	0	-1,414	365	365	193	549,3	3,59
9	0,53	620	0	0	365	365	193	620	3,77
10	0,53	620	0	0	365	365	193	620	3,52
11	0,53	620	0	0	365	365	193	620	3,63
12	0,53	620	0	0	365	365	193	620	3,66
13	0,53	620	0	0	365	365	193	620	3,44

По результатам расчетов получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 3,604 - 0,163x_1 - 0,253x_2 - 0,188x_1x_2 - 0,003x_1^2 - 0,257x_2^2 \quad (1)$$

Для уравнения регрессии (1), критическое значение критерия Стьюдента ($t_Q, (n)$) находили по табл 3.2 Процентные точки распределения Стьюдента [8] в зависимости от значений:

- уровень значимости $Q = 0,05$.
- степени свободы числителя $n = m - 1 = 5 - 1 = 4$;
- $\Rightarrow t_{0,025}(4) = 2,7764$

Регрессии уравнения были определены по формуле:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}} \quad (2)$$

Дисперсии оценка коэффициентов регрессии уравнения S_{bj} были определены по формуле:

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{\sum_{i=1}^N X_{ji}^2}}, \quad (3)$$

Значения критерия Стьюдента для проверки приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения критерия Стьюдента для проверки уравнения регрессии (1)

j	0	1	3	4	5	6
b_j	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
	3,604	-0,163	-0,253	-0,188	0,003	-0,257
$ b_j $	3,604	0,163	0,253	0,188	0,003	0,257
S_{b_j}	0,057	0,045	0,045	0,064	0,048	0,048
t_{b_j}	63,063	-3,600	-5,609	-2,935	0,071	-5,291

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались, таким образом, получили уравнение:

$$Y = 3,604 - 0,163x_1 - 0,253x_2 - 0,188x_1x_2 - 0,257x_2^2 \quad (4)$$

Используя компьютерную программу, были получены изображения поверхности выражения целевой функции для уравнений регрессии (4) они представлены на рисунке 3

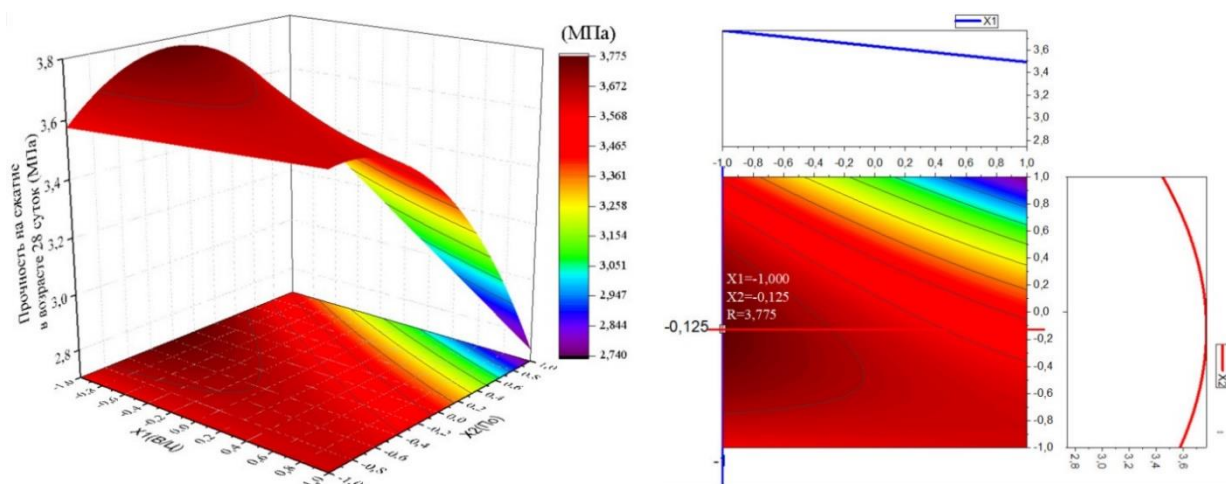


Рис. 3. Уравнение поверхности второго порядка (4)

Таким образом, из рисунка 4 получить наиболее оптимальное значение: $X_1^{опт} = -1,000$ и $X_2^{опт} = -0,125$, $R_{сж} = 3,775$ МПа.

$$\Rightarrow \frac{B}{Ц} = \left(\frac{B}{Ц}\right)_0 + 0,03 * X_1^{опт} = 0,53 - 0,02 * 1 = 0,51;$$

$$ПЕ = (ПЕ)_0 + 50 * X_2^{опт} = 620 - 50 * 0,125 = 613,75 \text{ (л)}$$

Таким образом, при изготовлении пенобетона плотностью $800 \div 900 \text{ кг/м}^3$ следует выбирать; $Ц = 365 \text{ (кг)}$; $П = 365 \text{ (кг)}$; $В = 186,15 \text{ (л)}$; $ПЕ = 613,75 \text{ (л)}$

3. Выводы. На основании результатов планирования эксперимента второго порядка можно сделать следующие выводы:

1) Полученное уравнение регрессии (4) адекватно описывает зависимость прочности на сжатие пенобетона в возрасте 28 дней нормального твердения от соотношений сырья $X_1 \left(\frac{B}{Ц}\right)$ и X_2 (ПЕ).

2) Используя компьютерную программу, мы определили максимальное значение целевой функции - прочность на сжатие пенобетона при 28 днях нормального твердения в уравнении регрессии второго порядка (2) в зависимости от факторов ввода - соотношения сырья в пене бетонная смесь: $X_1^{opt} = -1,000$ и $X_2^{opt} = -0,125$, $R_{сж} = 3,775$ МПа.

3) Полученный вид пенобетона может служить для изготовления пенобетонных блоков для несущих стеновых конструкций.

Библиографический список:

1. Nguyen Van Chanh. Use of cheap building material from lightweight panels of foam concrete in low-income housing case study on sustainable material for viet nam. Ho Chi Minh City University of Technology. 2012. 9p
2. Quyết định 567/QĐ-TTg. Phê duyệt quy hoạch tổng thể phát triển vật liệu xây dựng việt nam đến năm 2020. Hà Nội, 28/04/2010, 16tr. (Решение №567/QĐ-TTg. Утверждение генерального плана развития строительных материалов во Вьетнаме к 2020 году, Ханой, 28/04/2010, 16с).
3. TCVN 1450:2009. Пустотелые глиняные кирпичи. Строительные стандарты Вьетнама. Изд. Строительство. Ханой, 2009, 9 с.
4. <http://www.xaydung.gov.vn/web/guest/trang-chi-tiet/-/tin-chi-tiet/Z2jG/86/624327/tiem-nang-cua-nganh-vat-lieu-xay-dung-phuc-vu-xay-dung-bien-dao.html>
5. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона // Изд. АСВ. М., 2006, 335 с.
6. Рапопорт П. Б., Рапопорт Н. В., Кочетков А. В., Васильев Ю. Э., Каменев В. В. Проблемы долговечности цементных бетонов // Строительные материалы. 2011. №5. С. 38-41.
7. Х. Шугуан, В. Ф. Чжоу. Легкие бетоны. Изд. АСВ. М., 2016. 304 с.
8. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Изд. Наука. 1983, 416 с.

АНАЛИЗ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ОРЕНБУРЖЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩЕГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

В.А. Гурьева¹, д-р техн. наук, доцент

А.А. Ильина¹, аспирант

А.Д. Мажирин¹, студент

А.С. Жданова¹, студент

¹*Оренбургский государственный университет*

Аннотация. Разработка ресурсосберегающих технологий, как на общероссийском, так и на местном уровне является актуальной проблемой. Нахождение способов утилизации отвальных шлаков позволяет вовлечь в хозяйственный оборот уже переработанные материалы, освободить занимаемые площади и при этом получить востребованные строительные материалы с минимальными затратами. В данной статье представлена аналитическая информация наиболее перспективных месторождений глин Оренбургской области с целью их использования для производства кирпича с добавлением шлаков цветной металлургии. Исследован химический и минералогический состав глин, медьсодержащих шлаков Медногорского медно-серного комбината и никелевых шлаков комбината «Южуралникель». Приведены результаты определения дообжиговых и обжиговых свойств красной и белой глин Тюльганского месторождения и глины Халиловского месторождения.

Ключевые слова: легкоплавкие глины, ресурсосберегающие технологии, шлаки цветной металлургии, керамический кирпич, отощающие добавки.

Оренбургская область обладает значительной по величине минерально-сырьевой базой и промышленным потенциалом, что является следствием её территориального расположения и уникальных особенностей геологического строения. Обратной стороной такого богатства является скопление техногенных отходов, которые производят горнодобывающие и перерабатывающие предприятия, например, такие как Гайский горно-обогатительный и Медногорский медно-серный комбинаты, горно-обогатительное предприятие «Ормет», комбинат «Южуралникель» и др. заводы по обработке цветных металлов. Оперативной утилизации подвергается только малая часть техногенных отходов этих предприятий (около 10-15 %). При этом речь идет о недавно образовавшихся отходах. В тоже время отходы, образовавшиеся 10 и более лет назад, до сих пор находятся в отвалах и не начали перерабатываться [1]. В свою очередь, их вторичное применение является потенциальной серьезной базой сырья для строительной промышленности [1-3].

С другой стороны, на территории Оренбургской области находятся более 50 месторождений глин, пригодных по данным геологоразведки «ООО Оренбурггеология» для использования в производстве керамических изделий. Однако на территории области практически не осталось заводов по производству керамического кирпича. Это связано с тем, что оборудование предприятий устарело и не обеспечивает качественной подготовки и переработки местного глинистого сырья продукции в соответствии с ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камни керамические».

Одним из путей решения данных вопросов является утилизация отходов цветной металлургии в производство строительных материалов, что позволяет решить одновременно несколько проблем:

- развить технологию производства изделий строительной керамики и модернизировать оборудование технологических линий,
- снизить стоимость в результате сокращения потребности в первичной разработке недр и добыче минерально-сырьевых ресурсов – глин, которые еще до настоящего времени остаются главной составляющей сырьевых шихт.

Для проведения исследования были выбраны 2 месторождения глин и 2 предприятия, работа которых связана с производством большого количества побочных продуктов в виде шлаков: Медногорский медно-серный комбинат (Рисунок 1а) и комбинат «Южуралникель» (Рисунок 1б). Из анализа литературных источников [2-4] известно, что отходы цветной металлургии перспективны для применения их в производстве керамических изделий в качестве модифицирующих добавок.



Рис. 1. Образец: а) медьсодержащего шлака Медногорского медно-серного комбината; б) никелевого шлака комбината «Южуралникель»

Отвальные медеплавильные и никелевые шлаки обладают аналогичными характеристиками: черным цветом, высокими показателями физико-механических свойств, по содержанию Al_2O_3 в химическом составе относятся к группе кислого сырья, водопоглощение составляет 0,1–0,6 %. Согласно особенностям технологии производства, никелевые шлаки подвергаются грануляции, поэтому около 70 % частиц имеют размер от 0,25 до 2 мм. Медьсодержащий шлак, после извлечения меди, сливается в изложницы и охлаждается водой, поэтому получают более плотные литые куски с размером отдельных гранул от 5 до 10 см [2-5].

Одной из проблем, связанной с использованием никелевых и медьсодержащих шлаков при производстве керамического кирпича, является их измельчение. Размер зерен побочных продуктов, используемых в качестве компонента шихты, должен быть мнение 0,25 мм [3].

Первое месторождение глин – Тюльганское. Оно представлено красножгущимися глинистыми породами (Рисунок 2а) с прослойками беложгущихся глин (Рисунок 2б). Второе месторождение – Халиловское, характеризуется достаточно мощным слоем вскрыши, представленной глинистыми породами (Рисунок 2в), пригодными для производства керамического кирпича. Выбор данных месторождений связан с их территориальной близостью к залежам

шлака, что в дальнейшем позволит значительно снизить транспортные расходы, связанные с доставкой сырья.



Рис. 2. Образец: а) красной глины Тюльганского месторождения; б) белой глины Тюльганского месторождения; в) глины Халиловского месторождения

На начальном этапе исследований определён химический состав глин и шлаков на базе института геологии Уфимского научного центра Российской академии наук и проанализирована возможность для их применения в керамике.

Химический состав красной глины Тюльганского месторождения (далее КГТ), %: SiO_2 -56,99, Al_2O_3 -12,99, CaO -7,13, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ -5,35, MgO -2,48, K_2O -1,82, Na_2O -0,95, ППП -12,2.

Химический состав белой глины Тюльганского месторождения (далее БГТ), %: SiO_2 -76,31, Al_2O_3 -12,9, TiO_2 -1,24, CaO -0,46, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ -2,45, MgO -0,79, K_2O -0,46, Na_2O -0,15, ППП -5,47.

Химический состав глины Халиловского месторождения (далее ХГ), %: SiO_2 -49,5, Al_2O_3 -20,79, TiO_2 -1,07, CaO -2,71, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ -7,04, MgO -2,75, K_2O -1,74, Na_2O -0,53, ППП -13,84.

Все три глины по содержанию Al_2O_3 относятся к группе кислого глинистого сырья, количественное содержание глинозема позволяет отнести глины к легкоплавким. Содержание оксидов железа в КГТ и ХГ составляет более 3 %, что соответствует сырью с высоким содержанием красящих оксидов. Значительное содержание в глинах кварца (КГТ - 56,99 %, БГТ - 76,31 %, ХГ - 49,5 %) позволяет судить о степени запесоченности и разной пластичности. Высокое содержание CaO в количестве 7,13 % указывает на присутствие в глине КГТ известняка, а практически одинаковое количество CaO -2,71% и MgO -2,75% - на наличие в глине ХГ доломита. Повышенное содержание карбонатных включений характерно для легкоплавких глин и оказывает негативное влияние на формирование керамического черепка [6,8]: газовыделение при разрушении карбонатных пород приводит к поризации черепка, а освободившиеся CaO и MgO , выступая плавнями 2-го порядка, будут сокращать рабочий интервал спекания кирпича, вызывая оплавление и деформации.

Химический состав медьсодержащих шлаков Медногорского медносерного комбината, %: SiO_2 -30,1, Al_2O_3 -8,41, CaO -2,36, FeO -12,3, MgO -10,1, K_2O -0,25, Na_2O -0,21, ППП -5,1.

Химический состав никелевых шлаков комбината «Южуралникель», %: SiO₂ -48,79, Al₂O₃-5,9, CaO-18,36, Fe₂O₃общ-11,28, MgO-13,15, K₂O-0,25, Na₂O-0,21%, ППП-1,96.

Опытные шлаки по содержанию глинозема и оксидов железа позволяют отнести их к легкоплавкому сырью. Однако высокое содержание MgO, %: 10,1 и 13,1 обеспечивает тугоплавкость продуктов, что позволит расширить интервал спекания легкоплавкого компонента кирпича и производство изделия заданных размеров без признаков пережога. Также в опытных видах шлаков отсутствуют соединения соляной, фтористой, азотной или других кислот, выделяющих вредные газы при нагревании. По рекомендациям [9, 10] данный шлак может быть использован в качестве добавки в шихту с дальнейшим обжигом изделия.

Определение минерального состава глинистых пород осуществлялось методом рентгеновской дифрактометрии. После для оценки технологических свойств глинистого сырья изучены дообжиговые и обжиговые свойства глин» (Таблица 1, 2). в соответствии с требованиями ГОСТ 7025-91 «Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости», ГОСТ Р 57349-2016 «Кирпич и блоки. Метод определения прочности на сжатие».

Таблица 1. Дообжиговые свойства глинистого сырья

Наименование сырья	Абсолютная формовочная влажность, %	Относительная формовочная влажность, %	Пластичность	Коэффициент чувствительности к сушке	Воздушная линейная усадка, %	Воздушная объемная усадка, %
Красная глина Тюльганского месторождения	16,93	14,46	П=13 умереннопластичная	1,2 среднечувствительная глина	8,5	19,28
Белая глина Тюльганского месторождения	16,6	14,2	П=21 среднепластичная	0,54 малочувствительная глина	6,5	15,36
Глина Халиловского месторождения	6,6	6,25	П=27 высокопластичная	0,23 малочувствительная глина	8,5	6,31

Согласно данным таблицы 2 плотность после обжига всех глин составляет 1,6 - 1,9 г/см³, что соответствует плотности керамического кирпича после обжига. Однако водопоглощение обожженной КГТ (17,25%) превышает технологический интервал 12-14%, принятый в производстве изделий стеновой кера-

мики, а водопоглощение БГТ (11,9%), и ХГ (9,5%) ниже технологического интервала.

Таблица 2. Обжиговые свойства глинистого сырья

Наименование сырья	Общая линейная усадка, %	Линейная Огневая усадка, %	Общая объемная усадка, %	Объемная огневая усадка, %	Плотность черепка, г/см ³	Водопоглощение, %	Прочность на сжатие, МПа
Красная глина Тюльганского месторождения	10,25	1,75	19,28	2,78	1,63	17,2	19
Белая глина Тюльганского месторождения	7,1	0,6	15,36	1,09	1,82	11,9	15,7
Глина Халиловского месторождения	15,85	7,35	6,28	10,52	1,73	9,5	17,5

Выбранные шлаки планируется вводить в шихту для регулирования свойств глины, процессов фазо- и структурообразования.

Дальнейшая разработка технологических принципов ресурсосберегающей технологии производства керамического кирпича с добавлением медьсодержащих и никелевых шлаков несет в себе экономический эффект и позволит: уменьшить экологический ущерб, снизить потребности в разработке недр и добычи первичных минерально-сырьевых ресурсах. С другой стороны, необходимо будет решать ряд технологических вопросов, связанных с подготовкой шлака для производства керамических материалов и модернизацией технологических линий существующих заводов.

Библиографический список:

1. Турчанинов, В.И. Строительные материалы из техногенного сырья: учебное пособие / В.И.Турчанинов, Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. - 207 с.
2. Боженков, П.И. Строительная керамика из побочных продуктов промышленности / П.И. Боженков, И.В. Глибина, Б.А. Григорьев– М., Стройиздат, 1986. –136 с.
3. Боженков, П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология / П.И. Боженков. – М., Изд-во АСВ, 1994. – 264 с.
4. Хорошавин, Л.Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов: [учеб. пособие] / Л. Б. Хорошавин, В. А. Беляков, Е. А. Свалов; [науч. ред. А. С. Носков] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.
5. Каушанский В.Е., Боженков О.Ю., Трубицын А.С. Влияние термообработки шлаковой составляющей портландцемента на его активность // Цемент. - 2001.-№3. – С.25-26.

6. Кашкаев И.С., Шейнман И.Ш. Производство глиняного кирпича. 3-е изд., перераб. и доп. М., Высшая школа, 1978 г., 248 с., ил.
7. Веселовский, А.А. Переработка отвальных никелевых шлаков с целью извлечения никеля и железа // Сталь. 2016. № 11. С. 69–71.
8. Гурьева, В.А. Эколого-экономический эффект применения нефтешламов при производстве керамического кирпича/В.В. Дубинецкий, Н.В. Бутримова, А.В. Дорошин, К.М. Вдовин // Международный научно-исследовательский журнал. - 2016. - №11 - С. 50-52.
9. Абдрахимов, В. З. Экологические, теоретические и технологические принципы использования фосфорного шлака и зоошлакового материала в производстве высокомарочного керамического кирпича: монография. Известия вузов. Строительство. - Новосибирск: НГАСУ. – 2008. - № 8 (596). – С.20-24.
10. Большаков, В.И. Металлургические шлаки в строительстве / В.И. Большаков, В.З. Борисовский, В.Д. Глуховский, П.В. Кривенко, А.П. Никифоров, С.А. Щербак (Днепропетровск, 1999). –114 с.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧНОГО АКТИВАТОРА

С.-А.Ю. Муртазаев^{1,2}, д-р техн. наук, профессор

М.Ш. Саламанова^{1,2}, канд. техн. наук, доцент

Д.К.-С. Батаев², д-р техн. наук, профессор

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщиков

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук

Аннотация. Разработка рецептур бесклинкерных вяжущих связок щелочной активации на основе тонкодисперсных порошков природного алюмосиликатного происхождения позволит получать новые эффективные строительные композиты. В работе раскрываются вопросы, связанные с теоретическими основами формирования структуры и прочности цементного камня на основе щелочного активатора. Результаты исследований, на наш взгляд, безусловно представляют практическую значимость для строительной отрасли, так как предлагаемые рецептуры бесклинкерных цементов способны заменить дорогой и энергоемкий портландцемент, позволяя создавать прочные и долговечные бетонные и железобетонные конструкции.

Результаты, представленные в настоящей статье, получены в рамках исследований по реализации научного проекта № 05. 607.21.0320. "Разработка технологии новых строительных композитов на бесклинкерных вяжущих щелочной активации с использованием некондиционного природного и вторичного сырья" получившего поддержку Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Уникальный идентификатор соглашения RFMTFI60719X0320.

Ключевые слова: опока, вулканический туф, жидкое стекло, бесклинкерные вяжущие, щелочные металлы, дисперсность, цементные композиции, термоактивация

Современная цементная индустрия из года в год сталкивается с многочисленными проблемами, связанными с уменьшением объемов природно-сырьевого ресурса и удорожанием энергоносителя, и нуждается в поиске новых прогрессивных технологий, менее ресурсо- и энергоемких, не требующих высокотемпературной обработки и сложных технологических процессов изготовления [1-5]. Поэтому пристальное внимание многих отечественных и зарубежных исследователей нацелено на разработку бесклинкерных вяжущих систем щелочного затворения типа $Me_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ и $Me_2O - MeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ в надежде, что в будущем эти цементные связки станут альтернативой дорогому портландцементу. К тому же вяжущие щелочного затворения вряд ли можно назвать новым продуктом – это скорее хорошо забытое старое, широко применяемое в мире с начала 19-го века [6-12].

Истоки появления этого вяжущего начинаются в Европе, Эмиль Лангин в 1862 году изобрел шлакощелочной цемент, и полученный материал хорошо себя зарекомендовал и занял свою нишу на строительном рынке. Шлакощелочной цемент повсеместно широко применялся по всей Европе, и конкурировал с портландцементом, именно он использовался при строительстве метрополитена в Париже, Германии, в то же время началось промышленное применение и в США. Еще в начале двадцатого столетия был принят Европейский стандарт шлакощелочного цемента [13].

Небольшая историческая справка свидетельствует о перспективности щелочного цемента, ведь и в настоящее время он нашел свое применение во всем мире, такие страны как Великобритания, Япония, Сингапур, Нидерланды являются лидерами по производству этого вяжущего, к тому же производители преследуют в приоритете сокращение негативных воздействий на окружающую среду обитания, тем самым решая проблему с энергозатратным высокотемпературным обжигом и ликвидацией выбросов углекислоты в атмосферу [14-16]. А если учитывать, что технические показатели шлакощелочного цемента уникальны в сравнении с портландцементом: высокие прочностные характеристики, химическая стойкость, хорошая удобоукладываемость, сопротивляемость действию хлоридов, пониженная экзотермия, короткие сроки схватывания; то все это в целом и определит область их применения в строительстве [17].

В России, несмотря на большой положительный промышленный опыт применения этой технологии в эпоху СССР, в настоящее время массовое производство щелочных цементов идет на спад, что связано с отсутствием достаточной нормативной базы, ограниченностью и нестабильностью сырьевой базы, дефицит щелочных растворов и плохая информативность продукции.

Но по-прежнему ведутся научные разработки [16-19] и реализуется практическое внедрение, поэтому и в настоящее время производство бесклинкерных вяжущих щелочной активации и бетонов на их основе продолжает являться более чем актуальным. Ведь отходов черной металлургии в виде доменных гранулированных шлаков насчитывается миллионы тонн (рисунок 1), отходы химической промышленности от производства глинозема, сульфид натрия, капролактама по существу не используются, к тому же присутствует весома проблема их уничтожения, все это должно способствовать развитию бесклинкерной технологии и снижению затрат на получение вяжущих на 50%. А если учитывать и тот факт, что для приготовления щелочных бетонов возможно использование мелкого и крупного заполнителя без ограничений по содержанию глинистых и пылевидных фракций, так как эти частицы вступают с химическое взаимодействие с соединениями щелочных металлов, образуя гидроалюмосиликаты натрия, то расходы на получение строительных композитов существенно уменьшатся, не в ущерб прочностным показателям.

Приведенные доводы подтверждают, что бесклинкерная технология щелочных вяжущих является перспективной и довольно эффективной, но в нашей стране есть много регионов, в которых промышленные отходы металлургических предприятий являются дефицитным сырьем и экономически невыгодно их использование из-за транспортных расходов. При этом необходимо предусматривать альтернативу доменным шлакам, которые характеризуются алюмосиликатным составом с нестабильным минеральным и химическим составом из-за изменений в составе топлива, технологического процесса выплавки и складирования и т.д.



Условные обозначения:

- передельная металлургия
- металлургия полного цикла
- доменная металлургия
- бездоменная металлургия

Рис. 1. Сырьевая база России для производства шлакощелочных цементов

Исследование и разработка природных и техногенных источников алюмосиликатной природы позволят повысить эффективность бесклинкерных строительных композитов, путем снижения себестоимости и улучшения физико-механических свойств конечного продукта, а также расширения сырьевой базы бесклинкерной технологии.

Для получения бесклинкерных вяжущих щелочной активации исследовались горные породы осадочного и магматического происхождения: опока (окремненный мергель) Веденского месторождения и вулканический туф из Кабардино-Балкарской Республики. Энергодисперсионный микроанализ исследуемых порошков, проведенный с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200 i, показал существенное различие в химическом составе минеральных добавок:

– вулканический туф, %: $MgO = 0,20$; $Al_2O_3 = 13,57$; $SiO_2 = 73,67$; $K_2O = 6,00$; $CaO = 1,79$; $Fe_2O_3 = 1,52$; $TiO_2 = 2,85$; ппп = 0,40.

– опока: $MgO = 1,10$; $Al_2O_3 = 5,47$; $SiO_2 = 28,7$; $Na_2O = 1,09$; $CaO = 61,53$; $Fe_2O_3 = 2,12$.

Для приготовления тонкодисперсных порошков из исследуемых горных пород, крупнокусковые предварительно измельчали в щековой дробилке, а затем подвергали тонкому измельчению в лабораторной роликовой мельнице. Опока исследовалась в двух видах, до термообработки в естественном виде, и после термоактивации при температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$, оксидный состав % по массе:

– опока термообработанная при температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$: $CO_2 = 31,49$; $MgO = 0,41$; $Al_2O_3 = 2,20$; $SiO_2 = 28,53$; $Na_2O = 0,58$; $CaO = 35,92$; $Fe_2O_3 = 0,86$.

Удельная поверхность полученных порошков при продолжительности измельчения 20 минут составила:

– $S_{уд} = 520\text{ м}^2/\text{кг}$ опока;

– $S_{уд} = 470\text{ м}^2/\text{кг}$ вулканический туф.

Для исследования структуры многокомпонентных вяжущих систем «термоактивированная опока – вулканический туф – щелочной раствор» приготавливались цементные композиции из 80% опоки, 20 % вулканического туфа и водного раствора жидкого натриевого стекла (силикатный модуль 2,8, плотность $1,42\text{ кг/м}^3$), в качестве заполнителя использовали природный кварцевый песок. Полученные образцы после распалубки на последующие сутки твердения помещали в сушильный шкаф при температуре $50\text{ }^\circ\text{C}$ на 2 часа для ускоре-

ния структурообразования цементного камня. Изучение процессов формирования структуры 28 суточного цементного камня проводили на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU и на дифрактометре «ARLX'TRA», использующем кинематическую схему Θ - Θ с горизонтальным расположением плоского образца.

Исследуемые образцы цементного камня отличались неравномерным тонкокristаллическим распределением кристаллической структуры, обнаружены округлые замкнутые поры диаметр, которых доходил до 0.5 мм (рисунок 2). Образцам характерно достаточно плотное примыкание частиц цементной массы с зернами кварцевого мелкого заполнителя.

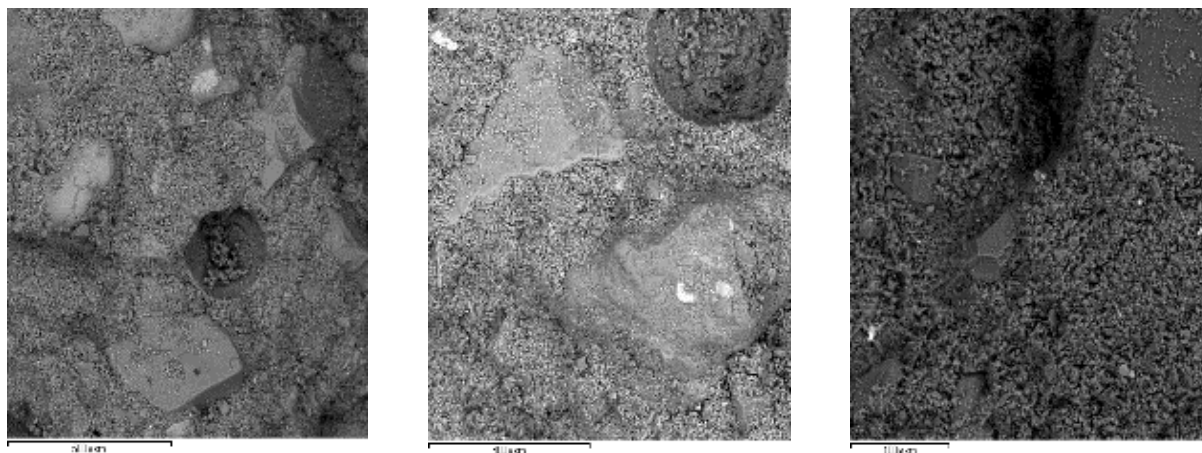


Рис. 2. Микростроение щелочного цементного камня на основе вулканического туфа и термоактивированной опоки

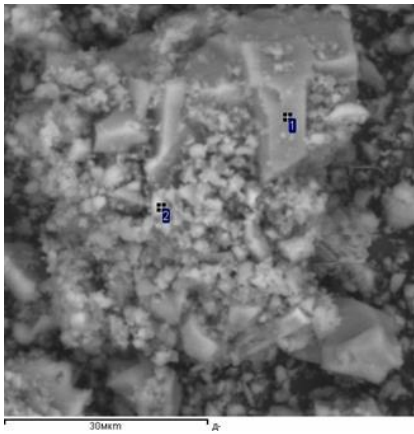
Проведенные исследования показали, что основными фазами, формирующими структуру цементного камня, считаются натриевые гидраты алюмосиликатов кальция, часто образующими плотные срастания кристаллов размером до 10-20 мкм (рисунок 3, 4). Состав сформированных новообразований по результатам полуколичественного анализа приведённый в таблице 1 анализы 1, 2, показал присутствие кальцита и тонких кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (таблица 2, анализы 3-5), а также тонкие чешуйки слюды.

Таблица 1. Состав гидратов основной массы, в вес. % (места анализа указаны на рис.3)

Спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Итог
1	8.19	0.22	12.51	46.98	2.05	17.71	0.43	88.09
2	4.13	0.21	6.72	35.82	2.58	24.42	0.52	74.41

Таблица 2. Состав кристаллов основной массы, в вес. % (места анализа указаны на рис. 4)

Спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Итог
1	8.66		18.76	61.65	1.66	7.61	0.40	98.74
2	4.24	0.23	12.12	71.43	5.03	5.57	0.28	98.91
3	0.92	0.21	1.14	5.98	0.23	44.52		53.00
4	2.36	0.54	1.25	4.35	0.27	43.17		57.44
5	0.74		1.03	4.06	0.33	42.55		48.70



Спектр EDX

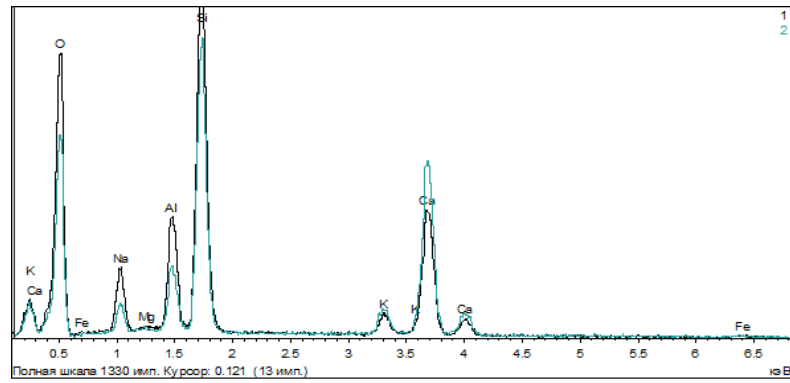
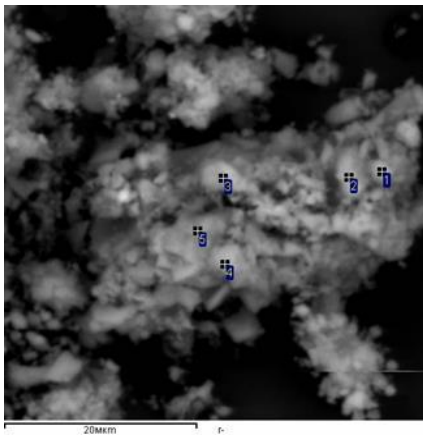


Рис. 3. Гидраты основной массы



Спектр EDX

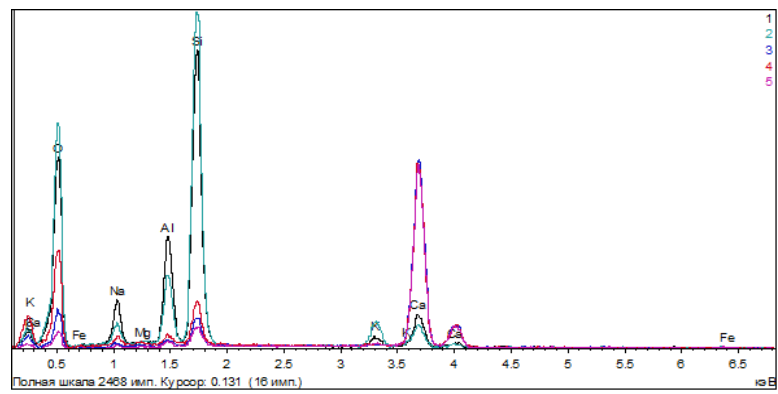


Рис. 4. Фазы основной массы

Рентгенофазовый и электронно-зондовый анализы показали, что кристаллы минерала слюды, пронизывают структуру камня и идентичны минералу мушкету; исследованный состав чешуек (размером ~20 мкм) в среднем близок к формуле

$(\text{Na}_{0.14}\text{K}_{0.63})_{0.8}(\text{Fe}^{2+}_{0.05}\text{Mg}_{0.02}\text{Al}^{\text{VI}}_{2.01}\text{Ti}_{0.01})_{2.1}(\text{Si}_{3.01}\text{Al}^{\text{IV}}_{0.99})_{4.0}\text{O}_{10}(\text{OH}_{2.00})_{2.0}$ и подтверждает насыщенность щелочными металлами натрия и алюминия.

Результаты РФА установили, что в составе новообразований присутствует кварц, полевые шпаты, близкие к альбиту и ортоклазу, слюда, кальцит, цеолиты (рисунок 5).

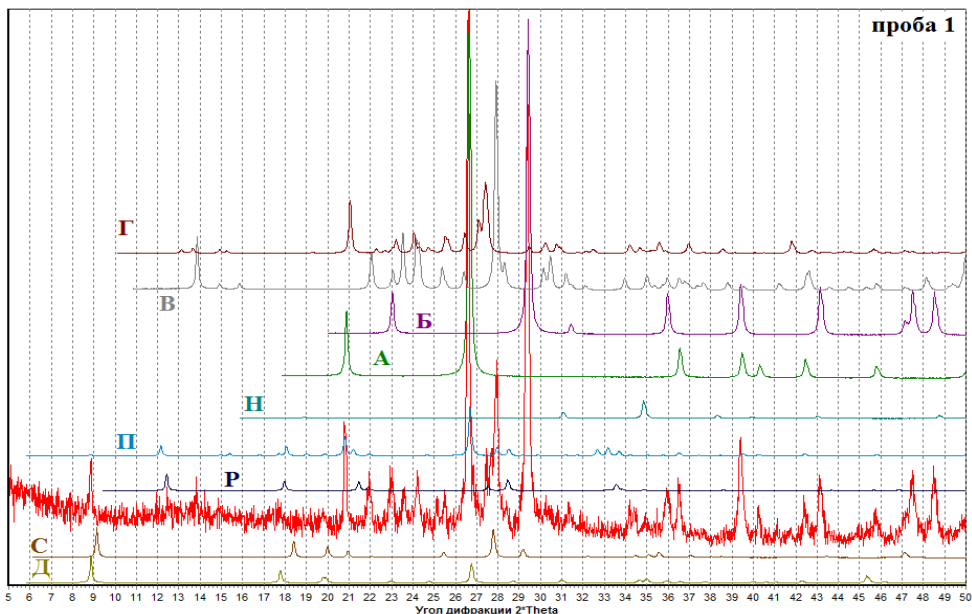
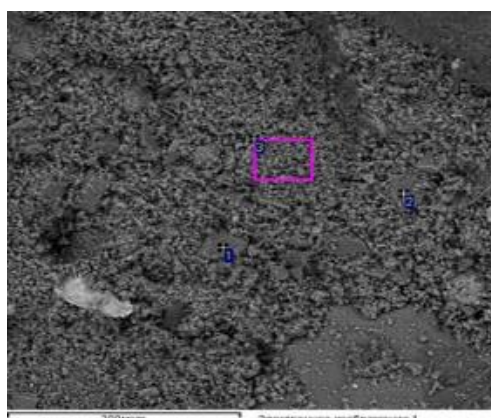
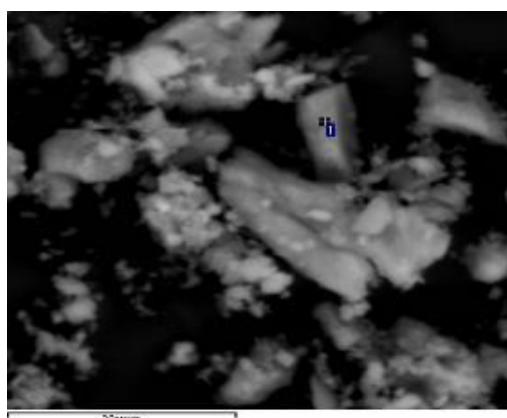


Рис. 5. Дифрактограмма образца: А – кварц, Б – кальцит, В – альбит, Г – калиевый полевой шпат, Д – мусковит, Н – анальцим, П – жисмондит, Р – гарронит, С - паргонит

Таблица 3. Состав гидратных Na-Ca-Si соединений (место анализа указано на рис. 6), в вес. %

Спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Итог
1	13.52	0.04	1.43	11.80	0.55	12.31	0.72	40.36



а)

б)

Спектр EDX

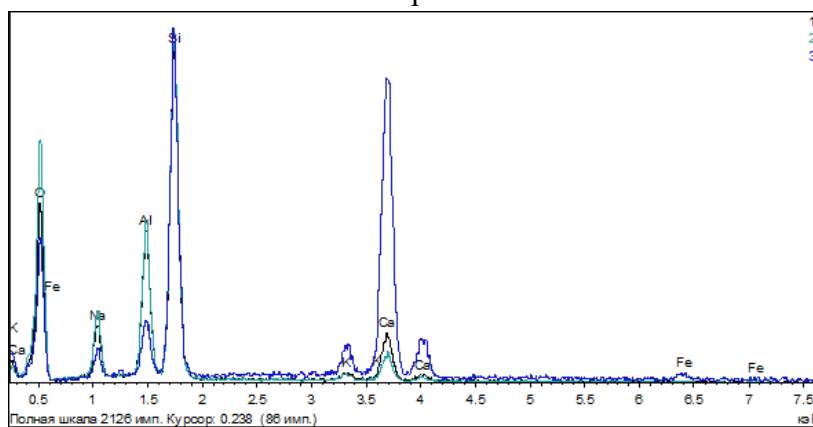


Рис. 6. Гидратные Na-Ca-Si соединения в структуре материала (а, б), спектры EDX кристаллов, близких к цеолитам (1, 2) и основной массы (3)

Новообразования цеолита по данным рентгеноструктурного анализа идентифицируется как образования схожие с гарронитом $\text{Na}_2\text{Ca}_5\text{Al}_{12}\text{Si}_{20}\text{O}_{64}\cdot 27(\text{H}_2\text{O})$, отчетливо выделяется главный рефлекс этой фазы ($2\Theta - 12,4 (7,10\text{\AA})$).

Результаты электронно-зондовых исследований выявили присутствие гидратно - аморфных Na – Ca – Si – H соединений, характеризующихся большим содержанием воды (рисунок 6, табл. 3; 4) и новообразований схожих ними по составу Na – Al – Si фаз, с наличием кристаллов алюминия и близких по элементному составу к цеолитам, Са-филлипситу или гаррониту (для которых характерно соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 2$).

Таблица 4. Состав цеолитовой фазы, в вес. %

Спектр	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Итого
1	5.12	17.07	40.91	0.39	6.47	0.13	71.09

По результатам рентгенофазового анализа в цементном камне с использованием тонкодисперсных порошков из вулканического туфа и термоактивированной опоки при 700 °С, установлено присутствие кварца, полевых шпатов, близких к альбиту и ортоклазу, слюд, кальцита, цеолитов. Электронно-зондовые исследования также выявляют присутствие гидратных аморфных соединений Na-Ca-Si сходных по составу фаз, содержащих алюминий и близких по элементному составу к цеолитам.

Таким образом, полученные рецептуры вяжущих щелочной активации с использованием термоактивированной опоки при температуре 700 °С, вулканического туфа и жидкого натриевого стекла позволят создавать эффективные строительные композиты с меньшими энерго- и ресурсозатратами и одновременно окажут весомый вклад в улучшение экологической обстановки.

Библиографический список:

1. Муртазаев, С-А.Ю. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы [Текст] / С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова// Приволжский научный журнал. – 2018. – №2 (Т.46). – С. 65 –70.
2. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintshev M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. – P.500-503.
3. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклинкерных вяжущих щелочной активации) / Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. – P.457-460.
4. Nematollahi, B. Efficacy of Available Superplasticizers on Geopolymers [Electronic resource] / B. Nematollahi, J. Sanjayan // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 7 – №7. – pp. 1278-1282. – <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v7-1278-1282.pdf>.
5. Hardjito D., Wallah S.E, Sumajouw D.M.J, Rangan B.V. Properties of geopolymer concrete with fly ash source material: effect of mixture composition / In: Seventh CANMET/ACI interna-

tional conference on recent advances in concrete technology, Las Vegas, USA; 2002.

