

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Дагестанский государственный технический университет»

На правах рукописи



Животкова Ирина Александровна

**СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ И МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ
БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович.

Махачкала 2025

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования	13
1.1 Перспективы применения сухих строительных смесей	13
1.2 Применение природного и техногенного сырья при производстве сухих строительных смесей	17
1.3 Химические добавки для сухих строительных смесей	25
1.4 Усадка строительных растворов.....	30
1.5 Морозостойкость строительных растворов	32
1.6 Морозостойкость контактной зоны	35
Выводы по главе 1:	38
Глава 2. Материалы и методика экспериментальных исследований	40
2.1 Экспериментальные исследования выполнены с использованием:	40
2.1.1 Зола-уноса Новочеркасской ГРЭС	41
2.1.2 Шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростова-на-Дону	44
2.1.3 Опоки Нагольновского месторождения	46
2.1.4 Горелая порода Шахтинско-Несветаевского района Ростовской области .	50
2.1.5 Песок Астаховского месторождения	52
2.1.6 Портландцемент	53
2.1.7 Химические добавки.....	53
2.2 Методы исследования.....	54
2.2.1 Химико-минералогический состав.....	54
2.2.2 Измерение усадочных деформаций	54
2.2.3 Показатели затвердевших строительных растворов	55
2.2.4 Образцы.....	58
Выводы по главе 2.....	59
Глава 3 Влияние комплексной минеральной добавки на свойства мелкозернистых бетонов и строительных растворов	60
3.1 Определение рациональной дозировки комплексной минеральной добавки	64
3.2 Влияние КМД на пористость мелкозернистых бетонов и строительных растворов.....	81
3.2.1 Влияние дополнительной полной пористости на предел прочности при сжатию.....	82

3.2.2 Открытая капиллярная пористость и условно закрытая пористость	84
3.3 Влияние дозировки РПП на прочностные и деформационные свойства строительных растворов с КМД	87
Выводы по главе 3	95
Глава 4 Деформации усадки мелкозернистых бетонов и строительных растворов	97
4.1 Усадочные деформации МЗБ	97
4.2. Усадочные деформации СР	119
4.2.1 Деформации усадки СР с опокой в составе КМД	119
4.2.2 Деформации усадки СР с золой-уноса в составе КМД	124
Выводы по главе 4	130
Глава 5 Влияние комплексной минеральной добавки на стойкость строительных растворов при различных воздействиях	133
5.1 Влияние комплексной минеральной добавки на определяющие морозостойкость параметры пористости	134
5.2 Влияние РПП и ВУД на изменение определяющих морозостойкость параметров пористости после воздействий	137
5.3 Влияние циклического замораживания и оттаивания на прочностные и деформационные показатели СР	138
5.4 Морозостойкость контактной зоны	151
5.5 Анализ критериев морозостойкости	156
5.6 Сравнение различных воздействий на стойкость СР	162
Выводы по главе 5	167
Заключение	170
Список литературы	172
Список сокращений и условных обозначений	193
Приложение 1. Внедрение результатов диссертационной работы	194

Введение

Актуальность. Потребление сухих строительных смесей в 2023 г. в РФ на фоне ввода в эксплуатацию 175,0 млн. м² жилья выросло до 15,6 млн т. Номенклатура производимых сухих строительных смесей (ССС) представлена значительным рядом разнообразных по области применения и свойствам строительных растворов: кладочные, штукатурные, шпатлевочные, клеевые, затирочные, напольные, ремонтные, изоляционные, специальные, для фасадных теплоизоляционных композиционных систем. Порядка 70% объема производимых СССР изготавливаются на портландцементной основе. Использование в составе СССР во все возрастающих объемах различных минеральных добавок и наполнителей техногенного происхождения обеспечивает решение важной экологической задачи по утилизации отходов в различных отраслях промышленности. В зависимости от назначения строительные растворы подвергаются воздействиям силовым, температурным, влажностным, агрессивной среды, в связи с чем для обеспечения стойкости к эксплуатационным воздействиям должны удовлетворять установленным нормативными документами показателям качества. При разработке рецептур СССР различного функционального назначения особое внимание уделяется эффективному использованию органоминеральных модификаторов «химические + минеральные добавки», обеспечивающих требуемый уровень технологических свойств смесей и строительно-технических свойств полученных из СССР растворов, эффективность эксплуатации которых определяется, в зависимости от назначения, показателями предела прочности при сжатии, растяжении (изгибе), морозостойкости, прочности сцепления с различными основаниями, величиной деформаций усадки, морозостойкости контактной зоны и др. Это предопределяет актуальность исследований с целью получения и уточнения зависимостей влияния вида и дозировок минеральных и химических добавок на свойства строительных растворов от указанных факторов с целью разработки эффективных рецептур СССР различного функционального назначения.

Степень разработанности темы исследований. Нормативными документами в зависимости от назначения ССС установлены требования по пределам прочности, морозостойкости, деформациям усадки и др. При этом для ремонтных ССС требования по показателю предела прочности на осевое растяжение или растяжение при изгибе не установлены. Нормирование морозостойкости представлено по изменению предела прочности при сжатии, данные о стойкости по другим критериям практически отсутствуют. Недостаточно информации о взаимосвязи основных свойств растворов, особенно при использовании минеральных добавок техногенного происхождения, что предопределяет актуальность исследований влияния органоминеральных модификаторов «химические + минеральные добавки» на основные строительно-технические свойства полученных из ССС растворов различного назначения.

Рабочая гипотеза. Выявленные закономерности влияния органоминеральных модификаторов на основе природного и (или) техногенного сырья, водоудерживающей добавки и РПП на изменение в зависимости от времени и условий эксплуатации основных строительно-технических свойств строительных растворов и мелкозернистых бетонов обеспечат разработку рациональных составов ССС различного функционального назначения.

Цель работы и задачи исследований. Целью диссертационной работы является выявление общих закономерностей и получение количественных зависимостей влияния вида и дозировок минеральных и химических добавок на пределы прочности при сжатии, изгибе, модуль упругости, прочность сцепления с основанием, морозостойкость по различным критериям и морозостойкость контактной зоны полученных из ССС строительных растворов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Выявить закономерности влияния состава и дозировок комплексных минеральных добавок и органоминеральных модификаторов «химические + минеральные добавки» на свойства полученных из ССС мелкозернистых бетонов и строительных растворов;

2. Сравнить степень эффективности золы уноса, опоки, горелой породой в составе комплексной минеральной добавки, содержащей шлам химводоочистки, и в составе органоминерального модификатора с водоудерживающей добавкой и редиспергируемым полимерным порошком;

3. Установить закономерности влияния рецептурных факторов при различных условиях выдерживания на пределы прочности при сжатии, изгибе, начальный модуль упругости, деформации усадки, прочность сцепления с основанием и взаимосвязь указанных свойств мелкозернистых бетонов и строительных растворов;

4. Выявить закономерности влияния рецептурных факторов на морозостойкость контактной зоны и морозостойкость полученных из ССС строительных растворов с органоминеральными модификаторами;

5. Сравнить результаты испытаний после 100 циклов замораживания и оттаивания по критериям изменения пределов прочности при сжатии, изгибе, начального модуля упругости, скорости ультразвука, прочности сцепления с основанием.

Объектом исследования являются свойства портландцементных мелкозернистых бетонов и строительных растворов, содержащих комплексную минеральную добавку природного и (или) техногенного происхождения, в т.ч. в комплексе с водоудерживающей добавкой «Mecellose 23701» и редиспергируемым полимерным порошком Vinavil E06PA.

Предметом исследования являются закономерности изменения в зависимости от рецептурных факторов основных строительно-технических свойств портландцементных мелкозернистых бетонов и строительных растворов, содержащих комплексную минеральную добавку природного и (или) техногенного происхождения, в т.ч. в комплексе с водоудерживающей добавкой «Mecellose 23701» и редиспергируемым полимерным порошком Vinavil E06PA.

Научная новизна работы:

1. Развита научные представления о влиянии на структуру и свойства полученных из ССС строительных растворов и мелкозернистых бетонов состава и

дозировок комплексных минеральных добавок шлам химводоочистки + зола-уноса (опока, горелая порода) и органоминеральных модификаторов «химические + минеральные добавки» и получены зависимости от рецептурных факторов пределов прочности при сжатии и изгибе, модуля упругости, деформаций усадки, прочности сцепления с основанием, морозостойкости и морозостойкости контактной зоны, установлено влияние химических добавок на дополнительную за счет воздухововлечения пористость, прочностные и деформационные свойства, морозостойкость;

2. Определена рациональная дозировка комплексной минеральной добавки (КМД) 20% при соотношении шлам/минеральная добавка (МД) = 1:1, установлено, что по предложенному условному критерию трещиностойкости $\varepsilon_{sh}E/R_f$ и по интенсивности развития деформаций усадки лучший результат обеспечивает опока, по прочности сцепления с основанием лучший результат обеспечивает зола уноса со значениями от 0,2 до 0,25 от предела прочности при изгибе, значения у опоки от 0,08 до 0,22. Установлено, что после 100 циклов замораживания и оттаивания составы с органоминеральным модификатором с комплексной МД с опокой или золой имели прочность сцепления более 1 МПа;

3. Получены для различных условий твердения зависимости $R = f(\%РПП, \%МД)$; $(R_f, E) = f(R)$; $A_{сц} = f(R_f)$ с учетом видов и дозировок органоминеральных модификаторов, выявлено повышение прочности при сжатии до 20%, при изгибе до 22%, установлено, что соотношение $R_2/R_{28} = 0,36...0,67$ в зависимости от состава мелкозернистого бетона (МЗБ), вида МД и соотношения шлам/МД, при этом комплексная МД не повышает модуль упругости, получены зависимости кинетики усадки при высыхании и выявлено влияние органоминеральных модификаторов на кинетику и величину деформаций, получены значения $\varepsilon_{sh,14}/\varepsilon_{sh,120} = 0,4...0,69$;