6. Alonso, S. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio / S. Alonso, A. Palomo // *Materials Letters*. - 2001. - №47(1-2). - pp.55-62.
7. Солдатов, А.А. Строительные материалы на основе жидкого стекла [Текст] / А.А. Солдатов, И.В. Сариев, М.А. Жаров, М.А. Абдураимова // В сборнике: Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности Материалы IV-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. Н.И. Стоянов (ответственный редактор). 2016. – С. 192-195.
8. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Structure formation of geopolymer perlite binder vs. Type of alkali activating agent // *International Journal of Pharmacy and Technology*. – 2016. – Vol. 8(3). – pp. 15338–15348.
9. Саламанова, М.Ш. Цементы щелочной активации: возможность снижения энергоемкости получения строительных композитов [Текст] / М.Ш. Саламанова, С-А.Ю. Муртазаев // *Строительные материалы*. – 2019. – № 7.– С.32-41.
10. Obata A. Hydroxyapatite Coatings Incorporating Silicon Ion Releasing System on Titanium Prepared Using Water Glass and Vaterite / A. Obata, T. Kasuga, J. R. Jones // *Journal of the American Ceramic Society*. - 2011. - Vol. 94. - Iss.7. - P. 2074-2079.
11. Reinik, J. Hydrothermal alkaline treatment of oil shale ash for synthesis of tobermorites / J. Reinik, I. Heinmaa, J.P. Mikkola, U. Kirso // *Fuel*. - 2007. - Vol. 86. - P. 669-676.
12. Кривенко, П.В. Шлакощелочные вяжущие нового поколения [Текст] / П.В. Кривенко, Ж.В. Скурчинская, Ю.А. Сидоренко // *Цемент*. – 1991. – №11-12. – С. 4-8.
13. Kmita A. The influence of physical and chemical parameters of modified water glass on the strength of loose self-setting sands with water-glass / A. Kmita, B. Hutera // *Metallurgy and foundry engineering*. - 2012. - Vol. 38. - No. 1. - P. 67-71.
14. Рахимова, Н.Р. Влияние дисперсности и гранулометрического состава молотых шлаков на свойства шлакощелочных вяжущих [Текст] / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2008. – вып. 11. – С. 16-18.
15. Удодов С.А., Черных В.Ф., Черный Д.В. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого бетона // *Сухие строительные смеси*. – 2008. – № 3. – С.70.
16. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsayev M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. – P.500-503.
17. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete //В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFoCE 2018" 2018. С. 04018.
18. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule*. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. С. 337.
19. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Сер. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017. С. 05011.

ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРБЕТОНОВ

А.С. Пилипенко¹, канд. техн. наук

А.Р. Скаяев¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. На сегодняшний день перед учеными и инженерами строительной отрасли всего мира стоит задача применения неразлагаемого вторичного сырья. Полиэтилентерефталат является одним из таких материалов, его жизненный цикл составляет 15-20 лет, после чего его физико-механические свойства бывают утрачены. Повторное применение полиэтилентерефталата в строительстве в настоящее время не производится. В связи с этим, была предложена гипотеза разработки состава полимербетона с использованием гамма-облученного полиэтилентерефталата (гранул или стружки) в качестве связующего. Применение облученного полиэтилентерефталата может позволить снизить количество вяжущего вещества, при этом повысить срок эксплуатации изделий и прочностных показателей до 15-25%.

Ключевые слова: вторичный полиэтилентерефталат, рециклинг, полимербетоны, гамма-излучение, полимерные отходы.

Сегодня в РФ перерабатывается в полиэтилентерефталат-бутылки более полумиллиона тонн полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и, соответственно, столько же образуется отходов высококачественного полимера широкого спектра применения. Организация сбора и подготовка отходов ПЭТФ к переработке является одним из серьезных экономических факторов формирования рынка вторичного ПЭТФ. Для загрязненных и смешанных отходов затраты на их подготовку к использованию в качестве вторичного сырья могут превосходить стоимость первичного сырья. Увеличению затрат на переработку отходов ПЭТФ способствует высокая доля ручного труда при сборе и сортировке отходов, постоянный рост затрат на энергоресурсы, высокий уровень налогообложения. Наиболее эффективен отдельный сбор выбывших из употребления изделий ПЭТФ. Этот метод получил широкое распространение за рубежом и начинает развиваться в России. Частично вторичный ПЭТФ собирается на предприятиях, где образуются производственные отходы [1].

Рециклинг полимерных отходов позволяет осуществлять возврат ценного полимерного сырья в технологический цикл производства, что в свою очередь, снижает нагрузку на окружающую среду. При повторной переработке отходов полиэтилентерефталата в технологическую схему входят такие стадии как сушка и кристаллизация полимера, которые позволяют снизить до предела повышенное содержание влаги ПЭТФ из-за гигроскопичности полимера и одновременно, повысить его вязкость, которая от цикла к циклу переработки резко снижается. Снижение вязкости ПЭТФ при повторной переработке можно связать с протекающими физико-химическими процессами деструкции материала. Деструкция полимеров обычно сопровождается уменьшением молекулярной массы и изменением реологических свойств, что и приводит к уменьшению деформационно-прочностных показателей полимерных материалов.

В связи с этим в последнее время все большую актуальность приобретают исследования свойств вторичного полимерного сырья, модифицированного различными способами. Так, например, модификацию сырья можно проводить различными химическими агентами, например, восками, эластомерами, ангидридами и т.д. Кроме этого, одним из методов регулирования структуры и свойств полимеров является введение в них небольшого количества (обычно до 5%) силоксановых добавок. Так, например, введение 2%мас. оксаметилцикло-тетрасилоксана в полиэтилен (ПЭ) приводит к значительному изменению свойств полимера, что отражается в повышении пластичности и деформируемости, полимер легче перерабатывается при температурах ниже температуры плавления. Аналогичные исследования были проведены и с использованием сверхмолекулярного ПЭ и других полимеров из класса полиолефинов. Было установлено, что введение силоксанов в полиолефины приводит к повышению физико-механических свойств, а также такие композиции отличаются повышенной стойкостью к атмосферному и тепловому старению. Это связано с тем, что образующиеся свободные радикалы в полимере при его деструкции могут присоединяться к группам силоксана до наступления реакции обрыва цепи. Проведенный анализ литературных данных позволил установить, что модификаторы на основе силанов могут проявлять активность по отношению к влаге, тем самым прекращать реакции гидролитической деструкции, что особенно важно для гигроскопичного ПЭТФ и тем самым можно упростить технологическую схему производства вторичного сырья на основе ПЭТФ, исключив стадии предварительной сушки и кристаллизации [2].

Ультразвук (УЗ) оказывает значительное влияние на свойства полимеров и композиций. Проведенные исследования по влиянию УЗ на свойства полимеров и композиционных материалов показали, что УЗ колебания, воздействуя на расплавы полимеров, приводят к увеличению относительного удлинения при разрыве. При обработке УЗ расплавов смесей полимеров из термодинамически несовместимых полимеров, в том числе вторичных, увеличиваются деформационно-прочностные показатели композиций, и улучшается диспергирование компонентов смесей. Изучение влияния УЗ на структуру и свойства ПЭ, модифицированного силанами, позволило установить увеличение физико-механических свойств материалов [3].

Перспективным направлением применения вторичного ПЭТФ является производство полимербетона. ПЭТФ от использованных бутылок для напитков может стать потенциально дешевым сырьем, а его вторичная переработка в полимербетон позволит также решить проблемы утилизации. Главное преимущество применения вторичного ПЭТФ для полимербетона заключается в том, что его не нужно очищать от других материалов и красителей. Оптимальное соотношение наполнителя и смолы составляет 9:1. Поверхностный слой полимербетона может иметь толщину всего 10-25 мм, что обеспечивает износостойкость и малую проницаемость.

Нанесение покрытий из полимербетона на строительные конструкции существенно улучшает их внешний вид. Эффективно применение полимербетона для дренажа кислотных стоков, подземных сводов, соединительных боксов канализационных труб.

Создание полимербетонов на термопластичных полимерах значительно расширяет области применения данных материалов. Их разработка является перспективной и актуальной задачей. Полимербетоны с ПЭТФ связующим имеет высокую химическую стойкость, ударную прочность, морозостойкость.

Как показали зарубежные исследования, повторное использование ПЭТ-гранул и ПЭТ-стружки снижало эксплуатационные и прочностные показатели бетона. В начале XXI века было установлено, что полиэтилентерефталат, подверженный гамма-облучению, приобретает необычную кристаллическую решетку (становится более плотным, устойчивым к воздействию ультрафиолета, прочностные показатели повышаются на 30-35%) [4].

Сегодня гамма-облучение широко используется в медицине, фармацевтике, военной отрасли, а также в пищевой отрасли в качестве ионизации (обеззараживания) стеленной и ПЭТ тары. Обзор научной литературы показал, что использование радиоактивного излучения в строительстве – явление новое. В начале XXI века было установлено, что коротковолновое электромагнитное излучение (гамма-излучение) способно изменять кристаллическую решетку и физико-механические свойства материалов.

Исходя из вышеизложенного, целью дальнейших исследований принята разработка научно обоснованного технологического решения получения эффективного и безопасного полимербетона с применением полиэтилентерефталата для облицовочных изделий, отвечающих современным требованиям. Отличительной особенностью создания такого полимербетона, является повторное использование полиэтилентерефталата, предварительно подверженному гамма-излучению.

Библиографический список:

1. Керницкий В. И., Жир Н. А. Переработка отходов полиэтилентерефталата // Полимерные Материалы. 2014. № 8. С. 11–21.
2. Кирш И.А., Балыхин М.Г., Бабин Ю.В., Банникова О.А., Безнаева О.В., Романова В.А. Модификация вторичного полиэтилентерефталата кремнийорганическими соединениями для производства нитей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. №5. С. 95-99
3. Кирш И.А., Чалых Т.И., Ананьев В.В., Заиков Г.Е. Регулирование физико-механических свойств вторичного полиэтилентерефталата путем химической и физической модификации // Вестник технологического университета. 201. Т.18. №7. С. 79-82.
4. Siddhartha, Suveda Aryaa, Kapil Dev, Suresh Kumar Raghuvanshia, J.B.M. Krishnac, M.A. Wahab, Effect of gamma radiation on the structural and optical properties of Polyethyleneterephthalate (PET) polymer // Radiation Physics and Chemistry. Vol. 81, Issue 4, April 2012, Pages 458-462.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСОРТИРОВАННОГО БОЯ СТЕКЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

А.А. Зайцева¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Несортированный бой стекла, потенциально может быть вторично использован для получения эффективных строительных материалов. В связи с этим важной задачей является разработка безотходной экологически чистой энергосберегающей технологии производства теплоизоляционных материалов на действующих предприятиях стройиндустрии без значительных капиталовложений и утилизацией несортированного стеклобоя. Целью настоящего исследования являлось разработка составов негорючих и огнестойких теплоизоляционных материалов на основе отвержденного жидкого стекла и несортированного стеклобоя. В работе был получен теплоизоляционный поризованный материал, значения некоторых свойств которого показывают, что ограждающие конструкции из ячеистого бетона на основе стеклобоя средней плотностью 400–900 кг/м³ не уступают по свойствам конструкциям на основе автоклавных цементных ячеистых бетонов, но и значительно превосходят их. Структурообразование в таких бетонах осуществляется за счет взаимодействия щелочной среды жидкого стекла с аморфным диоксидом кремния (SiO₂), содержащегося в стеклобое. Разработанные подходы использования несортированного стеклобоя явились основой для создания эффективного теплоизоляционного водостойкого и экологически чистого материала с ячеистой структурой и пониженной средней плотностью. Отказ от энергоемкой автоклавной обработки при получении подобных материалов позволяют получать изделия из ячеистого бетона на основе стеклобоя, предназначенные для устройства тепловой изоляции промышленных и гражданских зданий, а также промышленного оборудования и трубопроводов с температурой изолируемой поверхности до 600 °С и более.

Ключевые слова: несортированный стеклобой, структурообразование, теплоизоляционные материалы, вторичная переработка.

Экологические проблемы возникающие вследствие неконтролируемого воздействия человечества на окружающую среду, носят в настоящее время глобальный характер. Постоянное совершенствование и интенсификация технологий приводит к возрастающему увеличению вовлечения не восполняемых природных ресурсов. При этом количество складированных на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) неукоснительно увеличивается, что приводит к росту уровня отрицательного воздействия на окружающую среду. Однако некоторые компоненты ТБО, например, такие как несортированный бой стекла, потенциально могут быть вторично использованы для получения эффективных строительных материалов. [1-4].

Наряду с повсеместным совершенствованием технологий переработки ТБО, проблема трудно утилизируемых компонентов, к которым в полной мере относится стеклобой до сих пор остается нереализованной. Стеклобой, оказывающий комплексное негативное воздействие на окружающую среду, постоянно вывозится на полигоны ТБО десятками тысяч тонн ежегодно, и несмотря на невысокий класс опасности стеклобоя, его количество продолжает расти.

Эффективной вторичной переработке подвергается только сортовой стеклобой при производстве стекла. Однако, значительная часть несортированного

стеклобоя остается не использованной из-за отсутствия надлежащих технологий переработки или вторичного его использования [5].

При производстве стекла оконного или тарного требуются существенные материальные и энергетические затраты, а использование несортированного стеклобоя не допускается [6], поэтому изыскиваются другие возможности его использования.

В последнее время явные преимущества показали ячеистые бетоны при использовании их для ограждающих конструкций современных зданий. Эти бетоны эффективны по теплозащите зданий как теплоизоляционные и теплоизоляционно-конструкционные материалы и имеют такие важнейшие показатели современного строительства как надежность и долговечность конструкций [7], однако, в настоящее время получить ячеистые бетоны пониженной средней плотности пока не удается [8,9].

Создание новых дешевых теплоизоляционных материалов способствует существенному снижению стоимости капитального строительства, а также затрат на капитальный ремонт зданий и сооружений [1]. В связи с этим большое внимание уделяется материалам, которые могут составлять конкуренцию органическим и минераловатым утеплителям. К таким перспективным материалам относятся пеностекло или газостекло [10,11].

Целью настоящего исследования являлось разработка составов негорючих и огнестойких теплоизоляционных материалов на основе отвержденного жидкого стекла и несортированного стеклобоя.

В настоящее время жидкое стекло используются как связующие компоненты для изготовления различных строительных материалов, обладающих жаропрочными свойствами, являются химически стойкими материалами. Являясь безопасным жидкое стекло не подвергается коррозии, не испаряет пожароопасных летучих компонентов и не ухудшает окружающую среду в процессе эксплуатации, имеет высокую когезионную прочность, что делает его привлекательным с точки зрения технологичности, а низкая стоимость обуславливает его экономическую эффективность в применении.

Жидкое стекло при интенсивном перемешивании способно образовывать крупнопористую пену, а технология изготовления теплоизоляционного материала из него проста и не требует сложного оборудования, что делает его популярным при изготовлении теплоизоляционных материалов.

В качестве материалов для получения негорючих и огнестойких теплоизоляционных материалов использовали жидкое стекло, гидроксид натрия и кремнефтористый натрий. В качестве газообразователя использовали алюминиевую пудру.

Однородность стекломассы для негорючего теплоизоляционного материала не является важным показателем, как при варке стекла, поэтому использовали стеклобой различного химического состава и тонкости измельчения. В качестве крупного заполнителя использовали дробленый стеклобой со следующими характеристиками: модуль крупности $M_k = 0,945$; истинная плотность – $2,435 \text{ г/см}^3$; насыпная плотность – $1,313 \text{ г/см}^3$.

В качестве структурообразующего компонента использовали тонкомолотый стеклобой. Для этого его размалывали до порошка в шаровой мельнице или дезинтеграторе до удельной поверхности 450 – 550 м²/кг.

Структурообразование осуществляется за счет взаимодействия щелочной среды жидкого стекла с аморфным диоксидом кремния (SiO₂), содержащегося в стеклобее. Отверждение в такой системе происходит за счет образования жесткой сетки геля кремниевой кислоты и стеклообразных гидросиликатов. Кремнезем из жидкого стекла расходуется на образование кремнегеля, гидросиликатов, и других продуктов взаимодействия щелочных силикатов с отвердителем. Таким образом тонкомолотый порошок стеклобоя является активным поставщиком SiO₂ в систему, обеспечивая повышение кремнеземистого модуля жидкого стекла и тем самым повышая водостойкость материала. В качестве отвердителя выбран кремнефтористый натрий в сочетании с портландцементом, от которого зависит прочность межпоровых перегородок теплоизоляционного материала и следовательно его прочность [12].

Нами была разработана методика подбора состава пенобетона на основе стеклобоя и жидкого стекла различной плотности [12], и предложена технологическая схема получения теплоизоляционного материала, включающая дробильно-помольное отделение, отделение приготовления формовочной массы, посты формования, тепловой обработки, выдержки и доводки изделий, распаковки и упаковки [13].

На основании разработанной методики подбора состава газобетона и по вышеприведенной технологической схеме был получен теплоизоляционный материал. Полученные характеристики газобетонов на основе стеклобоя приведены в таблице 1, испытания полученного материала проводили в соответствии с действующими ГОСТами.

Таблица 1. Характеристики газобетонов на основе стеклобоя

Показатели	Ед. измерения	Значения показателей
Средняя плотность	кг/м ³	400 – 900
Прочность при сжатии	Мпа	1,5 – 5,5
Прочность при изгибе	Мпа	0,4 – 2,2
Сорбционная влажность		
при φ = 100%	%	16 – 5,5
при φ = 75%	%	5 – 3,5
Водопоглощение	% по массе	32 – 12
Теплопроводность	Вт/м·°С	0,07 – 0,17

Значения некоторых свойств пенобетонов на основе стеклобоя показывают, что ограждающие конструкции из ячеистого бетона на основе стеклобоя средней плотностью 400–900 кг/м³ не только не уступают по свойствам конструкциям на основе автоклавных цементных ячеистых бетонов, но и значительно превосходят их.

Разработанные подходы использования несортированного стеклобоя явились основой для создания эффективного теплоизоляционного водостойкого и экологически чистого материала с ячеистой структурой и пониженной средней плотностью. Отказ от энергоемкой автоклавной обработки при получении подобных материалов позволяют получать изделия из ячеистого бетона на основе стеклобоя, предназначенные для устройства тепловой изоляции промышленных и гражданских зданий, а также промышленного оборудования и трубопроводов с температурой изолируемой поверхности до 600 °С и более [13].

Несомненным преимуществом полученного материала на основе стеклобоя является то, что его можно производить по безотходной экологически чистой энергосберегающей технологии на действующих предприятиях стройиндустрии без значительных капиталовложений, а утилизация стеклобоя, большое количество которого имеется по всей территории России, позволит решить ряд производственных проблем и улучшить экологию промышленных регионов. Экономический эффект от использования несортированного стеклобоя может достигаться за счет снижения себестоимости продукции и уменьшения удельных капиталовложений, а также при применении эффективных теплоизоляционных материалов.

Библиографический список:

1. Иванова Н.В., Фалькевич Н.А. Проблемы повышения энергоэффективности и ресурсосбережения в ЖКХ // Экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. – 2014. – №10. – С. 175 – 181.
2. Samchenko, S.V., Aleksandrova, O.V., Zaitseva, A.A. Aerated concrete based on cullet and liquid glass // (2020) Materials Science Forum, 974 MSF, pp. 362 – 366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.362
3. Gajanan Deshmukh, Preeti Birwal, Rupesh Datir and Saurabh Patel. Thermal Insulation Materials: A Tool for Energy Conservation // J Food Process Technol. 2017. Volume 8. Issue 4. pp. 1–4.
4. Zhigulina A., Building Envelopes: An Objective Measure of Comfort in Residential Buildings, Urban Planning, № 1, 2012, pp. 80 – 81.
5. Минько Н.И. Добринская О.А. Технологические особенности использования стеклобоя в производстве стекломатериалов// Техника и технология силикатов. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 9 – 14.
6. Гулоян, Ю. А. Физико-химические основы технологии стекла [Текст] : учебное пособие / Ю. А. Гулоян. - Владимир: Транзит-ИКС, 2008. – 736 с.
7. Орлов Д.Л. Пеностекло теплоизоляционный материал XXI века // Стекло мира. – 2011. – № 2. – С. 78–79. (Orlov D.. Foamed glass heat-insulating material of the XXI century / D.L. Orlov // Glass world.2011. no. 2. pp. 78–79.)
8. Смолий В. А., Косарев А. С., Яценко Е. А. Зависимость реакционной и вспенивающей способности композиций органических и неорганических порообразователей ячеистого теплоизоляционного строительного стекломатериала от их соотношения и свойств // Техника и технология силикатов. – 2015. – Т. 22, № 4. – С. 7 – 12.
9. Лотов В. А. Перспективные теплоизоляционные материалы с жесткой структурой // Строительные материалы. – 2004. – № 11. – С. 8 – 9.
10. Перспективы развития технологии производства и применения пеностекла / Н.И. Минько, О.В. Пучка, А.А. Кузьменко, М.Н. Степанова // Стекло мира. – 2006. – № 4. – С. 91–92. (Minko N.I. Prospects of development of the technologies of production and application of foamed glass / N.I. Minko, O.V. Puchka, A.A. Kuzmenko, M.S. Stepanova // Glass world 2006. no. 4. pp. 91 – 92)

11. Зин Мин Хтет, Тихомирова И.Н. Технология получения композиционного теплоизоляционного материала с использованием натриевого жидкого стекла и минеральных наполнителей// Техника и технология силикатов. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 14 – 19.
12. Самченко С.В., Александрова О.В., Зайцева А.А. Влияние плотности жидкого стекла на свойства газобетона// Техника и технология силикатов. – 2019. – Т. 26, № 3. – С. 78 – 82.
13. Зайцева А. А., Коровяков В. Ф., Зайцева Е. И., Ушкалов А. А. Технология эффективного газобетона // Научное обозрение — 20/2015 – С. 112 – 115

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДЕКОРАТИВНЫЙ ЦЕМЕНТ

В.И. Турчанинов¹, канд. техн. наук, доцент

¹*Оренбургский государственный университет*

Аннотация. Проведен анализ состояния цементной промышленности России. Отмечено недостаточное производство белого портландцемента и предложены меры по увеличению производства декоративных цементов. Приведены результаты анализа сырьевой базы Оренбургской области и сделан вывод о наличии месторождений карбонатного и глинистого компонентов, пригодных для производства белого цемента. Приведены результаты эксперимента по получению энергоэффективного декоративного цемента.

Ключевые слова: декоративный цемент, сырьевые компоненты, низкотемпературный обжиг.

Одним из наиболее востребованных строительных материалов является портландцемент. Без него невозможно возведение большинства строительных объектов. В 2018 году объем производства портландцемента в России составил 53,7 млн.т. При этом мощности российских предприятий по производству портландцемента составляли порядка 104 млн. т [1].

Следует отметить, что, несмотря на не полностью загруженные мощности цементных заводов, наблюдается импорт цемента из соседних регионов (Беларусь, Казахстан, Турция), равно как и экспорт российского цемента за рубеж, что объясняется территориальной близостью поставщика и потребителя. Крупным экспортером портландцемента в 2018 году стала Оренбургская область (37,52% от общей величины поставок Россией), что свидетельствует о наличии значительных запасов кондиционного сырья и производственных мощностей для производства цемента.

Производство портландцемента характеризуется значительной энергоемкостью, т.к. обжиг клинкера протекает при температуре порядка 1450 °С, для обеспечения которой температура теплоносителя должна быть на 200-250 °С выше. Еще выше температура при обжиге клинкера белого портландцемента, который пользуется большим спросом при проведении отделочных работ. В России производство белого цемента многие годы осуществляет ОАО «Щуровский цемент», входящий в настоящее время в Словацкую компанию HОLCIM.

Но потребность в белом цементе значительно превышает уровень его производства в России, поэтому поставка цемента дополнительно производится из Словакии, Турции, Египта, Ирана и Дании. Качество цемента оценивается, прежде всего, по его белизне, оцениваемой путем сравнения с эталоном белизны, за который принимается молочное стекло МС-14, коэффициент диффузного отражения (КДО) которого должен быть не менее 95%. Степень белизны цемента по сортам должна быть не менее, %: первый (высший) - 80, второй - 75, третий - 68. Производится белый цемент двух марок по прочности – М 500 и М 400.

Ограниченный выпуск белого цемента, прежде всего, объясняется отсутствием кондиционного сырья для его производства. Глинистый и известковый компоненты должны содержать ограниченное количество красящих оксидов переходных металлов, в том числе оксидов железа. Щуровский цементный за-

вод при производстве белого портландцемента в качестве основного сырья использует известняк и глину, содержащие Fe_2O_3 в количестве 0,12 % и 1 % соответственно. Для корректировки химического состава сырьевой смеси используют кварцевый песок с содержанием Fe_2O_3 равным 0,29 %. Суммарное содержание Fe_2O_3 в сырьевой смеси составляет 0,3 %, а в клинкере 0,53 % [2].

Если проанализировать сырьевую базу Оренбуржья, то можно прийти к заключению, что выпуск белого цемента можно организовать на востоке области, где располагаются месторождения маложелезистых известняков и глин. Химические составы Новоорской глины и Аккермановского известняка приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Химический состав Новоорской глины

Месторождение	Химический состав, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	ППП	Сумма
Ново-Орское	61,52	24,33	1,41	1,64	0,62	0,61	0,96	0,20	8,89	100,18

Таблица 2. Химический состав Аккермановского известняка

Месторождение	Химический состав, %							
	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
Аkkerмановское	93,06	0,65	0,66	2,68	0,77	2,11	0,05	100,18

Следует отметить, что наиболее качественный флюсовый известняк поставляется на металлургический комбинат «Уральская сталь» и завод силикатных стеновых материалов, а на Новотроицкий цементный завод поступает менее кондиционный известняк с большим содержанием примесей, в том числе и Fe_2O_3 .

Химические составы основных компонентов портландцемента, представленные в таблицах 1 и 2, позволяют сделать вывод, что содержание оксидов железа достаточно низкое, поэтому на основе этого сырья действительно можно организовать выпуск белого цемента.

С точки зрения снижения затрат при производстве цемента интерес представляет глиноземисто-белитовый цемент (ГБЦ), обжиг которого можно проводить при температурах, не превышающих 1300 °С [3]. Принципиальное отличие технологии ГБЦ от традиционного портландцемента заключается в том, что обжиг клинкера ГБЦ протекает в твердой фазе без образования расплава. Поэтому основными клинкерными минералами ГБЦ являются низкоосновные силикаты и алюминаты кальция, такие как $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S) и $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA). Оксиды железа при этом связываются в ферриты кальция типа $2CaO \cdot Fe_2O_3$ (C_2F).

Расчет состава цементной сырьевой смеси ведется исходя из соображений связывания SiO_2 в C_2S , а Al_2O_3 в CA . Значения силикатного модуля n рекомендуется принимать в пределах от 1,1 до 2,4, а глиноземистого p от 5 и выше. Коэффициент насыщения рассчитывается по формуле подобной, используемой

при расчете состава портландцементной сырьевой смеси, но с другими коэффициентами, поскольку минералогия ГБЦ и портландцемента существенно различаются:

$$KH_{ГБ} = \frac{CaO - (0,65Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3)}{1,87SiO_2} \quad (1)$$

Значение КН для ГБЦ следует принимать равным единице. Соотношение между алюминатной и силикатной фазами должно быть в пределах $CA/C_2S = 0,2-0,4$.

В состав сырьевой смеси необходимо дополнительно вводить гипс, т.к. C_2S является нестабильным соединением и может при охлаждении переходить в стабильную модификацию $\gamma-C_2S$ меньшей плотности и гидравлической активности, что сопровождается рассыпанием клинкера в порошок. Добавление гипса способствует внедрению сульфатного аниона SO_4^{2-} в кристаллическую решетку двухкальциевого силиката и образованию его активной формы $\beta-C_2S$. Наряду с этим наблюдается связывание CA в гидравлически более активное соединение низкоосновный сульфоалюминат кальция $3(CaO \cdot Al_2O_3) \cdot CaSO_4$. Кроме того, учитывая достаточно большое количество гипса в сырьевой шихте, происходит частичное связывание C_2S в $2(2CaO \cdot SiO_2) \cdot CaSO_4$, также гидравлически активное соединение.

Процесс гидратации ГБЦ протекает по механизму твердения как портландского, так и глиноземистого цементов. В ранние сроки твердения наблюдается гидратация алюминатов кальция, в поздние – силикатов кальция. Поскольку содержание алюминатной фазы в ГБЦ ограничено, то, в отличие от глиноземистого цемента, на ранней стадии твердения не наблюдается интенсивного тепловыделения и, следовательно, перехода гексагонального C_2AH_8 в кубический C_3AH_6 . Таким образом исключается возможность разрушения цементного камня вследствие значительных объемных деформаций, сопровождающих переход C_2AH_8 в C_3AH_6 .

Гидратация безводного сульфоалюмината кальция $3CA \cdot CaSO_4$ сопровождается образованием этtringита $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$, гидроксида алюминия $Al(OH)_3$, гидроалюминатов кальция сложного состава или их твердых растворов [4].

Нами были проведены исследования в области технологии белого ГБЦ [5]. Было установлено, что наибольшей восприимчивостью к окраске обладает C_2S в отличие от CA и $3CA \cdot CaSO_4$. В таблице 3 приведены значения КДО указанных минералов синтезированных с добавлением оксида железа и добавки стабилизатора $\beta-C_2S$.

Таблица 3. Коэффициенты диффузного отражения минералов

Минералы	Режим охлаждения	КДО минералов, в % по МС-14, при вводе Fe_2O_3 , %		
		б/д	0,5	1,0
C_2S	в воде / на воздухе	- / -	76,8 / 62,4	- / -
$C_2S + 0,6 \% B_2O_3$	в воде / на воздухе	95,0 / -	77,6 / 63,3	64,9 / 39,1
$C_2S + 2,5 \% SO_3$	в воде / на воздухе	- / -	66,4 / 59,4	53,1 / 37,4
CA	в воде / на воздухе	98,0 / 96,2	94,5 / 94,0	88,0 / 92,0
$3CA \cdot CaSO_4$	в воде / на воздухе	97,0 95,3	94,0 / 93,4	90,1 / 92,7

Как видно из результатов, представленных в таблице 3, алюминатная и сульфоалюминатная фазы характеризуются более высокими значениями КДО при охлаждении как на воздухе, так и в воде в сравнении с силикатной. Для двухкальциевого силиката оптимальным режимом охлаждения является водный.

С точки зрения обеспечения достаточных прочностных характеристик, учитывая интенсивное твердение алюминатов и сульфоалюминатов в ранние сроки твердения, а C_2S в поздние, оптимальное соотношение между $CA: C_2S = 0,5$. Цемент, полученный из клинкера, обожженного при температуре $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и охлажденного на воздухе, имеет прочность при сжатии в возрасте 3 и 28 суток, в $\text{кг}/\text{см}^2$, 200 и 240 соответственно. Но к 9 месяцам прочность значительно возрастает за счет интенсивной гидратации C_2S . Так прочность клинкерного цемента, полученного из сырьевой смеси с добавлением добавок-минерализаторов CaF_2 и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, в возрасте 9 месяцев уже достигает $400 - 500\text{ кг}/\text{см}^2$.

Для подтверждения реальности предлагаемой технологии были проведены полужавовские испытания по получению белого ГБЦ на Опытном заводе НИИ-цемента в г. Подольске. Использовали следующие сырьевые компоненты: Щуровский известняк, Просьяновский каолин и гипс. В качестве минерализующей добавки вводили 0,9 % плавикового шпата. Обжиг проводили во вращающейся печи диаметром 0,6 м и длиной 8 м при температуре $1100-1150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Известь при такой температуре обжига полностью связалась. Белизна клинкера по КДО составила 70 % при охлаждении на воздухе и 82 % при охлаждении в воде. Прочность цемента при сжатии составила $201\text{ кг}/\text{см}^2$ в возрасте 3 суток и $470\text{ кг}/\text{см}^2$ через 9 месяцев.

Был также получен голубой цемент путем ввода в цементную мельницу 0,3 % синего фталоцианинового пигмента при размолке клинкера.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о возможности производства белого и цветных ГБЦ на основе сырьевых компонентов Оренбургской области. Проблему несколько завышенного содержания оксидов железа в местном сырье можно решить селективным отбором более чистых пластов глины и известняка на карьерах.

Библиографический список:

- 1 Рынок портландцемента в России - 2020. Показатели и прогнозы. - Режим доступа: https://tebiz.ru/mi/rynok-portlandtsementa-v-rossii?_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsyMjI1MzM2ODszMDQ5Njk0MDAwO3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=15566864643823730
- 2 Косенко, Н.Ф. Инженерно-технологические расчеты в производстве вяжущих материалов и изделий из них: учебное пособие / Н.Ф. Косенко, В.Г. Комлев. – Иваново: Иван. хим.-технол. ин-т, 1991. – 108 с.
- 3 Захаров, Л.А. Глиноземисто-белитовый цемент / Л.А. Захаров; Шестой международный конгресс по химии цемента, Т. 3. Цементы и их свойства. - М., Стройиздат, 1976. с. 153-154.
- 4 Гидратация сульфатированного цемента на основе модифицированного безводного сульфоалюмината / С.И. Иващенко, М.М. Фатиев, С.С. Иващенко, И.В. Горшкова, Я.С. Леонтьев. – Режим доступа:

<http://dspace.bstu.ru/bitstream/123456789/2400/1/3%20%D0%98%D0%B2%D0%B0%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%A1.%D0%98..pdf>

5 Грачъян, А.Н. Физико-химические основы технологии декоративного глиноземисто-белитового цемента / А.Н. Грачъян, В.И. Турчанинов; Технология декоративных цементов и бетонов (тез. докл. III Всесоюз. научно-техн. конф. - Новочеркасск, тип. НПИ, 1977. С. 11-13.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДБОРА СОСТАВА КЕРАМИЧЕСКОГО КАМНЯ ИЗ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Х.С. Явруян¹, канд. техн. наук, доцент

А.К. Халюшев¹, канд. техн. наук, доцент

Е.С. Гайшун¹, аспирант

¹*Донской государственной технической университет*

Аннотация: В данной работе рассматривается вопрос подбора состава керамических масс для производства крупноформатных керамических блоков на основе техногенного сырья угольного ряда с применением методов компьютерного моделирования эксперимента. Прорабатывается возможность использования нетрадиционного техногенного сырья угольного ряда Восточного Донбасса (отсевов терриконигов), которые образуются при переработке терриконигов с целью извлечения угля. Причинами возрастания столь широкого интереса к данному техногенному сырью послужило сокращение базы качественного глиняного сырья, а также большое количество скопившихся терриконигов. Подобранные в работе составы с использованием отсевов терриконигов показали, что керамические образцы имеют высокие прочностные характеристики, которые соответствуют требованиям. Применение методов компьютерного моделирования эксперимента позволяет наиболее полно оценить и проанализировать полученные данные. На основании компьютерного моделирования анализ воздействия исследуемых факторов показывает, что техногенное сырье (отсевы) является наиболее востребованным материалом для производства стеновых изделий в современном строительстве.

Ключевые слова: техногенное сырье, керамический блок, прочность, компьютерное моделирование, варьируемые факторы

1 Актуальность работы и постановка проблемы. В промышленности строительных материалов существенно повышается интерес к активным разработкам терриконигов Восточного Донбасса с целью извлечения угля из попутных продуктов их разработки. Концепция применения энергосберегающих и экологически чистых технологий при производстве керамических строительных материалов, приобретает в мире все большее значение. Процесс стройиндустрии влечёт за собой расширение номенклатуры изделий строительной стеновой керамики и повышение объемов их производства. Одним из перспективных направлений развития может считаться производство высокоэффективных керамических камней [1-2]. В настоящее время в угледобывающих районах Ростовской области (Восточный Донбасс) активно ведётся переработка терриконигов, которая стала экономически целесообразной и актуальной. В процессе извлечения угля из терриконигов образуется ряд материалов, отличающихся по зерновому и химико-минералогическому составу. Помимо угля, содержание которого обычно колеблется от 10 до 20%, основными породами, слагающими терриконики, являются алевролиты, аргиллиты и песчаники [3-4].

Технология производства керамических камней на основе техногенного сырья угольного ряда имеет свои особенности, которые связаны с предварительной подготовкой сырья. На основании литературных данных можно сделать вывод, что замена глинистого сырья на техногенное сырье угольного ряда возможна при производстве керамических изделий. Согласно ГОСТ, допускается применять (отсевы) с добавлением глины в размере от 10-30%. Соотноше-

ния данных компонентов могут изменяться в зависимости от химического и минералогического состава исходного горного отвала [5-6].

Наибольший интерес в качестве сырья для керамики представляют отсеvy от переработки террикоников – это среднезернистые материалы с размером частиц от 2 до 6 мм. Они мало востребованы, так как имеют, ограниченную область применения вместе с тем они однородны по своему химическому и гранулометрическому составу. Это позволяет наполовину снизить подготовку для производства керамических изделий. В минералогическом составе отсеvов от переработки террикоников присутствуют следующие виды минералов: полевые шпаты, кварц, слюды и гидрослюды. Полевые шпаты представлены в основном ортоклазом и альбитом, которые подверглись сильным вторичным изменениям (пеллитизации, хлоритизации). Гидрослюда выражена иллитом продуктом частичного гидролиза мусковита, который является типичным глинистым минералом, имеющим такой же структурный пакет, что и монтмориллонит, но в отличие от него в тетраэдрическом слое всегда содержит ионы алюминия, изоморфно замещающие ионы кремния, а образующийся заряд пакета компенсируется ионами калия. Также в составе отсеvов присутствуют вторичные железистые минералы в виде оксидов и гидрооксидов.

Целью работы является: разработка состава керамической массы с добавкой техногенного сырья из отходов угледобычи и ее влияние на усадочные деформации керамического черепка.

2. Материалы и методы исследований. В качестве исходных составляющих были приняты следующие материалы:

- техногенное сырьё угольного руда – отсеvy переработки террикоников;
- в качестве добавки – суглинок Чалтырского месторождения.

Перед проведением эксперимента, при подготовке массы, осадочные горные породы (глины) высушивали при температуре 105°C, а потом просеивали через стандартный набор сит для песка: 0,16, 0,315; 0,63.

Оптимизацию состава массы проводили с применением метода наименьших квадратов. Физический смысл факторов варьирования показан в таблице 1. За функцию отклика был принят следующий параметр: $Y_1 (X_1, X_2)$ – общая усадка.

После определения показателя пластичности массы формовали образцы. Общую усадку керамических образцов определяли после обжига при различных температурах (900; 1000; 1100).

Таблица 1. Физический смысл факторов варьирования

№ п/п	Фактор	Физический смысл фактора	Ед. Изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
					-1	0	+1
1	X1	Температура обжига	°C	±100	900	1000	1100
2	X2	Добавка глины	%	±10	10	20	30

Кодирование факторов и средние значения выходного параметра представлены в таблице 2.

Таблица 2. Кодирование факторов и средние значения выходного параметра

№	Кодирование факторов		Средние значения выходного параметра Y ₁ (общая усадка), %						
	X ₁	X ₂	Фракция 0,16		Фракция (0,315)		Фракция (0,63)		
1	-1	-1	5,11		7,41		4,49		
2	-1	0	9,24		10,1		5,54		
3	-1	+1	9,19		8,8		5,99		
4	0	-1	10,57		13,6		8,34		
5	0	0	14,86		13,5		10,9		
6	0	+1	14,03		11,5		9,95		
7	+1	-1	27,63		30,4		21,2		
8	+1	0	27,46		22,1		21,5		
9	+1	+1	23,23		19,5		19,3		

Математическая обработка полученных данных проводилась с помощью программы, написанной в оболочке «MATHCAD». По результатам математической обработки, методом наименьших квадратов были получены математические модели (уравнения регрессии), в виде полинома 2-ой степени:

$$Y(X_1, X_2)_{0,16} = 14,61 + 9,37 \cdot X_1 + 0,413 \cdot X_2 + 3,846 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,866 \cdot X_1^2 - 0,677 \cdot X_2^2 \quad (1)$$

$$Y(X_1, X_2)_{0,315} = 11,34 + 8,51 \cdot X_1 + 0,062 \cdot X_2 + 5,60 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,81 \cdot X_1^2 + 0,008 \cdot X_2^2 \quad (2)$$

$$Y(X_1, X_2)_{0,63} = 10,22 + 7,30 \cdot X_1 + 0,75 \cdot X_2 + 3,16 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,66 \cdot X_1^2 + 0,101 \cdot X_2^2 \quad (3)$$

Уравнения регрессии, полученные по методу наименьших квадратов, подвергались статистическому анализу. По результатам этого анализа проверялась адекватность уравнения регрессии (критерий Фишера F), однородность дисперсий (D_0^2), среднеквадратическое отклонение (S_0) и значимость коэффициентов (ζ) [7-8]. Результаты статистического анализа приведены в таблице 3. Коэффициенты для полученных уравнений регрессии приведены в таблице 4.

Таблица 3. Результаты статистического анализа для керамических образцов

Наименование выходного параметра уравнения		Статистические критерии			
		F	D_0^2	S_0	ζ
Y _{1 (0,16)}	Общая усадка, %	22,419	0,943	0,971	1,684
Y _{1 (0,315)}	Общая усадка, %	6,78	1,814	1,347	2,336
Y _{1 (0,63)}	Общая усадка, %	6,606	0,154	0,393	0,681

Таблица 4. Коэффициенты для полученных уравнений регрессии керамических образцов

Наименование выходного параметра уравнения		Коэффициенты уравнений					
		B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Y _{1 (0,16)}	Общая усадка, %	14,612	9,366	*0,413	3,846	-1,866	*-0,677
Y _{1 (0,315)}	Общая усадка, %	11,337	8,508	*0,062	5,598	*0,81	*8,3 × 10 ⁻³
Y _{1 (0,63)}	Общая усадка, %	10,217	7,302	0,75	3,16	*-0,66	*0,101

* - незначимые коэффициенты

Поверхности математических моделей полученных уравнений регрессии представлены на рис. 1-3.

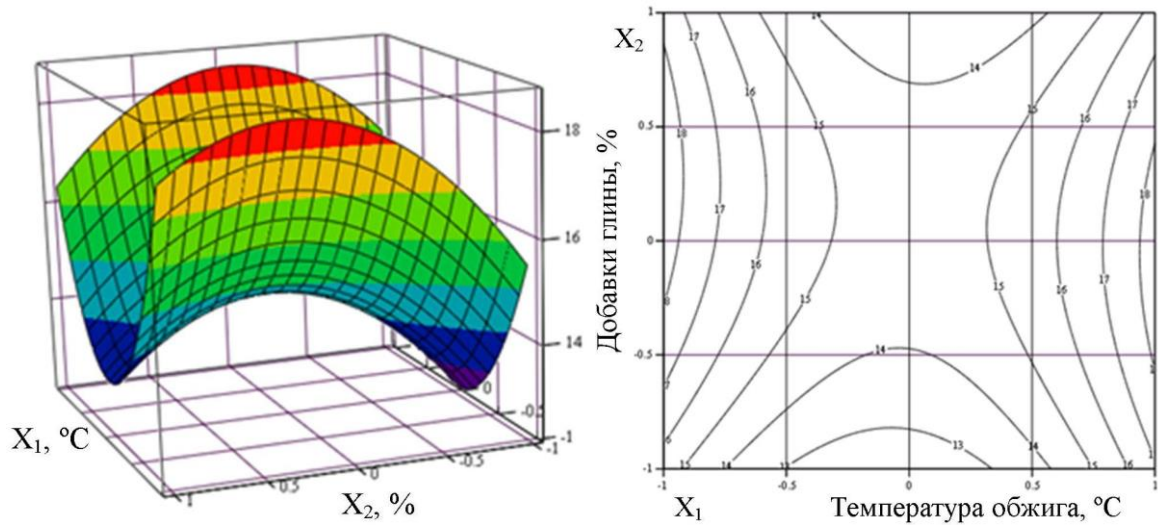


Рис.1 Зависимость общей усадки от температуры обжига (x_1) и добавки глины (x_2) для фракции 0.16

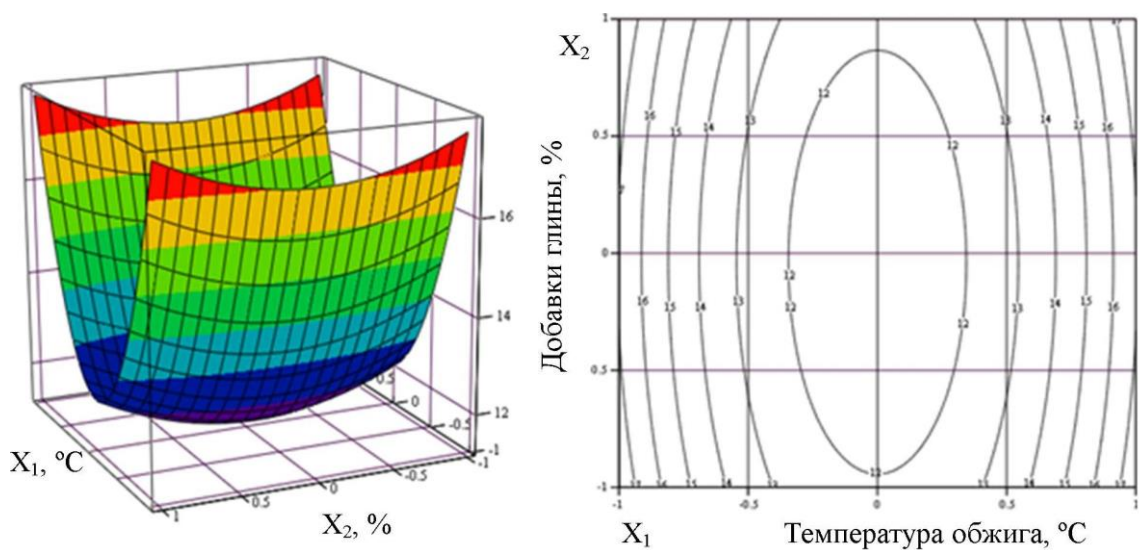


Рис. 2 Зависимость общей усадки от температуры обжига (X_1) и добавки глины (X_2) для фракции 0.315

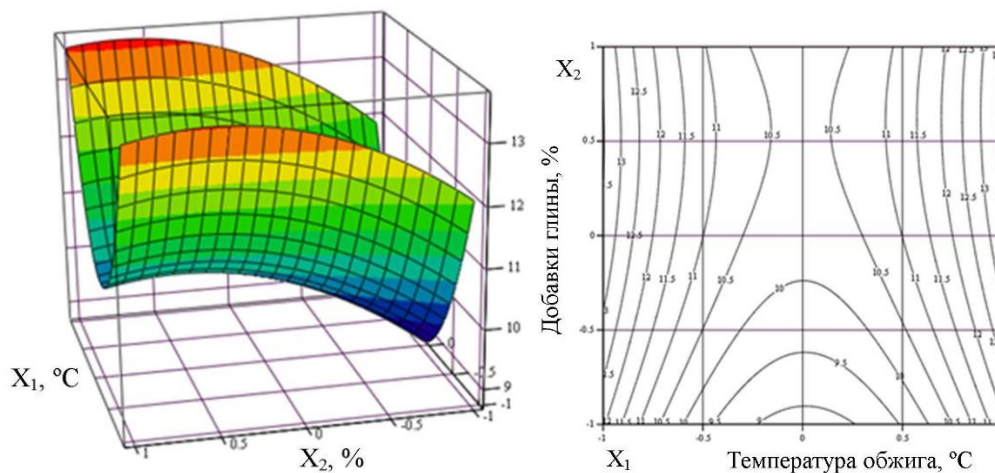


Рис. 3 Зависимость общей усадки от температуры обжига (X_1) и добавки глины (X_2) для фракции 0.63

3 Результаты и обсуждение. Согласно полученным уравнениям регрессии наибольшее положительное влияние на уменьшение общей усадки образцов керамического сырца оказывает фракция 0,16, причем это влияние действует и на фактор (B_1X_1) и на фактор (B_2X_2) эффективность последнего незначительна исходя из коэффициентов, представленных в таблице 1. Совместное взаимодействие факторов ($B_3X_1X_2$) имеет более существенное значение по сравнению с аналогичными составами на других фракциях[9-10].

Полученные данные по результатам исследований подтверждают наши предположения о существенном влиянии факторов (X_1 ; X_2) на общую усадку образцов керамического сырца и позволяют выявить определенные закономерности создания плотной структуры керамического черепка.

4 Выводы. На основании анализа результатов проведенной оптимизации при воздействии исследуемых факторов на общую усадку было установлено, что основное влияние на изучаемый показатель оказывает фракционный состав отсева 0,16. При этом варьируемые факторы подтверждают их существенное влияние на структуру керамических образцов из и позволяют установить закономерности создания плотного керамического черепка. Всё это делает отсева переработки терриконики весьма перспективным сырьём для получения высокоэффективных керамических блоков, являющихся наиболее востребованными стеновыми изделиями для современного строительства.

Библиографический список:

1. Yavruyan K.S., Characteristics of medium-dispersed products processing of waste heaps for production ceramic brick / K.S. Yavruyan, V.D. Kotlyar, Gayshun E.S. // Resource-efficient technologies in the construction complex of the region, Vol. 2 pp. 162-167, (2018)
2. Гайшун Е.С., Керамические камни из техногенного сырья угольного ряда/ Е.С. Гайшун// Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России. 2019. с. 235-236.
3. Kotlyar V.D., Wall ceramics on the basis of fine processing products of territorial / V.D.Kotlyar, H.S. Yavruyan // Building material, №4, pp. 38-41, (2017)
4. Явруян Х.С., Фазовые переработки при обжиге отсеков от переработки терриконики Восточного Донбаса / Х.С. Явруян, В.Д. Котляр, Е.С. Гайшун, Охотная А.С. // Строительные материалы 2019, №4, с. 3-7.

5. Гайшун Е.С. Стеновые керамические материалы на основе техногенного сырья угольного ряда / Е.С. Гайшун, А.С. Гайшун, Е.В. Ковалеристова, Х.С. Явруян. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2019, том 46, №1, с. 152-159.
6. Котляр В.Д. Отсевы дробления терриконигов Восточного Донбасса как сырье для производства строительной керамики /В.Д. Котляр, Х.С. Явруян, Е.С. Гайшун. // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности. 2018, с.82-84.
7. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры): [учеб. пособие] / Бондарь А.Г., Статюха Г.А., Потяженко И.А. – К.: Вища шк., 1980. – 264 с.
8. Халюшев А.К., Оптимизация режимов совместного измельчения композиционного цемента в шаровой планетарной мельнице / А.К. Халюшев, Н.А. Джамбеков, С.А. Джамалдинов, М.П. Нажуев, А.А. Чернильник, Н.А. Доценко. // Вестник евразийских наук 2019, Том 11, №3 с.50-58.
9. Serebryanaya I.A. Analysis of the Stress-Strain State of Ceramic Brick when Tested for Compressive Strength / I.A. Serebryanaya, A.A. Matrosov, N.A. Poryadina, A.N. Soloviev // Materials and Technologies in Construction and Architecture II. 2nd International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development" (CATPID-2019). Vol. 974, 2020. – Pp. 510-514.
10. Серебряная И.А. Математическое планирование при подборе состава строительных материалов/ И.А. Серебряная, Д.С. Серебряная. // Интеллектуальные технологии и проблемы математического моделирования: Материалы II Всерос. науч. конф. (Дивноморское, 30 сентября – 3 октября 2019 г.). – Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2019. – 42-43 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛЕГКОГО БЕТОНА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

Т.К. Зыонг¹, аспирант

А.С. Иноземцев¹, канд. техн. наук,

Е.В. Королев¹, доктор техн. наук, профессор

¹НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии», кафедра СМиМ, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Представлены перспективы использования высокопрочных легких бетонов на полых микросферах в качестве строительных «чернил» для технологии 3D-печати. Показано, что общей тенденцией для применяемых в 3D-печати материалах является использование мелкозернистых смеси на портландцементе с минеральными добавками, микрофиброй, противоусадочных химических добавок и регуляторов сроков схватывания. Растворы суперабсорбирующих полимеров с контролируемым процессом полимеризации могут быть использованы в цементных композитах для регулирования водного баланса с целью улучшения физико-механических свойств. Рациональное содержание таких САП в составе бетона ограничивается 1,0...1,5 % от массы портландцемента.

Ключевые слова: 3D-печать, высокопрочный легкий бетон, суперабсорбирующий полимер, усадка

Промышленная революция 4,0 способствует широкому применению компьютерных технологий, автоматизированных систем управления и робототехники в различных областях [1]. В развитых странах Америки, Европы и в России применение робототехники в строительстве получает все большее распространение. Одним из перспективных направлений развития строительной отрасли признается использование 3D-технологии для возведения зданий и сооружений [2...5]. Сегодня множество компаний выполняют исследования по разработке как оборудования (3D-принтеров), так и строительных материалов для них [6]. В качестве строительных «чернил» для 3D-принтеров применяются различные материалы, например: цементные композиты, пенополиуретан, керамику и т.д. Кроме того, существуют промышленные образцы зданий, возведенных из грунта, содержащего глину, ил, песок, измельченную рисовую солому, рисовую шелуху и известь [7].

Общей тенденцией для применяемых в 3D-печати материалов является использование мелкозернистых смесей на портландцементе с минеральными добавками, микрофиброй, противоусадочными химическими добавками и регуляторами сроков схватывания [6]. Наиболее распространенным материалом для такой технологии является тяжелый бетон средней плотностью 2100...2200 кг/м³ и прочностью при сжатии не менее 25 МПа. При этом, несмотря на то, что технология 3D-печати в основном используется для изготовления опалубки, пространство между рядами которой, заполняется конструкционным бетоном и теплоизоляционным материалом, например пенополистролом, все больше к ма-

териалу для экструзии предъявляются требования по функциональным свойствам [8].

Особенности климата и его прямого воздействия, как на свежееуложенный слой бетона, так и в процессе эксплуатации, а также необходимость энергосбережения для сохранения микроклимата помещений, обеспечивающего сохранение здоровья человека, позволяет заключить, что применение в 3D-печати полифункциональных материалов, сочетающих конструкционные и теплоизоляционные свойства, обеспечит функциональность печатных элементов строительных конструкций и повысит эффективность такой технологии.

Одним из материалов, обладающим универсальным сочетанием физико-механических, теплофизических и эксплуатационных свойств, является легкий бетон [9] на основе полых микросфер с оптимизированным цементно-минеральным составом и специальными добавками, обеспечивающих низкую среднюю плотность менее 1500 кг/м^3 и высокую прочность до 70 МПа. Несмотря на наличие в составе такого бетона армирующих волокон, важным является обеспечение внутреннего ухода за гидратацией цемента и снижение усадки вследствие большой открытой поверхности экструдированных слоев и соответствующей потере влаги.

В качестве одно из способов сохранения воды в композите предлагается применение суперабсорбирующих добавок, представляющих собой гранулы или волокна полимеризовавшегося геля [10, 11] размером более 200 мкм [12, 13], насыщенных водой и способных отдавать ее при необходимости. Опыт [13, 14] показывает, что применение суперабсорбирующих полимеров (САП) позволяет снизить усадку цементных композитов до 28 %. Однако наряду с этим наблюдается потеря прочностных характеристик, как в ранние сроки твердения, так и в марочном возрасте [14, 15]. Это объясняется особенностью структуры суперабсорбирующих полимеров, которая претерпевает существенную трансформацию при насыщении водой. Введение в состав цементного композита микроразмерных компонентов, способных деформироваться, теряя более 60 % массы, очевидно, приводит к формированию пустот и пор, являющихся искусственными дефектами структуры – наиболее слабых элементов в объеме материала.

Предположение об эффективности суперабсорбирующих полимеров для снижения усадки без потери прочностных характеристик может быть реализовано посредством исключения негативных факторов, вызванных их особенностями структуры. Как показано в [16] растворы САП с контролируемым процессом полимеризации могут быть использованы в цементных композитах для регулирования водного баланса с целью улучшения физико-механических свойств. Использование растворов САП позволяет повысить среднюю плотность и прочность на сжатие цементного камня. Наблюдается снижение пористости с 8,0 % до 3,3...3,5 % и повышение прочности цементного камня на сжатие с 58,0 МПа до 63,9...75,1 МПа или на 10,2...29,5 % по сравнению с составом без САП.

В таблице 1 представлены результаты исследования высокопрочных легких бетонов на полых микросферах средней плотностью 1400 кг/м^3 с раствором САП «Реновир-гидрогель» различной концентрации.

Видно, что в отличие от цементных смесей подвижность бетонных смесей высокопрочного легкого бетона при введении САП уменьшается. Увеличение содержания полиакрилатов до 2,3 % от массы портландцемента приводит к снижению диаметра расплыва смеси на 20 %. Такая закономерность может быть связана с существенным вкладом пластификатора в обеспечение реологических свойств таких композиций. При этом каждый из исследуемых составов имеет достаточную для выполнения технологических операций подвижность смеси $D_p > 150$ мм [17], обеспечивая формуемость слоя при экструзии и сохранение его формы после устройства следующего слоя.

Таблица 1. Реологические свойства смесей и физико-механические свойства высокопрочного легкого бетона с раствором САП

№ п/п	$\Sigma А/Ц$, %	D_p , мм	$\rho_{ср}$, кг/м ³	$R_{изг}$, МПа	$R_{сж}$, МПа	ϵ , мм/м
1	–	225	1370	5,50	45,3	12,2
2	0,4	212	1360	5,60	45,2	11,6
3	0,8	199	1360	5,80	47,8	10,2
4	1,5	181	1355	6,85	47,6	10,0
5	2,3	180	1355	6,35	44,2	9,5
6	3,9	170	1325	6,00	37,1	8,9

Примечания: D_p — диаметр расплыва конуса, $\rho_{ср}$ — средняя плотность, $R_{изг}$ — предел прочности при изгибе, $R_{сж}$ — предел прочности при сжатии, ϵ — относительная деформация в возрасте 21 сутки.

Установлено, что использование раствора САП в количестве 0,5...1,0 % от массы портландцемента обеспечивает наименьшее снижение прочности бетона. В возрасте 28 суток твердения в неблагоприятных условиях (температура 25...27 °С и влажность 50...60 %) прочность при изгибе таких бетонов изменяется в диапазоне 5,5...5,8 МПа, а прочность при сжатии — 45,3...47,8 МПа. Содержание акрилатной части до 2,3 % от массы портландцемента в составе бетона обеспечивает увеличение предела прочности при изгибе до 17 %, что может быть связано с формированием полимерных пленок или волокон, выполняющих после десорбции функцию армирующей добавки. При этом увеличение ее содержания более 1,5 % от массы портландцемента характеризуется снижением предела прочности при сжатии до 8,5 %. Отсюда допустимое количество САП в составе бетона ограничивается 1,0...1,5 % от массы портландцемента.

Исследования деформаций усадки высокопрочного легкого бетона с помощью компаратора после экспозиции в течение 28 суток в условиях интенсивной потери влаги в вентилируемой климатической камере показали возможность снижения деформаций усадки высокопрочных легких бетонов на 25 % за счет введения САП. Использование раствора САП даже в незначительных количествах (до 0,25 % от массы портландцемента) приводит к снижению деформации усадки на 26,9 %. Максимальное снижение усадки по сравнению с контрольным составом достигается при содержании САП в количестве 2,3 %. С учетом изменения реологических и физико-механических свойств, варьирование содержания САП в диапазоне 0,8...1,5 % от массы портландцемента обеспечивает наилучшую величину усадки.

Таким образом, применение полифункциональных материалов как высокопрочный легкий бетон совместно с раствором суперабсорбирующего полимера для технологии 3D-печати в строительстве позволяет обеспечивать требуемые прочностные характеристики и снизить усадочные деформации композита. В совокупности представленные решения позволяют повысить эффективность использования технологии 3D-печати. Расчеты [7] показывают, что для строительной печати технико-экономическая эффективность составляет 33,0...53,8 %.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-1394.2020.8.

Библиографический список:

1. Snudden, J. Progression to the next industrial revolution: Industry 4.0 for composites // Reinforced Plastics. 2019. Vol. 63. Iss. 3. P. 136-142.
2. Zhang, J. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting / J. Zhang, V. Khoshnevis // Automation in Construction. 2013. Vol. 29. P.50-67.
3. Лесовик, В.С. Формирование свойств композиций для строительной печати / В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, Е.С. Глаголев, С.В. Шаталова, М.С. Стариков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 6-14.
4. Мухаметрахимов, Р.Х. Нормативное регулирование аддитивных технологических процессов в строительстве / Р.Х. Мухаметрахимов, Л.В. Лукманова // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2019. № 11. С. 282-286.
5. Ватин, Н.И. 3D-печать в строительстве / Н.И. Ватин, Л.И. Чумадова, И.С. Гончаров, В.В. Зыкова, А.Н. Карпеня, А.А. Ким, Е.А. Финашенков // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 27-46.
6. Иноземцев, А.С. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Т.К. Зыонг // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 863-876.
7. Inozemtcev, A.S. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete / A.S. Inozemtcev, T.Q. Duong // E3S Web of Conferences 2019. Vol. 97. P. 02010.
8. Nerella, V.N. Chapter 16 - Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D) / V.N. Nerella, V. Mechtcherine // 3D Concrete Printing Technology. 2019. P. 333-347.
9. Патент РФ 2515450. Высокопрочный легкий бетон / Королев Е.В., Иноземцев А.С. Оpubл. 10.05.2014.
10. Cusson, D. Practical Applications of Superabsorbent Polymers in Concrete and Other Building Materials / D. Cusson, V. Mechtcherine, P. Lura // RILEM State of the Art Reports 2, Dordrecht: Springer. P.137-148.
11. Dang, J. Effect of Superabsorbent Polymer on the Properties of Concrete / J. Dang, J. Zhao, Z. Du // Polymers. 2017. Vol. 9 (12). P. 672.
12. Kim, J.H. Influence of internal curing on the pore size distribution of high strength concrete / J.H. Kim, S.W. Choi, K.M. Lee, Y.Ch. Choi // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 192. P. 50-57.
13. Junhong, Sh. Influence of Super Absorbent Polymer on the Mechanical Property of High Performance Concrete / Sh. Junhong, G. Shaowu // International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering (ISM3E 2015). 2015. P. 154-157.

14. Лесовик, В.С. Повышение эффективности текстиль-бетона / В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4 (33). С. 10-16.
15. Shi, C. Effect of Super-Absorbent Polymer on Shrinkage and Permeability of Self-Compacting Concrete (SCC) / C. Shi, J. Liu, K. Lv, X. Ma, J. Zhang // Conference: 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2016. 2016. P. 73-88.
16. Inozemtcev, A.S. Physical and mechanical properties of cement stone with superabsorbent polyacrylate solutions / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, T.Q. Duong // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 5 (89). С. 179-186.
17. Inozemtcev, A.S. High-Strength Lightweight Concrete Mixtures Based On Hollow Microspheres: Technological Features and Industrial Experience Of Preparation / A.S. Inozemtcev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tomsk: TSUAB. 2015. С. 012028.

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Е.А. Карпова¹, аспирант

Г. Скрипкюнас¹, д-р техн. наук, профессор

Г.И. Яковлев², д-р техн. наук, профессор

¹*Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса*

²*Ижевский государственный технический университет им. М.Т.Калашиникова*

Аннотация. С развитием нанотехнологий, значительное количество исследований посвящено модификации бетонов углеродными нанотрубками (УНТ). Однако, эффект УНТ на свойства бетонной смеси и механизмы, обуславливающие данный эффект, до конца не изучен. Данное исследование посвящено оценке реологических параметров цементного теста, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) в сочетании с пластифицирующими добавками разного генезиса. Реологический тест проводился с помощью ротационного реометра с коаксиальными цилиндрами. Аппроксимация экспериментальных кривых течения проводилась в соответствии с моделью Гершеля-Балкли. В ходе исследования было установлено, что модификация цементных тест МУНТ ведет к увеличению предельного напряжения и вязкости. При увеличении дозировки МУНТ свыше 0,06 и 0,015 % от массы цемента, предельное напряжение и вязкость увеличились на 265 и 107 %, соответственно, в цементных тестах пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором.

Ключевые слова: цементное тесто; углеродные нанотрубки; пластификатор; реология; вязкость; предельные напряжения.

Развитие высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей требует оценки реологических параметров с целью прогнозирования и улучшения технологических свойств данных смесей [1-4]. Управление свойствами бетонной смеси может осуществляться путем ее модификации минеральными, химическими и нанодобавками, а также комплексными добавками на их основе.

Уникальные свойства нанодобавок позволяют управлять структурой и свойствами материалов на основе цемента. Одним из перспективных наномодификаторов являются углеродные нанотрубки (УНТ). Ряд исследований подтверждают повышение прочности, улучшение микроструктуры и параметров долговечности наномодифицированных композитов [5-7]. Большая часть исследований посвящена эффекту УНТ на свойства бетонов и растворов в затвердевшем состоянии, в то время как эффект УНТ на свойства цементных паст, растворов и бетонных смесей остается не до конца изученным. Тем не менее, ряд немногочисленных исследований, посвященных изучению реологических характеристик наномодифицированных цементных систем, демонстрируют тенденцию УНТ к увеличению реологических параметров [8, 9].

Данное исследование посвящено оценке влияния суспензии многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) в сочетании с пластифицирующими добавками на вязкость, предельные напряжения и показатель нелинейности (индекс тиксотропии/дилатансии) цементного теста.

Изучение реологических свойств цементных тест проводилось на основе Портландцемента без минеральных добавок марки ЦЕМ I 42,5 Б. Пластифици-

рующие добавки на основе лигносульфоната (ЛС), нафталин формальдегид сульфата (НФ) и эфира поликарбоксилата (ПКЭ), со свойствами представленными в Таблице 1, были использованы для пластификации цементного теста. Суспензия МУНТ готовилась на основе гранул "Graphistrength CW 2-45" ("Arkema", Франция). Данные гранулы состоят из 45 % МУНТ и 55 % карбоксиметилцеллюлозы, используемой в качестве диспергирующего агента при приготовлении суспензии МУНТ. МУНТ, входящие в состав данных гранул, имеют диаметр около 15-20 нм и длину порядка 0,1-10 мкм.

Гранулы "Graphistrength CW 2-45" без и в сочетании с пластифицирующей добавкой, вода, нагретая до температуры не менее 75°C, перемешивались миксером (1000 об/мин) в течение 5 мин. Затем производилась ультразвуковая обработка с помощью ультразвукового гомогенизатора Bandelin Sonopuls HD 3400 (400 Вт, 20 кГц) с зондом VS 200 T (Ø 25 мм, амплитуда - 82 мкм) в течение 6 мин.

Таблица 1. Свойства пластифицирующих добавок

Характеристика	ЛС	НФ	ПКЭ
Форма	жидкость	жидкость	жидкость
Цвет	темно-коричневый	желтый	желтый
Сухое вещество, %	30-40	40-50	50
Плотность, г/мл	1,14	1,20	1,10
рН	4,3	9,1	4,9
Электропроводность, мСм/см	1,93	3,59	0,91
Рекомендуемая дозировка, % от массы цемента	0,4-1,2	0,5-2,0	0,2-2,0

Реологический тест проводился ротационным реометром Rheotest RN 4.1 с коаксиальными цилиндрами при температуре (20±2)°С. Скорость сдвига изменялась согласно специально подобранному режиму от 100 до 0,1 с⁻¹. Для приготовления цементного теста использовалось 200 г цемента. Полученная МУНТ суспензия без и с пластифицирующей добавкой использовалась в качестве воды затворения. Дозировка МУНТ варьировалась от 0 до 0,24 % от массы цемента, дозировка пластификатора для всех цементных паст была равной 1 % от массы цемента. В/Ц отношение было равным 0,30 и 0,25 для наномодифицированных цементных паст без пластификатора и с пластификатором, соответственно. Перемешивание цемента и суспензии проводилось согласно стандартной методике в течение 3 мин.

Аппроксимация экспериментальных кривых течения проводилась согласно модели Гершеля-Балкли, которая описывается уравнением:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

где τ - напряжение сдвига, Па; τ_0 - предельное напряжение цементной пасты, Па; μ - пластическая вязкость, Па·с; $\dot{\gamma}^n$ - скорость сдвига, с⁻¹; n - показатель нелинейности: тиксотропии или дилатансии, при $n < 1$ или $n > 1$, соответственно.

На Рис. 1 представлены изменения в предельных напряжениях и пластической вязкости цементных паст, модифицированных суспензией МУНТ. Увеличение дозировки МУНТ от 0 до 0,12 % от массы цемента привело к увеличению

предельного напряжения на 17 % и пластической вязкости на 6 % по сравнению с контрольным образцом без добавок.

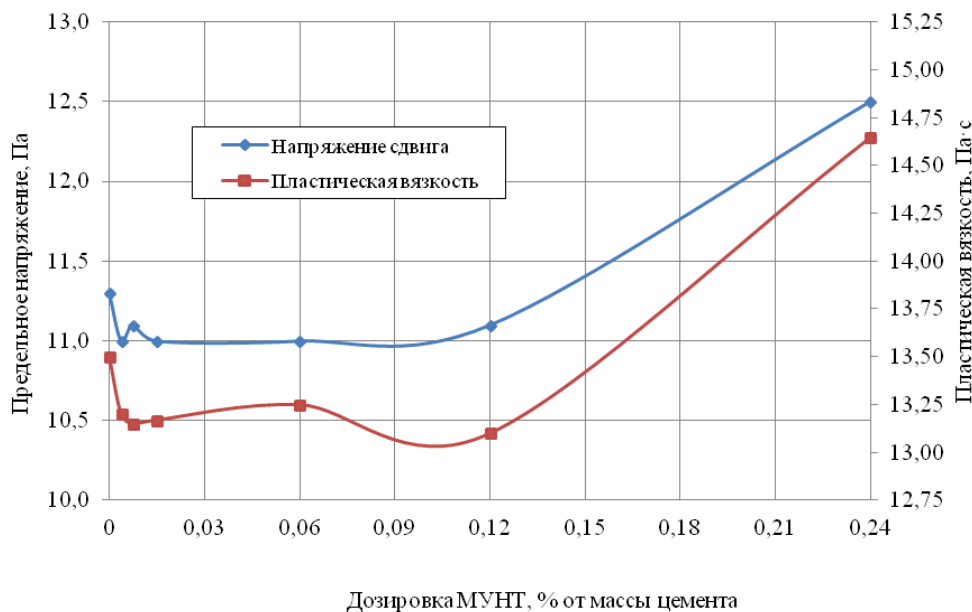


Рис. 1. Пределное напряжение и пластическая вязкость цементной пасты модифицированной суспензией МУНТ

Комплексная модификация цементного теста суспензией МУНТ с ЛС вызвало увеличение предельного напряжения и пластической вязкости с дозировки МУНТ 0,06 % от массы цемента. Максимальное увеличение предельного напряжения и пластической вязкости на 11 % и 9 %, соответственно, было установлено при увеличении дозировки МУНТ до значения 0,24 % от массы цемента (Рис.2).

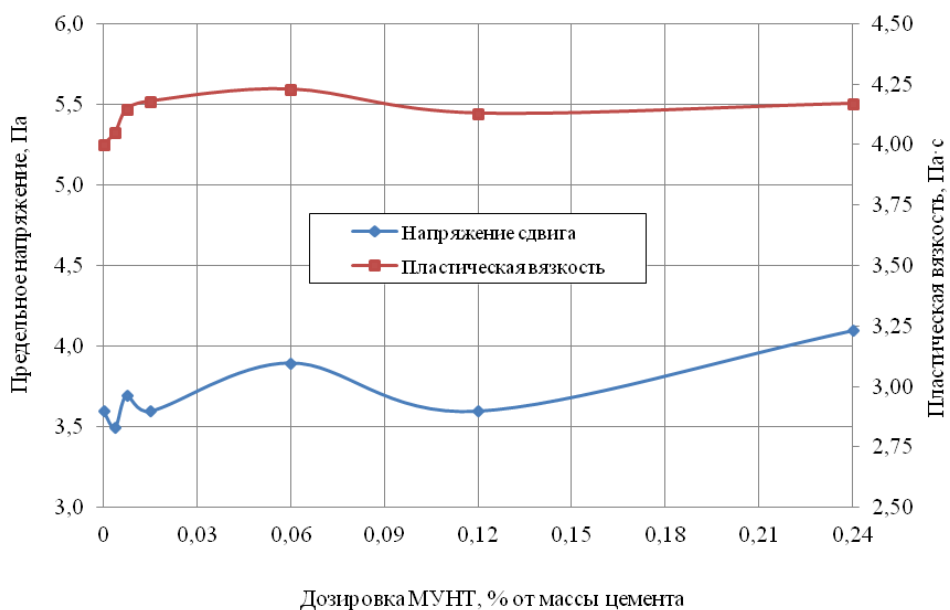


Рис. 2. Пределное напряжение и пластическая вязкость цементной пасты модифицированной суспензией МУНТ и ЛС

Модификация цементного теста суспензией МУНТ и НФ при дозировке МУНТ до 0,06 % от массы цемента привела к снижению предельного напря-

жения и пластической вязкости по сравнению с контрольным образцом без суспензии (Рис.3). Свыше дозировки МУНТ, равной 0,06 % от массы цемента, наблюдалось незначительное увеличение предельного напряжения и пластической вязкости. При дозировке МУНТ 0,24 % от массы цемента, предельное напряжение и пластическая вязкость увеличились до значений контрольного образца (цементное тесто, пластифицированное НФ, без МУНТ).

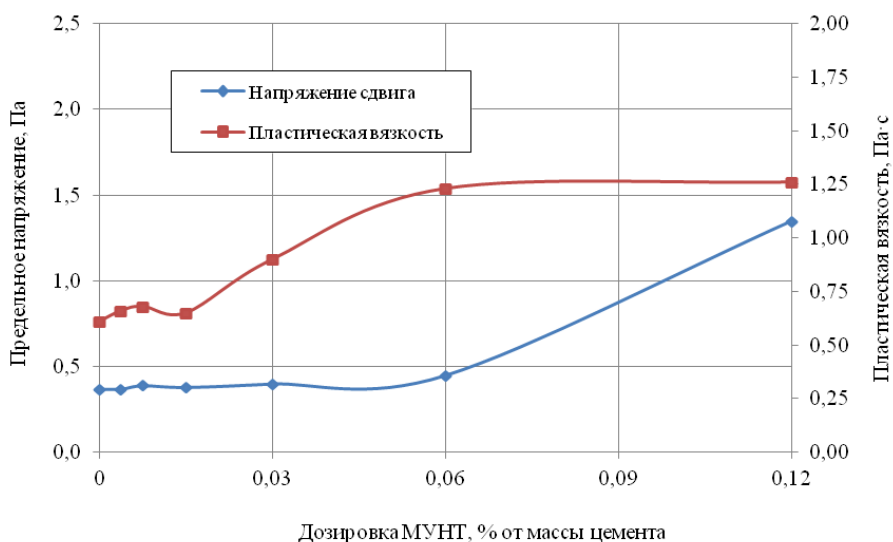


Рис. 3. Предельное напряжение и пластическая вязкость цементной пасты модифицированной суспензией МУНТ и НФ

Наиболее значительный эффект на реологические свойства цементного теста при введении МУНТ был отмечен в случае комплексной модификации МУНТ и ПКЭ. Предельное напряжение значительно увеличивалось с МУНТ дозировки свыше 0,06 % от массы цемента. Максимальное увеличение предельного напряжения на 265 %, по сравнению с контрольным образцом, было зафиксировано для МУНТ дозировки равной 0,24 % от массы цемента

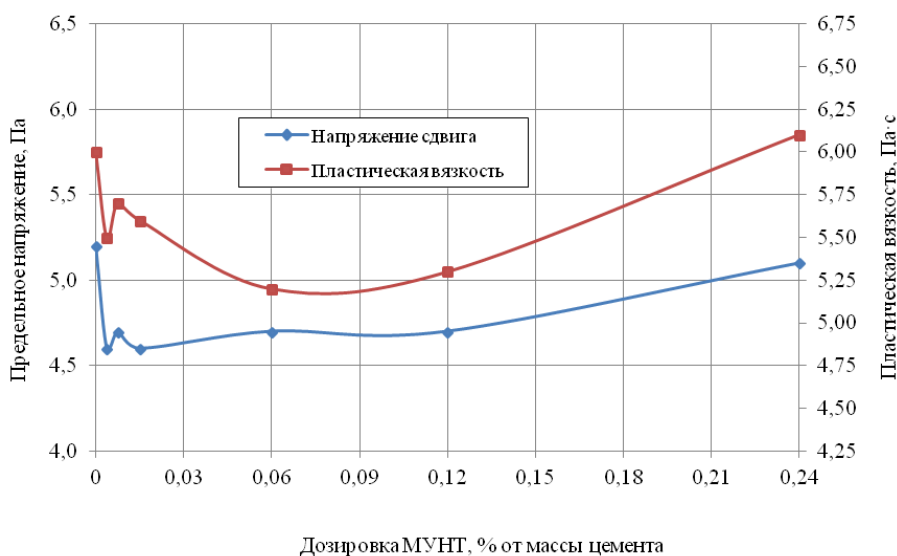


Рис. 4. Предельное напряжение и пластическая вязкость цементной пасты модифицированной суспензией МУНТ и ПКЭ

Пластическая вязкость цементного теста, модифицированного МУНТ суспензией в сочетании с ПКЭ пластификатором, увеличивалась с МУНТ дозировки, равной 0,015 % от массы цемента. Увеличение МУНТ дозировки до 0,24 % от массы цемента привело к росту пластической вязкости на 107 % по сравнению с контрольным образцом (Рис.4).

Наряду с оценкой предельного напряжения и пластической вязкости наномодифицированных цементных систем, устанавливался показатель нелинейности. Значения показателя нелинейности для исследуемых цементных паст представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Показатели нелинейности наномодифицированных цементных паст

Дозировка МУНТ, % от массы цемента	Без пластификатора	ЛС	НФ	ПКЭ
Контрольный *	0,965	0,720	0,830	1,190
0,00375	0,935	0,700	0,790	1,190
0,0075	0,963	0,740	0,820	1,200
0,015	0,968	0,715	0,780	1,190
0,030	0,840	0,745	0,860	1,180
0,060	0,980	0,650	0,797	1,175
0,120	0,975	0,720	0,785	1,170
0,240	0,985	0,780	0,835	н.о.

* В ходе реологических тестов пластифицированных цементных тест, в качестве контрольного образца была взята цементная паста с пластификатором без МУНТ суспензии

Согласно данным Таблицы 2, цементные пасты, модифицированные МУНТ суспензией без пластифицирующей добавки и с ЛС, НФ пластификаторами, обладают тиксотропным характером течения. В то время как цементные пасты с ПКЭ обладают дилатантным поведением. Важно отметить, что характер течения не зависит от введения МУНТ в цементное тесто, а определяется главным образом типом пластифицирующей добавки. Однако, в случае применения ПКЭ следует отметить снижение дилатантности цементного теста при введении МУНТ в дозировке выше 0,03 % от массы цемента.

Таким образом, модификация цементных тест МУНТ приводит к увеличению предельного напряжения и пластической вязкости и не оказывает влияния на характер течения, за исключением случая комплексной модификации МУНТ и ПКЭ. Определяющую роль при комплексной модификации цементных тест МУНТ и пластифицирующими добавками, играет тип пластифицирующей добавки. Наибольшие изменения в предельных напряжениях и пластической вязкости были установлены для цементных тест, модифицированных МУНТ в сочетании с ПКЭ пластификатором.

Библиографический список:

1. Перцев, В.Т., Леденев, А.А., Усачев, С.М., Усачев, А.М. Оценка реологических свойств строительных смесей с получением дополнительных количественных характеристик// Конденсированные среды и межфазные границы. 2016. Т.18, №3. С. 394-401.
2. Lomboy, G.R., Wang, X., Wang. K. Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC, and NC mixtures// Cement and Concrete Composites. 2014. №54. P. 110-116.

3. Иноземцев, А.С., Королев, Е.В., Т. К. Зыонг. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбонатным пластификатором// Региональная архитектура и строительство. 2019. №3. С. 24-34.
4. Торшин, А.О., Боровикова, С.О., Потапова, Е.Н. Изменение реологических свойств цементных растворов в присутствии добавок// Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31, №1. С. 46-48.
5. Перцев, В. Т., Перова, Н. С., Леденев, А. А., Загоруйко, Т. В. Влияние наноструктурирующих компонентов на характеристики цементного камня и свойства высокопрочных и термостойких бетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. №3. С. 163-171.
6. Хрусталева, Б. М., Леонович, С. Н., Яковлев, Г. И., Полянских, И. С., Лахайн, О., Эберхардштайнер, Й., Скрипкюнас, Г., Пудов, И.А., Карпова, Е. А. Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема// Наука и техника. 2017. № 16(2). С. 93-103.
7. Ибрагимов, Р.А., Киямова, Л.И. Микроструктура цементного камня, модифицированного углеродными нанотрубками// Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №5. С. 71-73.
8. Ma, S., Y. Qian, Kawashima, S. Performance-based study on the rheological and hardened properties of blended cement mortars incorporating palygorskite clays and carbon nanotubes// Construction and Building Materials. 2018. № 171. P. 663-671.
9. Jiang, S., Shan, B., Ouyang, J., Zhang, W., Yu, X., Li, P., Han, B. Rheological properties of cementitious composites with nano/fiber fillers. Construction and Building Materials. 2018. № 158. P. 786-800.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Козлова¹, канд. техн. наук

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

М.О. Дударева¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. В статье рассмотрены синергетические подходы к созданию эффективных строительных материалов. Наиболее отчетливо синергизм прослеживается в многокомпонентных системах, где каждая отдельная составляющая работает в комплексе, что приводит к созданию материала с повышенными эксплуатационными свойствами. Отмечено, что введение нано- и ультрадисперсных добавок в комплексе с пластификаторами в цементную систему способствует самоорганизации процесса твердения цементного камня с получением его повышенных прочностных и структурных характеристик, что свидетельствует о реализации одного из синергетических подходов строительного материаловедения. Также приведены различные строительные материалы, в которые для повышения заданных характеристик и экономии вяжущего материала вводятся отходы металлургических, топливно-энергетических, химических и других производств, в том числе рассматривается рециклинг бетонных изделий и бетонных смесей. Установлено, что комплексное использование отходов в производстве строительных материалов можно рассматривать как синергетический подход в создании эффективных строительных материалов.

Ключевые слова: синергизм, компонент, цементный камень, структура, отходы производства, рециклинг.

Понятие синергизм используется в различных областях науки и техники. Для строительного материаловедения его можно интерпретировать в следующем ключе, как усиление двух и более параметров при комбинированном использовании различных компонентов, обеспечивающий функциональность и эффективность характеристик композиционных строительных материалов.

При рассмотрении многокомпонентных систем явление синергизма прослеживается как само собой разумеющееся. Компоненты системы работают в комплексе, усиливая тот или иной параметр, что приводит к созданию высокоэффективного материала. В качестве примера могут служить сульфоалюминатные и сульфоферритные клинкеры, на основе которых получены расширяющиеся, сверхбыстротвердеющие, коррозионостойкие цементы [1-5].

К высокоэффективным материалам, подчиняющимся закономерностям синергетики можно отнести железобетонные изделия, в частности, сталефибробетон, а применение при его производстве тепловлажностной обработки усиливает эффективность этого материала. Установлено, что применение оптимального режима тепловлажностной обработки к подобранному составу бетонной системы получают объемно-преднапряженные сталефибробетоны с повышенными прочностными характеристиками. Прочность экспериментальных образцов выше на 25% по сравнению с контрольным образцом, твердевшим при нормальных условиях [6-7].

Процессы, протекающие при гидратации в цементных композициях, подчиняются законам самоорганизации, что приводит к оптимальному функциони-

рованию твердеющей системы, сопровождающемуся процессами самодотраивания цементного каркаса с последующим самоармированием структуры цементного камня образующимися кристаллогидратными новообразованиями.

При введении нано- и ультрадисперсных компонентов в состав цемента наблюдаются процессы саморегулирования структуры цементного камня. Нано- и ультрадисперсные компоненты равномерно распределяясь в объеме цементной матрицы, управляют процессами формирования структуры цементного камня, концентрируют вокруг себя новообразования. Такая направленная кристаллизация позволяет регулировать свойства полученных материалов, например снижать пористость, увеличивать прочность, снижать усадку материала [8-13].

Равномерности распределения нано- и ультрадисперсных материалов в цементной системе добиться достаточно сложно. Для этого нано- и ультрадисперсные частицы компонентов цементной системы стабилизируют, например пластифицирующими добавками [14-18]. Пластификаторы адсорбируются на поверхности нано- и ультрадисперсных частиц и препятствуют протеканию процессов агрегации, которые вызывают деструкцию цементной матрицы и ухудшают свойства материала. Таким образом, применение пластифицирующих добавок в комплексе с нано- и ультрадисперсными компонентами в составе цементной системы реализуют один из синергетических подходов строительного материаловедения.

С каждым годом в нашей стране уделяется особое внимание экологии, энерго- и ресурсосбережению. Остро стоит вопрос утилизации бытовых и промышленных отходов, а также захоронения радиоактивных отходов.

В производстве строительных материалов используются отходы металлургических (доменные гранулированные и сталеплавильные шлаки, шламы), топливно-энергетических (золы- уносы и золошлаковые отходы ТЭС) и химических (фосфогипс, борогипс) производств, отходы сухих и мокрых способов обогащения полезных ископаемых, отходы переработки древесины, отходы переработки нефти, отходы собственных производств и т.д.

Применение доменных гранулированных шлаков способствует повышению ряда свойств: водостойкости, коррозионной устойчивости, жаропрочности материала. Изделия на основе шлакопортландцемента используются в гидротехническом строительстве, при строительстве магистралей и дорог [19-21]. Композиционные материалы на основе молотых металлургических шлаков и глины применяются в производстве жаростойких изделий [22-24]. Также в работе [25] установлено, что дисперсность и расход шлака оказывают влияние на получение самоуплотняющейся бетонной смеси с улучшенной удобоукладываемостью.

Использование золы-уноса и золошлаковых отходов также способствует улучшению ряда свойств строительным материалам. При производстве грубой строительной керамики с применением золы-уноса Новочеркасской ГРЭС отмечено улучшение формовочных свойств глинистого сырья и снижение средней плотности материалов [26].