4. Предложен критерий морозостойкости «изменение предела прочности при изгибе» более «жесткий» относительно критериев по ГОСТ 10060-2012, обоснованы значение критерия морозостойкости $R_{f,F}/R_{f,0}$, установлено, что составы с золой-уноса характеризуются лучшими показателями $R_{f,F}/R_{f,0}$ в сравнении с опокой, сделан вывод о нецелесообразности применения критериев «изменение

динамического модуля упругости» и «изменение деформаций остаточного расширения», показано, что дозировка РПП более 2 % с точки зрения обеспечения морозостойкости по критериям «изменение предела прочности при изгибе» и «изменение предела прочности при сжатии» нецелесообразна;

5. Установлены после 100 циклов замораживания и оттаивания растворов с органоминеральными модификаторами значения критериев $R_F/R_0 > 1,2$; по п. 5.2.4 ГОСТ 10060-2012 $X_{min}^{II}/X_{min}^I = 0,94 \dots 1,73$, прогнозируемая морозостойкость более 150 циклов; $E_F/E_0 = 0,97 \dots 1,09$, прогнозируемая морозостойкость 140...325 циклов; $R_{f,F}/R_{f,0} = 0,76 \dots 0,93$, прогнозируемая морозостойкость от 19 до 140 циклов; $A_F/A_0 = 0,25 \dots 1,83$, прогнозируемая морозостойкость от 25 до 150 циклов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в:

- развитии научных представлений о влиянии рецептуры органоминеральных модификаторов на основные строительно-технические свойства полученных из ССС строительных растворов и мелкозернистых бетонов;
- уточнении влияния состава и дозировки комплексной минеральной добавки на зависимость строительно-технических свойств от рецептурных факторов полученных из ССС МЗБ и растворов;
- выявленных закономерностях влияния химических добавок на основные строительно-технические свойства полученных из ССС строительных растворов;
- полученных новых данных о соотношении определенных по различным критериям значений морозостойкости строительных растворов;
- развитии научных представлений о взаимосвязи основных свойств строительных растворов с органоминеральными модификаторами.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- предложены уравнения, описывающие зависимость предела прочности при изгибе и модуля упругости от предела прочности при сжатии, прочности сцепления с бетонным основанием от предела прочности при изгибе МЗБ и строительных растворов с органоминеральными модификаторами после выдерживания в различных условиях;

- определены рациональные дозировки компонентов МД и химических добавок для обеспечения требуемых показателей качества МЗБ и строительных растворов;
- определены значения морозостойкости строительных растворов с органоминеральными модификаторами по различным критериям;
- получены значения деформаций усадки и зависимости усадки от степени высыхания строительных растворов с органоминеральными модификаторами;
- предложены рекомендации по проектированию рецептур штукатурных и клеевых составов ССС.

Методология и методы исследования. Методология работы основывается на анализе и обобщении требований нормативных документов, трудов отечественных и зарубежных исследователей по тематике, связанной с оценкой влияния рецептурных и технологических факторов на строительно-технические свойства, полученных из ССС, содержащих комплексную минеральную добавку МЗБ и содержащих органоминеральный модификатор строительных растворов.

При выполнении экспериментальных исследований в лаборатории применялось современное высокотехнологичное оборудование, методы исследований и испытаний, регламентированные нормативными документами в сочетании с исследовательскими методиками, методы математического планирования эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

- установленные закономерности и полученные зависимости изменения предела прочности при сжатии, изгибе, модуля упругости, прочности сцепления с бетонным основанием МЗБ и строительных растворов с органоминеральными модификаторами после выдерживания в различных условиях;
- установленные закономерности и полученные зависимости влияния рецептуры и дозировок минеральных добавок и органоминеральных модификаторов на строительно-технические свойства МЗБ и растворов;

- установленные закономерности влияния органоминеральных модификаторов на пористость, предел прочности при сжатии, изгибе, модуль упругости, прочность сцепления с основанием строительных растворов;
- впервые полученные результаты оценки морозостойкости строительных растворов по различным критериям;
- установленные закономерности влияния рецептурных факторов на кинетику высыхания и развитие деформаций усадки.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена комплексом проведенных исследований с использованием сертифицированного и метрологически поверенного современного лабораторного оборудования, стандартных средств измерений и методов научных исследований, непротиворечивостью полученных результатов и выводов общепризнанным положениям строительного материаловедения и результатам исследований других авторских коллективов.

Апробация результатов работы. Результаты исследований были представлены на конференциях: II международной научно-практической конференции «Эволюция научных исследований: открытия и перспективы», Москва, 12 февраля 2024г; 45 итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ и научных мероприятий «Неделя науки , Махачкала, 2024»15-20 апреля 2024г; II Международной научно-практической конференции «Наука, технологии и общество: взаимодействие и перспективы», Москва, 18 июля 2024; II Международной научно-практической конференции «Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации», Саратов, 10 августа 2024 г; IV Международной научно-практической конференции «Инновации в науке: вызовы и перспективы будущего», Саратов, 10 сентября 2024 г; III Международной научно-практической конференции «Границы знаний: междисциплинарный подход в науке», Саратов, 12 марта 2025 г.

Внедрение результатов исследований. Результаты исследований прошли полупромышленную апробацию на технологической линии ООО "Технология и

Материалы" в период с марта по апрель 2025 г. Разработанные составы приняты в качестве базовых для отработки производственных рецептов в условиях ООО "Технология и Материалы" с целью организации производства напольных, штукатурных, клеевых и ремонтных сухих строительных смесей.

В мае 2025 г. на технологической линии ООО «ЮгСтройСмесь» выпущено опытные партии кладочных, штукатурных и напольных сухих строительных смесей по рецептурам разработанным рецептурам с модифицирующими добавками на основе природного и техногенного сырья. Апробированные в производственных условиях составы проходят лабораторные испытания в ООО «Ростовская Строительная Лаборатория» для подтверждения соответствия их качества требованиям действующих нормативных документов.

Публикации. Основные положения работы изложены в 13 публикациях, в том числе: 6 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 7 статей в изданиях, индексируемых в базе РИНЦ, в т.ч. 5 статей без соавторов.

Личный вклад автора состоит в обосновании рабочей гипотезы, постановке цели и задач исследования, в теоретическом анализе данных по проблеме исследования, в планировании и реализации экспериментов по исследованию влияния рецептурных факторов на свойства полученных из ССС содержащих комплексную минеральную добавку МЗБ и содержащих органоминеральный модификатор строительных растворов, обработке и анализе результатов исследований, формулировке научной новизны, выводов и заключения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 169 наименований и приложений. Изложена на 195 страницах текста формата А4, шрифт Times new roman 14, 1,5 интервала, содержит 95 рисунков и 39 таблиц.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.1.5 Строительные материалы и изделия:

п. 9 «*Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного*

сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений».

п. 11 *«Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации».*

п. 15 *«Развитие теоретических основ и технологии получения вяжущих композиций и сухих строительных смесей различного назначения».*

Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования

1.1 Перспективы применения сухих строительных смесей

Мелкозернистые бетоны (МЗБ) и строительные растворы различного назначения, в т.ч. полученные из сухих строительных смесей (ССС) на портландцементном вяжущем [1-2], массово используются [3-6] при производстве общестроительных, отделочных, специальных и ремонтно-восстановительных работ [7-9], поскольку обеспечивают высокую технологичность и меньшую зависимость от погодных условий и логистики в сравнении с традиционными строительными растворами и МЗБ, а также позволяют наряду с повышением качества отделочных работ значительно сократить трудозатраты и материалоемкость, упростить организацию снабжения и складские операции [10-13]. СССР на цементной основе составляют порядка 70% объема производимых СССР.

Потребление СССР в 2000 г. в ряде стран превышали 30 кг/чел. в год [14]. По данным [15] в 2019-2023 гг. продажи СССР в России росли ежегодно и за указанный период увеличились на 47,0%: с 10,6 млн т в 2019 г. до 15,6 млн т в 2023 г, т.е. составили порядка 100 кг/чел. в год. При этом спрос на строительные материалы для жилищного строительства остался на высоком уровне, поскольку в 2023 г в эксплуатацию было введено 175,0 млн м² жилья, что на 9,3% превысило показатели 2022 г. Некоторое снижение занятых в отрасли производства СССР с 114,0 тыс. чел. в 2019 г. до 106,3 тыс. чел. в 2023 г. (-6,8%) обусловлено, в т.ч., ростом производительности труда в связи с совершенствованием технологических процессов и ростом уровня механоворуженности труда. За это же период средняя заработная плата в отрасли производства СССР выросла на 67,7%, при этом в 2022 г. повышение стоимости продукции в среднем составило 12,2 % относительно 2019 г. Приведенные данные свидетельствуют о востребованности отрасли, ее развитии и перспективности.

Номенклатура ССС представлена значительным рядом разнообразных по области применения и свойствам материалов, в т.ч. МЗБ и строительных растворов для транспортных сооружений [16]. Согласно ГОСТ 31189-2015 по функциональному назначению ССС классифицируют на:

- кладочные;
- штукатурные;
- шпатлевочные;
- клеевые;
- затирочные;
- напольные;
- ремонтные;
- изоляционные;
- специальные;
- для фасадных теплоизоляционных композиционных систем.

Кроме того, различают ССС для наружных и внутренних работ.

В связи с использованием в составе ССС различных минеральных добавок и наполнителей [5,17], в т.ч. во все возрастающих объемах техногенного происхождения [18-20], с учетом роста производства и потребления ССС обеспечивается решение важной экологической задачи по утилизации техногенных отходов. При эксплуатации в зависимости от назначения строительные растворы подвергаются различным воздействиям, в частности, силовым, температурным, влажностным, агрессивной среды [21-29], в связи с чем для обеспечения стойкости к эксплуатационным воздействиям должны удовлетворять установленным нормативными документами показателям качества. При разработке рецептур ССС различного функционального назначения специалисты особое внимание уделяют оценке эффективности добавок для обеспечения требуемого уровня показателей как смесей, так и затвердевших растворов и МЗБ.

Функциональные химические и минеральные добавки для ССС обеспечивают улучшение как технологических свойств смесей, в частности, таких как водоудерживающая способность, стойкость к сползанию,

удобообрабатываемость и др., так и строительно-технических свойств полученных из ССС строительных растворов, в частности, предела прочности при сжатии, растяжении (изгибе), морозостойкости, прочности сцепления с основаниями, водонепроницаемости, стойкости к агрессивным средам, снижению усадочных деформаций, повышению теплозащитных свойств, морозостойкости контактной зоны [21, 30-46].