В работе [27] установлено, что применение органоминеральной добавки, приготовленной на основе золы-уноса, кремнезема и пластификатора на поли-

карбоксилатной основе, в бетоне повышает его прочность и коррозионную устойчивость, что может быть использовано при строительстве морских гидротехнических сооружений.

Применение золы-уноса в комплексе с битумом способствует улучшению гидротехнических свойств газобетона. Остаточная влажность, водопоглощение и капиллярный подсос снизились на 30%, 38-39% и на 30-32 %, соответственно, что свидетельствует о получении конкурентноспособного на рынке материала [28].

В работе [29] показано, что применение золошлаковых отходов в качестве смешанного заполнителя с песком при производстве бетона является, во-первых, экономически выгодным за счет экономии цемента; во-вторых, приводит к получению нового композиционного материала, обладающего повышенными реологическими свойствами, прочностными характеристиками и технологическими показателями (морозостойкость и водонепроницаемость).

Такой отход производства как фосфогипс используется в качестве наполнителя при производстве фосфогипсполимерных плит. Его вводят в бездобавочный гипс в количестве 20-70 %. Полученный материал обладает повышенными прочностными характеристиками, сопоставимыми с прочностью природного мрамора, и повышенной атмосферо- и коррозионной устойчивостью [30-31].

В работе [32] приводится использование бурового шлама в качестве компонента при производстве стенового керамического материала, что способствует повышению его теплотехнических свойств.

В работе [33] показано, что применение древесной пыли в цементном композите приводит к снижению гидратации и твердения материала. Это связано с наличием в древесине легкорастворимых в воде сахаридов, которые легко вымываются из неё водой и при попадании в цементное тесто образуют оболочки, иммобилизирующие доступ воды к частицам цемента. В работе [34] рассмотрена возможность получения не цементнодревесного композита, а гипсодревесного, обладающего теплоизоляционными свойствами. В ходе эксперимента доказано, что водорастворимые вещества на твердение гипсового камня влияния не оказывают, если измельченную древесину породы береза обработать методом акустической кавитации и устранить полученные в результате экстракции соединения. Вследствие проведенных манипуляций прочность гипсодревесного композита имеет значения, сопоставимые со значениями бездобавочного гипсового вяжущего.

Перспективным направлением в производстве строительных материалов является рециклинг, который берет свое начало из древности. Еще при восстановлении Древнего Карфагена использовали строительные материалы, взятые из городских развалин. В настоящее время по всей стране, в большей степени в крупных городах, запущены программы реновации жилья, в связи с чем образуется большое количество бетонного лома, который надо утилизировать. Поэтому применение бетонных отходов в качестве наполнителей способствует, в первую очередь, удешевлению производства бетонных изделий, во-вторых, не полностью прореагировавшие частицы цемента в комплексе с пластификаторами могут служить активаторами твердения, что привет к созданию нового клас-

са композиционных материалов [35-38]. В работе [39] показана возможность применения цементных суспензий, полученных от промывки бетоносмесителей при неполном рециклинге бетонных смесей, позволяющая также получать новые композиционные материалы с улучшенными свойствами.

Таким образом, в зависимости от используемых отходов в строительном материаловедении можно решать сразу две глобальные задачи: улучшать экологическую обстановку и управлять структурообразованием и свойствами композиционных материалов, что также является синергетическим подходом строительного материаловедения.

Захоронение радиоактивных отходов является актуальной задачей, над которой работают многие ученые-материаловеды, например, Ю.М. Баженов, Е.В. Королев, П.Г. Комохов, Ю.В. Пухаренко, Ю.А. Соколова и др. Разработаны строительные материалы на основе соединений серы, фуллерен-шунгита, карбида бора, позволяющие забетонировать токсичные и радиоактивные отходы [40-41]. Также эти материалы могут быть использованы не только для утилизации радиоактивных отходов, но и для применения в производстве изделий и конструкций с повышенными требованиями к прочности, коррозионной стойкости, водонепроницаемости и т.д., что позволяет рассматривать их с позиции синергизма, характерного для строительного материаловедения.

Рассмотренные варианты строительных материалов и компонентов, входящих в их состав, позволяют судить о создании различных композиций с комбинацией диаметрально различающихся функциональных характеристик, подчиняющимся законам синергетики.

Библиографический список:

1. Кузнецова, Т.В. Состав, свойства и применение сульфоалюминатного цемента / Т.В. Кузнецова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. Т.4. № 1. С.1-7.
2. Samchenko, S.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation / S.V. Samchenko, T.V. Kouznetsova // Cement, Wapno, Beton. 2014. Т. 2014. № 5. С. 317-322.
3. Самченко, С.В. Сульфоалюмоферритные цементы / С.В. Самченко // Цемент. 1986. № 3. С. 11-12.
4. Самченко, С.В. Коррозионностойкие цементы на основе сульфатированных клинкеров / С.В. Самченко // Сухие строительные смеси. 2013. № 2. С. 26-27.
5. Самченко, С.В. Сульфатостойкие композиционные цементы / С.В. Самченко // В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. С. 137-144.
6. Соловьев, В.Г. Особенности формирования структуры сталефибробетона при тепловой обработке / В.Г. Соловьев, А.Ф. Бурьянов, Х.Б. Фишер // Строительные материалы. 2015. № 9. С. 43-46.
7. Соловьев, В.Г. Особенности производства сталефибробетонных изделий и конструкций / В.Г. Соловьев, А.Ф. Бурьянов, М.С. Елсуфьева // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 18-21.
8. Самченко, С.В. Влияние дисперсности шлакового компонента на свойства шлакопортландцемента / С.В. Самченко, О.В. Земскова, И.В. Козлова // Техника и технология силикатов. 2016. Т. 23. № 2. С. 19-23.
9. Самченко, С.В. Влияние высокодисперсных шлаков на свойства шлакопортландцемента / С.В. Самченко, И.В. Козлова // В сборнике: Строительство – формирование среды жизнедеятельности. Сборник докладов Шестнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2013. С. 508-510.

10. Самченко, С.В. Влияние дисперсности расширяющегося компонента на свойства цемента / С.В. Самченко, Д.А. Зорин // Техника и технология силикатов. 2006. Т. 13. № 2. С. 2-7.
11. Кривобородов, Ю.Р. Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента / Ю.Р. Кривобородов, А.А. Еленова // Строительные материалы. 2016. № 9. С. 65-67.
12. Кузнецова, Т.В. Модифицирование портландцемента для устранения усадки бетона / Т.В.Кузнецова, Д.Я. Френкель, Ю.Р. Кривобородов // Цемент и его применение. 2007. № 4. С. 54-55.
13. Смирнова, О.М. Использование тонкодисперсных минеральных наполнителей для получения бетона с высокой ранней прочностью / О.М. Смирнова // В сборнике: Шаг в будущее (неделя науки-2010). Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Сборник научных статей секции молодых исследователей. 2010. С. 65-67.
14. Samchenko, S. Efficiency of stabilization of slag suspensions by polycarboxylate / S. Samchenko, I. Kozlova, O. Zemskova, D. Potaev, D. Tsakhilova // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. №. 02039. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102039.
15. Samchenko, S. Model and mechanism of carbon nanotube stabilization with plasticizer / S. Samchenko, I. Kozlova, O. Zemskova // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. № 03050. DOI: 10.1051/matecconf/201819303050.
16. Самченко, С.В. Модель и механизм стабилизации углеродных нанотрубок пластификатором на поликарбоксилатной основе / С.В. Самченко, О.В. Земскова, И.В. Козлова // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 7 (106). С. 724-732.
17. Самченко, С.В. Влияние суперпластификатора на морфологию кристаллов этtringита / С.В. Самченко, Е.М. Макаров // Техника и технология силикатов. 2015. Т. 22. № 2. С. 17-21.
18. Самченко, С.В. Влияние пластификатора на процессы перекристаллизации при твердении алюмината кальция / С.В. Самченко, С.Ю. Кривобородова // Техника и технология силикатов. 2017. Т. 24. № 3. С. 25-30.
19. Ахвердиева, Т.А. Влияние тонкомолотых минеральных добавок на свойства бетона / Т.А. Ахвердиева, Р. Джафаров // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 73.
20. Резванцев, В.И. Комплексное применение доменного шлака при строительстве конструкций дорожных одежд / В.И. Резванцев, В.Г. Еремин, Е.В. Матвеев, А.В. Еремин, В.П. Волокитин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. № 9 (20). С. 30-32.
21. Чудинов, С.А. Технология комплексной переработки металлургических шлаков для дорожного строительства / С.А. Чудинов, В.Н. Дмитриев., А.М. Хохлов // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. 2014. № 5 (64). С. 116-123.
22. Батынова, А.А. Анализ огнеупорных свойств композитов на основе металлургических шлаков и глин / А.А. Батынова, Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 1. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/01/43495> (дата обращения: 20.09.2020).
23. Тарасов, Р.В. Эффективный жаростойкий материал на основе модифицированного глиношлакового вяжущего / Р.В. Тарасов: канд. диссертация. – ПГАСА, 2002.-150 с.
24. Калашников, В.И. Новый жаростойкий материал для футеровки промышленных печей / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, Р.В. Тарасов, Д.В. Калашников // Строительные материалы. – 2003. – №11. – С.40-42.
25. Смирнова, О.М. Влияние дисперсности и расхода шлака на удобоукладываемость самоуплотняющейся бетонной смеси / О.М. Смирнова, К.В. Никольский, Е.В. Андреева // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2015. № 5. С. 137-139.
26. Козлов, А.В. Изучение свойств золы-уноса Новочеркасской ГРЭС и поиск области ее применения / А.В. Козлов, Д.А. Захаров, И.О. Животков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 12-17.

27. Лам, Т.В. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений / Т.В. Лам, Н.С. Хунг, В.К. Зиен, Н.Ч. Чык, Б.И. Булгаков, О.Ю. Баженова, Н.А. Гальцева // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11-21.
28. Ткач, Е.В. Высокоэффективные модифицированные гидрофобизированные бетоны с улучшенными физико-техническими свойствами / Е.В. Ткач, В.С. Семенов, С.А. Ткач // В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. научные труды III Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. С. 113-123.
29. Чулкова, И.Л. Строительные композиты на основе местного техногенного сырья / И.Л. Чулкова, И.В. Пастушенко, А.С. Парфёнов // Технологии бетонов. 2014. № 3 (92). С. 12-13.
30. Стефаненко, И.В. Высокие технологии в экологии и при переработке отходов в эффективные строительные материалы / И.В. Стефаненко. Волгоград: Волгогр. науч. изд-во, 2005. 173 с.
31. Стефаненко, И.В. Основные радиационные процессы по переработке отходов / И.В. Стефаненко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 20 (39). С. 99-104.
32. Орешкин, Д.В. Применение бурового шлама для производства эффективных стеновых материалов / Д.В. Орешкин, В.С. Семенов, А.Н. Чеботаев, В.А. Перфилов, В.И. Лепилов, И.Г. Лукина // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 11. С. 38-40.
33. Черкасова, Н.Г. Влияние древесной пыли на качество композиционных строительных материалов / Н.Г. Черкасова, В.В. Стрикун // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35. № 1-2. С. 106-110.
34. Лукаш, А.А. Гипсодревесные композиты из отходов переработки мягколиственной древесины / А.А. Лукаш, Н.П.Лукутцова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. № 4. С. 25-32.
35. Петрова, Т.М. Рециклинг как перспективный способ расширения сырьевой базы строительных материалов и решения экологических проблем // Т.М. Петрова, Н.А. Джаши, И.П. Лобач, О.М. Смирнова // Строительный тендер. 2009. № 42. С. 16-19.
36. Пилипенко, А.С. Использование строительных отходов от сноса панельных зданий для производства цветных отделочных бетонов / А.С. Пилипенко // В книге: Строительство - формирование среды жизнедеятельности. материалы XI Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. 2008. С. 563-565.
37. Пятаев, Е.Р. Полимербетонные изделия на основе строительных отходов / Е.Р. Пятаев, А.С. Пилипенко, Е.А. Зиновьева, М.А. Бурцева, Е.А. Медникова // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 1 (1001). С. 52-53.
38. Larsen, O.A. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow O.A. Larsen, S.V. Samchenko, V.V. Naruts, O.V. Aleksandrova, B.I. Bulgakov // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference Proceedings. 2019. pp. 115-122.
39. Егоров, Е.С. Предварительно гидратированная цементная суспензия как добавка в бетонную смесь / Е.С. Егоров, С.В. Самченко // В сборнике: Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. Сборник материалов конференции. В 3-х частях. 2019. С. 901-904.
40. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и коррозионностойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А. М.: Полиотип, 2006. 272 с.
41. Комохов, П.Г. Защитный бетон от радиации (часть 1) / П.Г. Комохов // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2008. № 1. С. 63-70.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛИНИСТО-КАРБОНАТНЫХ ВИДОВ ОПОКОВИДНЫХ ПОРОД КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЛИНКЕРНОГО КИРПИЧА СВЕТЛОЙ ОКРАСКИ

В.Д. Котляр¹, д-р техн. наук, профессор

Н.И. Небежко², инженер

Ю.А. Божко¹, ассистент

¹Донской государственной технической университет

²Индивидуальный предприниматель

Аннотация. Представлены результаты работ по изучению возможности получения стенового и дорожного клинкерного кирпича светлой окраски на основе глинисто-карбонатных видов опоковидных пород. Дана общая характеристика опоковидных пород и их глинисто-карбонатных разновидностей. Показано, что наиболее эффективным способом получения керамического материала с высокой степенью спекаемости при водопоглощении менее 2,5-6,0 % и температурах обжига 1050-1100 °С, является ввод минерализаторов в количестве до 1-3 %. Получаемые изделия при этом имеют светлую окраску (жёлтый, бежевый, розоватый цвет с различными оттенками) и отвечают требованиям к стеновому и дорожному клинкерному кирпичу. Установлено, что наиболее рациональным способом формования изделий для опоковидного сырья является компрессионное формование или мягкое формование. Основными технологическими факторами являются степень измельчения исходной породы, количество минерализатора и температура обжига изделий.

Ключевые слова: клинкерный кирпич, опоковидные породы, минерализатор, обжиг, водопоглощение, прочность.

С каждым годом всё более популярным и востребованным в архитектуре и строительстве становится клинкерный кирпич светлой окраски. Основным препятствием для его более широкого применения в нашей стране является достаточно высокая стоимость, так как основная часть клинкерного кирпича импортируется из-за рубежа. Сложившаяся ситуация объясняется весьма ограниченными запасами светложгущихся глин низкотемпературного спекания, являющихся наиболее подходящими и традиционными сырьевыми материалами для производства стенового и дорожного клинкерного кирпича. Перспектив увеличения запасов и поиска новых месторождений светложгущихся глин низкотемпературного спекания практически нет. Поэтому поиск новых нетрадиционных сырьевых материалов и разработка новых технологий производства стенового и дорожного клинкерного кирпича светлой окраски с температурой обжига до 1100 °С, является актуальной геолого-технологической задачей. Получение дорожного клинкерного кирпича при температурах обжига до 1100 °С имеет принципиальное значение, так как помимо снижения затрат на обжиг, этот фактор позволяет при необходимости организовывать производство на существующих кирпичных заводах с использованием печей для обжига обычного керамического кирпича.

Анализируя результаты предыдущих исследователей и наш опыт в технологии керамики, мы обратили внимание на одну из разновидностей опоковидных пород – глинисто-карбонатные [1-6]. Опоки – это достаточно большая группа неразмокаемых или плохо размокаемых в воде осадочных пород, особенностью которых является преобладание в составе опал-кристобалитового

кремнезёма, относительно низкая средняя плотность и тонкопористая структура. В зависимости от содержания глинистых минералов и тонкодисперсного кальцита выделяют различные разновидности опок [7]. Месторождения и проявления глинисто-карбонатных опок широко распространены на юге России, в Поволжье и других регионах России. После обжига они дают черепок со светлой окраской – светло-жёлтый, жёлтый, бежевый, светло-розовый и другие.

Особенностью технологических свойств опок является существенное влияние на свойства изделий и температуру обжига степени измельчения исходного сырья. На рисунке 1, для примера, показано влияние степени измельчения глинисто-карбонатной опоки Авило-Фёдоровского месторождения и температуры обжига на водопоглощение образцов мягкого формования.

Как видно, водопоглощение обожжённых образцов при температурах обжига 900-1000 °С достаточно большое и составляет от 16 до 32 %. При этом, при уменьшении зернового состава измельчённого сырья, от фракции менее 1,25 мм до фракции менее 0,16 мм, водопоглощение уменьшается в среднем в 1,5 раза. Более интенсивное снижение водопоглощения образцов наблюдается при температурах обжига выше 1000 °С. Однако водопоглощение, приемлемое для дорожного клинкерного кирпича – 2,5 % и ниже, достигается только при температуре обжига 1080–1090 °С и степени измельчения до фракций менее 0,315 и 0,16 мм. При степени измельчения до фракции менее 0,63 мм водопоглощение 2,5 % и ниже, достигается только при температуре обжига 1130 °С, для фракции менее 1,25 мм водопоглощение 2,5 % и ниже, достигается при температуре обжига 1160 °С. При этом деформирования и вспучивания образцов не происходит при замедленном режиме обжига на конечном 50–градусном этапе обжига при скорости набора температуры 0,5–1 °/мин. Водопоглощение менее 6 %, необходимое для стенового клинкерного кирпича, достигается для фракций менее 0,315 и 0,16 мм при температурах обжига 1050–1070 °С.

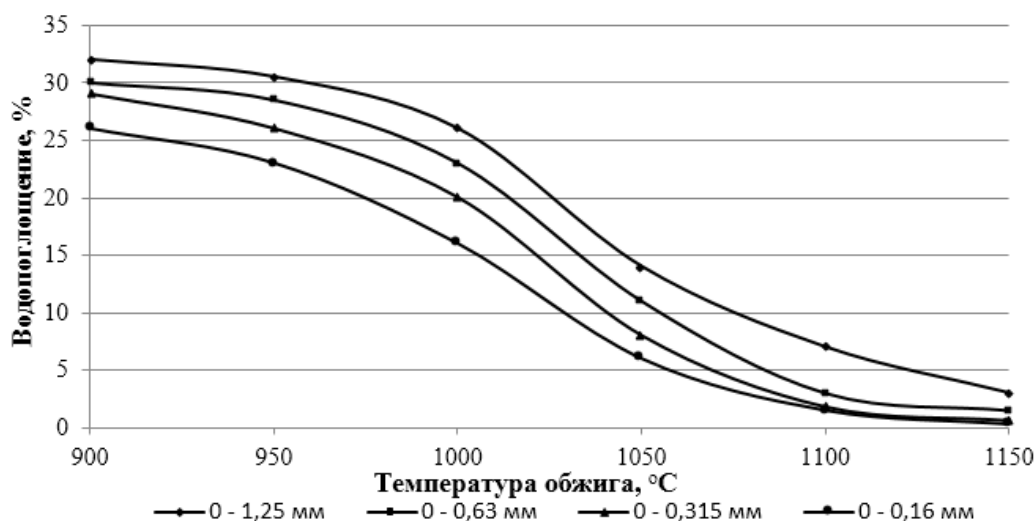


Рис. 1. Влияние степени измельчения и температуры обжига на водопоглощение образцов

Учитывая полученные результаты, для снижения температуры обжига и расширения интервала спекания нами решено было пойти по пути введения активных минерализаторов в состав сырьевой смеси, а фракционный состав из-

мельчённых опок принять 0–0,315 мм. Минерализаторами называют сильные плавни, которые существенно снижают температуру обжига и повышают степень спекания. Они широко применяются в технологии цемента и керамики. [8]. Их количество при вводе в керамические массы обычно не превышает 3 %. В основном это соединения щелочных металлов, бора, фтора, фосфора, цинка и т.д. Мы, в результате проведённых поисково-оценочных работ, с учётом технико-экономических факторов разработали комплексный боро-щелочноземельный минерализатор не растворимый в воде с вполне приемлемой для производства клинкерного кирпича стоимостью.

Влияние минерализатора на предел прочности при изгибе и водопоглощение обожжённых образцов для опоки Авило-Фёдоровского месторождения при степени её измельчения до фракции менее 0,315 мм показаны на рисунках 2 и 3. Подготовка образцов осуществлялась по комбинированной технологии – полусухое измельчение сырья и мягкое формование образцов. При степени измельчения до фракции менее 0,315 мм глинистые опоки приобретают необходимые формовочные свойства и связность.

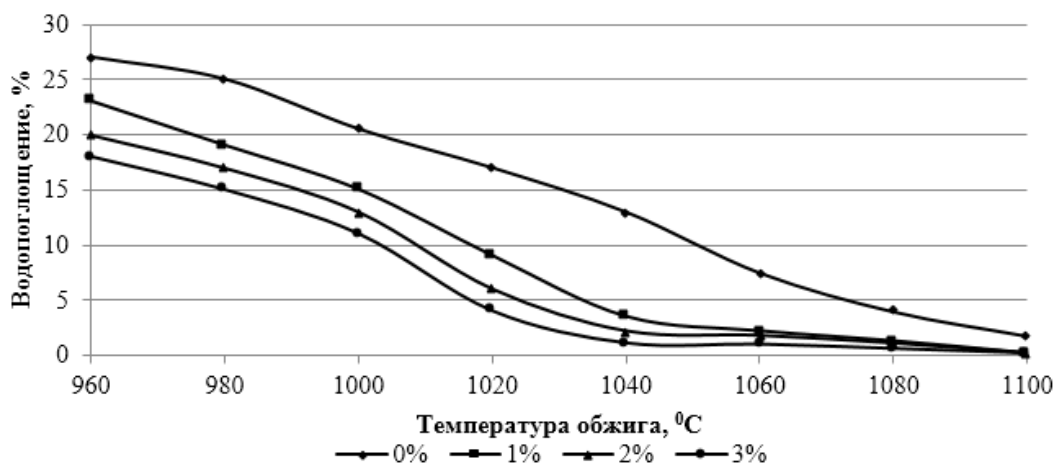


Рис. 2. Влияние количества минерализатора и температуры обжига на водопоглощение образцов

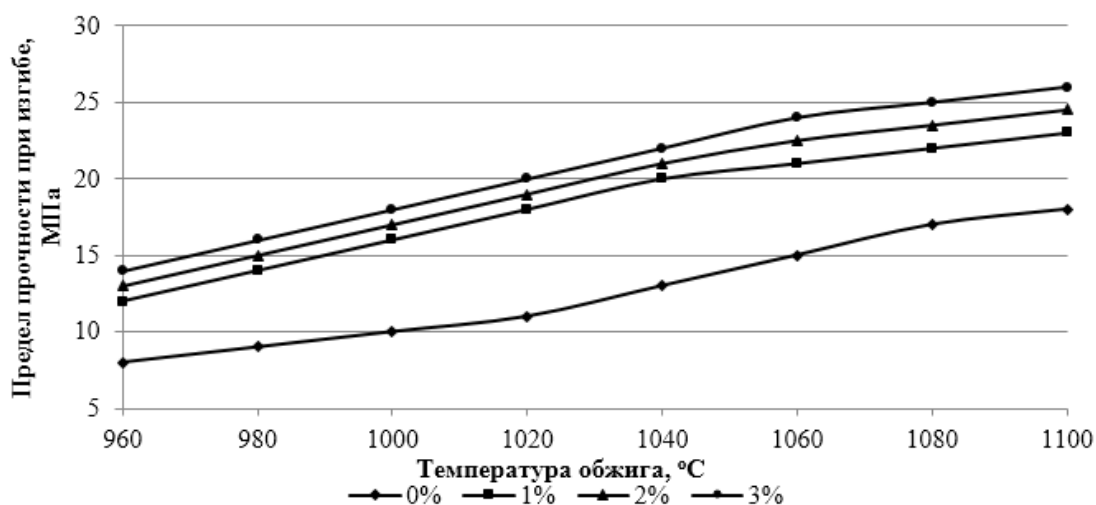


Рис. 3. Влияние количества минерализатора и температуры обжига на предел прочности при изгибе образцов

Как видно из полученных результатов, минерализатор оказывает заметное влияние на температуру обжига, существенно снижая его. Уже при содержании минерализатора 1 % водопоглощение менее 2,5 % достигается при температуре обжига 1050 °С, при содержании 2 и 3 % при температурах около 1020-1040 °С. При температуре обжига 1100 °С водопоглощение образцов становится почти одинаковым – $\approx 0,2$ % и практически не зависит от количества вводимого минерализатора. Таким образом, с учётом технико-экономических факторов ввод минерализатора в количестве 1 % вполне достаточен для получения дорожного клинкерного кирпича. Стеновой клинкерный кирпич можно получить при температурах обжига 1020 °С и выше. При этом образцы обладают достаточно высокой прочностью: $R_{сж.} > 80$ МПа; $R_{изг.} > 20$ МПа.

Согласно ГОСТ 32311-2012 «Кирпич керамический клинкерный для мощения» предел прочности при изгибе должен быть более 7,5 МПа. Требования по пределу прочности при сжатии к нему не предъявляются. Предел прочности при сжатии для стенового клинкерного кирпича согласно ГОСТ 530-2012 должен быть более 30 МПа. Высокая прочность обожжённых образцов объясняется формированием особой стеклокристаллической матрицы, где стеклофаза пронизана игольчатыми и пластинчатыми кристаллитами волластонита [9,10].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что на основе глинисто-карбонатных опок с вводом минерализаторов вполне возможно получение стенового и дорожного клинкерного кирпича при температурах обжига 1000-1100 °С. Образцы после обжига имеют приятный светло-жёлтый – тёмно-жёлтый цвет, отличаются высокой прочностью и морозостойкостью ($> F200$), а также низкой истираемостью – менее 0,2-0,4 г/см². С технико-экономической точки зрения ввод минерализатора вполне оправдан. Для стандартного прямоугольного дорожного клинкерного кирпича с размерами 200 x 100 x 62 мм стоимость ввода минерализатора в количестве 1 % составит около 60 копеек. Результаты проведённых работ показали высокую перспективность получения клинкерного кирпича светлой окраски с низкой себестоимостью на основе глинисто-карбонатного опоквидного сырья.

Библиографический список:

1. Августиник, А.И. Керамика / А.И. Августиник // – Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.
2. Котляр В.Д. Перспективы использования кремнистых опоквидных пород для производства дорожного клинкерного кирпича низкотемпературного спекания / В.Д. Котляр, Г.А. Козлов, О.И. Животков, К.А. Лапунова // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 13-16.
3. Езерский, В. А. Клинкер. Технология и свойства / В.А. Езерский // Строительные материалы. 2011. № 4. С. 79-81.
4. Котляр В.Д. Технологические особенности опок как сырья для стеновой керамики / В.Д. Котляр, К.А. Лапунова // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 11-12 (611-612). С. 25-31.
5. Котляр В.Д. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоквидных пород / В.Д. Котляр, Х.С. Явруян, Ю.А. Божко, Небежко Н.И // Строительные материалы. 2019. № 12. С. 18-23.
6. Котляр В.Д. Особенности применения дорожного клинкерного кирпича светлого цвета / В.Д. Котляр, Ю.В. Терёхина, А.В. Котляр, Р.А. Ященко, Ю.В. Попов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 44-49.

7. Котляр В.Д. Классификация кремнистых опоковидных пород как сырья для производства стеновой керамики // Строительные материалы. 2009. № 3. С. 36–39.
8. Горшков В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Федоров // – М.: «ВШ». 1988. 400 с.
9. Бондарюк А.Г. Фазовые преобразования при обжиге опок с карбонатными добавками при производстве стеновой керамики / А.Г. Бондарюк, В.Д. Котляр // Строительные материалы. 2009. № 12. С. 24–27.
10. Котляр В.Д. Особенности физико-химических преобразований при обжиге опоковидного сырья / В.Д. Котляр, К.А. Лапунова // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 40–42.

НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО БЕТОНА

А.М. Бахрах¹, аспирант

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

¹*Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ)*

Аннотация. Бетэл является уникальным композиционным материалом, сочетающим высокие физико-механические характеристики и свойства электрического проводника. Изделие из электропроводного бетона может одновременно выполнять функции конструктивного элемента, электротехнического прибора и экранирующего устройства. Теоретическая область применения бетэла в различных областях промышленности очень широка. Электропроводящие бетоны - бетоны, содержащие в качестве компонента диспергированные частицы, вводимые в бетонную смесь и обладающие свойствами проводников. В качестве таких добавок могут применяться как органические материалы, такие как коксовый уголь и технический углерод, так и металлические порошки, такие как, металлическая стружка. Получение эффективных токопроводящих бетонов связано с введением токопроводящей добавки, позволяющий получать композиционный материал, обладающий, наряду с высокой механической прочностью, высокой электрической проводимостью. Развитие технологии таких бетонов позволило получать дешевые нагреватели для помещений с большой площадью и другие электротехнические приборы.

Ключевые слова: цемент, нагреватель, сопротивление, бетэл, суперпластификатор, поликарбонат.

Электропроводящие бетоны относятся к бетонам с заданными электротехническими свойствами [1]. Получение бетонов с заданными электротехническими свойствами может быть направлено на решение двух задач: понижение электропроводности бетона или ее повышения. Бетоны с пониженной электрической проводимостью получили название изоляционных, с повышенной – бетэлов (бетонов электропроводных). Первые исследования по получению бетэлов проводились в мире еще в 40-70х годах 20 века [2]. Большой интерес к изучению бетэлов был вызван невозможностью получения электротехнических изделий большого объема и поверхности из известных ранее электротехнических материалов, способных при этом выполнять несущую функцию.

Бетон является проводником, при этом его электрическая проводимость повышается с увеличением влажности и, как следствие, увеличивающимся количеством ионов в теле бетона. Электрическая проводимость бетона, как правило, рассматривается как негативный фактор, вызывающий электрокоррозию стальной арматуры в конструкциях под действием блуждающих токов [3]. Однако в ряде случаев проводящие свойства бетона могут быть использованы для устройства заземлений [4]. Увлажнение бетона для целей снижения его электрического сопротивления малоэффективно и затруднительно, в том числе при воздействии отрицательных температур.

Применяться электропроводные бетоны могут как в гражданском строительстве, так и промышленных зданиях и сооружениях, в сельском хозяйстве и энергетической промышленности, в оборонно-промышленном производстве.

Причем в каждой из указанных сфер используются различные свойства бетэла, обусловленные сочетанием его электротехнических и механических свойств.

В работе [5] приводится возможность применения бетэла для устройства систем электрообогрева в зданиях и сооружениях, а также целесообразность применения резистивных нагревателей с системой автоматического терморегулирования. Эффективность достигается за счет низкой температуры зеркала излучения, низкого энергопотребления, положительного влияния объемного нагрева на здоровье людей.

В исследовании [6] описано получение изделий ЖБИ с использованием токопроводящего бетона – элементов здания, таких как стеновая панель или перекрытия с функцией электрообогрева. Свойства приведены в таблице 1, схема нагревательного элемента на рисунке 1.

Таблица 1. Технические характеристики бетэловой панели

Свойства	Показатели
Температура нагрева, 0С	До 100
Удельная мощность, Вт/м ²	300-3000
Напряжение, подаваемое на панель, В	12-220
Толщина нагревательного слоя, см	2-2,5

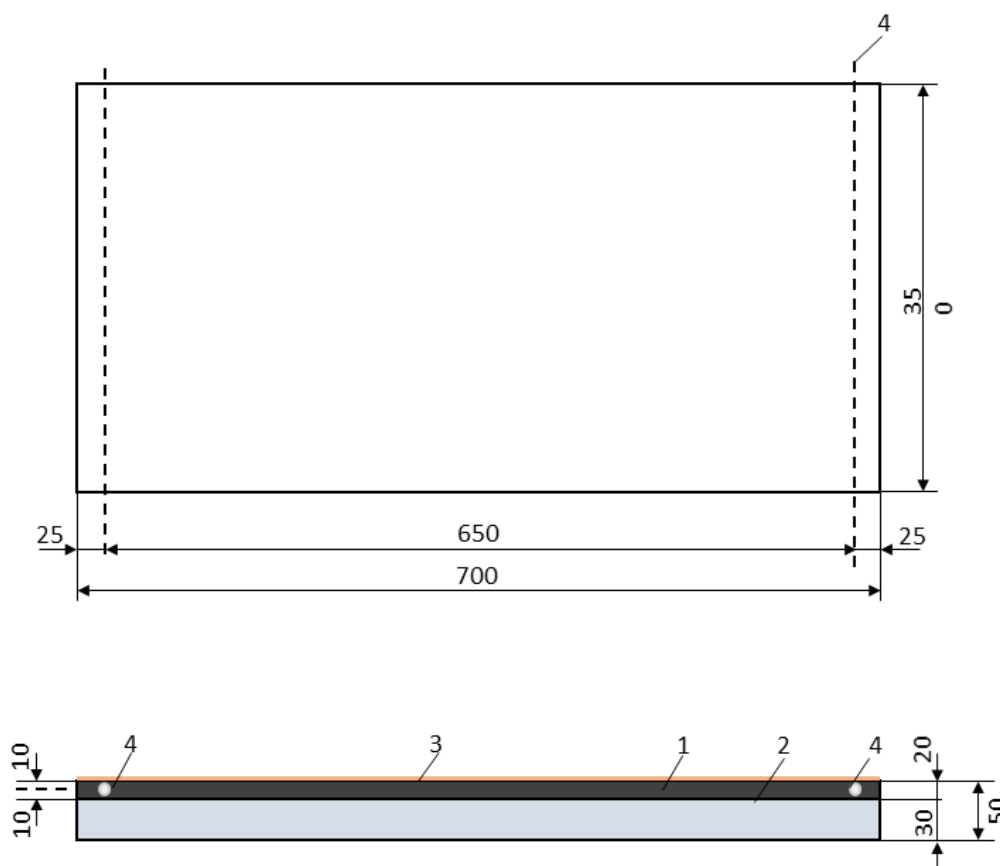


Рис. 1. Нагревательный элемент из бетэла:

1) греющий слой; 2) несущий слой; 3) декоративно-изоляционный слой; 4) электроды.

В работах [7, 8] приводится возможность использования электропроводящего бетона в качестве обогревательных элементов покрытий особо опасных участков автомобильных дорог для исключения образования гололедицы и снижения количества аварий, однако развитию использования такой техноло-

гии на открытом воздухе препятствует низкая прочность и морозостойкость бетэлов, получаемых путем введения в бетонную смесь токопроводящего компонента (рис. 2).

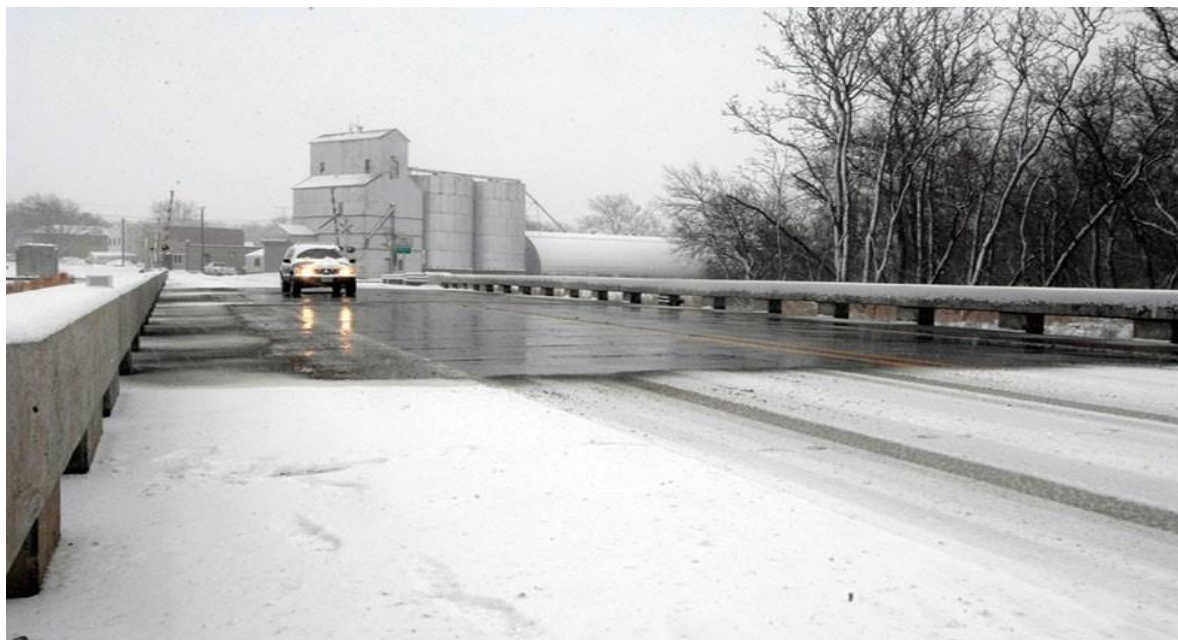


Рис. 1. Обогрев дорожного покрытия в зимний период

В работе [9] предложено использование бетэловых композиций в качестве оболочек атомных электростанций. Нанесение бетэловых композитов на внутреннюю поверхность защитной оболочки АЭС позволит локализовать повреждения по изменению их электропроводности в качестве первичных датчиков информации, сигнализирующих о наличии повреждений.

Одним из направлений применения токопроводящих бетонов является устройство экранирующих лотков кабелей, покрытых бетэлом с двух сторон [10]. Применяется такое решение для защиты современной микропроцессорной аппаратуры, противопожарной автоматики и автоматизированных систем управления от воздействия электромагнитных помех [11]. По полученным в данным, составы с удельным сопротивлением 0,49 Ом·метр и пределом прочности на сжатие до 20 МПа обеспечивают эквипотенциальное покрытие, т.е. по величине экранирующего эффекта и сопоставимы с листовой сталью. Может данное свойство бетэла применяться и для защиты людей от электромагнитного излучения [12].

Широкого распространения бетэл и устройства из него на практике не получили, что объясняется его низкой технологичностью: получаемые смеси являются жесткими так как токопроводящий компонент обладает очень высокой водопотребностью. Бетэлы пластического формирования, получаемые за счет введения большего количества воды затворения, не удовлетворяют требованиям по долговечности и прочности. Дальнейшее развитие технологии токопроводящих бетонов должно быть направлено на повышение технологических свойств бетонных смесей, а вместе с тем и эксплуатационных свойств готовых изделий. Получившие широкое распространение суперпластифицирующие до-

бавки на основе эфиров поликарбоксилатов возможно позволят повысить подвижность бетэловых смесей.

Библиографический список:

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник для студентов высших учебных заведений / Ю.М. Баженов. - М.: Издательство АСВ, 2011. – 375с.
2. Врублевский, Л.Е. Возможности использования электропроводного бетона (бетэла) в гражданском строительстве /Л.Е. Врублевский. — Новосибирск, 1971. — 51с.
3. Гречишкин, А.В. Диагностика технического состояния сооружений электрических подстанций /А.В. Гречишкин, Д.В. Артюшин, П.В. Коновалов, М.А. Праслов // Региональная архитектура и строительство— 2019. — С.135-141.
4. Вайнер, Л.А. Отвод в землю токов с железобетонных опор /Л.А. Вайнер, В.П. Поляков, В.И. Тучин // Электрические станции — 1964. № 2.-С. 50-55.
5. 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.
6. Врублевский, Л.Е. Нагревательные элементы и конструкции из электропроводного бетона /Л.Е. Врублевский, Е.К. Маевский, Б.Н. Долгинов // Возможности использования электропроводного бетона (бетэла) в гражданском строительстве/ СибНИИЭ. — Новосибирск, 1971. — 4с.
7. Гросу, Р.А. Тепловые способы обогрева покрытий транспортных сооружений //Р.А. Гросу, Е.И. Киряков. / Избранные доклады 61-й научно-технической конференции. — Томск, ТГАСУ, 2015. — С.260-266.
8. De-icing Concrete: the world's first bridge to incorporate conductive concrete [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <https://fcsconcreterepairs.com.au/de-icing-concrete-worlds-first-bridge-incorporate-conductive-concrete/>, свободный.
9. Большаков, В.И. Электропроводящие нанокompозиты для систем диагностики технического состояния герметизирующих оболочек АЭС /В.И. Большаков, Н.В. Савицкий // Вестник ПДАБА — № 5.- 2016. — С.100-119.
10. Алаев, Е.Г. Применение электропроводящего материала для экранирования кабельных конструкций / Е. Г. Алаев, Ю. В. Демин, А. Б. Палагушкин и др. // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 5-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках специализир. форума «Ехро Build Russia» (Екатеринбург, 14 апреля 2016 г.). — Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. — С. 152-155.
11. Матвеев М.В., Косарев И.Г. Экранирующие кабельные конструкции. Средство экономического решения проблем ЭМС. / М.В. Матвеев, И.Г. Косарев // Новости электротехники. – 2013. – № 1.-С.10-20.
12. Матвеев М.В., Косарев И.Г. Экранирующие кабельные конструкции. Средство экономического решения проблем ЭМС. / М.В. Матвеев, И.Г. Косарев // Новости электротехники. – 2013. – № 1.-С.10-20.

СОВРЕМЕННЫЙ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЙ БЕТОН

Л.В. Моргун¹, д-р техн. наук, профессор

А.Ю. Богатина², канд. техн. наук, доцент

В.Н. Моргун³, канд. техн. наук, доцент

¹*Донской государственный технический университет*

²*Ростовский государственный университет путей сообщения*

³*Южный Федеральный университет*

Аннотация. История производства и применения в строительстве газонаполненных бетонов не превышает 150 лет. Актуальность совершенствования их эксплуатационных свойств неуклонно возрастает потому, что стимулируется процессами урбанизации социума и зависит от развития таких фундаментальных наук, как физика и химия. Причиной создания технологии фибропенобетонов является потребность практики в трещиностойком газонаполненном бетоне, опирающаяся на возможность использования синтетических волокон для комплексного улучшения его эксплуатационных свойств. Показано, что дисперсное армирование пенобетонных смесей синтетическими волокнами позволяет при сохранении в равноплотных бетонах параметров прочности на сжатие снижать теплопроводность на 6...15%, паропроницаемость – на 25...40%, повышать морозостойкость более чем в 2,5 раза. Достигнутый уровень эксплуатационных свойств позволил предприятиям стройиндустрии существенно расширить номенклатуру изделий из фибропенобетона и сделать этот материал к полифункциональным.

Ключевые слова: газонаполненные бетоны, фибропенобетон, номенклатура изделий

Первые успешные работы по изготовлению газонаполненных бетонов появились в самом начале XX века [1,2]. Практическая потребность в системном изготовлении бетонных материалов, свойства которых были бы способны защищать живые организмы от атмосферных температурных воздействий окружающей среды сформировалась к середине XX века [3,4] не только потому, что значительная часть жилых и общественных зданий Европы была разрушена в результате 2-й мировой войны, но и потому, что постиндустриальная экономика планеты потребовала урбанизации социума [5,6].

К газонаполненным бетонам современное материаловедение относит пено- и газобетоны. Это композиционные материалы, в которых бетонная компонента выполняет конструкционную функцию, а воздух – теплоизоляционную. Энергетические кризисы прошлого века [7] в сочетании с урбанизацией [8] и очередным настоящим экономическим кризисом определяют системный интерес строительного комплекса к материалам из газонаполненных бетонов. Прежде всего потому, что воздух является единственным природным материалом, за который человек пока не платит, а в газонаполненных бетонах он выполняет энергосберегающую функцию.

Технологии этих разновидностей бетонов опираются на достижения фундаментальной химии и сильно зависят от уровня развития ее отдельных областей. Если в первой трети XX века преимущественное практическое развитие имела технология пенобетонов [1,8,9], то в последующем технология автоклавного газосиликата её практически вытеснила из стройиндустрии [10-12]. В

настоящее время не смотря на обширный успешный опыт применения в строительстве стеновых блоков из высокопрочного автоклавного газосиликата начинает обретать популярность фибропенобетон - разновидность неавтоклавного пенобетона, дисперсно армированного синтетическими волокнами [13-15].

Причины интереса практиков к технологии фибропенобетона состоят в следующем:

- низкие, по сравнению с автоклавной технологией, исходные капиталовложения [3,8,9];

- возможность изготовления на одной технологической линии обширной номенклатуры изделий различного назначения [16,17];

- возможность существенного расширения номенклатуры изделий заводского изготовления, обладающих пониженной материалоемкостью и улучшенными эксплуатационными свойствами [16, 18].

Важнейшей отличительной особенностью фибропенобетона от других разновидностей газонаполненных бетонов является их повышенная прочность на растяжение при изгибе (табл.), обеспечивающая возможность расширения номенклатуры изделий и комплексного улучшения их эксплуатационных свойств [14,16-18]. Сырьем для получения этого материала являются:

- портландцемент любого вида;

- дисперсный минеральный заполнитель с размером частиц менее 0,315 мм и лояльный к продуктам гидратации портландцемента;

- пенообразователь (любое анионоактивное поверхностно активное вещество);

- синтетические волокна (диаметром менее 0,5 мм и длиной более 15 мм);

- вода.

Качественное изготовление этого материала возможно только по одностадийной технологии в турбулентных смесителях и при содержании фибры более 0,5% от объема цементного камня. В этом случае будет иметь место комплексное улучшение свойств газонаполненного бетона (табл.). При меньшем содержании фибры в составе сырьевой смеси (как и поступают, к сожалению, большинство фирм-производителей) изделия из фибропенобетона будут отличаться от других видов только слегка повышенной трещиностойкостью и отсутствием брака при транспортировании. В таблице 1 приведен перечень важнейших эксплуатационных свойств фибропенобетона и самого распространенного в современной практике газосиликата.

Из автоклавного газосиликата современный строительный комплекс потребляет только один вид изделий – стеновые блоки. Свойства фибропенобетона обеспечивают возможность производства следующих видов энергосберегающих изделий заводского изготовления:

- галтелей плотностью 500 кг/м³ – погонажных изделий для теплоизоляции мест сопряжений железобетонных конструкций с окнами и дверьми. Технология освоена с 2002 года;

- перемычек гражданский зданий. Перемычки изготавливаются из фибропенобетонов плотностью 700 и 800 кг/м³, содержат металлические каркасы, масса которых меньше идентичных, изготовленных из бетона слитной структуры класса В20. Технология освоена с 2004 года;

Таблица 1. Свойства газонаполненных бетонов

Плотность кг/м ³	Прочность, МПа		Паро- проницаемость, мг/м ² ·ч	Морозо- стойкость, циклы	Теплопроводность, Вт/(м·°С)		
	сжатие	растяжение при изгибе			сухого	А	Б
ФИБРОПЕНОБЕТОН							
300	0,5...1,0	0,2...0,5	0,23	35	0,069	0,09	0,11
400	1,0...2,0	0,5...1,5	0,21	50	0,078	0,10	0,13
500	2,0...3,5	1,0...2,0	0,18	75	0,088	0,12	0,15
600	2,5...4,5	1,5...2,5	0,15	75	0,113	0,16	0,20
700	3,5...5,0	2,0...3,0	0,13	100	0,142	0,19	0,24
800	4,5...7,5	2,5...3,5	0,10	Более 100	0,171	0,21	0,27
АВТОКЛАВНЫЙ ГАЗОСИЛИКАТ							
400	2,0...2,5	Не норм.	0,23	35	0,095	0,10	
500	2,5...3,5	Не норм.	0,20	35	0,118	0,127	
600	3,5...5,0	Не норм.	0,16	35	0,137	0,160	
700	5,0...7,0	Не норм.	0,15	35	0,165	0,192	
800	Более 7	Не норм.	0,14	35	0,182	0,225	

- карнизных изделий для зданий с индивидуальным архитектурным обликом. Карнизные изделия изготавливались плотностью 600 кг/м³, содержали арматурные каркасы расчетной массы, эксплуатируются на объекте «Купеческий Двор» в г. Ростове-на-Дону с 2008 г.;

- плит перекрытий для гражданских зданий. В настоящее время имеются результаты инициативных испытаний плиты перекрытия, изготовленной из бетона плотностью 800 кг/м³ размером 4800x900x300 мм армированной объемными металлическими каркасами, суммарная масса которых на 8% меньше проектной для равновеликой пустотной плиты, изготавливаемой из бетона литной структуры класса В20. В ходе испытаний допустимый прогиб, (6,85 мм) был достигнут после превышения удельной нагрузки в 73 МПа. Эта нагрузка в 2,4 выше нормативной для многопустотных железобетонных, применяемых в гражданских зданиях. При удельной нагрузке 220 МПа прогиб плиты в средней части пролета достиг 35 мм, однако видимых трещин в растянутой зоне изделия обнаружено не было. Плита не получила местного смятия и в местах опирания. При дальнейшем загрузении плиты до 890 МПа кинетика прогибов не регистрировалась. После снятия нагрузки волосяные трещины, появившиеся в растянутой зоне, исчезли;

- сборных вентиляционных каналов, которые при плотности 800 кг/м³ обеспечивают при возведении строительных объектов каркасного типа достижение следующих преимуществ:

а) снижение материалоемкости при обеспечении пожарной безопасности [19];
 б) снижение трудоемкости при обеспечении индивидуальных требований к планировке помещений [20];

- отделочных архитектурных панелей и малых архитектурных форм, которые эксплуатируются в Южном Федеральном округе с 2006 г. [21];

- панелей антикошетной облицовки [22];

- стеновых блоков.

Учитывая перечисленную выше номенклатуру изделий, считаем, что фибропенобетон обладает полифункциональностью и может эффективно применяться в строительных конструкциях с индивидуальными эксплуатационными свойствами.

Библиографический список:

1. Кауфман Б.Н. Пенобетон. Подбор состава и основные свойства. – М.: Издательство по строительству, 1951. – 46 с.
2. Федин А.А., Чернышов Е.М. Совершенствование технологии и устранение брака в производстве газосиликатных изделий // Строительные материалы. 1962. № 4. С. 25-28.
3. Чернышев Е.М., Федин А.А., Потамошнева Н.Д., Кухтин Ю.А. Газосиликат: современная гибкая технология материала и изделий// Строительные материалы, 2007, №4. - С.4-9.
4. Jäger W., Schöps P. Confined masonry – a chance to improve the load bearing capacity // 5th International conference on Autoclaved Aerated Concrete «Securing a sustainable future»: Bydgoszcz, Poland, September, 14– 17, 2011. Pp. 225–237.
5. Петрова З.К., Кодолов Г.О. Рекомендации по применению инновационных систем энергоснабжения в малоэтажной застройке на территории России// Градостроительство, 215, №1 (35). – С.15-20.
6. Котельников Н.П. Архитектурно-дизайнерское материаловедение: учеб.-метод. пособие. Тольятти, ТГУ, 2011. – 100 с.
7. Смородин С.Н., Белоусов В.Н., Лакомкин В.Ю. Методы энергосбережения в энергетических, технологических установках и строительстве: учебное пособие / СПбГТУРП.- СПб., 2014.- 99 с.
8. Гаттунен Н.А. Жилищная политика России: тенденции, проблемы, перспективы // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление. Том 2 (68). 2016 г. № 4 С. 15–24.
9. Кудряшев И.Т., Куприянов В.П. Ячеистые бетоны. М.: Госстройиздат, 1959. 182 с.
10. Брилинг Р.Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Стройиздат, 1948. - 90 с.
11. Сажнев Н.П. Производство ячеистых бетонов в Беларуси на современном этапе // Белорусский строительный рынок. 2011. №5. С. 8–16.
12. Гринфельд Г.И. Диалектика нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2012. №1. С. 22–24.
13. Моргун В.Н. Размышления об эффективности стеновых материалов. г. Ростова-на-Дону// Инженерный Вестник Дона (электронный научный журнал), 2008, №4. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2008/703>.– Яз. рус.
14. Кадомцева Е.В., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. О поведении фибропенобетона при изгибе армированных балок// Бетон и железобетон – взгляд в будущее. Труды III Всероссийской (II Международной) конф. по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. – С. 151-157.
15. Вотрин Д.А. Сравнительный анализ фибропенобетона с теплоизоляционными ячеистыми бетонами. Action160-14230.pdf interactive-plus.ru
16. Моргун Л.В. Пенобетон. Монография: Ростов-на-Дону, Рост. госуд. строит. ун-т, 2012. – С.154.
17. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У. Полидисперсное армирование строительных композитов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011 – № 2 (145). – С. 2-3.
18. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Фибропенобетоны – аспекты их применения с целью ресурсо- и энергосбережения в строительстве// Сб.тр. XVI МНПК «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии», Сочи, 2019. – С.501-506.

19. Галумян А.В. Организационно-технологическая модель скоростного строительства жилых зданий из монолитного железобетона: автореф. дис. канд. техн. наук. МГСУ, М., 2010. – 22с.
20. Справка о введенных в эксплуатацию объектах капитального строительства в г. Ростове-на-Дону за IV квартал 2018 г. // <http://rostov-gorod.info/administration/structure/departments/daig/important/gradostroitelstvo/tekushchee-stroitelstvo/tekushchee-stroitelstvo-2018/>
21. Моргун Л.В., Моргун В.Н., Черенкова И.А. К вопросу об эффективности теплоизоляции фасадов гражданских зданий//Жилищное строительство, 2015, №4. – С.21...24.
22. Моргун Л.В., Вотрин Д.А. Новый материал для антирикошетной облицовки конструкций//Труды РГУПС, Ростов-на-Дону, 2016, №4 (37). – С. 62-65.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ БЕТОНА

Л.А. Урханова¹, д-р техн. наук, профессор

А.А. Урханова¹, аспирант

С.А. Лхасаранов¹, канд. техн. наук, доцент

Н.Н. Смирнягина², д-р техн. наук, профессор

¹*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления*

²*Институт физического материаловедения СО РАН*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы получения электропроводящих специальных бетонов с использованием углеродных наноматериалов, полученных при обработке угля в электроразрядной установке. Методом лазерной дифракции установлено, что углеродные наноматериалы имеют размер частиц в интервале от 50 до 500 нм. Определены зависимости физико-механических свойств портландцемента при введении различного количества углеродных наноматериалов. Определены физико-механические и эксплуатационные свойства тяжелого электропроводящего бетона. Определена кинетика изменения электрического сопротивления бетона в различные сроки твердения.

Ключевые слова: Портландцемент, электропроводящий бетон, углеродные наноматериалы, микроструктура, электрическое сопротивление

Одним из интересных направлений исследований в области строительных материалов является создание специальных бетонов с заданным уровнем электрической проводимости [1-6].

Для получения бетонов с высокой электропроводимостью традиционно вводили различные токопроводящие заполнители или наполнители: графитсодержащие материалы, металлические порошки и т.д. При использовании данных материалов возможны некоторые проблемы: блокировка в процессе гидратации электропроводящих частиц, обеспечение начальной прочности композита, нестабильность электрических свойств из-за высокого водопоглощения.

В проводимых исследованиях для получения электропроводящего бетона использовались следующие материалы: портландцемент класса ЦЕМ I 32,5 Н, кварц-полевошпатовый песок, щебень гранитный фракции 5-20 мм; углеродные наноматериалы (УНМ), полученные на специальной высокопроизводительной установке [7-9]. Для модификации добавок УНМ в состав графитовых стержней были введены примеси цемента в количестве до 5 мас. %. Введение цемента объясняется тем, что полученная после плазмохимической обработки нанодисперсная добавка цемента в составе УНМ будет являться кристаллической затравкой для гидратных новообразований, полученных при гидратации цемента.

Результаты исследований по влиянию вида и количества УНМ на свойства цемента представлены в таблице 1. Исследование прочности при сжатии модифицированного цемента показало, что более высокие результаты получены при содержании УНМ 0,05 мас. %, при котором прочность при сжатии увеличивается на 30-35% по сравнению с бездобавочным контрольным образцом.

Таблица 1. Кинетика набора прочности портландцемента с различными УНМ

Вид добавки	Кол-во добавки, % от массы це- мента	Прочность при сжатии, МПа		
		3 суток	7 суток	28 суток
Контрольный	-	41,2	47,6	60,8
УНМ	0,01	42,3	50,2	67,2
УНМ с цемен- том	0,01	37,5	42,3	72
	0,05	42,3	65,8	82,5
	0,1	44,3	53,8	75

Положительное влияние УНМ на свойства портландцемента приводит к улучшению свойств электропроводящего бетона. При подборе состава электропроводящего бетона класса по прочности В40 был использован углеродный наноматериал с оптимальным содержанием 0,01 мас. %, при расходе вяжущего 300 кг/м³ (табл. 2). Определение электрического сопротивления бетона проводилось на образцах с ребром 10 см по методике [10]. Согласно этой методике, образец помещали между двумя металлическими латунными пластинами, имеющими толщину 3 мм. К пластинам подключали мультиметр. Обеспечение надежного электрического контакта между пластинами и образцом осуществляли с помощью пресса, который изолировали от пластин резиновыми прокладками.

Таблица 2. Свойства электропроводящих бетонов

Параметр	Фактические показатели		
	Без добавок	С добавкой УНМ	
Прочность при сжатии, МПа, в возрасте			
	3 сут	26,4	30,8
	7 сут	43,3	44,1
	28 сут	49,2	55,6
Водопоглощение по массе, %	1,4	1,1	
Морозостойкость, циклы	300	400	
Водонепроницаемость, марка	W8	W12	
Электрическое сопротивление, МОм*см	9,8	5,8	

Использование УНМ приводит к увеличению прочности при сжатии бетона на 10-15% по сравнению с контрольным бездобавочным составом. Введение УНМ приводит к изменению эксплуатационных показателей модифицированного бетона за счет существенного изменения структуры композита. Результаты испытаний показывают уменьшение электрического сопротивления бетона при введении УНМ в количестве 0,01 мас. %. Известно, что углеродные проводящие компоненты (например, технический углерод или сажа) создают в электропроводящем бетоне непрерывные токопроводящие цепочки, при этом их концентрация достаточно высока. При использовании углеродных наноматериалов, на наш взгляд, за счет высокой удельной поверхности частиц УНМ и при условии их равномерного распределения в бетоне также создаются непрерыв-

ные токопроводящие цепочки, приводящие к снижению электрического сопротивления композита.

На основании проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

- использование нанодисперсных добавок УНМ и УНМ с цементом существенно улучшает прочностные показатели цементного камня;
- введение УНМ в состав электропроводящего бетона приводит к снижению электрического сопротивления за счет создания по объему материала токопроводящую структуру.

Библиографический список:

1. 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. №1. С. 158-162.
2. Фанина, Е.А. Электропроводящие композиты приоритетных силикатов и переходных форм углерода / Е.А. Фанина, А.Н. Лопанов // Белгород: 2015. 182 с.
3. Каблов, Е.Н. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов / Е.Н. Каблов, С.В. Кондрашов, Г.Ю. Юрков // Российские нанотехнологии. 2013. Т.8. №3-4. С 28-46.
4. Большаков, В.И. Электропроводящие нанокompозиты для систем диагностики технического состояния герметизирующих оболочек АЭС / В.И. Большаков, Н.В. Савицкий // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2016. № 5 (218). С. 16-34.
5. Лопанов, А.Н. Реология электропроводящих цементных паст и дисперсий графита / А.Н. Лопанов, А.Ю. Семейкин, Е.А. Фанина // Цемент и его применение. 2009. №5. С. 110-112.
6. Федюк, Р.С. Электропроводящие бетоны для специальных сооружений / Р.С. Федюк, Д.Е. Кузьмин, В.О. Батаршин, Р.А. Тимохин, В.С. Гиневский // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. №1. Ст. 51-57.
7. Чурилов, Г.Н. Способ синтеза фуллереновой смеси в плазме при атмосферном давлении // Патент RU 2320536 С2, 27.03.2008. МПК С01В31/00, В82В3/00.
8. Чурилов, Г. Н. Фуллерены: синтез и теория образования: монография / Г. Н. Чурилов, Н. В. Булина, А. С. Федоров; ред. В. Ф. Шабанов. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 227 с.
9. Семенов, А.П. Способ синтеза покрытий производных фуллеренов /А.П. Семенов, И.А. Семенова // Патент на изобретение RU № 2517706 С1. Бюл. № 15 от 27.05.2014.
10. Рекомендации для производства изделий и конструкций из радиоэкранирующего бетона для специальных сооружений // М.: НИИЖБ Госстроя СССР. 1981. 20 с.

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРТЛАДЦЕМЕНТОВ

Л.Д. Шахова¹, д-р техн. наук, профессор, директор НТЦ НБН

Л.С. Щелокова², канд. техн. наук, доцент

Е.С. Черноситова², канд. техн. наук, доцент

Е.А. Поспелова², канд. техн. наук, доцент

¹ООО «Полипласт Новомосковск»

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова

Аннотация. Все характеристики по тонкости помола и физико-механическим показателям цементов находятся в тесном взаимодействии между собой, и изменение одного из них влечет за собой изменение свойств готового продукта. В связи с вводом в действие новых технологических линий производства цемента, а также с запросом строительного рынка асортимент портландцементов и их основные характеристики меняются в сторону улучшения качественных показателей.

Ключевые слова: портландцемент, качественные характеристики, тенденция

Бетон, изготовленный с ключевым ингредиентом - портландцементом, наиболее широко используемый искусственный материал во всем мире. Свежеприготовленную бетонную смесь можно отлить в почти любые формы, как устойчивый строительный материал, бетон обеспечивает энергоэффективность, более низкие затраты на жизненный цикл и устойчивость к стихийным и техногенным бедствиям.

В нормативной документации на бетоны (ГОСТ 26633-2015) устанавливается, что требования к цементам должны соответствовать требованиям стандартов. Никаких других требований к приемочному контролю у потребителей не нормируется.

Все характеристики цемента можно разделить на технологические и эксплуатационные. К технологическим характеристикам цементов относятся свойства, которые позволяют получать заданные технологические параметры бетонных или растворных смесей: водопотребность или нормальная густота, водоотделение, сроки схватывания. К эксплуатационным характеристикам относятся свойства, определяемые свойствами бетона или раствора в условиях эксплуатации: прочность, и долговечность.

Двухвековая практика получения и применения портландцементов показывает, что все указанные характеристики определяются в первую очередь минералогическим составом клинкера, вещественным составом цемента, тонкостью его измельчения.

Вещественный состав цементов представлен пятью типами от ЦЕМ I до ЦЕМ V по ГОСТ 31108. Перечень минеральных компонентов расширен по сравнению с ГОСТ 10178 и дополнен известняком, микрокремнеземом и обожженным сланцем.

Повышение требований к эмиссии углекислого газа в атмосферу оказало существенное влияние на мировую цементную отрасль. Доля клинкера в цементах, так называемый клинкер-фактор, который описывает долю в цементе, существенно сократился во всем мировом производстве. Так, в Индии доля

клинкера в цементе составляла 85 % в 2000 г. и снизилась до 71 % в 2015 г. Согласно статистическим данным Союзцемента, ассортимент цементов, выпускаемых цементными заводами РФ за последние 12 лет, изменился. Доля выпуска добавочных цементов снизилась с 51,6% (2012 г.) до 34,4% (2019г.), а доля цементов без минеральных добавок возросла с 39,6% до 60,8% соответственно (рис.1.).

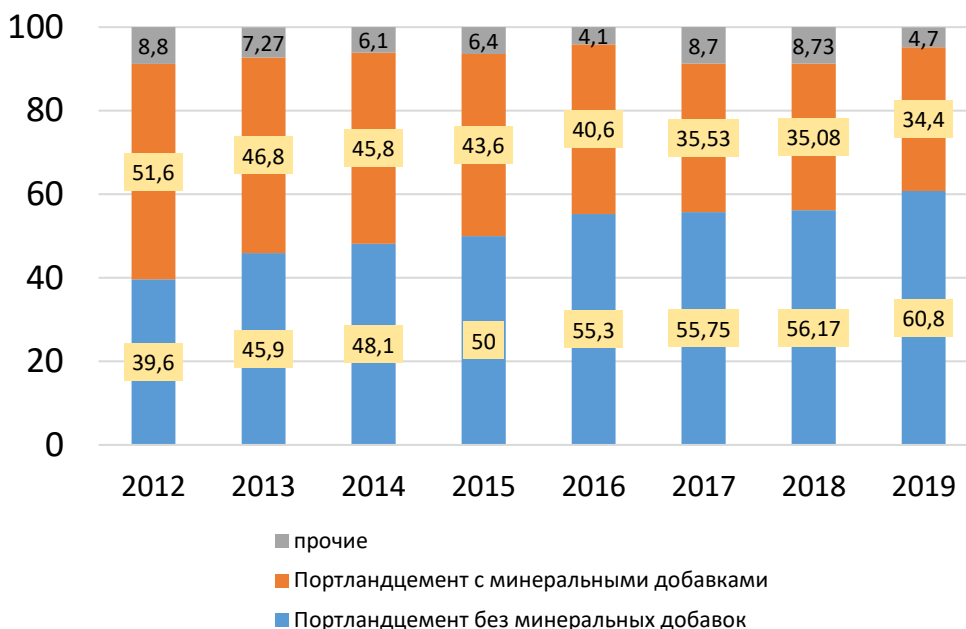


Рис. 1. Ассортимент выпуска цементов с 2012 по 2019гг. (Данные СМ ПРО)

Это объясняется рядом причин. Во-первых, возрос спрос на рынке цементов с высокой ранней прочностью, которую могут обеспечить в первую очередь цементы ЦЕМ I; во-вторых, стоимость минеральных добавок (особенно доменного гранулированного шлака) сравнима со стоимостью основного компонента клинкера, поэтому применение привозных добавок невыгодно цементным заводам. Из всего перечня минеральных добавок в состав ЦЕМ II добавляют доменный гранулированный шлак, известняк и природные пуццоланы (опоку и трепел). Всего один цементный завод выпускает цемент с добавлением золы-уноса. Если рассматривать цементы, выпускаемые в ЦФО, известняк в качестве минеральной добавки вводит ограниченный ряд заводов, которые работают на известняках в качестве сырьевого компонента для производства клинкера. Следует отметить, что известняк, вводимый в состав цементов, должен отвечать требованиям стандарта по содержанию органических примесей, что не всегда выдерживается.

Сегодня во всем мире наблюдается не только опережающий рост объемов производства цемента в сравнении с объемами клинкера, но и увеличение складских мощностей для добавок – золы уноса и гранулированного доменного шлака (GGBFS), а также складских мощностей для разных сортов цемента. На многих цементных заводах РФ и распределительных терминалах существующие складские мощности оказываются недостаточными для выпуска широкого ассортимента.

Минералогический состав клинкеров в последние годы имеет довольно узкие пределы колебаний по цементным заводам. Это также объясняется спросом строительного рынка и необходимостью экономии топливно-энергетических ресурсов. Среднегодовой расчетный минералогический состав по Ботту клинкеров некоторых цементных предприятий представлен в табл. 1.

Таблица 1. Минералогический состав клинкеров некоторых цементных предприятий

Индекс завода	Способ производства	Содержание минералов, мас.%				
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	R ₂ O
1	мокрый	64,53	10,47	8,42	12,58	
2	сухой	62,00	15,00	7,00	12,00	0,70
3	мокрый	67,90	7,85	6,70	12,80	
4	сухой	65,50	13,40	6,70	18,00	
5	мокрый	61,00	17,90	7,70	13,50	
6	сухой	62,50	17,60	6,00	12,30	0,75
7	сухой	63,36	12,20	7,80	13,30	
8	комбинированный	72,00	8,00	5,00	13,30	
9	сухой	64,02	11,32	4,47	13,30	
10 (Турция)		70,40	5,05	5,5	10,40	0,40

Как правило, минералогический состав клинкера на каждом заводе подбирается опытным путем и в течение длительного времени не меняется.

Все параметры по тонкости помола и физико-механическим показателям цементов находятся в тесном взаимодействии между собой, и изменение одного из них влечет за собой изменение свойств готового продукта. Таким образом, при неизменных показателях вещественного состава цемента и минералогического состава клинкера тонкость помола рассматривается в качестве основной характеристики, определяющей многие строительно-технические свойства цементов. При назначении требований по тонкости помола на предприятиях учитываются такие факторы как удельные затраты на помол и достигаемая прочность в 2 или 28-ти суточном возрасте (рис.2). Как видно по рис. 2, затраты энергии на помол увеличиваются экспоненциально с ростом тонины и определяют оптимальное значение последней. В данном случае важнее всего то, что это значение тонкости не одинаково для различных клинкеров и минеральных добавок. Поэтому каждый цементный завод самостоятельно определяет оптимальную тонины помола цемента с точки зрения его качества с учетом свойств исходных компонентов цементной шихты и имеющейся системы измельчения.

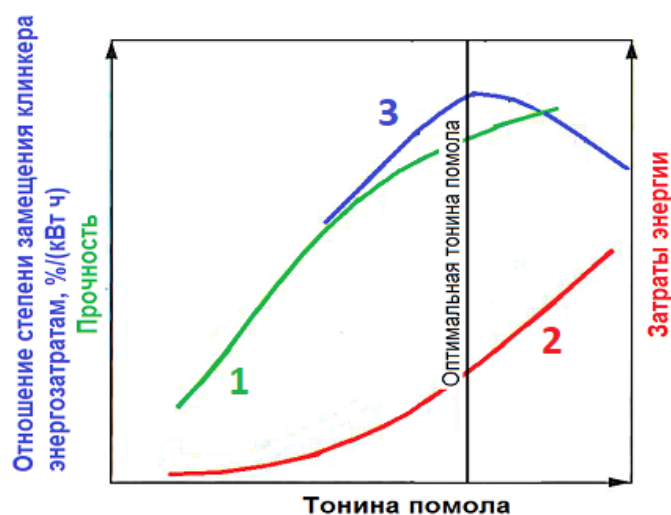


Рис. 2. Зависимость прочности продуктов твердения материала (1), затрат энергии на его помол (2) и отношения степени замещения в нем клинкера к энергозатратам на помол (3) от тонны помола материала [1]

Одной из основных тенденций в технологии бетона в течение последних пятидесяти лет во всем мире было последовательное увеличение тонкости применяемого цемента главным образом, для обеспечения повышенной прочности в раннем возрасте для поддержки ускоренных темпов строительства. В настоящее время на цементном рынке РФ доступно много цементов с тонкостью помола от $380 \text{ м}^2/\text{кг}$ до $400 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Внедрение в последние десятилетия в РФ технологий помола цемента в замкнутом цикле с сепараторами третьего и четвертого поколения, внедрение новых агрегатов для помола цемента (вертикальные мельницы), применение технологических добавок при помоле, все это привело к изменению не только удельной поверхности цемента, но и его гранулометрического состава, что сказалось на изменении кинетики набора ранней прочности, сроков схватывания, трещиностойкости и аутогенной деформации цементного теста в составе бетонов.

На старых заводах, имеющих помольные установки открытого цикла, тонкость оценивается по остатку на сите №008 (3-7%) и удельной поверхности по Блейну ($260\text{-}320 \text{ м}^2/\text{кг}$). На новых предприятиях, работающих по замкнутому циклу помола, тонкость определяется по остатку на сите №0045 (3-20%), удельной поверхности ($350\text{-}420 \text{ м}^2/\text{кг}$) или оценивается по гранулометрическому составу цемента. Причем удельные энергозатраты на помол 1 т цемента по технологии замкнутого цикла снизились примерно на 35%, что позволяет расширять выпуск тонкомолотый цементов и регулировать в более широком диапазоне свойства цементов.

Хорошо известно, что распределение частиц цемента по размерам (PSD) играет основную роль в воздействии на свойства материалов на основе цемента как в пластичном состоянии, так в затвердевшем, особенно в раннем возрасте: скорость гидратации; кинетику набора прочности, водоцементное отношение, выделение тепла в заданный промежуток времени, полуадиабатическое повышение температуры, время схватывания, аутогенную деформацию в составе бетонов (рис. 3, табл. 2).

Известно, что узкие и широкие распределения по размеру частиц оказывают различное влияние на свойства цемента. Более широкое распределение частиц по размерам увеличивает плотность упаковки и уменьшает потребность в воде (цементы, выпущенные по открытому циклу), в то время как более узкое распределение частиц по размерам обеспечивает более высокие скорости гидратации для равной удельной площади поверхности, но при высокой водопотребности (замкнутый цикл помола).

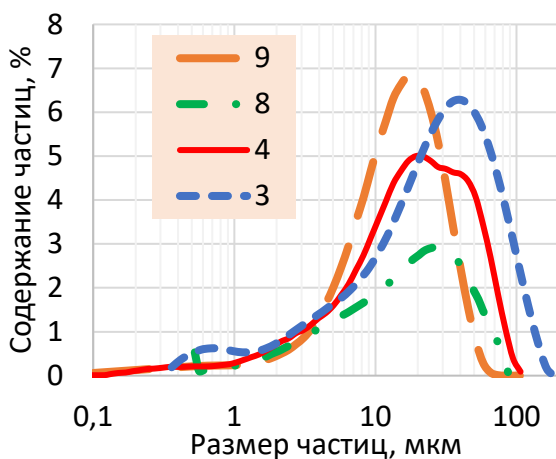


Рис. 3. Интегральное распределение частиц цементов (номера см. табл.1)

Таблица 2. Гранулометрическое

Характеристики	Номер предприятия (табл.1)			
	3	4	8	9
D (v, 0,1) , %	3,5	3,35	2,984	3,87
D (v, 0,5) , %	23,4	17,8	16,6	13,7
D (v, 0,9) , %	76,2	50,5	46,0	30,2
D [4,3] , мкм		22,9	21,0	15,6
Модальный диаметр, мкм	36,1	19,1	21,0	17,3
S.S.A. , м ² /кг	380	365	343	418

распределение частиц цементов

Фактор однородности n вносит положительный вклад в улучшение прочности при равном значении S_{y0} ; это подтверждается высокой скоростью гидратации из-за узкого распределения по размерам. Для образцов, имеющих постоянный параметр положения (n), прочность в течение 28 дней оставалась неизменной, даже если наклон прямой на диаграмме Розина-Раммлера увеличивался. Это связано с тем, что параметр положения образца цемента лежит в диапазоне 15–32 мкм, что является определяющим диапазоном размера частиц для развития прочности [2].

Тонкомолотые цементы более активны в раннем возрасте, прочность на сжатие достигает 70-90% от всего потенциала (рис. 4). Поскольку большинство производителей цемента не решаются производить широкий ассортимент продукции, те же цементы типов I и II, которые производятся для применения в условиях высокой прочности в раннем возрасте (высотное строительство, монолитное строительство масштабных объектов и т. д.), также используются в технологии производства бетонов для устройства тротуаров, дорожных и мостовых настилов, где показатель долговечности может быть гораздо более важным, чем прочность в раннем возрасте.

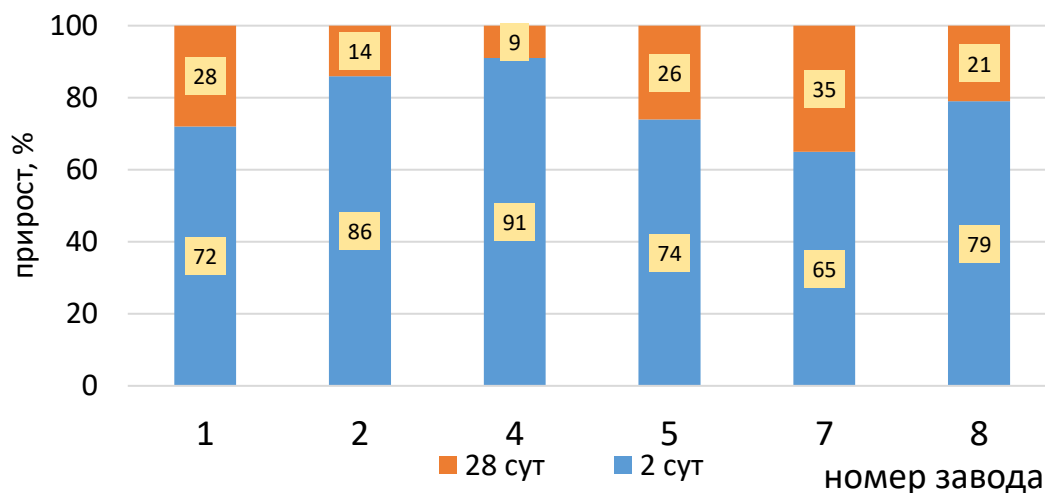


Рис. 4. Кинетика набора прочности цементами в составе бетона (номера цементов см. табл.1) (статистика НТЦ ООО «Полипласт Новомосковск»)

Дополнительными положительными аспектами повышения тонкости цемента является более эффективное использование цемента, позволяющее достичь целевых прочностей при низком содержании цемента в бетоне. В качестве альтернативы, проектировщики могут уменьшать размеры бетонных конструкций, потому что более высокие прочностные характеристики, которые достигаются тонкомолотыми цементными, обеспечивают проектную прочность.

Следует отметить, что при грубом помоле ниже В/Ц бетонных смесей, при одинаковой консистенции смеси из таких цементов достигается сравнимая 28-дневная прочность с более тонкомолотыми цементными, например, ЦЕМ I 52,5Б. Бетонные смеси на тонкомолотых цементных требуют большого расхода пластификаторов для достижения заданной подвижности, обладают низкой сохраняемостью подвижности, но достигают более высокой ранней прочности. Тенденция к получению более тонких цементных вызвала дополнительную обеспокоенность в связи с возможностью термического крекинга термочувствительных структур – от крупных массивных бетонных конструкций с относительно низким содержанием цемента до более средних структурных конструкций с более высоким содержанием цемента, определяемым соображениями высокой прочности. Очевидно, что для того, чтобы инженеры-конструкторы и технологи в конкретном секторе лучше понимали структурные последствия такого развития событий, необходимо дать количественную оценку таким проблемам.

Библиографический список:

1. Kline J., Kline C. Cement plants of the future // Intern. Cement Rev. 2013. November
2. K. Kuhlmann, H.G. Ellerbrock, S. Sprung, Particle size distribution and properties of cement, Part I: strength of portland cement, ZKG 6 (1985) 136–145.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА КГВ С МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ ОПОКОВИДНОГО МЕРГЕЛЯ

Е.С. Глаголев¹, канд. техн. наук, доцент
В.С. Лесовик¹, д-р техн. наук, профессор
Н.В. Чернышева¹ д-р техн. наук, профессор
Е.Н. Лесниченко¹, инженер (аспирант)

¹*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова*

Аннотация: В статье рассматривается возможность получения композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) для 3D аддитивных технологий строительства. В качестве активной минеральной добавки предлагается карбонатно-кремнистая порода – опоковидный мергель (ОМ), который содержит в своем составе рентгеноаморфные вещества, определяющие его гидравлическую активность при взаимодействии с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция и других новообразований, уплотняющих микроструктуру твердеющей матрицы и, как следствие, повышающих стабильность композиций. Приведены основные характеристики опоковидного мергеля. Процессы структурообразования КГВ имеют свои особенности. С участием ОМ происходит связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и вывод его из сферы реакции. Ускоряется гидролиз клинкерных минералов, одновременно увеличивается количество низкоосновных гидросиликатов кальция типа $\text{CSH}(\text{В})$, что положительно сказывается на начальной прочности затвердевшего КГВ.

Ключевые слова: композиционное гипсовое вяжущее, опоковидный мергель, физико-механические свойства.

В строительной отрасли России особое внимание уделяется возведению ограждающих конструкций малоэтажных зданий с помощью новой перспективной технологии 3D-печати. Для ее развития необходимо расширение номенклатуры технологически, экономически и экологически эффективных разновидностей материалов нового поколения с требуемыми регулируемыми свойствами: быстрыми сроками схватывания, высокими показателями прочности, однородности и прочности сцепления между различными слоями и т.д. [1-13].

В последнее время идет накопление знаний и экспериментального материала о разработанных композициях для 3D аддитивных технологий, но опробована и применяется весьма ограниченная их номенклатура (в основном на портландцементе). Имеется мало сведений об эффективности использования новых, природно-сбалансированных компонентов в составах композиционных вяжущих, удовлетворяющих всем требованиям к их использованию.

Особо перспективными для данных целей по сравнению с другими широко применяемыми в настоящее время вяжущими, являются композиционные гипсовые вяжущие (КГВ), так как соответствуют всем современным требованиям с позиции развития 3D аддитивных технологий строительства. Получение высокоэффективных КГВ сопровождается использованием сложных составов компонентов – гипсового вяжущего, портландцемента и модифицирующих кремнеземсодержащих добавок. При этом важное значение имеет минеральный состав и химическая активность добавок по отношению к портландцементу. Как из-

вестно, природные минеральные добавки в зависимости от генезиса обладают пуццолановыми способностями разнообразной химической активности.

В различных регионах нашей страны в большом количестве имеются сырьевые материалы природного и техногенного происхождения с содержанием достаточно большого количества кремнезема в различной форме. Недостаточность проведенных исследований пригодности такого сырья для использования в КГВ, а также малая изученность влияния на свойства этих материалов сдерживает возможность их широкого применения.

С целью расширения сырьевой базы доступного и дешевого сырья для получения специальных энергоэффективных КГВ для технологии 3D-печати в данной работе изучена возможность использования активной минеральной добавки из карбонатно-кремнистой породы - опоковидного мергеля Хворостянского месторождения, находящегося в 30 км от г. Губкин Белгородской области, который способен реагировать с компонентами вяжущего и активно влиять на физико-химические процессы, происходящие в твердеющей композиции.

Выполнение экспериментальных исследований проводилось в Белгородском государственном технологическом университете имени В.Г. Шухова на кафедре СМИК, в испытательном центре «БелГТАС-сертитис» с использованием существующих базовых методов исследований, включая современные физико-химические методы анализа - РФА, лазерной гранулометрии, растровой электронной микроскопии и др.

Для получения КГВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками применяли рационально подобранную смесь гипсового вяжущего α -модификации – ГВВС-16(Г-16) совместно с гидравлическим модификатором (ГМ), полученным в результате смешивания, совмещенного с кратковременным домолом в лабораторной шаровой мельнице портландцемента ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ) и предварительно тонкоизмельченного до удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ опоковидного мергеля (ОМ).

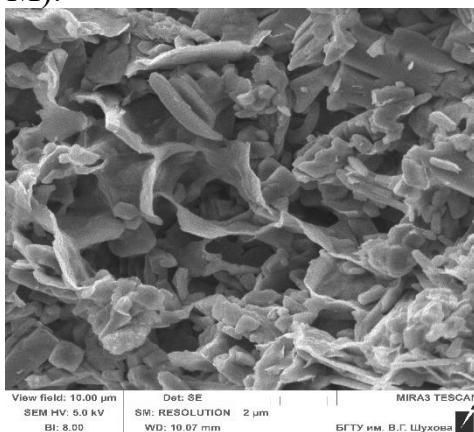


Рис. 1. Микроструктура опоковидного мергеля (ОМ)

Визуально ОМ представляет собой довольно плотную породу светло серого цвета с зеленоватым оттенком, часто трещиноватую с тонкими налетами гидроокислов железа по плоскостям трещин, беспорядочной текстуры, пелитоморфозернистой глобулярной, реликтовоорганогенной структуры с варьирующим содержанием кремнезема и карбоната кальция (рис. 1).

Основным порообразующим минералом ОМ является органогенный кальцит, среднее содержание которого – 35...38 %, опал – до 15%, остальное – смешанослойные глинистые образования и цеолиты, наблюдается замещение глинистых минералов опалом. Некоторые из минералов ОМ - аморфны или имеют дефектную кристаллическую решетку, что и предопределяет их сорбционную и пуццолановую активность (табл. 1). Кристаллическая фаза тонкомолотого до удельной поверхности 500 м²/кг ОМ, установленная методом РФА, представлена кварцем ($d = 4,27; 3,353; 2,29; 2,13; 1,98; 1,82 \dots \text{Å}$), кальцитом ($d=3,042; 2,847; 2,500; 2,288; 2,096; 1,915; 1,878 \dots \text{Å}$), глинистыми минералами.

Таблица 1. Химический состав используемых минеральных добавок

Вид добавки	SiO ₂	SiO ₂ аморф.	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	CaO	R ₂ O	SO ₃	ппп
ОМ	30,62	4,32	4,61	6,31	0,21	1,02	30,52	0,12	0,37	21,90

Важным свойством ОМ является гидравлическая активность, обуславливающая возможность его применения в составе КГВ. Экспериментально определена пуццолановая активность тонкомолотого ОМ, составившая в возрасте 30 суток - 76,4 мг/г (табл. 2).

Таблица 2. Активность опоковидного мергеля по поглощению СаО

Вид добавки	Удельная поверхность, м ² /кг	Активность по поглощению СаО (титрование), мг/г
ОМ	487	76,4

Известно [9], что на поверхности частиц ОМ преобладают отрицательно заряженные активные центры (средняя величина ξ -потенциала составляет -9,67 mV). При помоле увеличивается количество дефектов кристаллической структуры ОМ, поверхностные слои частиц кварца частично переходят из кристаллической фазы в аморфную, их реакционная активность повышается, что способствует при обычных температурах связыванию Са(ОН)₂, выделяющемуся при гидратации алита с образованием малорастворимых гидросиликатов кальция типа CSH(B).

Опытным путем было установлено отношение между тонкомолотым ОМ и ПЦ - 1;0,5, обеспечивающее оптимальные условия твердения КГВ при снижении концентрации СаО в растворе (в соответствии с ТУ на ГЦПВ 21-31-62-89) (табл.3).

Таблица 3. Изменение концентрации СаО в водной суспензии КГВ

№ п/п	Материалы, г			Концентрации СаО в р-ре, г/л, через:	
	Гипс	ПЦ	ОМ	5 сут	7сут
1	4	2,5	1,25	1,02	0,87
2	4	2,5	2,5	0,97	0,86

Важным фактором, влияющим на свойства КГВ, является величина дисперсности его компонентов. При сравнении гранулометрического состава бездобавочного цемента и ГМ с минеральной добавкой ОМ было установлено:

графики распределения частиц вяжущих имеют схожий полифракционный характер. У ГМ с добавкой ОМ наблюдается наибольшее смещение графика из области крупных частиц (100 мкм) в область более мелких (до 60 мкм), снижение фракции частиц в области 3...6 мкм с увеличением мелкой фракции частиц в области 0,06...0,5 мкм. Смещение графиков в сторону уменьшения размеров частиц указывает на повышение их дисперсности, что способствует уплотнению структуры, оптимизации гранулометрического состава вяжущих, ускорению процесса их структурообразования и, как следствие, повышению прочности (рис.2).