Как известно, долговечность строительных конструкций во многом зависит от стойкости материалов к агрессивным эксплуатационным воздействиям. Среди основных показателей качества для, например, штукатурных и ремонтных составов для наружных работ, нормируются морозостойкость и усадочные деформации. ГОСТ 31357-2007 [47] устанавливает марки по морозостойкости по критерию прочности при сжатии от F15 до F400, а по морозостойкости контактной зоны для всех смесей, кроме клеевых, от $F_{кз}25$ до $F_{кз}100$. ГОСТ Р 58277-2018 [48] регламентирует методы испытаний ССС.

Для ремонта и восстановления железобетонных конструкций все шире применяются так называемые «ремонтные» ССС по ГОСТ 31189-2015 [49]. Они классифицируются на поверхностно-восстановительные, объемно-восстановительные, конструкционные, инъекционные, и в зависимости от назначения для указанных ССС требования по показателям прочности на сжатие, модуля упругости, прочности сцепления с основанием, усадки установлены в ГОСТ Р 56378-2015 [50]. Требования по показателю предела прочности на осевое растяжение или растяжение при изгибе не установлены, хотя важность этого показателя для многих бетонов и строительных растворов очевидна [51].

Одной из ведущих тенденций в производстве МЗБ и строительных растворов различного назначения является применение активных и инертных минеральных добавок (МД), как правило, в виде наполнителей в составе ССС [52,53], поскольку их применение способствует получению более плотной структуры бетона и раствора [49] и, как показано в [50], указанные добавки, как правило, являются обязательным компонентом ССС. Реализуются также различные технологии получения минеральных и комплексных органоминеральных модификаторов для

бетонов и ССС на основе МД [17, 29, 56-60], в т.ч. с применением механоактивации МД [61]. В связи с влиянием МД и комплексных модификаторов на процессы гидратации портландцемента и, следовательно, на формирование поровой структуры цементного камня и контактной зоны «цементный камень-заполнитель», применение указанных добавок может оказывать значительное влияние на строительно-технические свойства МЗБ и строительных растворов [62-65]. В частности, некоторые МД могут существенно повышать предел прочности на растяжение как при изгибе, так и осевое, что важно, в т.ч. для повышения усадочной трещиностойкости бетонов и строительных растворов [66, 67]. Следует отметить, что ГОСТ Р 56592-2015 [68] допускает применение МД, качество которых не соответствует требованиям стандарта, при обосновании предварительными исследованиями, что создает условия для расширения сырьевой базы для производства МД.

Таким образом, применение при производстве ССС различного функционального назначения наряду с применением специальных химических добавок, обеспечивающих:

- технологические свойства мелкозернистых бетонных и растворных смесей, таких как удобоукладываемость (удобообрабатываемость), сохраняемость, водоудерживающая способность;
- эксплуатационные свойства МЗБ и строительных растворов, таких как показатели прочности, морозостойкости, прочности сцепления с основанием, морозостойкости контактной зоны, деформационных и иных требуемых свойств.

Широко применяются различные МД как природного, так и техногенного происхождения, что позволяет решать наряду с технологическими задачи как снижения себестоимости продукции так и обеспечения экологической безопасности, в связи с чем исследования в области анализа возможности расширения сырьевой базы за счет применения МД из природного и (или) техногенного сырья, выявление общих закономерностей влияния различных МД, в т.ч. в сочетании с химическими добавками, на строительно-технические свойства МЗБ и растворов являются актуальными.

1.2 Применение природного и техногенного сырья при производстве сухих строительных смесей

Согласно [69] «применение техногенных отходов в производстве сухих строительных смесей в России позволяет решать несколько задач: оптимизировать расход вяжущего и улучшить функциональные свойства материалов, такие как истираемость, теплопроводность, долговечность и другие...». В Российской Федерации на промышленных предприятиях ежегодно образуется около 36 млн. т пылевидных и газообразных отходов и до 10 млрд. т твердых отходов. Основную часть техногенных отходов составляют золы и шлаки ТЭС и металлургических производств [69]. По данным Росприроднадзора вторично используется или обезвреживается только до 20 % образующихся техногенных отходов.

Традиционно для производства портландцемента, бетонов и строительных растворов применяются металлургические шлаки, золы и золошлаковые смеси, выход которых составляет ежегодно несколько десятков миллионов тонн, а утилизация, по некоторым данным, не превышает 8%. Золы характеризуются высокой дисперсностью и, достаточно часто, реакционной способностью, т.е. обладают пуццоланическими свойствами. Зола-уноса представляет собой частицы преимущественно аморфного стекловидного состава обычно сферической формы диаметром от 5 до 200 мкм [70]. В зависимости от качественных показателей золы делят на 4 вида, для производства строительных растворов рекомендуется применять золу-уноса вида II. Зола-уноса ПАО ОГК-2 Новочеркасская ГРЭС характеризуется химическим составом, представленным в таблице 1.1 [71].

Таблица 1.1 – Сведения о химическом составе золы-уноса Новочеркасская ГРЭС

МД	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	п.п.п
Зола	53,82	22,12	9,77	3,71	4,59	1,26	0,35	0,23	22,8

Эффективность применения золы-уноса с целью экономии цемента отмечена в [72]. Показано, что замена части цемента на минеральные добавки приводит к

замедлению набора прочности в ранний период и не оказывает значительного влияния на предел прочности при изгибе. По данным [71] «в составе зол от сжигания мелкозернистых углей, добываемых на территории Ростовской области, и в горелых породах шахтных отвалов свободный оксид кальция практически не обнаружен. Золы и горелые породы при затворении водой не твердеют. Однако в смеси с вяжущими (известь, цемент) проявляют свойства, характерные для пуццоланов». В [72] сделано заключение, что «согласно ГОСТу 25094-94 тонкодисперсные горелые породы шахтных отвалов и золы уноса можно считать активными минеральными добавками». Авторы [73] пришли к заключению, что «зола уноса более активна в сравнении с горелой породой» и рекомендуют тонкодисперсные горелые породы и золы-уноса к применению в технологии бетонов и строительных растворов.

В работе [74] представлен обстоятельный анализ исследований по вопросам применения зол и золошлаковых отходов в строительстве, видов зол, их химических и физических характеристик, предложена классификация. Среди рациональных областей применения указано производство строительных растворов марок до М200 включительно и сухих строительных смесей.

По данным [75] «использование взамен цемента грубодисперсной золы-уноса в количестве до 20% массы цемента... способствует повышению вязкости, практически не изменяет сроки схватывания и кинетику пластической прочности... приводит к снижению интенсивности тепловыделения и суммарной теплоты гидратации». Отмечено, что в случае применения золы-уноса с суперпластифицирующими добавками наряду с усилением положительных эффектов будет иметь место и снижение расслаиваемости и водоотделения растворных смесей. К подобным выводам пришли и авторы [76].

По данным [77] применение в составе МЗБ «активных пуццолановых наполнителей природного и техногенного происхождения» позволяет получать МЗБ с пределом прочности до 100 МПа, при этом при совместном введении в состав метакеолина и золы-уноса обеспечивается повышение прочности как в ранний период твердения, так и в проектном возрасте». Из представленных

авторами [77] данных следует, что соотношение пределов прочности изгиб/сжатие практически не зависит от возраста МЗБ и других факторов, и может быть описано уравнением:

$$R_f = 1,27R^{0,47} \quad (1.1)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,955$ (рисунок 1.1).

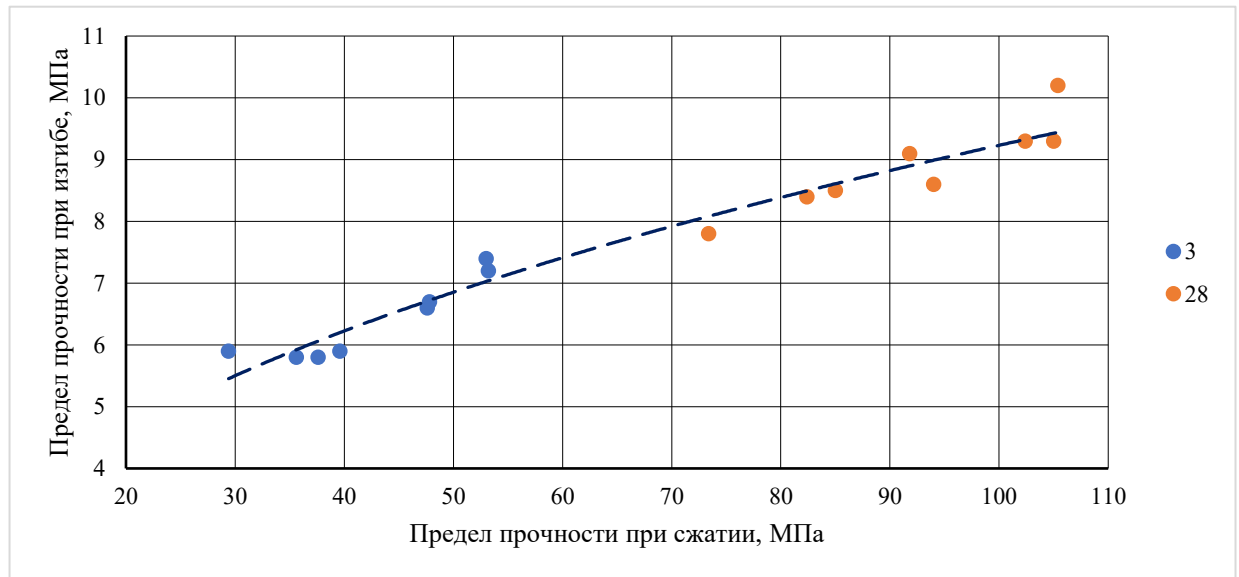


Рисунок 1.1 – Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии и возраста МЗБ по данным [77]

По данным [78] известково-зольное вяжущее, содержащее до 30% портландцемента, т.е. фактически замена 70% портландцемента на известково-зольную смесь, позволяет получить значение активности вяжущего, составляющее до 65% от активности портландцемента. В принципе, вяжущее может быть применено для производства низкомарочных строительных растворов.