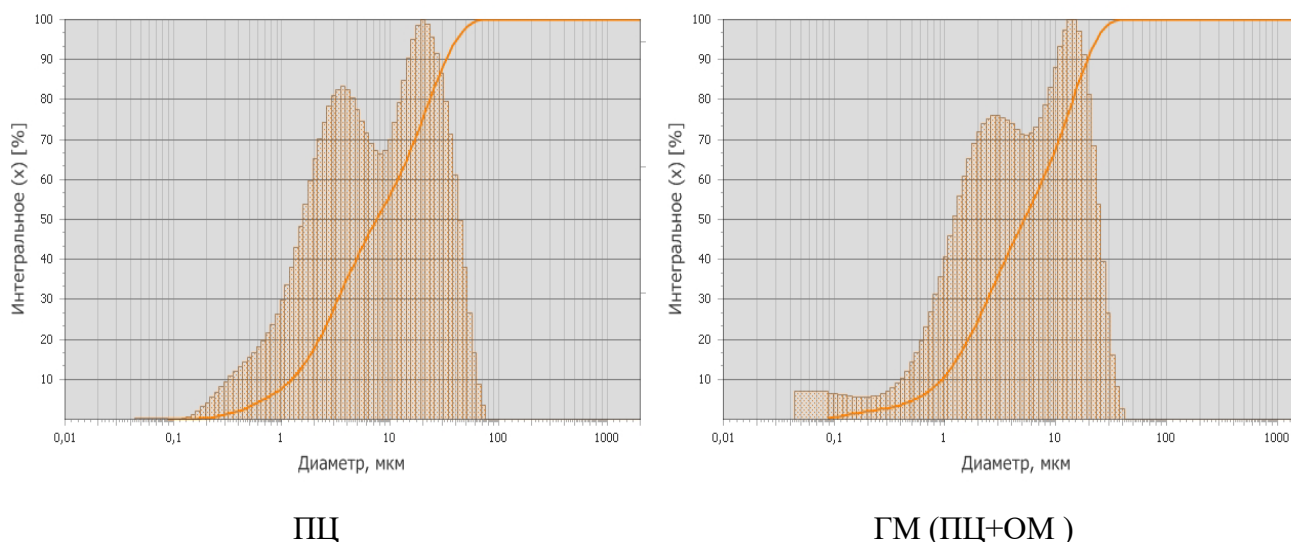


Рис. 2. Гранулометрический состав портландцемента и гидравлического модификатора в составе КГВ

Особый теоретический и практический интерес представляют результаты исследования изменения во времени показателей тепловыделения ранней стадии твердения ГМ с ОМ, оказывающего влияние на процессы гидратации и структурообразования КГВ [14-15]. Было выявлено (рис.3), что реакционно активные частички ОМ в составе ГМ «запускают» пуццолановую реакцию, в результате чего интенсивно образующийся портландит, блокирующий гидратацию C_3S и C_3A , стремительно вступает с ним в реакцию, что приводит к равномерной кристаллизации новообразований (гидросиликатов кальция второй генерации) и большей их концентрации без возникновения внутреннего напряжения.

Результаты прочностных характеристик (табл. 4), моделирующие условия контакта ОМ с клинкерными минералами и процессы между ними, а также РФА и электронной микроскопии, являются подтверждением стабильности сформировавшихся структур затвердевших КГВ в ранние сроки твердения.

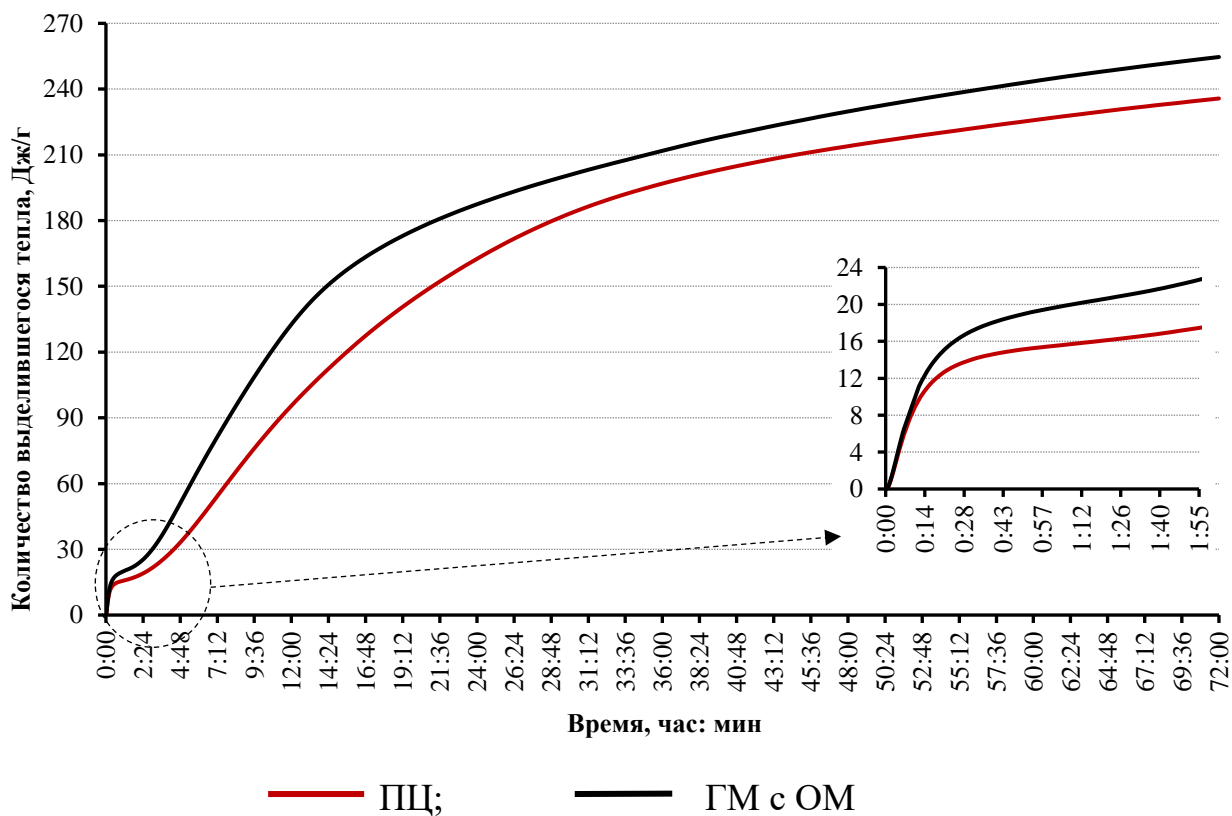
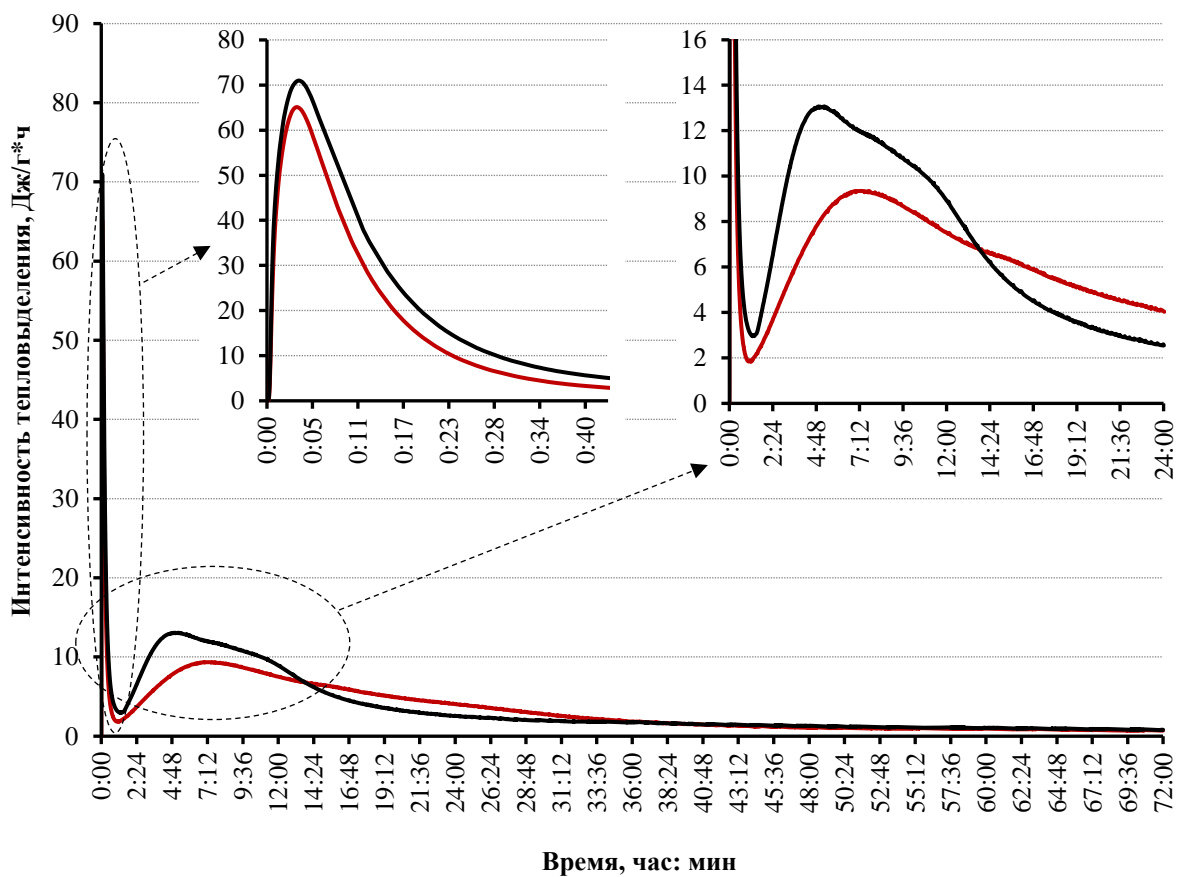


Рис.3. Кинетика тепловыделения при гидратации ГМ с добавкой ОМ

Таблица 4. Составы и основные свойства КГВ

№ п/п	Компоненты КГВ, % по массе:			В/В, %	Расплав, мм	Сроки схватывания, мин., -с		R сжатия, МПа	
	Г-16	ПЦ	ОМ			Начало	Конец	2 часа	7 сут
1	70	20	10	0,42	120	8-30	9-00	9,6	25,8
2				0,45	165	11-00	11-20	8,7	22,7
3				0,5	220	11-00	11-30	7,5	20,0

Примечание: активность КГВ определялась на образцах-кубах, размером 30x30x30 мм

Тонкомолотый до удельной поверхности 500 м²/кг ОМ активно участвует в процессах гидратации КГВ, нарастание прочности идет параллельно изменению его микроструктуры (рис.4, состав №1) и фазового состава новообразований.

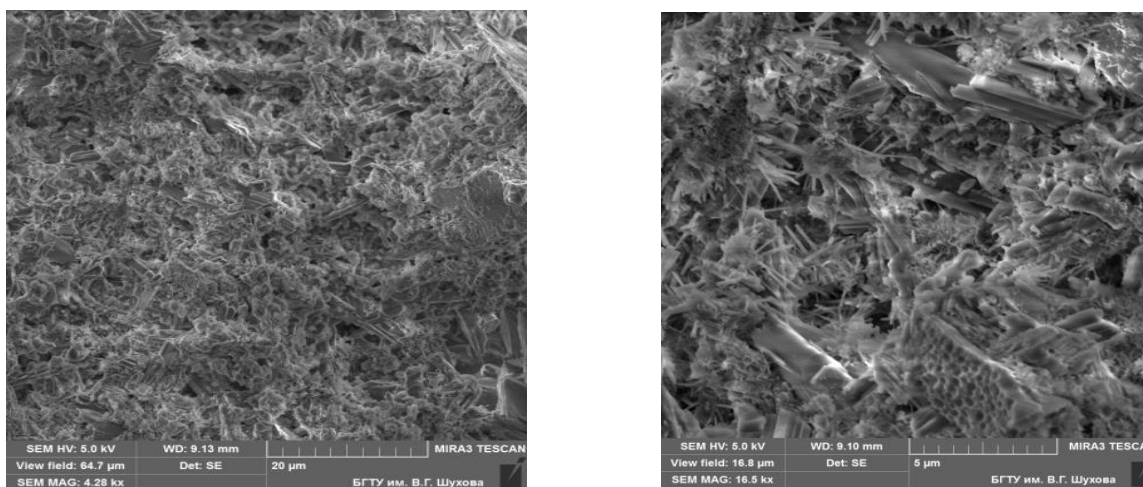


Рис. 4. Микроструктура затвердевшего КГВ с минеральной добавкой ОМ

Минеральная добавка ОМ и гетерогенный состав вяжущего способствуют синтезу более плотной и прочной структуры композита, наблюдается зарастание межзернового пространства и пор, что приводит к повышению прочности затвердевших КГВ.

Основным цементирующим веществом исследованной пробы (состав №1, 7 сут.), установленным РФА, является: дивудный сульфат кальция ($d=7,66; 4,29; 3,81; 3,074; 2,881; 1,877... \text{Å}$); карбонат кальция ($d=3,029; 2,089; 1,912; 1,626; 1,6044 1.520; 1.440... \text{Å}$); частично закpисталлизованный тоберморитоподобный гидросиликат кальция ($d=3,07; 2,88; 2,4; 2,1; 1,81... \text{Å}$); низкоосновный гидроалюминат кальция ($d=10,5; 2,87; 2,68; 2,55; 1,75... \text{Å}$); кварц ($d=3,35; 2,54; 2,46; 2,22; 2,28; 2,133; 2,08; 1,813; 1,54... \text{Å}$). При этом выявлено, что интенсивность линии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - ($d=4,93... \text{Å}$) больше интенсивности линии $2,63 \text{Å}$, несмотря на то, что на линию $2,63 \text{Å}$ накладывается линия негидратированного цемента. Эттрингит на рентгенограммах практически не обнаружен, имеются лишь следы. Многие отражения новообразований накладываются друг на друга.

Таким образом, создаются благоприятные условия для связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ аморфной фазой SiO_2 в составе ОМ, способствующие снижению основности твердеющей системы и образованию низкоосновных гидросиликатов кальция – $\text{CSH}(\text{В})$, имеющих отрицательный заряд поверхности и осаждающихся, пред-

положительно, на положительно заряженных активных центрах CaCO_3 , одновременно выступающих дополнительными центрами кристаллизации для различных гидроалюминатных новообразований. В связи с этим обеспечивается более быстрый набор прочности КГВ в начальный период твердения, исключая последующее саморазрушение структуры за счет кристаллизационного давления. Это дает возможность использования ОМ в качестве активной минеральной добавки, что будет способствовать увеличению эксплуатационных характеристик в целом.

Библиографический список:

1. Справочник. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) / под общ. ред. проф., д-ра техн. наук А.В. Ферронской. - М.: Изд-во АВС, 2004. - 485 с.
2. Рахимов, Р.З. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего, будущего / Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова // Строительные материалы. – 2013. – №5. – С. 57 – 59.
3. Гипсовые материалы и изделия нового поколения. Оценка энергоэффективности / Ю.А. Гончаров, Г.Г. Дубровина, А.Г. Губская, А.Ф. Бурьянов. – Минск: Колоград, 2016. 336 с.
4. Лесовик, В.С. Применение композиционного гипсового вяжущего в 3D - технологиях стройиндустрии / В.С. Лесовик, М.Ю. Дребезгова // Науч.-практич. конф. к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук, Баженова Юрия Михайловича. Белгород. 2015. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. С. 151 – 157.
5. Чернышева, Н.В. Особенности формирования структуры композиционного гипсового вяжущего с минеральными добавками разного генезиса / Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик, М.Ю. Дребезгова, А.В. Герасимов, Х.-Б.Фишер // Междунар. науч.-практ. конф. «Наукоемкие технологии и инновации» (XXII научные чтения), Белгород, 6–7 октября 2016 г. / БГТУ. Белгород, 2016. С. 457 – 471.
6. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgova M.Y., Lesnichenko E.N. Thermal insulating and constructive foamed concrete on a composite gypsum binder // Materials Science Forum. 2020. Pp. 125-130.
7. Tay Y., Panda B., Paul S, Noor M., Tan M. Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a re-view // Virtual and Physical Prototyping. 2017. № 12(3). Pp. 261–276. doi: 10.1080/17452759.2017.1326724
8. Дребезгова, М.Ю. Современные аддитивные технологии в малоэтажном строительстве / М.Ю. Дребезгова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 6. С. 66-69.
9. Глаголев, Е.С. Эффективное композиционное вяжущее для монолитного пенобетона / Е.С. Глаголев, В.В. Воронов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород. 2016. С. 79 – 84.
10. Гордина, А.Ф. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры / А.Ф. Гордина, Г.И. Яковлев, И.С. Полянских, Я. Керене, Х.Б. Фишер, Н.Р. Рахимова, А.Ф. Бурьянов // Строительные материалы. 2016. № 1-2. С. 90-95
11. Гаркави, М.С. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей / М.С. Гаркави, А.В. Артамонов, Е.В. Колодежная, А.П. Нефедьев, Е.А. Худовекова, А.Ф. Бурьянов, Х.Б. Фишер // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 14-17.
12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Evtushenko E.I. Nano-modified polymer solution for additive technologies // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. Iss. 4. Pp. 24930–24937.
13. Дребезгова, М.Ю. Свойства композиционного гипсового вяжущего с многокомпонентными минеральными добавками / М.Ю. Дребезгова, А.Х. Аласханов // В сб.: Актуальные проблемы современной строительной науки и образования Материалы всероссийской научно-практической конференции. 2017. С. 160-168.
14. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1989. – 304 с.

15. Ушеров-Маршак, А.В. Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / А.В. Ушеров-Маршак. – Харьков: Факт, 2002. 183 с.

АПРОБАЦИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ НА БИТУМНОМ ВЯЖУЩЕМ

До Чонг Тоан¹, аспирант

С.С. Иноземцев¹, к.т.н., н.с. НОЦ НТ

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Акустико-эмиссионный метод позволяют решать задачи по изучению структуры материалов, в том числе композитов на основе битумного вяжущего. Для апробации метода акустической эмиссии при исследовании композитов на основе битумного вяжущего были изготовлены образцы из битума БНД 60/90 и минерального порошка. В условиях отрицательных температур у исследуемых образцов наблюдается эмиссия акустических импульсов, суммарное количество которых увеличивается при снижении температуры. Увеличение содержания минерального наполнителя в составе смеси приводит к снижению суммарного количества акустических импульсов. Акустическая эмиссия битума в условиях отрицательных температур снижается после старения в течение 24 часов при температуре 80 °С. Компонентами битума, структурная перестройка которых выступает основным источником акустической эмиссии, являются низкомолекулярные соединения, которые более термочувствительны, чем асфальтены.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, интенсивность, битум, структура, деструкция

Метод акустической эмиссии является высокоточным неразрушающим методом для исследования материалов, данные, с помощью которого они получены, позволяют решать задачи по изучению структуры. Использование метода акустической эмиссии позволяет проводить исследования структуры строительных материалов, процессов разрушения, оценке влияния агрессивных факторов, коррозии, магнитного и радиационного воздействия, а также фазовых переходов и химических реакций [1...5].

Таким образом, метод акустической эмиссии может быть использован при проведении научных исследований, направленных на разработку новых строительных материалов, проектировании их составов, синтеза модификаторов, в том числе для композитов на основе битумного вяжущего [6, 7].

Для апробации метода акустической эмиссии при исследовании композитов на основе битумного вяжущего были изготовлены образцы из битума БНД 60/90 и минерального порошка. Использовался Битум БНД 60/90 с температурой размягчения и хрупкости 51 °С и -20 °С, соответственно, и глубиной проникания иглы при температуре 25 °С и 0 °С, соответственно, 67 мм⁻¹ и 36 мм⁻¹. Минеральный порошок неактивированный из карбонатных горных пород МП-2 по показателям качества соответствовал требованиям ГОСТ 32761-2014. Исследования проводились на образцах-цилиндрах из смесей различного состава, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Составы смесей для изготовления образцов-цилиндров

Наименование компонента	Содержание компонента для состава, %		
	№ 1	№ 2	№ 3
Битум БНД 60/90	100	40	20
Минеральный порошок МП-2	–	60	80

В процессе структурных преобразований в материале, вызванных фазовыми переходами, деформациями, образованием дефектов, изменением кристаллической решетки, происходит излучение упругих волн, которое является акустической эмиссией [8, 9]. Источниками акустической эмиссии являются дислокационные процессы, которые связаны с отрывом дислокаций от точек закрепления, их перемещением, торможением возле препятствий, формированием их скоплений или уничтожением [10, 11].

Метод акустической эмиссии является высокоинформативным методом, позволяющим регистрировать как интенсивность и амплитуду эмиссии, так и число импульсов и уровень сигналов эмиссии.

В работе исследовалось влияние состава органоминеральных смесей и температуры окружающей среды на суммарное количество акустических импульсов, которые регистрируется для образцов, размещенных в климатической камере. Предварительно к образцам крепились датчики с помощью жгутов, после чего совместно устанавливались в климатическую камеру, где поддерживалась температура от -20 до 20 °С.

Результаты определения суммарного количества акустических импульсов представлены на рисунке 1.

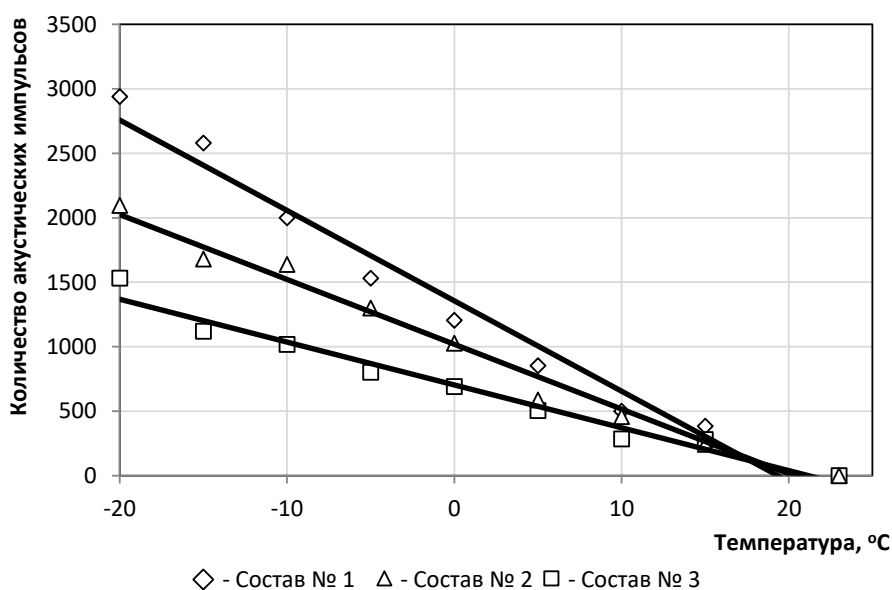


Рис. 1. Зависимость изменения суммарной акустической эмиссии

Анализ рисунка 1 показывает, что в условия отрицательных температур у исследуемых образцов наблюдается эмиссия акустических импульсов, суммарное количество которых увеличивается при снижении температуры. При этом увеличение содержания минерального наполнителя в составе смеси приводит к снижению суммарного количества акустических импульсов, что свидетельствует о регистрации эмиссии, которая преимущественно связана с процессами структурной перестройки связующего, фазовыми и релаксационными переходами различных компонентов дисперсной системы битума.

Для подтверждения указанного предположения исследовалось влияние изменения группового состава битума на суммарное количество акустических импульсов в условиях отрицательных температур. Образцы битума подвергались термической обработке в сушильном шкафу в течение 24 часов при тем-

пературе 80 °С, в результате которого часть низкомолекулярных мальтеновых фракции испаряется [12], а в групповом составе битума возрастает концентрация асфальтенов [13].

Зависимость изменения суммарного количества акустических импульсов от температуры описывается линейной зависимостью $\Sigma N = aT + b$, по которой можно оценить степень влияния старения битума на акустическую эмиссию. Значение эмпирических коэффициентов уравнений зависимости для исходного битума и битума после термического старения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры зависимостей изменения суммарного количества акустических импульсов от температуры

Наименование компонента	Значение эмпирических коэффициентов	
	<i>a</i>	<i>b</i>
Исходный битум	-70,103	1355,9
Битум после старения	-59,095	1181,2

Анализ таблицы 2 показывает, что наклон прямой зависимости суммарного количества акустических импульсов от температуры для битума после старения снижается на 15 %, то есть акустическая эмиссия таких образцов меньше. Это может свидетельствовать о том, что компонентами битума, структурная перестройка которых выступает основным источником акустической эмиссии, являются низкомолекулярные соединения, которые более термочувствительны, чем асфальтены.

Таким образом, метод акустической эмиссии позволяет исследовать как битумо-минеральные композиты на основе битума, так и битумы различного группового состава. Принцип регистрации акустической эмиссии может быть использован при разработке методов исследования структурных изменений битумных вяжущих и композитов на их основе, в том числе асфальтобетонов, которые происходят после воздействия внешних эксплуатационных факторов, а так же для прогнозирования скорости деструктивных процессов в процессе эксплуатации.

Библиографический список:

1. Иноземцев С.С., Королев Е.В., Тоан Д.Ч. Перспективы использования метода акустической эмиссии для исследования самовосстанавливающихся асфальтобетонов. Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам XXX Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – М., Изд. «Интернаука». 2019. № 12 (28). С. 157-164
2. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Analysis of the kinetics of destruction of nanomodified high-strength light concrete by the method of acoustic emission. Construction Materials. 2016. Vol. 1-2. Pp. 38-47.
3. Fan Xiangqian, Shaowei Hu, Lu Jun, Congjie Wei. Acoustic emission properties of concrete on dynamic tensile test. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 114. Pp. 66-75.
4. Jiang Y., Xu F., Xu B., Vargas E.S., Gallego A. Application of acoustic emission tomography in concrete structures. Journal of Southeast University (Natural Science Edition). 2014. Vol. 44. Issue 4. Pp. 822-825.
5. Королев Е.В., Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Самошин А.П., Иноземцев С.С. Обоснование выбора способа наномодифицирования асфальтобетонных смесей. Вестник Белгород-

- ского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова . 2012. № 4. С. 40-43.
6. Иноземцев С.С., Гришина А.Н., Королев Е.В. Модель комплексного наноразмерного модификатора для асфальтобетонов. Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 15-21.
 7. Смирнов В.А., Королев Е.В., Иноземцев С.С. Стохастическое моделирование наноразмерных систем Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2012. Т. 4. № 1. С. 6-14.
 8. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М. : Машиностроение. 2002. 239 с.
 9. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 276 с.
 10. Нацик В.Д., Чишко К.А. Акустическая эмиссия дислокаций, выходящих на поверхность кристалла //Акустический журнал. 1982. Т.28. Вып. 3. С. 381-389.
 11. Бехер С.А., Бобров А.Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии : учеб. пособие – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. 145 с.
 12. Порадек С.В. Еще раз о деградации битума при нагреве. Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 1. С. 27.
 13. Касаткин Ю.Н. Старение и структурная долговечность битумоминеральных материалов в конструкции. Строительные материалы. 2001. № 9. С. 30–33.

ОТХОДЫ ШИННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

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

Е.О. Безверхова¹, аспирант

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

Аннотация. Сеть автомобильных дорог – важнейший элемент экономики России. Ее эффективное функционирование и устойчивое развитие являются необходимым условием перехода к экономическому росту, обеспечения целостности и национальной безопасности страны, повышения уровня и улучшения условий жизни населения. Однако дорожная сеть Российской Федерации в настоящее время не в полной мере соответствует политическим, социальным и экономическим потребностям общества. Понимая это Минтранс России во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» разработали приоритетный национальный проект «Безопасные и качественные дороги», который предусматривает приведение в нормативное состояние дорожной сети. Поэтому одной из наиболее актуальных проблем, требующих незамедлительного решения в дорожной отрасли, является обеспечение требуемого уровня качества автомобильных дорог. Что возможно достичь за счет применения экономически и технически эффективного подхода в решении задач по увеличению межремонтного срока службы асфальтобетонных покрытий особо высоконагруженных трасс, мостовых переходов, подвергающихся механическим и климатическим нагрузкам, превышающим расчетные нормативные показатели.

Одним из наиболее перспективных направлений решения указанной проблемы является применение функциональных резинобитумных вяжущих, обладающих повышенной устойчивостью к климатическим и эксплуатационным агрессивным воздействиям, позволяющих продлить эксплуатационный срок службы дорожного покрытия и существенно сократить затраты на содержание и восстановление автомобильной дороги.

Ключевые слова: асфальтобетон, резиновый модификатор, покрышки, резиновая крошка, битумные вяжущие, модифицирование.

Асфальтобетон – композиционный материал, склонный к интенсивному воздействию различного множества механизмов деформации и разрушения целостности покрытия, связанному с высокой транспортной нагрузкой, перепадами температуры, воздействием агрессивных сред, водонасыщением и многократными циклами замораживания-оттаивания, приводящими к снижению адгезионных связей в системе «каменный материал-битумное вяжущее». При этом качество и срок службы асфальтобетонных покрытий во многом определяется адсорбционными и адгезионными силами сцепления и смачивания битумным вяжущим шероховатых поверхностей инертных материалов, а также от когезионной прочности битумного вяжущего, как основного структурообразующего компонента асфальтобетона.

Улучшение свойств битумного вяжущего можно достичь посредством применения различных модифицирующих компонентов:

- полимерных добавок, улучшающих когезионные эксплуатационные характеристики битумного вяжущего;

-поверхностно-активных веществ, улучшающих адгезионные характеристики битумного вяжущего;

-наноструктурных модификаторов, упрочняющие структуру битумного вяжущего.

Для решения обозначенных проблем, протекающих в процессе эксплуатации асфальтобетонного покрытия, необходимо использовать комплекс обозначенных мер, а это является сложным, трудоемким и дорогостоящим решением. Однако, одним из преобладающих факторов, оказывающим влияние на масштабирование научных разработок, является ее экономическая эффективность без потери качества продукции. Поэтому актуальным направлением является разработка технологии, позволяющей эффективно реализовать отходы шинной промышленности, что дополнительно позволит снизить негативный прессинг на окружающую среду, а также разработка научно-обоснованных критериев для создания термодинамически устойчивых комплексных функциональных материалов.

Утилизация использованных покрышек является одним из сложных и трудоемких направлений мирового рынка переработки отходов. Это связано с неоднородностью состава шины и с необходимостью предварительного разделения ее на компоненты. При этом потребность в утилизации покрышек растет пропорционально росту производства и использования шин в мире. Производство шин – одна из наиболее развитых мировых отраслей. В мире ежегодно производят огромное количество новых автопокрышек, на изготовление которых требуется 15-20 млн тонн шинной резины. На современном этапе стоимость такого количества шинной резины достигает 50 млрд. долларов. Тогда как показатель переработки в России остается на низком уровне – не более 30%, тогда как в Европе этот показатель достигает 82% (Германия – 100%), а ежегодный объем снимаемых с эксплуатации шин в России – более 1 млн. тонн.

Основной метод переработки изношенных шин в России – измельчение с получением резиновой крошки. Шины изнашиваются достаточно быстро, при этом химический состав резины в этих шинах практически не отличается от химического состава исходной резины. Поэтому ежегодно образуется большое количество изношенных автопокрышек, которые содержат примерно столько же (16-20 млн тонн) исходной шинной резины. Загрязнение земли, обочин, переполнение свалок оказывают пагубное влияние на окружающую атмосферу. Поэтому в утвержденное распоряжение Правительства РФ от 25.07.2017 № 1589-р Перечень видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается, включены резиновые шины, камеры и покрышки от них. Постановление вступило в силу 01.01.2018, запрет на захоронение шин – с 01.01.2019.

Дополнительной актуальной составляющей является и то, что экспорт товарной продукции (использованные резиновые покрышки) также затруднен, так

как большие запасы шинных отходов есть в любой стране мира и каждому государству выгоднее развивать собственную отрасль переработки.

Таким образом экономика и экологическая обстановка обуславливают актуальность разработки технологии, позволяющей эффективно переработать использованные резиновые покрышки с получением резинобитумного вяжущего с термодинамически устойчивой структурой.

В настоящий момент в России проводились исследования по введению резиновой крошки в дорожное строительство и битумоминеральные смеси Горелышевым Н.В., Сюньи Г.К., Лысихиной А.И., Руденской И.М., Слепой Б.М., Печеным Б.Г., Гезенцвеем Л.Б., Прокопцом В.С. и др [1]. Основными направлениями использования резиновой крошки являются технологические модели «су-хого» введения частиц резины в смеси асфальтобетона и «мокрого» метода добавления резиновой крошки напрямую в дорожный битум. «Сухой» способ является наиболее простым и экономически выгодным [2]. Главный недостаток - постепенное набухание резиновой крошки, из-за чего покрытие разрушается и разуплотняется, а крошка выкрашивается. «Мокрый» метод основан на разложении и девулканизации резины в битумных вяжущих [3]. Главный недостаток - выделение токсичных веществ, которые содержатся в резине; так же наблюдается уменьшение адгезии вяжущего, сдвиговых показателей асфальтобетона и его водостойкости; потребность дорогостоящих добавок и дополнительного специализированного оборудования.

Отечественные и зарубежные исследования показывают, что для повышения физических и механических свойств дорожного асфальтобетона при любой технологической модели введения резиновых частиц необходимо тонкодисперсное измельчение покрышек. Установлено, что даже при самом дисперсном измельчении резины (размер до 1 мм и меньше), крошка не будет растворяться в битуме, а находится внутри в виде неполностью набухшей дисперсии [4, 5, 6].

В МАДИ были проделаны работы, доказывающие улучшение свойств асфальтобетона при «сухом» способе введения резиновой крошки. Но, как отмечается в другой работе [7], многие виды резин не поддаются эффективному диспергированию без охлаждения при использовании штатного комплекта пальцевых и лопастных роторов. Исследованиями, проведенными в СибАДИ (Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет) под руководством проф. В.С. Прокопца [8], установлено, что для достижения удовлетворительного качества диспергирования резиновой крошки необходимо использование специальной конфигурации дезинтегратора. Повторное измельчение резинового порошка не приводит к заметному увеличению тонкости помола. Это обосновывается возникшими электростатическими полями, которые привели к коагуляции мельчайших частиц резины. Поэтому было предложено произвести диспергирование резиновой крошки в присутствии поверхностно-активного вещества в качестве добавки. Экспериментальные исследования по использованию отхода завода моющих средств в

качестве гидрофильной добавки поверхностно-активного вещества показало, что дисперсность резиновой крошки увеличивается [9].

Необходимым условием успешного модифицирования является однородное распределение по объему битумного вяжущего эластичных частиц (кластеров) и достижение субмикронных размеров данных кластеров. Существующие производственные технологии модифицирования вяжущего подразумевают введение в битум крупных полимерных частиц и затем тщательное перемешивание смеси, позволяющее достичь снижения размеров частиц модификатора до микронного уровня. Большинство существующих методов измельчения позволяют получать только сравнительно крупные частицы модификаторов (полимеров и резины) с размером от нескольких сантиметров до 0,2-0,6 мм [8]. Получение более мелких частиц модификатора требует больших энергозатрат, а также это сопровождается получением продукции, характеризующейся слеживаемостью. Кроме того, традиционные методы измельчения приводят к получению резиновых частиц с гладкой поверхностью (типа «битое стекло») и низкой химической активностью, что не позволяет достичь заметного улучшения свойств конечного продукта (модифицированного битумного вяжущего) и существенно ограничивает область их дальнейшего применения.

Исследователи, независимо от рассматриваемой системы, сталкиваются с общей проблемой, связанной с обеспечением эффективного диспергирования и равномерного объемного распределения модификаторов как в среде-носителе, так и в модифицируемой матрице композита.

В настоящий момент отсутствуют научно обоснованные критерии получения эффективных термодинамически устойчивых дисперсионных систем с резиновым модификатором. Отсутствие знаний о механизме взаимодействия углеводородных сред и полимерного резинового модификатора не позволяет эффективно управлять процессом его растворения для получения дисперсных систем с заданными параметрами свойств и их стабильностью. Что делает данное направление актуальным и перспективным.

Библиографический список:

1. Отечественный и зарубежный опыт применения резины в дорожном строительстве [Электронный ресурс] - режим доступа: <http://www.bitrack.com/opyt-primeneniya.html?PHPSESSID=hcne33vdrngn18n1vilptaj5>
2. Марков, В.В. Новые методы использования отработанных резин [Текст] / В.В. Марков, С.А. Резниченко, А.Е. Корнев, Ю.В. Кукушкин, Е.В. Алифанов / Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – №3. – С. 36.
3. Way, G.B. Rubberised bitumen in road construction [Текст] / G.B. Way / The waste and resources action programme, Vandury, Oxfordshire, UK, The Old Academy, 2006.
4. Вулканизированный асфальтобетон повышенной долговечности для дорожных покрытий. Сер. Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: Экспресс-информация. – М., 1980. - Вып. 16. –53 с.

5. Прокопец В.С. Повышение эффективности дорожностроительных материалов механоактивационным модифицированием исходного сырья: автореф. дис., д-ра техн. наук : 05.23.11 / В.С. Прокопец. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. – 42 с
6. Механоактивации как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении / Н. И. Алфимова [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. - 2016. - № 6. - С. 85-89.
7. Никольский В.Г. Упругодеформационное измельчение термопластов / В.Г. Никольский, Е.Л. Акопян, А.Ю. Кармилов и др. // ДАН СССР. –1986. – Т.291. – № 1. – С.133–136.
8. Исследовать эффективность измельчения резиновых отходов в модельном измельчителе и дать рекомендацию на изготовление опытно-производственной дезинтеграторной установки для получения резиновой крошки требуемой дисперсности: отчет о научно-исследовательской работе, тема № 113-03 / В.С. Прокопец, Е.А. Бедрин. – Омск: СибАДИ, 2016.
9. Усачев С.В. Механика разрушения и свойства резин, содержащих ИВ разной дисперсности / С.В. Усачев, Д.П. Емельянов, Г.М. Галыбин, Н.Л. Сергеева // Каучук и резина.–1987.- №4.–С. 27–33.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КИРПИЧА МЯГКОЙ ФОРМОВКИ В ВОССОЗДАНИИ ИСТОРИЧЕСКОГО ОБЛИКА ГОРОДОВ

Ю.А. Божко¹, ассистент

К.А. Лапунова¹, канд. техн. наук., доцент

¹*Донской государственный технический университет*

Аннотация. В статье рассматривается стремительное развитие среды современных городов и их разрыв с историческими центрами. Однако, замечены тенденции по реновации объектов культурного и архитектурного наследия и придания им второй жизни. Одним из наиболее подходящих материалов, связующих прошлое и настоящее, является кирпич мягкой формовки с визуально состаренной поверхностью. Благодаря своей широкой цветовой гамме и необычной фактуре, возможности его применения при восстановлении исторических объектов необычайно широки. Этому способствует и технические характеристики: прочность, морозостойкость, водопоглощение и др. Отдельным важным аспектом является полнотелость кирпича, что позволяет использовать его при сложных архитектурных кладках. Приведены примеры успешной реновации объектов культурного наследия как в Европе, так и в нашей стране.

Ключевые слова: архитектура, реновация, объект культурного наследия, кирпич мягкой формовки, фактура, цвет.

Введение. В современном мире мода меняется стремительно, оставляя отпечаток на окружающей нас среде: архитектуре, предметах быта и мебели. Каждая эпоха характеризуется определенными стилями с их характерными особенностями. Появляются новые строительные материалы, которые с легкостью входят в доверие потребителей, и есть такие, кто не находит нужного отклика. Керамика – это один из фундаментальных материалов, который не теряет своей актуальности с момента его открытия и по настоящий момент. Самым распространенным керамическим материалом является кирпич. Он прошел огромный путь трансформации – менялась его форма, размеры, цвет, поверхность, но лишь суть оставалась постоянной. Кирпич является той элементарной единицей, из которой можно создать как рядовой объект, так и шедевр архитектуры. По истории развития керамики написано огромное количество книг и научных статей, существует масса противоположных мнений. В этой отрасли трудятся ведущие технологи, искусствоведы, архитекторы и инженеры.

Последние два десятилетия керамическая отрасль нашей страны переживает подъем после почти полувекового застоя. Политика второй половины двадцатого века не поощряла строительства новых и функционирование имеющихся кирпичных заводов. Керамическая отрасль находилась в упадке и существенно отстала в технологическом плане от европейских стран. В подавляющем большинстве случаев выпускался лишь рядовой кирпич, необходимый для массовых «безликих» застроек. Индивидуальность и художественная выразительность была не в моде. Однако, в самом начале двадцать первого века ситу-

ация стала меняться, и благодаря возросшему спросу на цветной лицевой кирпич родилось и предложение. На сегодняшний момент в России налажено производство качественного лицевого кирпича широкой цветовой гаммы, а также единичные заводы по выпуску фасадного клинкера и даже кирпича мягкой формовки.

Что же представляет собой кирпич мягкой формовки? Это кирпич, произведенный по технологии заполнения форм массой с влажностью выше формочной, обеспечивающий эксплуатационные характеристики кладки и создание декоративного эффекта «кладки под старину» с визуальной «состаренной» поверхностью. Внешний вид такого материала обладает высокой художественной выразительностью, позволяет передать несравненный шарм старинного кирпича европейских городов.

Архитектура, в целом, может внести весомый вклад в создание безопасного и комфортного мира для жизни людей в современных мегаполисах. Действенными способами решения проблем расширения городов, нехватки площадей и перерасхода ресурсов может являться ремонт и модернизация имеющихся кирпичных зданий. Ведь именно керамические строительные материалы обладают высокой прочностью и отличными теплоизоляционными свойствами. А их универсальность в применении позволяет решать сложные архитектурные задачи.

В европейских странах государственные программы по реновации уже дали свои значительные результаты. Огромное значение придается вопросу энергоэффективности и экологичности материалов. К сожалению, опыт нашей страны в реновации объектов архитектурного наследия не столь велик, но работы в этом направлении ведутся. На примере некоторых выдающихся объектов можно увидеть, насколько уникальным материалом является кирпич мягкой формовки.

Основная часть. Кирпичная архитектура демонстрирует разнообразные подходы, которые используются при реконструкции зданий – конструктивные решения и новое эстетическое видение. Керамический кирпич способен передать и очень тонко подчеркнуть характер имеющегося здания. Главным вектором реновации является восстановление первичной практичности, создание максимального удобства и обновление фасада в соответствии с последними тенденциями в архитектуре. Особенно интересны те проекты, где при помощи грамотного проектирования, существенно увеличено жилое пространство, и приобретен более широкий функционал использования. Разнообразие эффектов, создаваемое при помощи кирпичной кладки, позволяет проектам играть новыми красками и обретать вторую жизнь.