Согласно [79] механоактивация золы-уноса приводит к повышению прочности бетона при сжатии до 20% при замене до 20% портландцемента золой-уноса. Кроме того, снижается сульфатная коррозия бетона и реакционная способность заполнителей. По данным [80] повышается коэффициент коррозионной стойкости бетонов, содержащих золу-уноса ТЭС взамен части портландцемента. В случае применения «золы, отобранной с анода электрического

сепаратора», имеет место повышение коэффициента коррозионной стойкости еще до 35 %. Кроме того, подвижность цементно-зольных паст с различным содержанием золы взамен части портландцемента возрастает [81].

По данным [82] при введении золы-уноса обеспечивается:

- «увеличение подвижности бетонной смеси на одну ступень без пластифицирующей добавки»;
- отсутствует негативное влияние на показатель сохраняемости бетонной смеси и марку бетона по водонепроницаемости;
- в равноподвижных смесях снижение водопотребности составляет до 18%;
- при замене до 20% портландцемента золой-уноса повышение прочности при сжатии в проектном возрасте составляет до 16,4%.

В пересчете на клинкер экономия цемента составляет 12-14%.

По данным [83] замена 10% заполнителя в МЗБ золой при нормальных условиях твердения обеспечивает рост прочности при сжатии до 64%. Эффективность применения золы-уноса при производстве ССС показана в [84]. Повышение предела прочности при сжатии в содержащих золу-уноса составах составила до 27% при введении в состав вяжущего до 30% золы.

Достаточно обширные исследования вопроса применения золы уноса в составе портландцементных композитов различного функционального назначения не содержат достаточного количества данных для ответов на вопросы, касающиеся прочности сцепления полученных из ССС строительных растворов с основанием, морозостойкости контактной зоны, изменения модуля упругости и предела прочности при изгибе или осевом растяжении при циклическом замораживании и оттаивании. Выявления закономерностей влияния рецептурных факторов на указанные показатели представляет актуальную задачу, особенно при применении золы-уноса в составе комплексных модификаторов, содержащих химические и другие, помимо золы-уноса, минеральные добавки.

Шламы являются перспективным источником техногенного сырья для производства строительных материалов. К шламовым отходам относятся осадки суспензий при металлургических и химических производствах, а также при очистке

воды на ТЭЦ. Шлам химводоочистки ТЭЦ-2 города Ростова-на-Дону характеризуется химическим составом, представленным в таблице 1.2 [71, 85].

Таблица 1.2 - Сведения о химическом составе шлама химводоочистки ТЭЦ-2

МД	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	п.п.п
Шлам	5,76	1,04	2,78	43,18	0,28		0,52	-	40,18

По мнению [84] «...важной проблемой теплоэнергетики является обработка, хранение и утилизация ... шламов». Состав шламов характеризуется содержанием карбоната кальция в пределах 75-85%, гидроксидов магния и железа по 4-8%, кремнекислыми и органическими соединениями. В обзоре [86], указывается, что у шламов химводоочистки «размер частиц составляет 40–50 нм, что позволяет отнести шламы к нанотехногенному сырью». По данным [87] содержание CaO в шламе химводоочистки в зависимости от электростанции составляет от 32 до 39,2%, Fe₂O₃ порядка 4%, CaSO₄ более 5%, CaCO₃ порядка 75%. Показана эффективность получения на основе шлама химводоочистки гипсового вяжущего посредством обработки шлама серной кислотой.

Согласно [88] имеет место ускорение твердения цементно-зольных растворов при введении известково-карбонатной пыли. Составы растворов с известково-карбонатной пылью и золой-уноса при производстве ССС соответствовали требованиям нормативных документов, что предопределяет актуальность исследований влияния шлама химводоочистки и золы-уноса при совместном их введении на технологические свойства смесей и свойства строительных растворов, полученных из ССС. По данным [89] целесообразно использовать шлам химводоочистки в качестве наполнителя при производстве высокоэффективных самоуплотняющихся портландцементных МЗБ. По данным [90] при замене до 35% портландцемента в штукатурных смесях шламом химводоочистки обеспечивается рост водоудерживающей способности смеси, при дозировке шлама 10% имеет место повышение предела прочности при сжатии в 7 сут, отмечается ускорение твердения в раннем возрасте. Морозостойкость раствора составила 75 циклов при

10% шлама и 50 циклов при 35% шлама [90]. По данным [91] самоуплотняющиеся МЗБ смеси, содержащие 7,3% шлама химводоочистки от массы портландцемента, характеризуются показателем распыла до 70 см против 61 см в составе с известняковой мукой, воздухововлечением 4,2% против 3,9%, пределом прочности при сжатии 52 МПа, высоким модулем упругости и несколько меньшей усадкой. По данным [92] на основе комбинированного вяжущего, содержащего не менее 60% гипса и до 40% шлама химводоочистки получены прессованные изделия с прочностью при сжатии до 65 МПа и коэффициентом размягчения до 0,70.

Результаты исследований влияния шлама в составе портландцементных композитов различного функционального назначения не содержат достаточного количества данных для ответов на вопросы, касающиеся прочности сцепления полученных из ССС строительных растворов с основанием, морозостойкости контактной зоны, изменения модуля упругости и предела прочности при изгибе или осевом растяжении при циклическом замораживании и оттаивании. Выявления закономерностей влияния рецептурных факторов на указанные показатели представляет актуальную задачу, особенно при применении шлама химводоочистки в составе комплексных модификаторов, содержащих химические и другие, помимо шлама химводоочистки, минеральные добавки.

По данным [93] «Юг России располагает крупной сырьевой базой кремнистого опал-кристобалитового сырья, потенциал которого до настоящего времени мало используется. Особенно велики запасы опок и их разновидностей – опоковидных пород». По данным [94] с использованием опоки получены ССС, соответствующие требованиям нормативных документов. В таблице 1.3 представлены данные о химическом составе опоки Нагольновского месторождения Ростовской области.

Таблица 1.3 - Сведения о химическом составе опоки

МД	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	п.п.п
Опока	59,83	7,11	2,78	13,03	1,18	0,85	0,21	0,12	12,7

В [95] произведена оценка активности семи минеральных добавок для композиционных цементов по 4 методикам:

- физико-механические испытания;
- EN 196-5:1991;
- Запорожца Д.И.;
- теплоте смачивания.

Получены следующие оценки активности опоки:

- по физико-механическим испытаниям 6 место;
- по EN – 2 место;
- по методике Запорожца Д.И. – 1 место;
- по теплоте смачивания – 1 место.

В [96] анализируются усадочные деформации содержащих опоку материалов на основе комбинированных вяжущих. В [97] анализируется влияние различных минеральных добавок, в т.ч. опоки, на показатели прочности кладочных растворов. По результатам можно сделать заключение о целесообразности применения опоки в строительных растворах. В [98] сделан вывод о возможности применения опок в качестве минеральной добавки при производстве бетонов. По данным [99] при замещении до 10% цемента опокой имеет место повышение прочности при сжатии. По данным [100] опока применяется при производстве ячеистых бетонов, гипсовых штукатурок, известковых растворов, композитных составов. Некоторая противоречивость сведений и недостаточность данных о применении опоки в ССС на основе портландцемента предопределяется целесообразность исследований влияния опоки в составе ССС на технологические свойства смесей и строительно-технические свойства полученных из содержащих опоку ССС строительных растворов.

Результаты исследований влияния опок в составе портландцементных композитов различного функционального назначения не содержат достаточного количества данных для ответов на вопросы, касающиеся прочности сцепления полученных из ССС строительных растворов с основанием, морозостойкости контактной зоны, изменения модуля упругости и предела прочности при изгибе или

осевом растяжении при циклическом замораживании и оттаивании. Выявления закономерностей влияния рецептурных факторов на указанные показатели представляет актуальную задачу, особенно при применении опок в составе комплексных модификаторов, содержащих химические и другие, помимо опок, минеральные добавки.

По данным [101] свойства горелых пород как сырья для применения в бетонах и растворах «определяются составом минеральной части, температурой обжига, а также составом газовой среды при горении». В таблице 1.4 представлены данные о химическом составе горелой породы Шахтинско-Несветаевского геолого-промышленного района Ростовской области.

Таблица 1.4 - Сведения о химическом составе горелой породы (ГП)

МД	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	п.п.п
ГП	56,43	19,38	6,18	1,73	3,77	1,18	1,73	0,14	4,07

В [102] анализируются рациональные области применения техногенного сырья для производства строительных композитов. Авторы отмечают, что горелые породы являются типичным представителем класса В по агрегатному состоянию по классификации Баженов Ю.М. и рассматривают 5 групп по преобладанию в составе минеральных отходов соответствующих химических соединений:

- силикатные;
- карбонатные;
- известковые;
- гипсовые;
- железистые.

Отмечается, что «отходы второй и третьей групп утилизируются в строительстве... как сырье для производства автоклавных материалов, керамики, стекла». Ко второй группе, в частности, авторы относят «...побочные продукты горнодобывающей промышленности» [102]. Недостаточность данных о применении горелых пород в ССС на основе портландцемента предопределяется

целесообразность исследований влияния минеральной добавки из горелых пород в составе ССС на технологические свойства смесей и строительно-технические свойства полученных из ССС, содержащих минеральную добавку их горелых пород, строительных растворов.

Результаты исследований влияния горелых пород в составе портландцементных композитов различного функционального назначения не содержат достаточного количества данных для ответов на вопросы, касающиеся прочности сцепления полученных из ССС строительных растворов с основанием, морозостойкости контактной зоны, изменения модуля упругости и предела прочности при изгибе или осевом растяжении при циклическом замораживании и оттаивании. Выявления закономерностей влияния рецептурных факторов на указанные показатели представляет актуальную задачу, особенно при применении горелых пород в составе комплексных модификаторов, содержащих химические и другие, помимо горелых пород, минеральные добавки.