Современные способы ремонта и правильно подобранные материалы для реконструкции зданий продлевают сроки их эксплуатации и значительно повышают их практическую ценность. Благодаря керамическим строительным материалам формируются не только красивые фасады, но и уютные ландшафты, гармонично вписывающиеся в существующую городскую застройку.

Особого внимания требует реновация промышленных помещений, таких как заводы и фабрики, мельницы, водонапорные башни, склады и прочие стро-

ения. Войны, пожары и наводнения, смена владельцев и годы запустения дают о себе знать. Так случилось и с мельницей Бургмюле в Бранденбурге на Гавеле в Германии. В 2002 году она практически полностью сгорела в пожаре. Но уже к 2015 году старинное здание мельницы и стоящий рядом зерновой склад были отремонтированы и теперь выполняют функцию современного жилого комплекса на набережной Бранденбурга (рис. 1). Здание даже внесли в список исторических памятников. Основной целью реновации являлось максимальное восстановление здания после пожара с сохранением его естественного вида. Главным критерием было использование экологичных материалов [1].

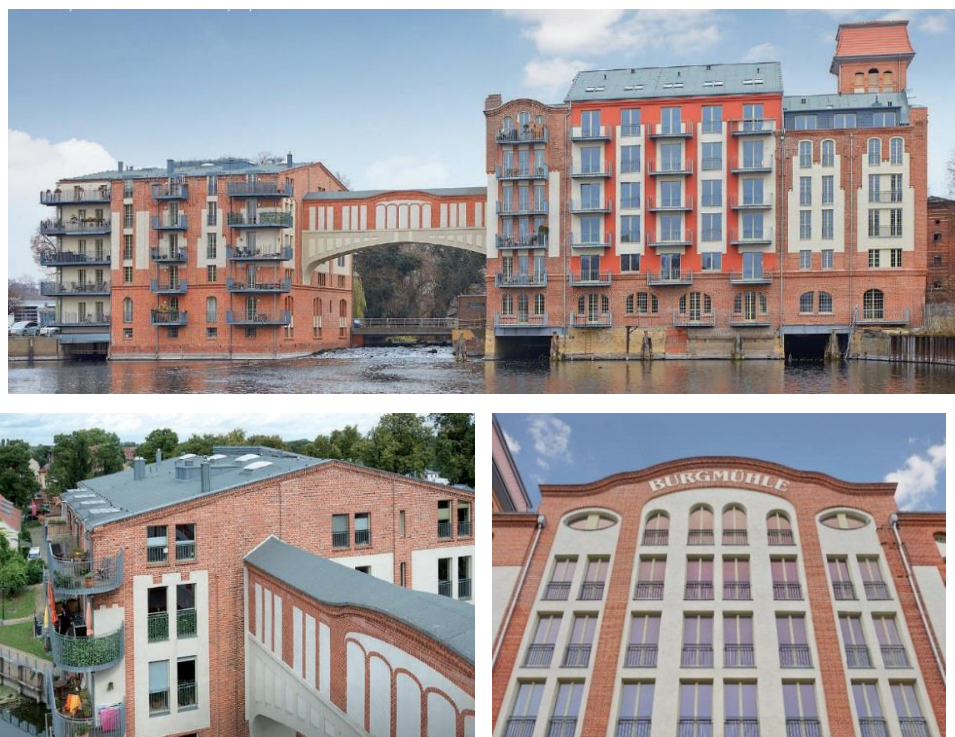


Рис. 1. Результат реновации старинной мельницы Бургмюле, Бранденбург, Германия

Для комплексного восстановления исторического облика мельницы перед началом работ необходимо было обезопасить целые секции ветхого здания. Содержимое некоторых частей пришлось удалить вовсе, а сами части отстроить заново. По задумке владельца, облицовка фасада должна была быть максимально приближенной к оригинальному как по цвету, так и по форме и размеру кирпича. За время эксплуатации старый кирпич приобрел неоднородную окраску кирпича, совмещая сразу несколько оттенков классического красного. Необходимо было сохранить дух промышленного объекта. Фасадный кирпич был подобран из линейки ручной формовки компании Wienerberger, где путем совмещения двух коллекций был найден тот оптимальный баланс цвета и фактуры оригинального кирпича. Его легкая шероховатая и нарочито неровная поверхность как нельзя лучше подходит под характер старинной мельницы.

Ремонт исторического здания на набережной реки Гавел положительным образом сказался на развитии небольшого городка. Теперь это место притягивает туристов и местных жителей для тихих прогулок по набережной. Естественно, реновация таких комплексов – это комплексная работа конструктивных и отделочных материалов, и за лицевым кирпичом мягкой формовки стоят

такие же современные стеновые, изоляционные и кровельные материалы. Таким образом, полученное современное жилье в историческом здании обладает должной теплоизоляцией без необходимости застройки новых земельных участков.

Ещё одним ярким и масштабным примером реновации является жилой квартал в охраняемой зоне в Солфорде, Великобритании. Он является частью проекта восстановления центра старинного Солфорда Фонда развития городов Англии, главная цель которого заключается в реновации и второй жизни более 50 акров исторического центра города.

Жилой квартал Timekeepers Square расположился недалеко от охраняемой государством Церкви Святого Филиппа и Площади Георга с другой стороны. В общем сложности, здесь расположились тридцать шесть таунхаусов из двух, трех и четырех комнат (рис. 2).



Рис. 2. Жилой квартал Timekeepers Square в городе Солфорд, Великобритания

На такой дизайн домов архитекторов вдохновили георгианские террасы, весьма распространенные в этой местности. Новые дома по своим размерам – высоте и массе, соответствуют историческим террасам. Окна тоже вытянуты вертикально, как и в оригинале. Таунхаусы передают давно утраченную атмосферу старого центра города, объединяя в единое целое всю территорию с центром в качестве церкви Св. Филиппа.

Исторический проект был нацелен на создание схемы воссоздания культурного наследия города со своим привычным, но осовремененным характером. Именно этой ниточкой, связывающей эпохи, стал керамический кирпич мягкой

формовки серого нюансного цвета со стандартным европейским размером 210x100x65 мм. При восстановлении квартала было использовано довольно ограниченное количество материалов по цветовой палитре. Серый кирпич с визуалью состаренной поверхностью обеспечивает однородность и придает проекту ощущение своего собственного уникального места. Для шва был выбран максимально похожий по цвету и тону кирпича кладочный раствор. Для визуально интересного образа швы были утоплены на 3 мм, тем самым подчеркнув тональное разнообразие кирпичей [2].

Благодаря рациональному использованию весьма ограниченного пространства и сохранению неприкосновенности исторического центра в виде площади и аллеи, проект является удачным примером преобразования исторической части города без утраты своей индивидуальности. Керамический кирпич всегда обеспечивает тепло и уют. Это тактильное качество контрастирует с гладкой поверхностью внешних алюминиевых оконных рам. В данном случае, использование кирпича мягкой формовки в качестве материала стен, идеально соответствует цели проекта: возрождению и сохранению наследия.

Но не только в Европе заботятся о сохранении своего исторического наследия. Тенденция реновации активно поддерживается и в России. Практически в каждом городе, будь то большой мегаполис или провинциальный городок, есть свои заброшенные заводы, фабрики, склады и торговые ряды, которые давно не используются по назначению. Как правило, они находятся в исторической части города и закрыты ото всех огромными банерами. Эти комплексы занимают огромные территории, которые принадлежат городу. Так случилось и со старой заброшенной фабрикой в небольшом городе Миллерово, Ростовской области (рис. 3).



Рис. 3. Здание заброшенной фабрики в историческом центре города Миллерово, Ростовская область

Продолжительное время, больше полувека, это здание не эксплуатировалось. Вскоре этот полуразрушенный комплекс со старинной водонапорной башней выкупили владельцы компании Amulco. Начался долгий процесс поиска архитектурного бюро, способного взяться за столь сложный проект. Здание было кирпичное, разной высотности с отдельно стоящими помещениями. Проведя тщательную экспертизу комплекса, решено было воссоздать на его основе жилой комплекс с рестораном и гостиницей (рис. 4).



Рис. 4. Жилой комплекс со встроенной гостиницей и рестораном после реновации в городе Миллерово, Ростовская область

Реализация данного проекта заняла немногим больше трех лет и закончилась в 2018 году. Основным направлением стал стиль «loft», в основе которого лежит кирпич в первозданном виде, грубое дерево, промышленные коммуникации под потолком и бетонные стены. Условно весь комплекс разделен на три зоны: жилые многоуровневые квартиры, гостиница и ресторан. Основной задачей реновации было использование прочных и натуральных материалов [3]. Выбор был остановлен на кирпиче мягкой формовки двух цветов: бордово-красном и графитовом, а также алюминии с имитацией патинированной меди. В результате хотели получить здание, которое не просто хорошо бы выглядело, а сохранило свой вид и через 50 лет. Этот комплекс должен стареть изящно, именно поэтому выбор пал на керамический кирпич мягкой формовки. Его поверхность имитирует состаренную поверхность, что не вызывает диссонанса между стилистикой здания и используемым материалом.



Рис. 5. Элементы сложной архитектурной кладки, выполненные из полнотелого кирпича мягкой формовки

Важным аспектом было сохранение разной этажности здания, при этом максимально используя имеющиеся площади. Также были сохранены размеры и форма окон в различных частях строения. Необходимым условием для выполнения сложной архитектурной кладки являлась полнотелость кирпича. Обычный керамический кирпич имеет большую пустотность и никак не мог удовлетворить заявленным требованиям. Сложные узоры вокруг окон, подпорные стенки и карнизные русты – всё выполнено из кирпича (рис. 5).

Архитектор бережно сохранил каждую стену исторического здания, дополнив весь проект уникальными деталями в виде балконов, выступов, отдельных входных порталов для каждой квартиры. Особым авторским элементом яв-

ляется остроугольная крыша в стиле «оригами», которая венчает огромную террасу на четвертом этаже жилого комплекса.

Комплекс получился многофункциональным, где каждая его зона выполнена в разных стилях. Основным связующим материалом является кирпич с визуально состаренной поверхностью. Именно благодаря ему весь ансамбль выглядит единым целым (рис.6). Цвет шва специально подобран максимально в тон кирпича, чтобы сделать кладку визуалью цельной и не акцентировать внимание на растворе.



Рис. 6. Комплекс после реновации с высоты птичьего полета

Кирпич мягкой формовки позволил архитектору и заказчику воплотить идею соединения промышленного стиля и современности с элементами хай-тек и даже классики. Именно благодаря техническим характеристикам лицевого кирпича стало возможным его использование в сложных комбинаторных элементах кладки: выступы, русты, карнизы и т.д. Комплекс органично вписался в городскую среду, одновременно притягивая взгляды и не диссонировав с окружающими объектами.

Заключение. Проблема восстановления архитектурного наследия городов остро стоит уже многие годы. В любом городе, миллионнике или небольшом провинциальном, есть здания, формирующие историю города. Местами даже сохраняются целые кварталы. Но оставлять их в первозданном виде – экономически невыгодно, ведь это полезные площади, имеющаяся инфраструктура и удачное местоположение. Зачастую, проекты реновации позволяют взглянуть на привычные вещи под противоположным углом, вдохнуть в объекты среды новую жизнь, принести пользу горожанам.

Никакой материал не передает дух времени и связи поколений лучше, чем керамический кирпич. Это связующий компонент эпох. Из него строили несколько тысячелетий назад, и строят сейчас. Он видоизменился, приобрел новые размеры, цвета и фактуры, но смысл сохранился. Кирпич мягкой формовки представляет собой уникальный продукт, где каждый элемент индивидуален, фактура и цвет не повторяется. Намеренно состаренная бархатистая поверхность имеет множество бороздок, складок, наслоений, скруглений и прочих «дефектов». Именно эта отличительная особенность делает его незаменимым

материалом как при реставрации объектов архитектурного наследия, так и при их реновации [4-5].

В приведенных примерах кирпич мягкой формовки был тем необходимым элементом, чтобы гармонично связать прошлое и настоящее. Он имеет широчайшую цветовую гамму, что существенно раздвигает возможности его применения. Не смотря на свой «состаренный» внешний вид, кирпич мягкой формовки отвечает всем техническим требованиям по прочности, морозостойкости, водопоглощению и другим параметрам. Керамика всегда ассоциируется у людей с теплотой и уютом, а кирпич с надежностью и фундаментальностью. Поэтому именно применение керамического кирпича способно гармонично вписать любой объект в окружающую среду [4-7].

Библиографический список:

1. Architectum // под. ред. В. Шустер-Хофингер (Wienerberger AG). Изд-во: Starmuhler Agentur & Verlag GmbH, Вена. 2019. №3 (28). С. 28-29.
2. Architectum // под. ред. В. Шустер-Хофингер (Wienerberger AG). Изд-во: Starmuhler Agentur & Verlag GmbH, Вена. 2018. №2 (24). С. 14-17.
3. Архитектурное бюро «Новая Р.А.С.А.»: режим доступа: <https://www.new-rasa.com/zhiloy-kompleks-loft>
4. Котляр В.Д. Технология получения и роль фигурного кирпича мягкой формовки в современном дизайне / В.Д. Котляр, Ю.А. Божко // Труды академии технической эстетики и дизайна. 2018. № 2. С. 10-13.
5. Божко Ю.А. Применение облицовочного кирпича мягкой формовки в современной архитектуре / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова // Дизайн. Материалы. Технология. 2018. №1. С. 61-65.
6. Каримова И.С. Объективное и субъективное в дизайне среды // *Монография*. Министерство образования и науки Российской Федерации, Амурский государственный университет. Благовещенск, 2012.
7. Столбоушкин А.Ю. Получение декоративной стеновой керамики из глинистого сырья и отходов добычи марганцевых руд / А.Ю. Столбоушкин, О.А. Фомина, Д.В. Акст, А.И. Иванов, М.С. Дружинин // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 38-44.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНЪЕКЦИОННЫХ МИКРОЦЕМЕНТОВ

М.С. Гаркави, д-р техн. наук, профессор
А.К. Нефедьева, инженер
А.П. Нефедьев, инженер
ООО «Синерго»

Аннотация Инъекционная цементация грунтов с применением микроцементов широко применяется в геотехнике, для укрепления оснований зданий и сооружений, гидроизоляции и др. Изготовление микроцементов осуществляется двумя способами: домолом товарного цемента или сепарирование исходного цемента. Для инъекционного закрепления грунтов технологическим требованиям по своим характеристикам в наибольшей степени отвечают сепарированные микроцементы с нормированным зерновым составом. Сепарированные микроцементы обладают высоким коэффициентом пригодности, обеспечивают необходимую седиментационную устойчивость цементных суспензий. При использовании этих микроцементов достигается высокая прочность грунтового массива с низкой водопроницаемостью.

Ключевые слова: инъекционная цементация грунтов, микроцемент, домол цемента, сепарация цемента

В последние годы широкое распространение получило инъекционное закрепление грунтов как метод искусственного повышения несущей способности оснований зданий и сооружений и увеличения их эксплуатационной надежности [1-3]. Из существующего многообразия способов инъекционной цементации наиболее пригодным и щадящим способом закрепления грунтов является манжетная технология с использованием микроцементов [1,4].

В настоящее время существует много минеральных вяжущих веществ, свойства которых обусловлены высоким содержанием в них тонкодисперсной фракции. К таким материалам относятся микроцементы – особо тонкодисперсные минеральные вяжущие (ОТДВ), которые отличаются нормированным гранулометрическим составом, а также уровнем строительной и технологической надежности [4].

Для производства микроцементов используются, главным образом, следующие способы:

- домол исходного цемента в различных измельчительных аппаратах;
- помол исходного сырья с последующей воздушной сепарацией и разделением на фракции мелких частиц.

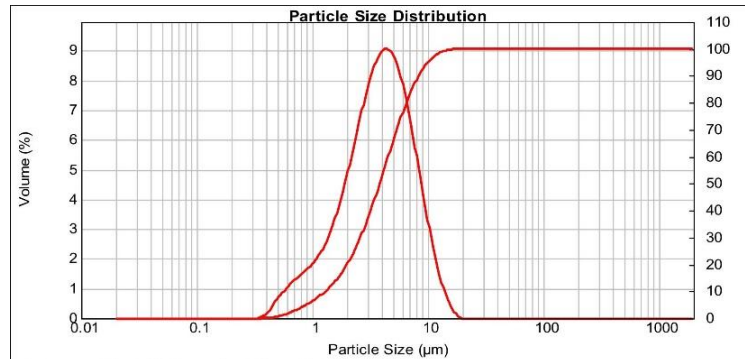
При получении микроцемента домолом исходного цемента готовый продукт характеризуется широким зерновым составом и наличием в нем крупных зерен (с размером более 20 мкм). Эти частицы в процесс инъекции суспензии в грунт или в структуру каменного материала выполняют роль «пробок», закупоривающих капилляры и поры и останавливающих процесс инъекции [3].

Применение современных динамических сепараторов позволяет производить широкую гамму микроцементов с заданным гранулометрическим составом за счет варьирования числа оборотов ротора и расхода воздуха [5].

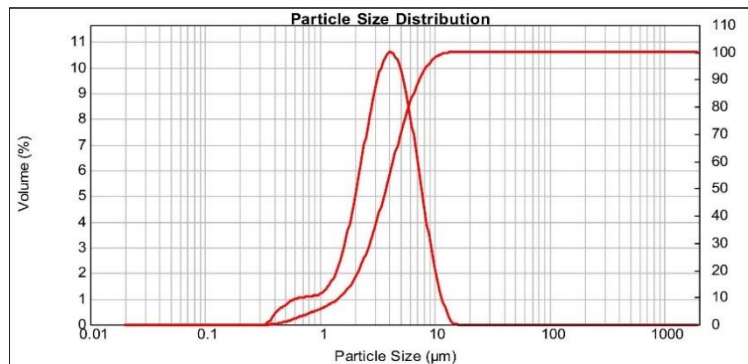
В настоящей работе использованы следующие микроцементы различных производителей, присутствующие на рынке РФ, : «Микродур R-X» (Dyckerhoff

GmbH, Германия), МикроБонд МС-3, МС-505 (ООО «Синерго», Россия), микроцемент для реставрационных работ (г. Санкт-Петербург, Россия), микроцемент (г. Старый Оскол). На рисунке 1 приведен гранулометрический состав указанных микроцементов, а в таблице 1 их дисперсные и технологические характеристики.

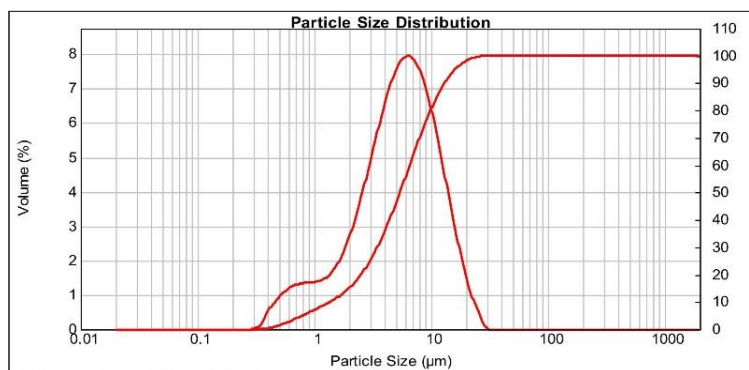
1)



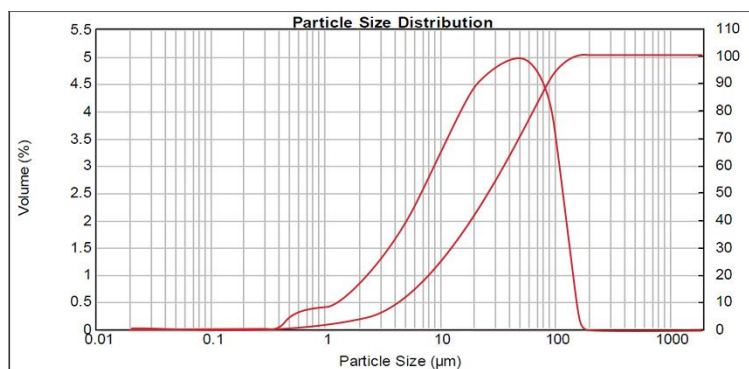
2)



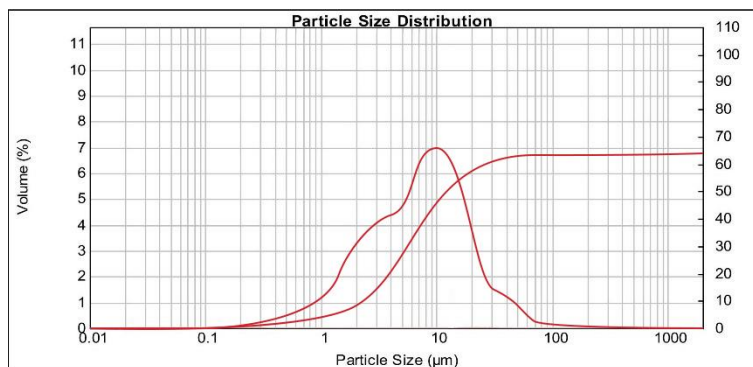
3)



4)



5)



б)

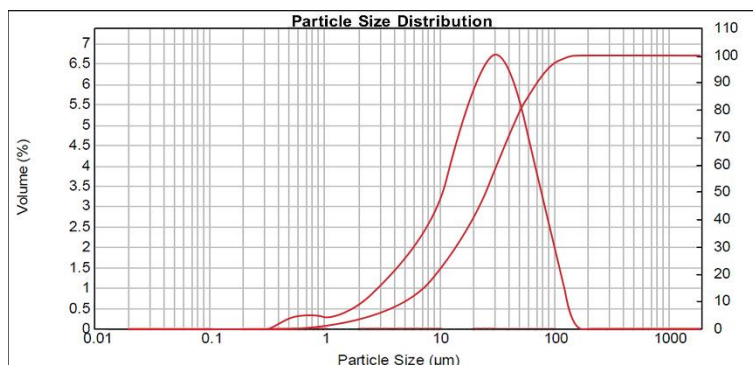


Рис. 1. Гранулометрический состав микроцементов:

1) «Микродур R-X»; 2) МикроБонд МС-3; 3) МикроБонд МС-505; 4) Микроцемент для реставрационных работ (г. Санкт-Петербург); 5) Микроцемент (г. Старый Оскол); 6) Рядовой портландцемент СЕМ I – 42,5

Таблица 1. Характеристики микроцементов

Наименование цемента	Номер образца цемента	Характеристика дисперсности, мкм			Содержание частиц $d \leq 5$ мкм, %	Коэффициент пригодности N
		D (0,5)	D (0,85)	D (0,98)		
Микродур R-X	1	3,9	7,5	12	65,9	26,6
МикроБонд МС-3	2	3	6,5	10	69,6	30,7
МикроБонд МС-505	3	5,4	11	19,5	46,2	18,2
Микроцемент для реставрационных работ	4	25,9	88,1	131,7	12,7	2,3
Микроцемент	5	9,8	35,6	43,7	23	5,6
Портландцемент СЕМ I – 42,5	6	19,5	96,9	93,7	15,7	2,1

Как следует из приведенных данных, по своим дисперсным характеристикам особотонкодисперсным вяжущим соответствуют «Микродур R-X», МикроБонд МС-3 и МикроБонд МС-505 [4]. Для этих микроцементов характерен узкий зерновой состав с повышенным содержанием в них частиц с размером менее 5 мкм. Особенностью этих микроцементов является также отсутствие частиц крупнее 20 мкм, что является предпосылкой для высокой проникающей способности инъекционных растворов на их основе.

Микроцемент (г. Старый Оскол, образец №5), изготовлен, по-видимому, домолом товарного портландцемента, что характеризуется повышенным по сравнению с исходным цементом (образец №6) содержанием мелких классов (менее 20 мкм) и в целом более тонким помолом. Однако, для конечного продукта характерно наличие достаточно крупных частиц ($D(0,98) = 43,7$ мкм), что существенно снижает качественные показатели этого микроцемента.

Микроцемент для реставрационных работ (образец № 4) по своему зерновому составу не может рассматриваться в качестве микроцемента или вяжущего применяемого для инъекционного закрепления грунта [4].

Для определения возможности использования микроцементов в качестве инъекционных вяжущих, применяют коэффициент пригодности N , определяемый по следующей формуле [3]:

$$N = d_{r15} / d_{mц85} \quad (1)$$

где d_{r15} - размер частиц грунта, мельче которых в его составе содержится 15%; $d_{mц85}$ – размер частиц цемента, мельче которых в его составе 85%.

Для расчета этой величины, в качестве примера использованы данные о гранулометрическом составе песчаного грунта из работы [3], согласно которой $d_{r15} = 200$ мкм. Результаты расчета приведены в таблице 1. Из этих данных следует, что применение микроцемента МикроБонд МС-505 для инъекционного закрепления грунтов требует проведения предварительных полевых испытаний, Микроцементы «Микродур R-X», МикроБонд МС-3 пригодны для инъекционных работ без проведения предварительных испытаний, а остальные рассмотренные цементы для решения данной задачи использоваться не могут [3,6].

При инъекционной цементации важным моментом является проникающая способность цементных растворов в структуру грунта, что является залогом высокой несущей способности укрепленного грунта.

Инъекционные цементные растворы являются свободно дисперсными неустойчивыми суспензиями, подверженными седиментации. Для оценки качества инъекционного тонкодисперсного вяжущего принято рассматривать седиментационную устойчивость цементной суспензии на его основе при высоких рабочих значениях В/Ц (от 1 до 4). Следует отметить, что этот метод можно использовать в условиях строительной площадки как «полевой метод» для качественной оценки инъекционного вяжущего, определяя величину водоотделения инъекционного раствора с В/Ц=2 в течение 60...90 минут. Для рассматриваемых микроцементов данные показатели приведены в таблице 2.

Как следует из приведенных данных, высокие значения водоотделения и, следовательно, седиментационная неустойчивость, свойственны цементным растворам на основе микроцементов, содержащих значительную долю крупных частиц. При использовании сепарированных микроцементов с нормированным гранулометрическим составом в инъекционных растворах на их основе удастся избежать седиментации и, следовательно, образования перемычек и сводов в порах грунта. Образование этих перемычек и сводов, препятствует проникновению инъекционного раствора в грунт на большую глубину и не позволяет обеспечить требуемую несущую способность грунтового массива [3].

Таблица 2. Показатель водоотделения инъекционных суспензий

Номер образца	Водоотделение, %, от момента затворения		
	5 мин	60 мин	90 мин
1	0	0,9	2,3
2	0	0	1,5
3	0	1,0	2,4
4	8,3	22,8	41,9
5	2,5	12,9	23,3
6	8,1	24,6	41,1

Приведенные выше характеристики микроцементов: коэффициент пригодности и седиментационная устойчивость инъекционных растворов на их основе, хорошо коррелируют с физико-механическими показателями микроцементов (таблица 3).

**Таблица 3. Физико-механические характеристики цементного камня
(В/Ц =1)**

Номер образца	Прочность при сжатии, МПа в возрасте		
	1 сут	7 сут	28 сут
№1	1,5	12,2	27
№2	8	12	25
№3	5,4	10,9	15,2
№4	-	1,1	7,8
№5	2,1	4	11,3
№6	-	1,9	9,1

Высокие прочностные показатели сепарированных цементов обусловлены большим количеством контактов в структуре камня вследствие низкого среднего размера частиц. Кроме того, для этих микроцементов характерно повышенное содержание сульфата кальция, что также способствует созданию плотной микроструктуры на основе мелкокристаллического этtringита и тонкодисперсных гидросиликатов кальция. В домолотых цементах велика доля аморфной фазы, которая обладает высокой растворимостью. При высоком В/Ц, что характерно для инъекционных растворов, это отрицательно сказывается на прочности из-за образования малопрочных межчастичных контактов [6].

Заключение. Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о технологических преимуществах использования сепарированных микроцементов с нормированным гранулометрическим составом для инъекционного закрепления грунтов оснований зданий и сооружений.

Наибольшей стабильностью технологических свойств и пригодностью обладают микроцементы МикроБонд МС-3 и МикроБонд МС-505, которые могут служить альтернативой ОТДВ «Микродур R-X».

Библиографический список

1. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.-Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // Вестник МГСУ.2016. Том 12. Выпуск 5. С. 552-558.
2. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Некоторые проблемы закрепления грунтов растворами из микроцементов // Строительные науки. 2016. №4. С. 114-120.
3. Камбефор А. Инъекция грунтов. М.: Энергия, 1971. 333 с.
4. Панченко А.И., Харченко И.Я., Алексеев С.В. Микроцементы. М.: Издательство АСВ, 2014. – 76 с.
5. Шарапов Р.Р., Прокопенко В.С., Шарапов Р.Р., Агарков А.М. Моделирование процесса разделения тонкодисперсных материалов в динамических сепараторах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С. 84-89.
6. Тимашев В.В., Цернес Р.Я. Зависимость прочности сепарированных цементов от их дисперсности // Цемент. 1972. №2. С.1516.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕНЫ ТРОМБА В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Би Жуйпу¹, Аспирант

А.К. Соловьев¹, д-р техн. наук, профессор

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация. Настоящая статья представляет собой анализ использование стены Тромба в современном строительстве. Приводится краткий анализ технологии, а также ее преимущества по сравнению с искусственными методами отопления и охлаждения здания. Автором представлена методика проектирования стены Тромба, а также какие показатели являются наиболее оптимальными для ее постройки. Рассмотрены тепловые воздействия, которые позволили определить потребность в искусственном отоплении зданий. Проведен анализ финансовой экспертизы постройки стены Тромба, что позволило установить уровень соотношения выгоды и затрат от использования искусственного отопления. Делается акцент на роли остекления стены и коэффициенте усиления солнечного тепла. В заключении приводятся основные положения, которые необходимо предусматривать при ее проектировании в условиях современного строительства.

Ключевые слова: стена Тромба, современное строительство, искусственное отопление, проектирование, солнечное тепло, моделирование.

Стена Тромба — это остекленная, обращенная к солнцу внешняя стена из тяжелого материала, которая поглощает тепло от солнца в течение дня, чтобы отапливать помещение путем конвекции днем и медленно отводить его внутрь ночью. Идея солнечных каминов древнеримских терм I в. нашей эры была превращена в работоспособный архитектурный элемент в 1960-х годах французским инженером Феликсом Тромбом и архитектором Жаком Мишелем и успешно используется во всем мире (рис. 1).

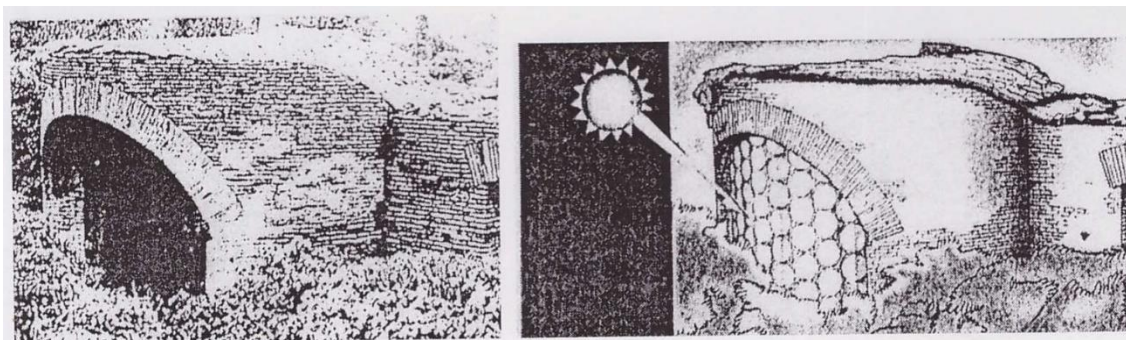


Рис. 1. Термы Остии, Рим, Италия (I в. н.э) Герлиокаминус

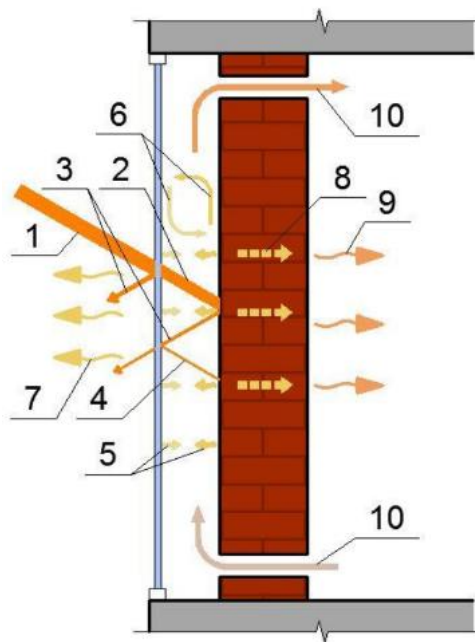


Рис. 2. Тепловые потоки в стене Тромба. 1 – падающее солнечное излучение; 2 – прошедшее сквозь остекление солнечное излучение; 3 – отраженное солнечное излучение; 4 – переотраженное на стену солнечное излучение; 5 – ИК-излучение наружной поверхности стены и внутренней поверхности остекления; 6 – конвективный теплообмен между стеной и остеклением; 7 – теплоотдача наружной поверхности остекления; 8 – теплопередача в массиве стены; 9 – теплоотдача внутренней поверхности стены; 10 – конвекционный теплообмен помещения и воздушной прослойки

Данная технология использует природные аккумулирующие тепло характеристики тяжелых строительных материалов, которые подвергаются воздействию прямых солнечных лучей. Как правило, стена Тромба состоит из темно окрашенной наружной стены из бетона или каменной кладки, обращенной на южную сторону горизонта, снаружи покрытой остеклением (рис.2). Солнечная энергия, передаваемая через остекление, нагревает внешнюю поверхность бетонной стены. Это тепло путем конвекции нагретого в воздушной прослойке воздуха через верхнее и нижнее отверстия в стене нагревает воздух в помещении в солнечные дни, а также аккумулируется в массиве стены и медленно проходит через стену. Оно через определенное время, обычно ночью, излучается во внутреннее пространство, уменьшая количество энергии, необходимой для обычного обогрева помещения. Летом стены Тромба должны быть тщательно затенены, чтобы не перегревать внутреннюю часть здания [1]. Воздушная прослойка при открытой верхней фрамуге остекления и открытом нижнем отверстии в стене может служить также для охлаждения помещения за счет протяжки холодного воздуха из теневых зон или из холодных подвалов.

С точки зрения разработки, данное архитектурное решение особенно хорошо подходит для зданий в солнечном климате, где мало облаков и большие колебания температуры днем и ночью в холодные месяцы, например, в Якутии и Забайкалье. Тем не менее, и в других регионах России, можно использовать значительные преимущества от этого типа технологий. Для архитектуры зданий, в том числе и для многоэтажного строительства, применение стен Тромба создает много возможностей с точки зрения разнообразия решений фасадов

(рис.3). Есть несколько ключевых соображений, которые необходимо соблюдать, чтобы обеспечить успех стен Тромба в современном строительстве.



Рис. 3. Многоквартирный жилой дом на ул. Лютовштрассе (Берлин, Германия). Солнечные каминьы, зимние сады и солнечные коллекторы интегрированы в фасад. Проектный институт ИБУС, Берлин, 1988г.

В настоящее время для проектирования стена Тромба используется программа SUNREL, которая позволяет проводить их тепловое моделирование. Обеспечение комфорта, влияние на традиционное отопление помещений и финансовая экономия являются определяющими преимуществами анализируемого архитектурного решения [5].

Смоделированные тепловые воздействия были оценены количественно по ряду полезных показателей [3].

1. Стены Тромба сокращают потребность в искусственном в отоплении жилых помещений отдельных домов в среднем на 25%, что соответствует экономии около 15 000 рублей в год. Расчет был основан на заданной температуре 20° С в течение часов между 7 и 11 часами вечера в течение отопительного периода в районе с муссонным климатом в северо-восточном Китае. Для России такой климат характерен для южной части Хабаровского края.

2. Стены Тромба хорошо работают в разных климатических зонах. Нами было проведено исследование эффективности стены тромба в районах от 46 до 40 градусов северной широты. При этом оказалось, что эффективность в значительной степени зависит от величины градусо-суток отопительного периода. Однако эффективность зависит также и от перепадов температуры днем и ночью. Следует отметить, что в пасмурные дни и ночью стена Тромба работает как буферная зона, так как температура воздуха в воздушной прослойке значительно выше температуры наружного воздуха. Но в основном эффективность стены Тромба в процентном отношении зависит от региона, где возводится здание.

Финансовая экспертиза технологии стены Тромба опирается на два общих экономических показателя: соотношение выгод и затрат и срок окупаемости. Соотношение выгод и затрат суммирует общую стоимость проекта: чем выше соотношение, тем лучше инвестиции. Как правило, если соотношение выше 1, проект является хорошей инвестицией. Простой срок окупаемости означает время, необходимое для возврата инвестиций, чтобы погасить сумму первоначальных затрат. Хотя такой срок не учитывает риск или финансирование денег, он является полезным показателем, когда его тщательно используют для сравнения аналогичных инвестиций.

Необходимо обратить внимание на преимущества стены, особенно с точки зрения качества предоставляемого тепла. Обнаружено, что низкоинтенсивный радиационный нагрев, обеспечиваемый на очень большой поверхности, является более предпочтительной формой, чем принудительный, такой как от электрических нагревателей или батарей центрального отопления. Подчеркивая очень низкие требования к техническому обслуживанию, надежную работу с течением времени и безопасность в качестве «обогревателя» здания, такое архитектурное решение представляет собой хорошее финансовое вложение.

Что касается ее расположения, то стена Тромба должна быть ориентирована между 300° и 120° от севера, чтобы обеспечить максимальное поступление тепловой энергии [6].

Для лучшей эксплуатации стены Тромба внешние северо-восточные и северо-западные пространства около стены необходимо будет оставить свободными от озеленения и построек для того, чтобы зимой при низком солнце они не мешали его попаданию на стену.

Используемое остекление может быть одинарным или двойным. Компьютерное моделирование показывает, что в большинстве случаев двойное остекление (с точки зрения потерь тепла) дает лишь незначительные преимущества.

Размер воздушного пространства между поверхностью наружной стены и остеклением должен составлять от 15 мм до 50 мм. Оно должно иметь фрамугу в верхней части стены для летнего удаления тепла из прослойки. Сохранение зазора 20 мм или менее означает, что конвективные потери будут минимизированы из-за жесткости слоя воздуха, препятствующей конвекции. На первом этаже основание стены отделяют от цоколя с помощью теплоизоляции, чтобы уменьшить потери тепла. Использование экструдированного пенополистирола с закрытыми порами снизит количество влаги, в том числе и капиллярной. Однако при применении любых пенопластов теплоизоляция нуждается в некоторой форме защиты поверхности - например, защитной штукатурке.

Материал, выбранный для стены Тромба, имеет значение для того, сколько тепла может быть сохранено и, следовательно, позже выпущено во внутреннюю часть здания. Эту способность аккумуляции тепла обычно называют тепловой инерцией. Чем выше тепловая инерция материала, тем дольше время, необходимое для изменения его температуры.

Значения тепловой инерции для монолитных бетонных стен и стен из бетонных блоков на цементном растворе аналогичны бетонным стеновым панелям. Альтернативные строительные материалы, такие как утрамбованная земля и саман, отличаются в термическом плане. Грунтоблоки могут накапливать примерно на 25% больше тепла, чем бетон, хотя они и менее плотные [4]. Если используются бетонные блоки, то швы должны быть полностью зацементированы - чем меньше воздушных зазоров, тем лучше для сохранения тепла. Автоклавный газобетон не обладает достаточной плотностью, чтобы можно было использовать его в качестве материала для стены Тромба.

Величина тепловой инерции стены должна быть пропорциональна жилой площади, которую она нагревает - очень маленькая стена Тромба не будет полезна для очень большого помещения. Отношение объема стены Тромба (в квадратных метрах) к объему смежной жилой площади (в кубических метрах) должно быть не менее 1:80 для материалов на основе бетона.

Толщина и материал стены Тромба определяют временную задержку прохождения тепла от внешней к внутренней части стены, которая пропорциональна ее тепловой инерции. При этом, когда на наружной темной поверхности будет максимальная температура на внутренней поверхности температура должна быть минимальной. Для предварительной оценки запаздывания температуры на внутренней поверхности стены может быть использовано следующее выражение:

$$E = 2.7 D - 0.4, \text{ час.} \quad (1)$$

Для того, чтобы максимальная теплоотдача стены Тромба была в вечернее время около 20 – 21 часа, если считать, что максимальные конвективные теплопоступления от стены будут в 16 часов, необходимо, чтобы запаздывание составило 4 -5 часов. Для этого надо, чтобы монолитная бетонная стена была толщиной 200мм. При этом тепловая инерция конструкции стены будет составлять 1.87. Однако, при этом термическое сопротивление такой конструкции составит всего 0.1 м²°C/Вт. Несмотря на то, что стена Тромба благодаря буферной зоне, создаваемой воздушной прослойкой, подвержена гораздо более высоким наружным температурам, чем средняя температура отопительного периода, такое термическое сопротивление представляется более чем недостаточным и грозит тем, что внутренняя поверхность стены будет мокрая от конденсата. Поэтому более целесообразной представляется стена из обычного керамического пустотного кирпича плотностью 1300 кг/м³ на цементно-песчаном растворе. Такая стена толщиной в один кирпич, т.е. 250мм имеет термическое сопротивление 0.48 м²°C/Вт и тепловую инерцию 3.37. Запаздывание температуры на внутренней поверхности стены в этом случае составит 8.7 часов. Это значит, что с момента максимальных конвективных теплопоступлений в 16 часов максимальные теплопоступления в помещение за счет накопления тепла в стене будут происходить в 24 часа – в 1 час ночи. Ночью и в пасмурные холодные дни работа стены Тромба за счет буферной зоны может защитить помещение от охлаждения. При этом, естественно, должна работать обычная система отопления. Считается, что традиционно стена Тромба предполагает наличие вентиляционных отверстий в верхней и нижней частях стены, которые открываются автоматически при повышении температуры воздуха в воздушной прослойке выше температуры воздуха в комнате. Они служат для отвода теплого воздуха из передней части стены в помещение для утреннего притока тепла. Однако также существует мнение, что более эффективным было бы, чтобы стены Тромба не вентилировались во внутреннем пространстве, чтобы они больше нагревались в течение дня, чтобы обеспечить больше тепла ночью, когда это необходимо. А чтобы утреннее тепло собиралось от прямых солнечных лучей, проникающих в окна в наружных стенах. Но что это дает в общем тепловом балансе здания пока не ясно.

Чтобы помочь способности внешней стены поглощать солнечное излучение, она должна быть темного цвета средней насыщенности. Селективное покрытие темной поверхности стены имеет положительный эффект так как это покрытие повышает поглощение в диапазоне длин волн солнечного излучения и сильно снижает лучистый теплообмен между стеной и остеклением, а следовательно, и перепады теплоступлений.