1.3 Химические добавки для сухих строительных смесей

При производстве ССС различного назначения в их состав вводят химические добавки для обеспечения технологических свойств смесей и требуемых показателей качества полученных из ССС строительных растворов. Количество добавок в составе ССС может составлять от 1 до 7 и более. Наиболее часто применяемыми химическими добавками являются [36]:

– водоудерживающие добавки (ВУД), представляющие различные соединения на основе эфиров метилцеллюлозы, основное назначение которых в составе ССС заключается в обеспечении водоудерживающей способности смеси. Дозировка ВУД обычно составляет от 0,1 до 0,3 (0,35) % от массы ССС, одним из основных показателей ВУД является вязкость суспензии, в зависимости от величины которой (от 400 до 70000) определяется область применения ВУД:

-- наливные полы и стяжки;

- штукатурки, шпатлевки, ремонтные составы;
- клеевые смеси;

– редиспергируемые полимерные порошки, представляют собой сухие порошки различных водорастворимых полимеров (чаще всего винилацетата, сополимера винилацетата и этилена, винилового эфира версатиковой кислоты и эфиров акриловой кислоты). Достаточно обстоятельный обзор РПП представлен в [100]. Одними из основных показателей РПП являются температура стеклования (от минус 8°C до 18°C) и температура пленкообразования (от 0°C до 18°C). Механизм действия РПП в составе смесей и растворов описывается, например, в [40]. РПП вводятся в состав ССС с целью:

- повышения прочности сцепления с основанием (адгезии);
- снижения модуля упругости (повышения «эластичности»);
- изменения соотношения прочностей изгиб/сжатие).

Дозировка РПП составляет от 0,5 до 5% от массы ССС, чаще изменяется в диапазоне от 1 до 3%.

В составе ССС, как правило, применяются одновременно несколько добавок, или комплекс. В напольные смеси (стяжки, «финишные» полы) вводят, в т.ч., суперпластифицирующие добавки. Обстоятельный обзор комплексов и продукции одного из производителей приведен в [104]. Стоимость представленных на рынке добавок различна. В [36] предложена «методика оценки эффективности добавок ВУД и РПП по показателям:

- удельной стоимости;
- технологичности нанесения;
- прочности сцепления с основанием»;
- с «учетом особенностей минеральной составляющей ССС».

Анализ влияния дозировок, вида и свойств РПП, ВУД и пластификаторов на технологические свойства смесей и строительных растворов приведен в [66, 105-115]. Отмечено, что «важным условием обеспечения монолитности сцепления является совместность деформаций основания и нанесенного слоя при эксплуатации».

В некоторых исследованиях отмечается положительное влияние РПП на технологические свойства смесей, а также такие свойства растворов, как «гибкость» (видимо, «эластичность» за счет снижения модуля упругости) и прочность сцепления с основанием, повышение предела прочности при растяжении и изгибе до 20% [42, 62]. По данным [45] РПП наибольшее влияние проявляет именно на прочность сцепления с основанием (адгезию), при этом увеличение дозировки РПП сопровождается повышением прочности сцепления при выдерживании как в сухой, так и во влажной среде, при температуре до 70°C и при циклическом замораживании и оттаивании, что очень важно, например, для фасадных штукатурных составов [116].

Авторы [46] отмечают зависимость прочности сцепления от водоцементного отношения (т.е. фактически от пористости строительного раствора) и модуля упругости. По данным [117,118] важным фактором, определяющим величину прочности сцепления (адгезии), является физико-химическое взаимодействие основания и нанесенного раствора. В результате прочность сцепления с основанием (адгезия) определяется как свойствами раствора, так и его взаимодействием с основанием [39, 119]. Существуют различные теории (взгляды) на природу адгезии:

- механическая;
- химическая;
- адсорбционная;
- диффузионная;
- релаксационная;
- электрическая и слабых граничных слоев.

Прочность сцепления включает две составляющие: механическое зацепление, на величину которого влияет шероховатость поверхности, и адгезия (аутогезия), обусловленная межмолекулярным взаимодействием [120, 121].

РПП в базовых рецептурах клеевых смесей классов С1 и С2 присутствуют в обязательном порядке. По данным [115] при введении в состав ССС РПП Vinnapas прочность сцепления в сравнении с бездобавочным эталоном возросла до 3 раз, а

согласно [14] при увеличении дозировки РПП Vinnapas от 0,5% до 5% прочность сцепления возросла в 5 раз, от 0,2 до 1,0 МПа. По данным [42] в нормальных условиях клеевые составы, содержащие 2% и 5% РПП Vinnapas, показали повышение прочности сцепления в 1,29 раза и в 1,71 раза, а при выдерживании 14 суток при 70°C после 14 суток твердения в нормальных условиях прочность сцепления составила 0,5 и 0,7 МПа соответственно, при этом у бездобавочного эталона после 70°C прочность сцепления оказалась равной нулю. По данным [122] при дозировке 3% РПП Mowilith и Vinnapas выявлено различие до 30% между прочностью сцепления при введении в состав ССС различных РПП, т.е. прочность сцепления зависит от вида РПП. По данным [108] при дозировке 3% РПП ELOTEX 50E100 прочность сцепления увеличилась в 2,5 раза относительно бездобавочного эталона. Согласно [43] введение РПП в состав клеевой смеси обеспечивает повышение прочности сцепления на 0,2-0,25 МПа. По данным [123] при введении РПП прочность сцепления возросла до 2,5 раза. Показана зависимость прочности сцепления от показателя открытого времени. По данным [37] при нормальных условиях твердения при дозировке РПП до 2% имеет место повышение прочности сцепления до 30%, при дозировке до 3% до 2,3 раза, причем выдерживание при 70°C существенно влияет на прочность сцепления. Неоднозначное влияние РПП на прочность сцепления после циклического замораживания и оттаивания (морозостойкость контактной зоны) отмечается в [122].

Для монолитности сцепления должно быть минимизировано трещинообразование как при нанесении растворной смеси, так и в процессе эксплуатации строительного раствора. При этом значения модулей упругости и коэффициентов температурных деформаций основания и раствора должны быть близки. Исследования вопросов влияния РПП и ВУД в основном посвящены таким свойствам полученных из ССС строительных растворов, как предел прочности при сжатии и прочность сцепления с основанием. Данных о влиянии РПП и ВУД на предел прочности на осевое растяжение и (или) предел прочности при изгибе, модуль упругости, усадка при высыхании относительно немногочисленны. Немногочисленные результаты исследований модуля упругости МЗБ [124]

применительно к строительным растворам требуют проверки и, возможно, корректировки. По представленным в [125] данным можно сделать вывод, что добавки оказывают влияние на предел прочности при изгибе и прочность сцепления (рисунок 1.2), но при этом соотношения R_f/R (прочность при изгибе/прочность при сжатии) и A/R_f (прочность сцепления/прочность при изгибе) практически не изменяются.

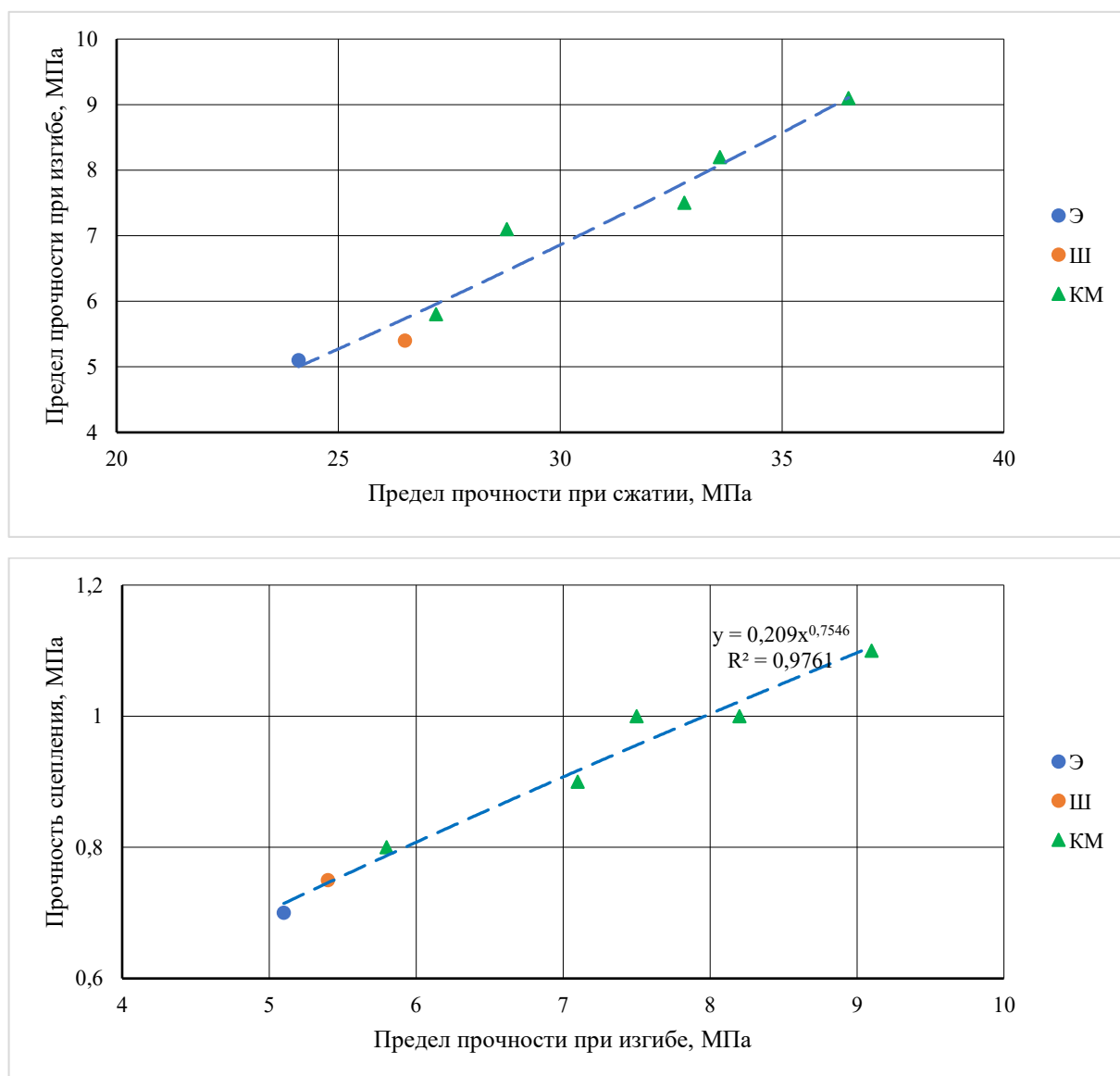


Рисунок 1.2 – Влияние добавок на соотношение прочностей изгиб/сжатие (вверху) и прочностей сцепление/изгиб (внизу) по данным [125] Э – эталон без добавок, Ш – только шлак, КМ – комплексные модификаторы

По представленным в [125] экспериментальным данным зависимость предела прочности при изгибе R_f от предела прочности при сжатии R может быть описана уравнением:

$$R_f = 0,05R^{1,44}, \quad (1.2)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,95$, что свидетельствует о весьма тесной корреляции между рассматриваемыми показателями, а зависимость прочности сцепления со стандартным бетонным основанием от предела прочности при изгибе может быть описана уравнением:

$$R_f = 0,21R_f^{0,75}, \quad (1.3)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,976$, что свидетельствует о весьма тесной корреляции между рассматриваемыми показателями.