Настоятельно рекомендуется затенение стены в летний период. Это особенно важно там, где хорошая летняя вентиляция всего здания либо затруднена, либо невозможна. Внешнее затенение для полуденного прямого летнего солнца является критически важным, но затенение в середине утра и в середине дня также важно. В идеале затенение и вентиляция должны использоваться в теплое время года. Однако затенение выгоднее, чем вентиляция.

Внутренняя поверхность стены Тромба не должна быть покрыта гипсокартоном или изоляцией любого типа, чтобы гарантировать, что ее радиационные свойства не будут нарушены.

С точки зрения поддержания целостности стены также требуется очень мало затрат. Может потребоваться покрытие оконных стоек / каркасов краской. В идеале следует предусмотреть доступ к воздушному пространству прослойки, чтобы убрать паутину или перекрасить поверхность стены.

Таким образом, можно сделать определенные выводы относительно проектирования и использования стены Тромба в современном строительстве:

1. Ориентация стены Тромба между -30° и $+30^\circ$ истинного севера (не магнитный север). Истинный север можно измерить с помощью компаса (с поправкой на магнитный север) или с помощью тени, отбрасываемой палкой в землю в полдень.

2. Отсутствие зимнего затенения: стена располагается так, чтобы солнечное излучение ввиду укороченного светового дня позволяло достичь хотя бы минимум тепла для отопления здания или помещения.

3. Летнее затенение: внешняя стена Тромба полностью затенена в течение не менее 70% дня, исключая почти весь прямой солнечный свет.

4. Установка с одинарным остеклением при коэффициенте теплопропускания $\geq 0,82$. Двойное остекление целесообразно в районах севернее 46° широты с.ш.

5. Пространство полости между остеклением и темной поверхностью внешней стенки 50-100 мм.

6. Отношение площади стены Тромба (в квадратных метрах) к объему смежной жилой площади (в кубических метрах) должно быть не менее 1:80 для материалов на основе бетона.

7. Толщина стены должна составлять около 200 мм в зависимости от требуемого строительного материала.

8. Фундамент стены должен быть изолирован от земли как минимум с краевой изоляцией.

9. Стена Тромба является частью более широкой стратегии пассивного отопления или охлаждения, которая охватывает все здание.

10. Использование трехмерной визуализации позволяет изучить круглогодичное внешнее затенение стены Тромба.

11. Использование компьютерного теплового моделирования поможет лучше понять круглогодичное влияние стен Тромба на отопление или охлаждение здания.

Библиографический список:

1. Брызгалин, В. В., Соловьев, А. К. Использование пассивных систем солнечного отопления как элемента пассивного дома / В. В. Брызгалин, А.К. Соловьев // Вестник МГСУ. 2018. №4 (115). С. 472-482.
2. Казанцев, П. А. Архитектурный проект «Энергоэффективное здание «Экодом Solar-5» / П. А. Казанцев // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. №4. С. 17-20.
3. Красулина, Л.В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. 2012. №2. С. 29-34.
4. Briga Sá, Ana & Cunha, J. & Lanzinha, João & Paiva, Anabela. (2016). An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions: Influence of ventilation openings and shading devices. *Energy and Buildings*. 138. 10.1016/j.enbuild.2016.12.085.
5. Saadatian, Omid & Sopian, Kamaruzzaman & Lim, Chin Haw & Asim, Nilofar. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16. 6340–6351. 10.1016/j.rser.2012.06.032.
6. Sharma, Piyush & Agarwal, Neeraj. (2016). Passive Solar Technique Using Trombe Wall – A Sustainable Approach. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 01.

ВЫЯВЛЕНИЕ АСПЕКТОВ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И КАПИТАЛИЗАЦИЯ СОЗНАНИЯ И ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО ТИПА В Г. НОВОСИБИРСК

С.К. Лакетич¹, магистр

А.Е. Наумов¹, канд. техн. наук, доцент

Р.Г. Абакумов¹, канд. экон. наук, доцент

¹*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В настоящей работе рассмотрена и проанализирована выпускная квалификационная работа бакалавра Лакетич С.К. «Многофункциональное высотное здание кинетического типа в г. Новосибирск», определены понятия, связанные с кинетической архитектурой. В ходе анализа выявлены основные типы представителей кинетикостроения, проблемы и риски строительства зданий кинетического типа с подвижным каркасом, аспекты эффективного функционирования подобных многофункциональных зданий, а также обоснован выбор и проведено исследование пространственного потенциала территории, выбранного в качестве места строительства для кинетического здания. Рассмотрена возможность капитализация человеческого сознания и способы влияния на психоэмоциональное человеческое восприятие объектов недвижимости за счет установки автоматизированных систем изменения фасада здания, способной подстраиваться под окружающую среду и оптимизировать форму здания для сокращения ресурсозатрат на «лишнее вращение».

Ключевые слова: кинетическая архитектура, кинетикостроение, высотное здание, многофункциональное здание, пространственный потенциал, капитализация, сознание, пространственное развитие.

В выпускной квалификационной работе бакалавра Лакетич С.К. было рассмотрено и предложено к проектированию многофункциональное высотное здание кинетического типа в г. Новосибирск (см. рис.1).

Город Новосибирск был выбран не случайно, во-первых в рамках ВКР при проектировании отталкивались от нормативно-правовой базы (ГОСТы, СП, СНиП и т.п.), соответственно, нормы, по которым запроектировано данное здание действительны только на территории РФ, что значительно ограничивает выбор подходящей локации.

Во-вторых, Новосибирск - хорошо развивающийся город, один из крупнейших бизнес-центров России, что способствует повышению интереса к объекту кинетической архитектуры и привлечению платежеспособного слоя населения.

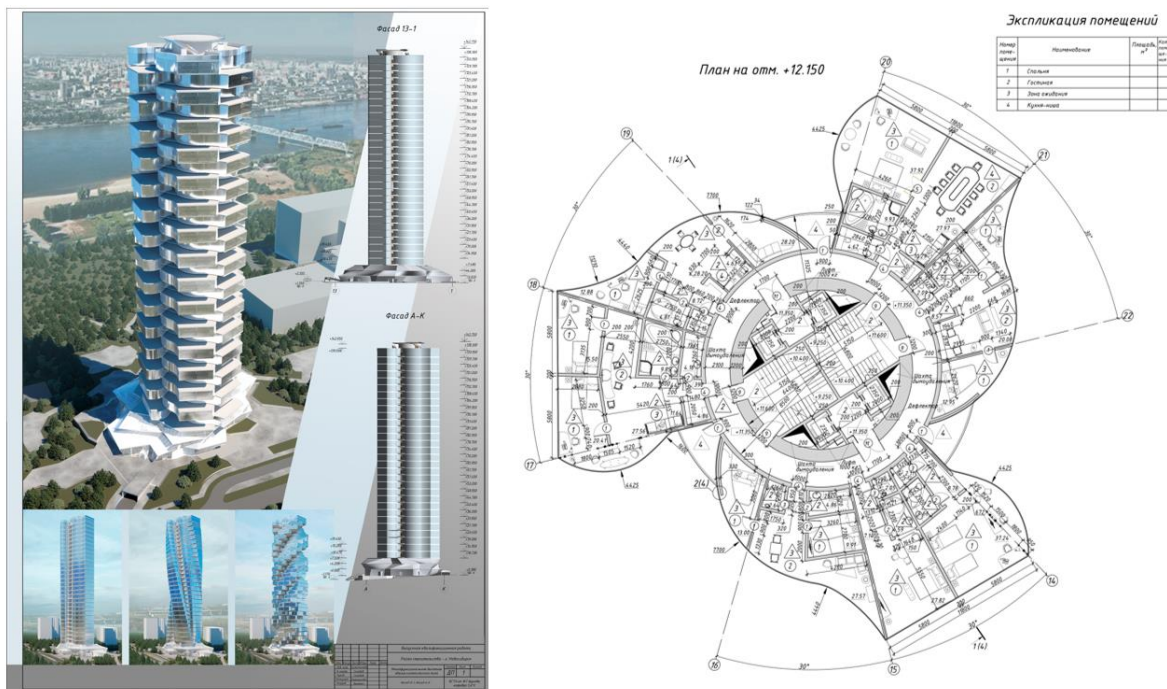


Рис. 1. Проект многофункционального высотного здания кинетического типа в г. Новосибирск

В-третьих, Новосибирск, несмотря на его удаленность от центрального района России, имеет довольно благоприятные климатические условия, которые позволяют воплотить проект многофункционального высотного здания кинетического типа в реальность.

И наконец, не стоит забывать о наших дальневосточных соседях, которые семимильными шагами двигаются вперед в различных сферах жизнедеятельности. Китай - один из лидеров в сфере строительства и роботизации техники, что в рамках настоящего проекта немаловажно.

Взяв во внимание все вышеизложенные факты, было принято решение о рассмотрении Новосибирска в качестве места предполагаемого строительства.

В ходе обследования территории была выбрана реальная ситуационная задача, топографический план которой представлен на рисунке 2.

Данный район является промышленным, при этом расположен он в живописном месте, на берегу реки Обь, в транспортной доступности от исторического и культурного центра города.

Итак, здание кинетического типа представлено несколькими типами кинетической архитектуры. К первому типу относятся функциональные строения – мосты, дающие возможность проплывать большим кораблям или связывающие водные пути разноуровневых рек. Второй тип – здания-трансформеры, изменяющие в процессе времени свою формы. Третий тип представлен сооружениями, движение которых происходит на поверхности (фасаде) [1].

Подобные строения являются единичными, а конкретный предложенный к рассмотрению проект многофункционального высотного здания кинетического типа вовсе не имеет аналогов.



Рис. 2. Ситуационный план, г. Новосибирск

Кинетическая архитектура представлена различными видами сооружений, сконструированными таким образом, что их части могут двигаться относительно друг друга, не нарушая общую целостность структуры.

Существенная особенность рассматриваемого объекта от прототипов - сооружение является первым в своем роде, т.к. кинематика проявляется в возможности оборота каждого из 30 типовых кинетических этажей на 360° относительно центрального неподвижного ствола жесткости [2].

Каждый этаж – отдельный сегмент, не имеющий связей с последующими и предыдущими этажами. Несущий остов сегмента представлен системой перекрестных ферм на этаж и отдельных продольных горизонтальных элементов, включая две жесткие несгораемые железобетонные плиты перекрытия и покрытия. Этаж навешивается на центральный неподвижный ствол, образуя тем самым подвижную консоль. Ствол в свою очередь передает все нагрузки и воздействия на фундаменты основания [3, 4].

В ходе разработки проекта и ВКР Лакетич С.К. было успешно зарегистрировано право на патентообладание полезной моделью № 177603 «Соединительное устройство канализационного и подводящего трубопроводов системы внутренней канализации зданий кинетического типа с подвижным каркасом» и изобретением № 2650538 «Система внутренней канализации для зданий с подвижным каркасом», что подтверждает уникальность подобного рода зданий и неспособность их скорой реализации [5].

Существует немало примеров кинетической архитектуры, но проекты зданий кинетического типа с подвижным каркасом так и остаются нерезализованными, что говорит о нерешённых задачах и определенных рисках, связанных со строительством и эксплуатацией объектов кинетикостроения.

Основными проблемами и рисками строительства зданий кинетического типа с подвижным каркасом являются:

- недостаточная проработка материалов и информации об объекте до начала проектирования;
- неправильная постановка задачи на проектирование объекта;
- неполнота нормативной базы;

- согласование проект и внесение изменений в состав проектной документации;
- обеспечение безопасности объекта в период его строительства и последующей эксплуатации;
- отсутствие материалов, спецтехники и спецсредств для ведения строительных работ;
- дача объективной оценки текущего состояния объекта;
- оправданность вложений и срока их окупаемости;
- превышение сметы на строительство в процессе возведения.

В Техническом задании необходимо проработать и описать архитектурные и конструктивные решения, все внутренние инженерные системы здания, системы безопасности (в том числе противопожарной), диспетчеризации и автоматизации инженерных систем, мониторинга основных конструкций здания.

Поскольку риски и проблемы, связанные с реализацией подобного проекта достаточно велики, для эффективного функционирования здания кинетического типа необходимо выделить следующие аспекты:

- повышение энергоэффективности за счёт использования природной энергии (например, установка светогенерирующих панелей на фасаде здания, ветряных турбин в межэтажном пространстве и т.д.). Здание может вырабатывать количество энергии, достаточное для автономного потребления;

- организация постоянного мониторинга технического состояния объекта строительства за счёт установки специальных датчиков. Данное мероприятие поможет свести к минимуму риски в процессе эксплуатации, связанные с поломками и разрушениями;

- т.к. рассматриваемое здание не является типовым, необходимо использование умных систем контроля, например, таких как датчики температуры, влажности, освещенности пространства и т.п., благодаря которым можно контролировать процесс электропотребления;

- установка автоматизированных систем изменения формы (фасада) здания, способной подстраиваться под окружающую среду с возможностью поиска оптимальной формы здания для сокращения ресурсозатрат на «лишнее вращение». Использование наиболее выразительной и привлекательной формы увеличивает привлекательность территории, тем самым, капитализирует сознание.

Капитализация сознания представляет собой совокупность приемов и методов по созданию/поддержанию экономической устойчивости объекта вложений и дальнейшего роста его финансовой эффективности за счет воздействия на психоэмоциональное восприятие человека. Иными словами, капитализация подразумевает под собой разумные ходы, которые позволяют при потере меньшей части капитала приобрести большую.

Благодаря применению новейших разработок в области робототехники, автоматизации различных систем, а также строительных материалов и конструкций, кинетическое строение становится реальным. Кинетическая архитектура - направление будущего, объединяющее многовековой опыт строения зданий и технологии современности.

Библиографический список:

1. Цуркина С.К., Солодов Н.В. Кинетическая архитектура: ее типы, особенности и возможности реализации «движения» в зданиях. Международный студенческий строительный форум – 2016 (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): сб. докл.: в 3 т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – Т.2. С.248-252.
2. Лакетич С.К., Солодов Н.В., Коренькова Г.В. Современные конструктивные решения и формообразование при проектировании зданий кинетического типа на примере многофункционального высотного общественного здания/ Международный студенческий строительный форум – ноябрь, Белгород. 2017 г. С. 150-156.
3. Snežana Laketić, Galina Korenjkova, Nikolaj Solodov. Savremena konstruktivna rešenja i oblikovanja u projektovanju zgrada kinetičkog tipa na primeru višespratne multifunkcionalne javne zgrade / Modern design solutions and shaping in the design of buildings of kinetic type on the example of a multifunctional public high-rise building / «ZBORNİK RA-DOVA» Visoka tehnička škola strukovnih studija – Niš. Decembar, 2017. С. 151-154.
4. Snezhana Tsurkina, Aleksandar Laketich. Кинетическая архитектура в современном строительстве и возможность реализации «движения» в зданиях / The kinetic architecture in modern construction and possibilities of «mobility» in buildings / «ZBORNİK RADOVA» VISOKA TEHNIČKA ŠKOLA STRUKOVNIH STUDIJA – NIŠ. DECEMBAR, 2016. С. 181-184.
5. Цуркина С.К., Гольцов А.Б. Подвижная система водоснабжения и водоотведения/ VIII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» - Белгород 2016. С. 1358-1361.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ И ФОРМОУСТОЙЧИВОСТЬ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

Г.С. Славчева¹, д-р техн. наук, профессор

Е.А. Бритвина¹, аспирант

¹Воронежский государственный технический университет

Аннотация. Данная работа посвящена оценке эффективности влияния дисперсного армирования из полипропиленового волокна на реологические свойства смесей для строительной 3D-печати с учетом их компонентного состава. Для определения пластичности и формоустойчивости смесей применялись сдавливающие тесты, моделирующие напряжение, возникающее при экструзии, и нагрузку в нижележащем слое при печати последующих. Исследования проводились на цементных составах с различными наполнителями, отличающихся по химическому и гранулометрическому составам. Независимо от вида наполнителя фактор дисперсного армирования является эффективным способом регулирования подвижности и формоустойчивости вязко-пластичных цементных смесей, предназначенных для строительной 3D-печати. Введение полипропиленового волокна в системы позволяет повысить пластичность смеси на 20-30 %, повысить способность смеси воспринимать сжимающие нагрузки без деформирования в 1,5-4 раза, снизить относительные пластические деформации в 2-3 раза, однако, способность смеси деформироваться с сохранением целостности структуры совокупно зависит от факторов: вид наполнителя и наличие дисперсного армирования.

Ключевые слова: цементные смеси, строительная 3D-печать, реологические характеристики смесей, сдавливающие тесты, дисперсное армирование.

Введение. Активное внедрение 3D-печати в строительную практику требует разработки оптимальных многокомпонентных смесей, удовлетворяющих требованиям всем технологическим этапам процесса печати. Для повышения физико-механических свойств и трещиностойкости бетона, снижения величины усадочных деформаций применяют армирование. Для литых бетонных изделий, в качестве армирующего компонента используют различные виды фибр: стальную, стеклянную, базальтовую, полипропиленовую. Стальная и стеклянная фибра значительно усложняют процесс перекачивания свежей смеси к экструдеру в процессе печати, длина жесткой фибры не должна превышать размера экструдерной головки. Применение в качестве армирования базальтовой или пропиленовой фибры подходит для 3D-печати, а также, повышает износостойкость бетонных конструкций, трещиностойкость и прочность композитов.

Анализ экспериментальных результатов, представленных в работах [1-4], показывает, что добавление различных волокон в смеси для строительной 3D-печати незначительно улучшает прочность на сжатие, однако способствует повышению прочности на изгиб и растяжение. Наиболее хорошие результаты по влиянию на структурно-механические свойства смесей дают полипропиленовые волокна. Также, данное волокно контролирует и препятствует образованию усадочных трещин в бетоне, что является важным фактором для печатного бетона, поскольку, при печати тонкими слоями и без опалубки испарение воды с поверхности бетона происходит интенсивнее, чем в литых конструкциях, что приводит к образованию данных дефектов.

Влияние полипропиленовой фибры на физико-механические свойства и трещиностойкость затвердевшего композита однозначно, но для применения составов с дисперсным армированием для 3D-печати, системы должны удовлетворять требованиям по пластичности (подвижность и экструдирруемость) и формоустойчивости.

Цель работы — определить эффективность влияния дисперсного армирования на реологические характеристики смесей для строительной 3D-печати с учетом их компонентного состава.

Для этого решались следующие задачи:

1. Установить влияние дисперсного армирования на пластичность смесей;
2. Установить влияние дисперсного армирования на формоустойчивость;
3. Определить состав смеси, в котором дисперсное армирование наиболее сильно влияет на изменение реологических свойств.

Для оценки реологических свойств свежеприготовленной смеси используют сдавливающие тесты, основанные на принципе «squeeze flow rheometry», суть которых заключается в сдавливании свежесформованного образца между двумя параллельными цилиндрическими пластинами с постоянной скоростью нагружения или постоянной скоростью деформирования [5-10].

Метод оценки пластичности [6, 7] позволяет определить показатель подвижности смеси, в качестве комплексной характеристики смеси, при моделировании напряжений сжатия при экструзии смеси. Для оценки формоустойчивости смеси [8-10], определяют комплекс реологических характеристик при моделировании напряжений при нагружении свежесформованного образца следующими: структурную и пластическую прочность и относительные пластические деформации.

Материалы и методы. Для определения влияния дисперсного армирования на реологические свойства смеси были выбраны системы различного состава, основное отличие в дисперсности применяемых наполнителей: микродисперсные и грубодисперсные. Выбор вида наполнителя и их концентрация обоснованы в работе [11]. Использованные в исследованиях кварцевый песок и известняковая мука — наполнители разной дисперсности и кристаллохимического состава. Распределение по размерам и частиц кварцевого песка ($d = 0,16-0,63$ мм), и известняковой муки является полифракционным ($d = 1-55$ мкм). Влияние песка на свойства дисперсионной среды в силу достаточно большого размера представляется пренебрежимо малым. Для известняковой муки такое влияние, определяемое кристаллохимическими особенностями строения и, соответственно, свойствами поверхности может быть более существенным из-за его более высокой дисперсности и большей поверхностной активности CaCO_3 по сравнению с SiO_2 .

Сдавливающие испытания проводились с использованием электромеханической испытательной системы INSTRON 5982 в Центре коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова ВГТУ.

Компоненты смесей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сырьевых компонентов

Компоненты систем	Характеристика компонента смеси	Обозначение
Портландцемент	СЕМ I 42,5 Н	Ц
Модификатор вязкости	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	МВ
Микродисперсный наполнитель (известняковая мука)	$CaCO_3$, d = 1-55 мкм	ИМ
Грубодисперсный наполнитель (песок)	SiO_2 , d = 160-630 мкм	П
Дисперсное волокно	Полипропиленовая фибра, SikaFiber® PPM-12, l = 12 мм	Вл
Вода	ГОСТ 23732-79 Вода для бетонов и растворов. Технические условия	В
Суперпластификатор	Sika® ViscoCrete® T100	СП

Система 1 — Ц–ИМ–МВ–СП–В; система 2 — Ц–ИМ–МВ–СП–Вл–В; система 3 — Ц–П–МВ–СП–В; система 4 — Ц–П–МВ–СП–Вл–В.

Для проведения экспериментов изготавливали цилиндрические образцы из свежей смеси всех исследуемых систем радиусом $R = 25$ мм, высотой $h = 25$ мм.

На первом этапе экспериментов проведена оценка пластичности смеси. Сдавливательный тест проводился с постоянной скоростью деформирования 5 мм/с, при данной скорости испытания наиболее адекватно моделируется поведение смеси в процессе экструзии. Испытания проводились до полного разрушения образца, в процессе опыта фиксировалась диаграмма «напряжение–относительное изменение высоты образца».

На втором этапе экспериментов была проведена оценка формоустойчивости смеси. Сдавливательный тест проводился при постоянной скорости нагружения 0,5 Н/с, что обусловлено скоростью возрастания нагрузки при печати от вышележащих слоев. Испытания проводились до образования и развития значительного количества трещин в образце, фиксировались диаграммы «перемещение–время» и «нагрузка–относительная деформация».

По результатам сдавливающих тестов определялись реологические характеристики смесей:

- предел пластичности ($K_i(I)$) — напряжение, необходимое для перехода системы из устойчивого состояния в вязкопластическое течение с интенсивно разрушаемой структурой;

- структурная прочность (σ_0) — характеризует способность вязкопластичной смеси сопротивляться действию сжимающих напряжений без деформирования;

- пластическая прочность ($\sigma_{пл}$) — характеризует способность вязкопластичной смеси деформироваться при действии сжимающих напряжений без разрушения структуры;

- пластические деформации ($\Delta_{от.пл}$) — относительная деформация системы, определенная как отношение абсолютных деформаций к первоначальной высоте образца.

Предел пластичности определялся по формуле:

$$K_i(h/R) = \frac{\sqrt{3}F^*}{2} \quad (1)$$

где F^* — приведенное напряжение, определенное в точке перегиба кривой «напряжение–относительное изменение высоты образца», в диапазоне $h_i/R = 0,8-1,0$, кПа.

Структурная и пластические прочностии определялись по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{\pi R^2} \quad (2)$$

где N — нагрузка в соответствующей точке кривой «перемещение – время», кН.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Полученные результаты представлены в таблице 2 и на рисунках 1-3.

Таблица 2. Реологические характеристики смесей

№	Наименование системы	$K_i(I)$, кПа	σ_o , кПа	$\sigma_{пл}$, кПа	$\Delta_{от.пл}$, мм/мм
1	Система 1	1,27	0,99	44,87	0,093
2	Система 2	0,98	4,69	31,31	0,035
3	Система 3	3,65	1,10	31,56	0,066
4	Система 4	2,59	1,48	36,74	0,035

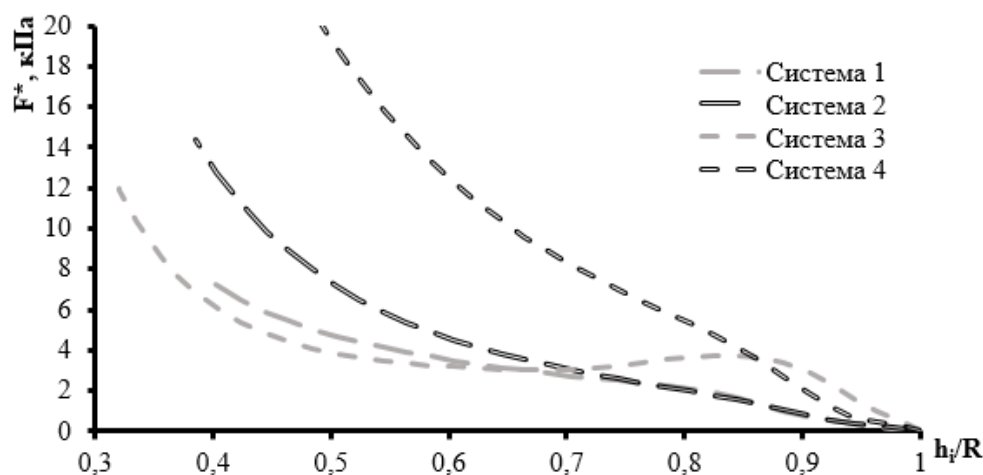


Рис. 1. Экспериментальные диаграммы $F^ = f(h_i/R)$*

Система 3 соответствует диаграмме для жестких смесей (рис. 1). Величина напряжения F^* , необходимого для перехода системы из устойчивого состояния к пластическому состоянию составляет ~ 6 кПа, в тоже время, переход системы в состояние течения уже с разрушенной структурой составляет ~ 4 кПа. При этом значение предела пластичности $K_i(I) = 3,65$ кПа.

Системы 1, 2 и 4 соответствуют оптимальным смесям для строительной 3D-печати. Величина нагрузки, соответствующая началу пластического течения, менее 3 кПа, при этом $K_i(I) = 1,0-3,0$ кПа, переход в состояние течения с разрушенной структурой происходит при $F^* = \sim 5$ кПа.

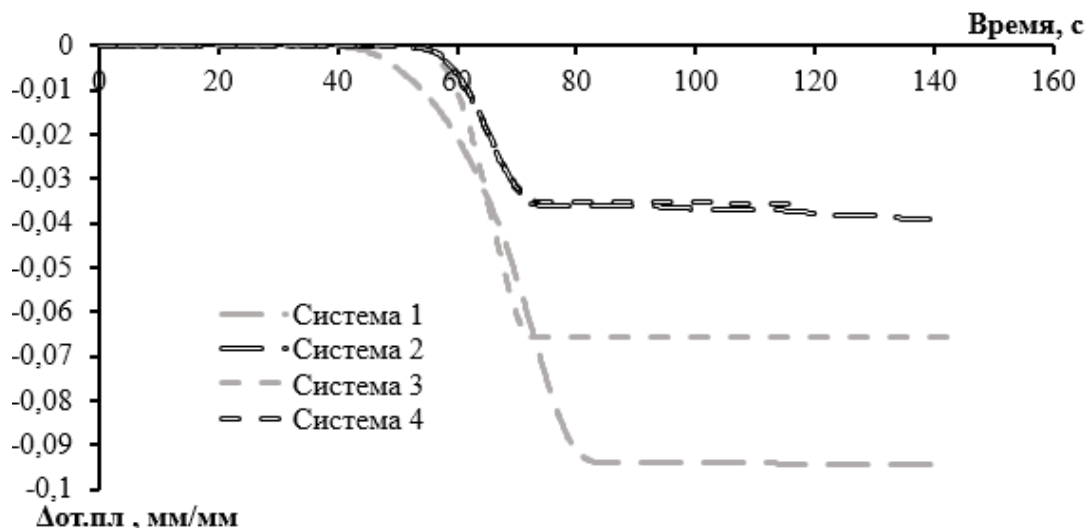


Рис. 2. Экспериментальные диаграммы «перемещение–время»

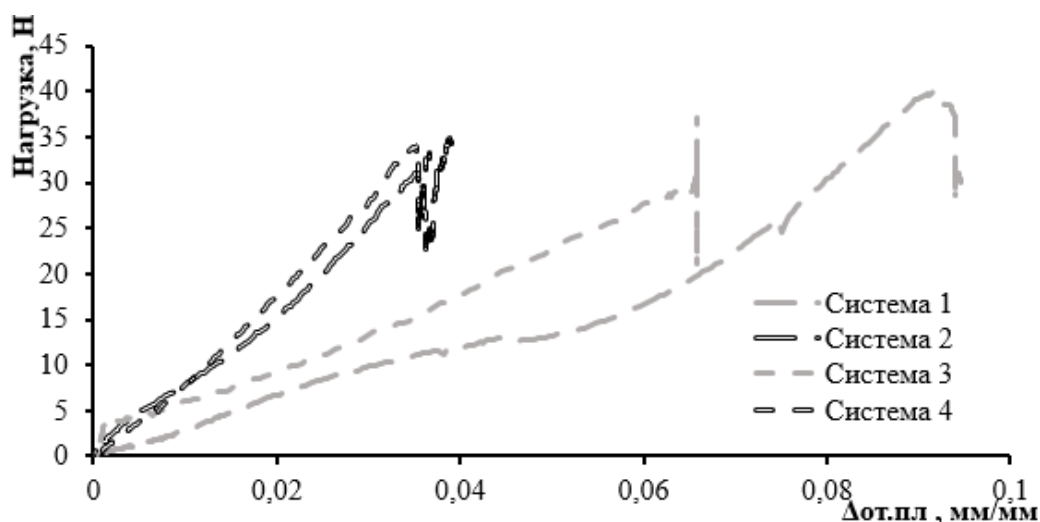


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы «нагрузка–относительная деформация»

Анализ полученных кривых показывает, что все системы с включениями волокон (системы 2 и 4) показывают более высокие значения структурной σ_0 прочности и минимальные пластические деформации $\Delta_{от.пл}$ (табл. 2). При этом на кривых (рис.2, 3) видно, что период пластического деформирования у систем без волокон (системы 1 и 3) выше, чем у систем с дисперсным армированием. Уменьшение периода пластического деформирования, который предшествует началу трещинообразования, свидетельствует о нарастании жесткости систем. Однако, влияние полипропиленового волокна на пластическую $\sigma_{пл}$ прочность зависит от наполнителя в составе композита. В системах с микродисперсным наполнителем наблюдается уменьшение пластической прочности, в системах с грубодисперсным наполнителем значение пластической прочности увеличивается.

При введении волокон для систем на кварцевом песке можно обеспечить значения $K_i(I) = 2,59$ кПа, структурной прочности $\sigma_0 = 1,48$ кПа, а пластические деформации $\Delta_{от.пл.} = 0,035$ мм/мм. При использовании известняковой муки удастся обеспечить наиболее рациональное соотношение характеристик пластичности и формоустойчивости $K_i(I) = 0,98$ кПа, $\sigma_0 = 4,69$ кПа, а $\Delta_{от.пл.} = 0,035$ мм/мм. Таким образом, смеси на песке отличаются меньшей пластичностью по

показателю $K_i(I)$), но практически одинаковой структурной прочностью и деформативностью при нагружении по сравнению со смесями на известняковой муке.

Выводы:

1. Введение полипропиленового волокна положительно влияет на пластичность смесей, т.е. повышает подвижность и экструдирруемость смеси, снижая значения $K_i(I)$ на 20-30 %;

2. Введение дисперсного армирования позволяет повысить структурную прочность смесей в 1,5-4 раза, снизить относительные пластические деформации в 2-3 раза. Влияние дисперсного армирования на пластическую прочность зависит от наполнителя в составе композита, в системах с микродисперсным наполнителем уменьшается, а в системах с грубодисперсным наполнителем увеличивается;

3. В смесях с грубодисперсным наполнителем введение полипропиленового армирующего волокна наиболее сильно изменяет их реологические свойства.

Библиографический список:

1. Karahan, O. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete / O. Karahan, C.D. Atis // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. No. 2. P. 1044-1049.
2. Le, T.T. Hardened properties of high-performance printing concrete / T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, et al. // *Cement and Concrete Research*. 2012. V. 42. P. 558-566.
3. Panda, B. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material / B. Panda, S.C. Paul, M.J. Tan // *Materials Letters*. 2017. V. 209. P. 146-149.
4. Kim, G.B. Development of thin FRP reinforced GFRC permanent formwork systems / G.B. Kim, K. Pilakoutas, P. Waldron // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. No. 11. P. 2250-2259.
5. Engmann, J. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review / J. Engmann, C. Servais, A.S. Burbidge // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2005. No 132(1-3). P. 1-27.
6. Russel, N. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test / N. Russel, C.Lanos // *J. Applied Reology*. 2003. Vol. 13. No. 3. P. 132-141.
7. Toutou, Z. The squeezing test: A tool identify firm cement-based material's rheological behavior and evaluate their extrusion ability / Z. Toutou, N. Roussel, C. Lanos // *J. Cement and Concrete Research*. 2005. № 35. P. 1891-1899.
8. Perrot, A. Structural build-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // *J. Materials and Structures*. 2016. № 49. P. 1213-1220.
9. Perrot, A. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behavior of high yield stress fluids at low strain rate / A. Perrot, D. Rangeard, F. Micaelli et al. // *J. Rheologica Acta*, Springer Verlag. 2012. №51. P. 743-754.
10. Славчева, Г.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати / Г.С. Славчева, М.А. Шведова, Д.С. Бабенко // *Строительные материалы*. 2018. № 12. С. 30-35.
11. Славчева, Г.С. Влияние концентрации и гранулометрии наполнителей на реологические свойства цементных систем / Г.С. Славчева, А.И. Ибряева // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии*. 2019. № 2 (2). С. 29-36.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ЭКСПЕРТИЗЫ СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.Т. Пименов¹, д-р.техн.наук, профессор

Л.А. Барахтенова¹, д-р.био.на, профессор

А.Г. Маньшин¹, канд.техн.наук доцент

В.С. Прибылов¹, аспирант

¹*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Аннотация. Показаны синергетические подходы реализации программ прикладной магистратуры (08.04.01 «Строительство») и введением в учебный план подготовки дисциплины «Экспертиза автомобильных дорог и дорожно-строительных материалов». Эта дисциплина отвечает требованиям ФГОС ВО, имеет полифункциональный характер, основана на технологиях проблемного и эвристического обучения. Магистрантам предоставляется возможность учебного моделирования, что реализуется через разработку тематических ментальных карт, причинно-следственных диаграмм, а также решения экспертных и ситуационных задач, которые имеют ярко выраженный практико-ориентированный характер и требуют не только конкретных предметных знаний, но знаний нескольких учебных предметов.

В целом, учебно-методическое сопровождение программ прикладной магистратуры определяет полноценное трудоустройство выпускников по выбранной специальности на предприятиях, которые профессионально осуществляют строительно-техническую экспертизу состояния объектов дорожной отрасли.

Ключевые слова: программы прикладной магистратуры, синергетические подходы в подготовке студентов, качество подготовки и конкурентоспособность выпускников.

Основные постулаты доктринальных документов РФ [1,2] ориентированы на развитие инфраструктуры дорожной сети как совокупности дорог общего пользования на определенной территории. Расширение сети автомобильных дорог, включая объекты придорожного сервиса, на территории России имеет целью обеспечение развития потенциальных зон экономического роста внутри страны, особенно – территорий Сибири и Дальнего Востока. Именно здесь транспортно-эксплуатационные показатели автомобильных дорог наиболее подвержены влиянию климатических факторов на протяжении всего срока их жизненного цикла.

Структура автомобильных дорог в РФ включает дороги различных технических классов и категорий [3-5]. При этом вариации соответствия состояния дорог нормативным требованиям строительства, ремонта и содержания колеблются в пределах от 40 до 80 % в зависимости от специфики территории [6], с чем связаны сезонные колебания их несущей способности в расчетный весенний или осенний периоды года. Причинами несоответствия состояния автомобильной дороги и ее конструктивных элементов требованиям нормативно-технических документов являются [7]:

- ошибки в изысканиях и проектировании дорог;
- недостаточная изученность процессов деградации строительных материалов в составе дорожной одежды, связанных с изменением их физико-механических характеристик;
- низкая эффективность и недостаточная изученность применяемых в отрасли технологий.

Для выявления достоверных причин неудовлетворительного состояния дорог и улиц целесообразно провести строительно-техническую экспертизу этапов их сооружения, включая стадии предпроектных изысканий и самого процесса проектирования, а также условий и технологий применения материалов и строительных процессов, что, безусловно, требует привлечения широкопрофильных экспертов (специалистов) и подчеркивает актуальность настоящей работы. В этой связи очевидна проблема подготовки высшей школой профессиональных кадров для сферы дорожного хозяйства [8,9].

В целях реализации в РФ госпрограммы по развитию профессионального образования [10] в ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) в рамках направления подготовки 08.03.01 «Строительство» был открыт новый профиль «Автомобильные дороги» с последующей реализацией программ прикладной магистратуры. При этом среди видов профессиональной деятельности, к которым готовятся выпускники, освоившие программу магистратуры, заявлена «Профессиональная экспертиза и нормативно-методическая».

Профессиональные компетенции ФГОС ВО по программам прикладной магистратуры 08.04.01 «Строительство»¹ предписывают решение задач контроля соответствия разрабатываемых проектных решений и технической документации ТЗ на проектирование, стандартам, строительным нормам и правилам и другим исполнительным документам, что согласуется с формированием у магистрантов требуемого комплекса компетенций, см. рис.1.

Профессиональная экспертиза и нормативно-методическая		
Общекультурные компетенции: <i>- способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу</i>	Общепрофессиональные компетенции: <i>- способность использовать углубленные теоретические и практические знания, часть которых находится на передовом рубеже данной науки; уметь применять знания для анализа, синтеза и критически резюмирования информации</i>	Профессиональные компетенции: <i>- способность вести техническую экспертизу проектов объектов строительства</i>

Рис.1 Формируемые компетенции при подготовке экспертов в процессе обучения по программам прикладной магистратуры 08.04.01 «Строительство»

¹ Утверждено приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30.10.2014 г. N 1419

Указанным на рис.1 требованиям в полной мере отвечает такая дисциплина учебного плана ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) как «Экспертиза автомобильных дорог и дорожно-строительных материалов», имеющая полифункциональный характер. Здесь основными технологиями учебной работы преподавателя с магистрантами являются:

- технология интерактивного обучения, предполагающая применение разнообразных форм активного взаимодействия обучающихся в формате диалогов и дискуссий с проблематикой рассматриваемого вопроса;
- технология эвристического обучения, предполагающая коллективную творческую деятельность обучающихся в решении конкретной проблемы по методу «мозгового штурма».

Перечисленные технологии обучения основаны на синергетическом и практико-ориентированном подходах [11]. Более того, магистрантам предоставляется возможность учебного моделирования, что реализуется через разработку тематических ментальных карт, причинно-следственных диаграмм и деловых игр, а также решение экспертных и ситуационных задач в виде следующей логической цепочки: ознакомление ↔ понимание ↔ применение ↔ анализ ↔ синтез ↔ оценка. Ситуационные задачи имеют выраженный практико-ориентированный характер, для решения требуют не только конкретных предметных знаний, но знаний нескольких учебных дисциплин. Ниже представлен типичный пример ситуационной задачи, см. табл.1.

Таблица 1. Типичный пример ситуационной задачи по дисциплине «Экспертиза автомобильных дорог и дорожно-строительных материалов»

Формулировка проблемы	Общее задание	Результат
Вы находитесь на улице ... в г. Новосибирске: на покрытии участка ... дороги имеются видимые дефекты, которые в своей совокупности существенно затрудняют проезд по дороге в обоих направлениях	Проведите визуальный осмотр состояния участка дороги, определите техническую категорию и класс дороги/улицы, выделите основные виды дефектов	Подготовьте Заключение по экспертизе с учетом требований Федерального закона N 73-ФЗ ² , ст. 25
	Разработайте алгоритм Ваших действий по экспертизе состояния участка дороги	Подготовьте краткий отчет в виде презентации

Алгоритм действий магистранта по экспертизе состояния участка автомобильной дороги или улицы включает:

- обоснование необходимости экспертизы выбранного участка автомобильной дороги/улицы, формулирование цели и задач экспертизы;
- разработку конкретных этапов экспертизы с определением объектов, методов, инструментария экспертного исследования;

² Федеральный закон от 31 мая 2001 г. N 73-ФЗ "О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации"

- обоснование выбора методов экспертизы, согласование методов экспертизы и свойств дорожно-строительных материалов;
- обоснование выбора инструментов экспертизы;
- определение основных видов работ по экспертизе выбранного участка дороги и представление их в виде технологической карты процесса производства работ.

Важным этапом подготовки является проведение магистрантами научно-исследовательских работ накануне их итоговой аттестации, что осуществляется через процесс вовлечения выпускников в НИОКР и хоздоговорные работы.

Сформированные профессиональные компетенции позволяют будущим выпускникам успешно решать производственные задачи на ведущих предприятиях дорожно-строительной отрасли г. Новосибирска и области. Более того, полученные в стенах ВУЗа магистрантами знания, навыки и умения по выбранному направлению подготовки позволяют им успешно работать на предприятиях, которые профессионально осуществляют строительно-техническую экспертизу состояния автомобильных дорог и инженерных сооружений на них.

В целом, факты полноценной интеграции в производство выпускников ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) по указанному направлению подготовки выступают убедительным критерием качества подготовки и конкурентоспособности их как специалистов в дорожно-строительной сфере.

Библиографический список:

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008 г., № 1734-р [Электронный ресурс] // Сайт Правительства РФ- URL: <http://government.ru/docs/22047/> (последняя дата доступа: 07.05.2020).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 28.12.2012 № 2600-р «Об утверждении государственной программы «Развитие транспортной системы» [Электронный ресурс] // Сайт Правительства РФ- URL: <http://government.ru/docs/22047/> (последняя дата доступа: 07.05.2020).
3. Россия в цифрах. 2017: Крат. стат. сб./ Росстат- М., 2017 - 511 с.
4. Автомобильные дороги общего пользования Российской Федерации. / Справочник -. М. Росавтодор, 2003.- 435 с.
5. А. Н. Шумейко и др. /Автомобильные дороги России. Состояние и перспективы. - М. МАДИ (ГТУ), 2007. - 243 с.
6. А Т Pimenov Impact of design decisions on quality of highways 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 687 022023
7. Пименов А. Т. Строительно - техническая экспертиза автомобильных дорог: учеб. пособие / А. Т. Пименов; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2018. –159 с.
8. Пименов А.Т., Барахтенова Л.А., Игнатова О.А. Инновации в процессах подготовки специалистов для дорожной отрасли //Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2019): сборник статей 11-й Международной научно-технической конференции (25 октября 2019 года)/ Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. –С. 264-272.
9. Андрончев И.К., Красинская Л.Ф. Подготовка специалистов для транспортной отрасли: проблемы и перспективы//Высшее образование в России. - № 7.-2013.- С. 10-15.
10. Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие образования" на 2013 - 2020 годы». Постановление Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 295) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. ВерсияПроф. - URL:

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_197766/ (последняя дата доступа: 07.05.2020).

11. Якушева С.Д. Синергетический подход в развитии профессионального мастерства современного педагога // *Личность, семья и общество: вопросы педагогики и психологии*: сб. ст. по матер. XIII междунар. науч.-практ. конф. Часть II. – Новосибирск: СибАК, 2012.