Важность выявления закономерностей влияния РПП и ВУД на модуль упругости и прочность при изгибе строительных растворов в первую очередь обусловлена тем, что условный критерий трещиностойкости E/R_t при усадочных, температурных, силовых деформаций определяется именно этими величинами. Выявление влияния рецептурных факторов на закономерности изменения предела прочности при сжатии, изгибе, модуля упругости, усадки при высыхании строительных растворов, прочности сцепления с основанием, морозостойкости и морозостойкости контактной зоны ССС, содержащих РПП и ВУД, в т.ч. в составе комплексных органоминеральных модификаторов, представляет актуальную задачу.

1.4 Усадка строительных растворов

Для многих видов строительных растворов при разработке рецептур регулирование усадки является важным фактором [126-128], особенно для штукатурных растворов при производстве реставрационных работ [9], и ремонтных составов [6, 7], но количественное нормирование численных значений усадочных деформаций строительных растворов отражено в немногих документах (таблица

1.5). В ГОСТ Р 58766-2019 [129] в числе основных показателей качества строительных растворов не представлены усадочные деформации. В ГОСТ 31357-2007 [47] для некоторых ССС в качестве дополнительных показателей качества допускается нормирование деформаций усадки. В ГОСТ Р 56378-2015 [50] для так называемых «ремонтных» ССС устанавливается процедура испытаний на усадку, но нормирование количественных значений усадочных деформаций отсутствует. Некоторые производители таких ССС ограничивают значение усадочных деформаций не более 0,5 мм/м.

Таблица 1.5 – Нормирование усадочных деформаций строительных растворов

Нормативный документ	Нормирование
ГОСТ Р 58766-2019 [129]	Нормирование усадки отсутствует
ГОСТ 31358-2019 [130]	Значение усадки, мм/м, не более 1,5
ГОСТ 33083-2014, [131]	Значение усадки, мм/м, не более 1,0
ГОСТ 30459-2008 [132]	Метод испытания расширяющих добавок
ГОСТ Р 56178-2014 [133]	Состав раствора ¹ Ц:МБ:П = 0,87:0,13:1
ГОСТ Р 56378-2015 [50]	Процедура испытаний на усадку
Примечание – 1 - для определения расширения	

Как известно, в состав многих ССС вводятся различные полимерные и минеральные добавки (МД) с целью повышения технологичности растворов смесей и регулирования свойств строительных растворов [13], в т.ч. МД вводятся в качестве наполнителей [52], что обеспечивает получение высокотехнологичных смесей и положительно влияет на свойства строительных растворов [54], при этом и полимерные и минеральные добавки могут влиять на деформации усадки цементного камня и, закономерно, МЗБ или строительного раствора [134,26]. По данным [135] в зависимости от вида и дозировки минеральных добавок усадочные деформации в возрасте 21 сут составили от 0,15 до 0,6 мм/м, т.е. различались в 4 (!) раза. По данным [136] при содержании в составе МЗБ минеральной добавки из металлургических шлаков имело место снижение деформаций усадки в возрасте 90

сут до 6 (!) раз. По данным [137] влажностная усадка цементного камня значительно зависит от величины водоцементного (В/Ц) и наличия химических добавок. Несмотря на значительное количество информации по влажностной усадке строительных растворов и МЗБ, данных о влиянии РПП и ВУД на влажностную усадку строительных растворов недостаточно. Учитывая важность вопроса регулирования усадки растворов и бетонов различного функционального назначения [26, 138], особенно при производстве ремонтных [13] и реставрационных работ [9,54,127,128], при разработке рецептур штукатурных и ремонтных составов различного назначения, а также недостаточное отображение требований в нормативных документах, регламентирующих оценку усадочных деформаций для растворов различного назначения из ССС [139], выявление закономерностей влияния органо-минерального модификатора, содержащего ВУД и РПП в сочетании с комплексной минеральной добавкой (КМД), содержащей шлам химводоочистки в сочетании с золой-уноса либо горелой породой либо опокой на усадочные деформации строительных растворов представляет актуальную задачу.

1.5 Морозостойкость строительных растворов

Согласно ГОСТ 31357-2007 [47] «...морозостойкость является основным показателем качества затвердевшего раствора». Марки по морозостойкости затвердевших растворов установлены от F15 до F400. В [140] приведены составы и свойства кладочных растворов без РПП с маркой по морозостойкости до F100. Показано, что морозостойкость растворов в «основном зависит от факторов, определяющих вяжуще-водное отношение, т.е. от расхода цемента и содержания добавки-суперпластификатора». При «наличии добавки С-3 морозостойкость может практически не изменяться или даже несколько возрасти». В [12] показано влияние критерия морозостойкости МЗБ, в т.ч. модифицированных введением в состав РПП, особенно в случае применения зольной микросферы с

воздухововлекающей добавкой, на изменение предела прочности при изгибе и при сжатии после циклического замораживания-оттаивания. Показано, что морозостойкость на базе 75 циклов испытаний практически не зависит от критерия морозостойкости МЗБ. Установлено, что «критерий морозостойкости не оказывает значительного влияния на изменения величины относительной прочности при сжатии» и практически не оказывает влияния на изменение прочности сцепления. В [141,142] приведены результаты исследований влияния РПП и низкомодульных включений на предел прочности при сжатии, изгибе, начальный модуль упругости и прочность сцепления после 75 циклов замораживания и оттаивания. Предложены дозировки РПП для растворов с нормируемыми требованиями по морозостойкости.

По данным [143] применение модифицированного коллоидного цементного клея обеспечило повышение морозостойкости до 3 раз. По данным [144] использование аморфных алюмосиликатов оказывает положительное влияние на морозостойкость плиточного клея в пределах 75 циклов замораживания и оттаивания. Согласно [145] использование пластифицирующих и воздухововлекающих добавок обеспечило повышение морозостойкости равнопрочных и равноподвижных составов с марки по морозостойкости F75 до марки F150, т.е. в 2 раза. По данным [146] при использовании добавки «комплексного действия $C_{MK}+C-3$ получены сухие монтажные смеси с прочностью на сжатие M200 и морозостойкостью F200 при экономии цемента 22...24 %». В [147] показано, что введение добавки метакаолина до 10% обеспечило повышение морозостойкости раствора из ССС с марки F50 до марки F100, т.е. в 2 раза. Возможность получения штукатурных растворов с маркой по морозостойкости до F100 при введении в состав «шлама водоумягчения ТЭЦ» показана в [85]. В [13] приведена информация о теплоизоляционных растворах с морозостойкостью 50-75 циклов на перлитовом песке.

Как известно, долговечность строительных конструкций зависит от стойкости материалов к эксплуатационным воздействиям. Среди основных показателей качества для, например, штукатурных и ремонтных составов для наружных работ, нормируются морозостойкость и усадочные деформации. ГОСТ

31357-2007 устанавливает марки по морозостойкости по критерию прочности при сжатии от F15 до F400, а по морозостойкости контактной зоны для всех смесей, кроме клеевых, от $F_{кз}25$ до $F_{кз}100$. ГОСТ Р 58277-2018 регламентирует методы испытаний ССС.

В составе ССС различного назначения для повышения удобообрабатываемости смесей и обеспечения требуемых свойств затвердевших растворов как правило присутствуют, наряду с водоудерживающей добавкой (ВУД), редиспергируемые полимерные порошки (РПП) и активные минеральные добавки АМД и (или) наполнители (МД) [22, 23]. В [148] показано, что строительные растворы с комплексной минеральной добавкой (КМД = шлам химводоочистки + зола-уноса, либо опока, либо горелая порода) при соотношении ПЦ: КМД = 1:0,2 при средней влажности воздуха самого засушливого месяца в Ростове-на-Дону 47% не превысят 0,55 мм/м. В [149,78] представлены результаты исследований влияния указанных добавок на некоторые свойства, в т.ч. прочность сцепления со стандартным бетонным основанием полученных из ССС строительных растворов. Добавки, оказывая влияние на поровую структуру цементного камня, могут значительно влиять на свойства МЗБ и строительных растворов, в т.ч. на морозостойкость [150-152].

В связи с ограниченными данными о влиянии РПП и АМД (МД), особенно при совместном применении, на морозостойкость полученных из ССС строительных растворов, особенно при числе циклов замораживания и оттаивания более 75, выявление закономерностей влияния комплексной МД, содержащей шлам химводоочистки (Ш) в сочетании с золой уноса (З) либо опокой (О), в т.ч. при применении МД в составе органо-минеральных модификаторов, на морозостойкость строительных растворов представляет актуальную задачу, решение которой требует анализа стойкости полученных из ССС строительных растворов, содержащих комплексные органо-минеральные модификаторы после 100 циклов циклического замораживания и оттаивания по критериям изменения пределов прочности при сжатии, изгибе, начального модуля упругости [153,154].

1.6 Морозостойкость контактной зоны

По п. 4.15 стандарта [47] для показателя «морозостойкость контактной зоны» марки по морозостойкости контактной зоны составляют от F25 до F100. Морозостойкость контактной зоны нормируется в ГОСТ Р 56378-2015, ГОСТ Р 56387-2018, ГОСТ 33083-2014. Последний регламентирует и морозостойкость строительных растворов.

Как известно, одним из определяющих морозостойкость бетонов и строительных растворов является изменение соотношения условно-закрытых («резервных») пор, в первую очередь, за счет сокращения объема капиллярных пор. По данным [155,156] положительное влияние на прочность сцепления (до 55%) штукатурных растворов оказала комплексная добавка «микрокремнезем + омыленный таловый пек». Последний, как известно, является воздухововлекающей добавкой. Положительное влияние микрокремнезема на прочность сцепления отмечается во многих исследованиях. В [158] для повышения морозостойкости монтажных и кладочных растворов в состав растворной смеси вводилась микрогранулированная воздухововлекающая добавка, содержащая микрокремнезем и продукты совместной обработки целлюлозы и сульфатного мыла. Рост морозостойкости составил до 3-5 раз относительно эталонного состава без добавки.

По данным [144] при введении в состав растворной смеси аморфных алюмосиликатов «зафиксировано снижение общей и капиллярной пористости на 6,8% и 35,8% соответственно» относительно бездобавочного эталона, что привело к росту морозостойкости плиточного клея.

По данным [122] после 75 циклов замораживания и оттаивания «повышение прочности сцепления с бетонным основанием в растворах с РПП составляет до 49%», а при совместном введении с низкомолекулярными включениями (зольные микросферы) «повышение прочности сцепления с бетонным основанием достигает 62%». Прочность сцепления со стандартным бетонным основанием после 75

циклов замораживания и оттаивания составила в среднем 1,02 относительно нормальных условий.

Значительный рост сцепления с керамической плиткой при введении 1,5% добавки «МетаМикс» установлен в [159,160]. При дозировке добавки «МетаМикс» 1% прочность сцепления клея для плитки после 35 циклов замораживания и оттаивания возросла с 0,84 МПа до 0,95 МПа.

Согласно [12] «условием обеспечения монолитности адгезионного соединения является физико-химическое взаимодействие» керамической плитки и раствора. Для повышения прочности сцепления применена ПВА дисперсия, морозостойкость плиточного клея по критерию «прочность сцепления» составила не менее 50 циклов.

В современных ССС важную роль в обеспечении морозостойкости контактной зоны отводится РПП и ВУД. По данным [42] на рисунке 1.3 показано влияние РПП Winnapas на прочность сцепления с керамической плиткой клеевых составов. Представленные на рисунке 1.3 данные наглядно показывают влияние РПП на прочность сцепления с керамической плиткой при различных условиях выдерживания.

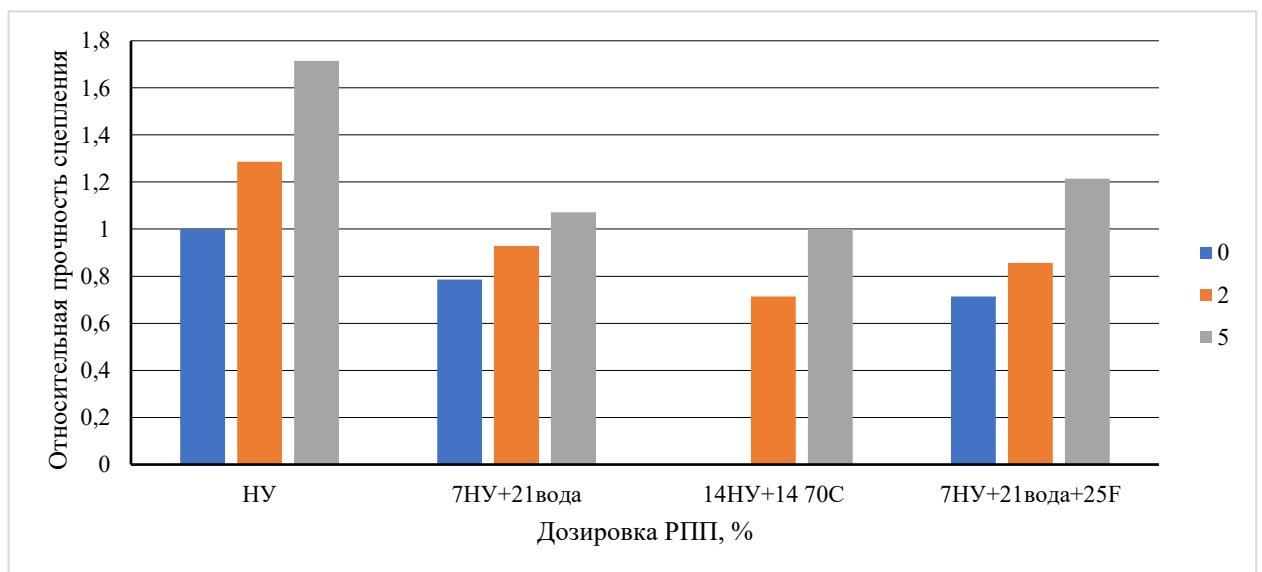


Рисунок 1.3 – Влияние дозировки РПП Winnapas на прочность сцепления с керамической плиткой клеевых составов по данным [42], где 0-5 – дозировка РПП, %; 7,21 – сутки выдерживания; 25F – циклы замораживания и оттаивания

По данным [29, 38] на рис. 1.2 показано влияние различных РПП при дозировках от 0 до 3% на относительную прочность сцепления с бетонным основанием полученных их ССС растворов. За 100 % (1,0) приняты значения после выдерживания 28 сут в НУ

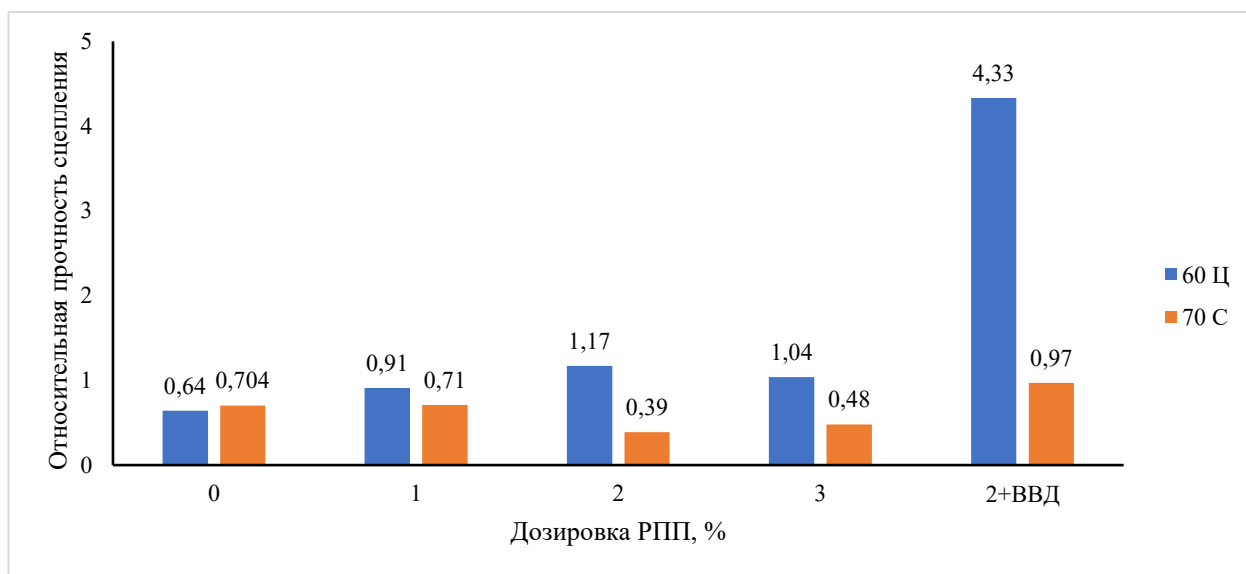


Рисунок 1.4 – Влияние дозировки РПП на прочность сцепления с бетонным основанием клеевых составов по данным [42], где 0-5 – дозировка РПП, %; 60 Ц – 28 сут НУ + 60 циклов нагревания до 60°С и остывания до 20°С; 70 С – выдерживание 14 сут НУ + 14 сут при 70° С; ВВД – с воздухововлекающей добавкой

Представленные на рисунке 1.4 данные о влиянии РПП на прочность сцепления с основанием в принципе позволяют, как и данные рисунке 1.3, сделать вывод о положительном влиянии РПП на прочность сцепления при различных воздействиях и, что особенно важно, о положительной роли воздухововлекающей добавки на обеспечение прочности сцепления при циклических температурных воздействиях.

В связи с ограниченными данными о влиянии комплексных модификаторов, содержащих РПП, ВУД и АМД (МД) на морозостойкость контактной зоны полученных из ССС строительных растворов, особенно при числе циклов замораживания и оттаивания более 75, выявление закономерностей влияния комплексной МД, содержащей шлам химводоочистки (Ш) в сочетании с золой

уноса (З) либо опокой (О) на морозостойкость контактной зоны строительных растворов представляет актуальную задачу.

Выводы по главе 1

1. Востребованность и перспективность отрасли производства ССС, широкая номенклатура продукции различного функционального назначения, возможность применения при производстве ССС в качестве минеральных добавок и наполнителей многотоннажных техногенных отходов предопределяет актуальность исследований в области совершенствования рецептур на основе выявления закономерностей влияния состава и дозировок органо-минеральных модификаторов «химические + минеральные добавки» на эксплуатационные свойства полученных из ССС строительных растворов и мелкозернистых бетонов.

2. Органо-минеральные модификаторы на основе минеральной добавки, содержащей шлам химводоочистки в сочетании с золой уноса либо опокой либо горелой породой в сочетании с водоудерживающей добавкой и редиспергируемым полимерным порошком при установленном в результате исследований рациональном сочетании компонентов обеспечат возможность регулирования в широком диапазоне технологических свойств смесей и строительно-технических свойств полученных из ССС растворов и бетонов различного функционального назначения.

3. Выявление закономерностей влияния рецептурных факторов на изменение в зависимости от времени и условий эксплуатации пределов прочности при сжатии, изгибе, начального модуля упругости, деформаций усадки мелкозернистых бетонов и строительных растворов с комплексными минеральными добавками или органо-минеральными модификаторами представляет актуальную задачу.

4. Выявление закономерностей влияния рецептурных факторов на морозостойкость полученных из ССС строительных растворов с органо-минеральными модификаторами и оценка морозостойкости контактной зоны

и коэффициента стойкости по критериям изменения пределов прочности при сжатии, изгибе, начального модуля упругости, скорости ультразвука после 100 циклов замораживания и оттаивания представляет актуальную задачу.

5. На основании обзора и анализа данных по рассматриваемой проблеме в работе формулируется **рабочая гипотеза** о том, что выявленные закономерности влияния органоминеральных модификаторов на основе природного и (или) техногенного сырья, водоудерживающей добавки и РПП на изменение в зависимости от времени и условий эксплуатации основных строительно-технических свойств строительных растворов и мелкозернистых бетонов обеспечат разработку рациональных составов ССС различного функционального назначения.

Глава 2. Материалы и методика экспериментальных исследований

2.1 Экспериментальные исследования выполнены с использованием

- портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2016 производства ОАО «Новоросцемент», завод «Первомайский»; активностью 51,9 МПа, НС/КС 150/220 мин, НГ 27,75% (далее ПЦ);
- кварцевого песка (П) с модулем крупности 2,37, удовлетворяющего требованиям к заполнителям для ССС;
- минеральных добавок Ш, З, ГП, О, сведения о химическом составе которых представлены в таблице 1.

Таблица 2.1 – Сведения о химическом составе минеральных добавок

МД	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	п.п.п
З ¹	53,82	22,12	9,77	3,71	4,59	1,26	0,35	0,23	22,8
Ш ²	5,76	1,04	2,78	43,18	0,28		0,52	-	40,18
О ³	59,83	7,11	2,78	13,03	1,18	0,85	0,21	0,12	12,7
ГП ⁴	56,43	19,38	6,18	1,73	3,77	1,18	1,73	0,14	4,07

Примечание – 1 – зола уноса ПАО ОГК-2 Новочеркасская ГРЭС;

2 – шлам химводоочистки ТЭЦ-2, г. Ростов-на-Дону;

3 – Нагольновская опока;

4 – горелая порода Шахтинско-Несветаевского геолого-промышленного района Ростовской области.

2.1.1 Зола-уноса Новочеркасской ГРЭС

Одним из важнейших показателем качества золы-уноса, является ее химический состав. Химический состав золы-уноса Новочеркасской ГРЭС (рисунок 2.1) представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав золы-уноса Новочеркасской ГРЭС

Показатели	Величина, %	факт
SiO ₂	53,82	50,63
TiO ₂	0,91	0,84
Al ₂ O ₃	22,12	28,85
Fe ₂ O ₃	9,77	9,28
CaO	3,71	1,82
MgO	2,27	1,87
MnO	0,14	0,06
K ₂ O	4,59	3,93
Na ₂ O	1,26	1,29
SO ₃	0,35	0,89
P ₂ O ₅	0,23	0,26

Как видно из таблицы 2.2, показатели оксидов находятся в традиционном диапазоне для золы-уноса различных тепловых электростанций, а также соответствуют требованиям ГОСТ 25818-2017, что позволяет применять ее в промышленности производства строительных материалов.



Рисунок 2.1 – Внешний вид золы-уноса Новочеркасской ГРЭС

Другим немаловажным аспектом, определяющим свойства золы-уноса, является ее фазовый состав. Для определения фазового состава золы-уноса Новочеркасской ГРЭС был выбран метод рентгенофазового анализа. Фазовый анализ выполнен с использованием рентгенометрической картотеки PDF-2 и программы ProfileShow. Рентгенограмма золы-уноса представлена на рисунке 2.2.

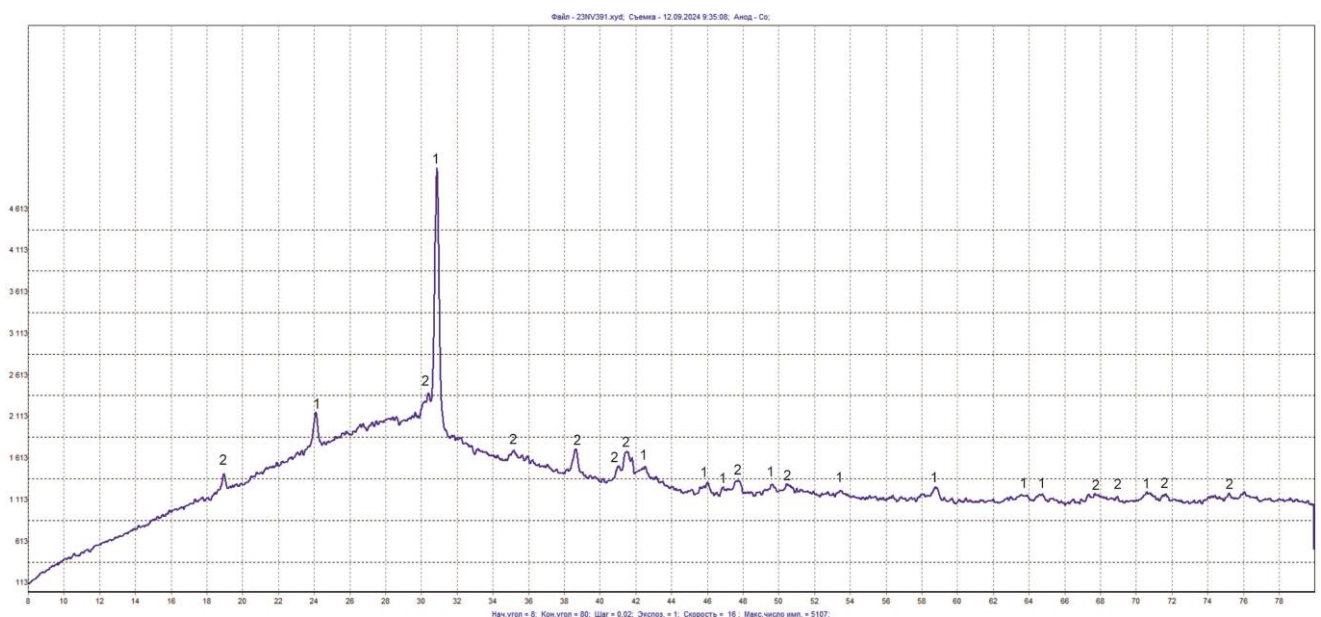


Рисунок 2.2 – рентгенограмма золы-уноса Новочеркасской ГРЭС, где 1 – диоксидом кремния SiO_2 ; 2 – муллит.

Как видно из рентгенограммы фазовый состав золы-уноса Новочеркасской ГРЭС (рисунок 2.2) представлен в основном двумя фазами: диоксидом кремния SiO_2 с пиками [d, Å, 3,35; 4,26; 1,82] и муллитом с ярко выраженными пиками $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ [d, Å, 5,39; 3,42; 3,39; 2,88; 2,69; 2,54; 2,20; 1,52].

Термограмма золы-уноса Новочеркасской ГРЭС (рисунок 2.3) характеризуются плавным экзотермическим эффектом вызванным окислением оставшихся органических веществ; эндоэффектом при температурах 550-580⁰С, связанным с полиморфными преобразованиями кварца, а также эндоэффектами связанными с потерей кристаллической воды таких минералов как каолинит, иллит, пиррофиллит, слюда, хлорит. Наблюдаются небольшие экзотермические эффекты при температурах 900-1050 ⁰С. Обусловлено это присутствием каолинита и пиррофиллита. Данные минералы теряют кристаллогидраты в интервале температур 550-800 ⁰С, а образующийся после этого метакаолин, представляющий собой тесную ассоциацию кремнезема и глинозема, переходит из кристаллической структуры в аморфное состояние при 980-1000 ⁰С, что отражается экзотермическим эффектом аморфизации. Физико-механические характеристики приведены в таблице 2.3.

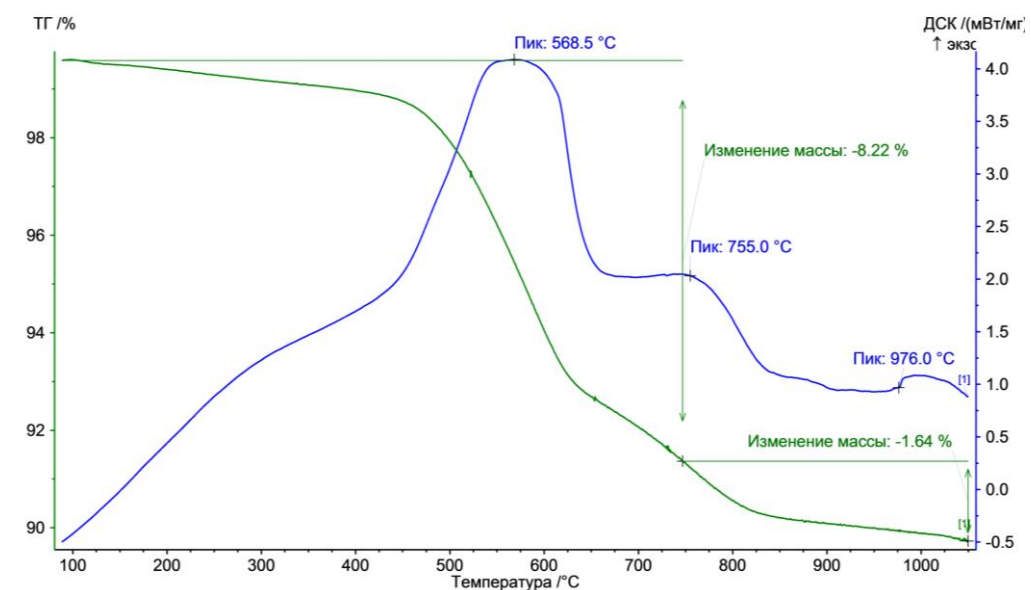


Рисунок 2.3 – Термограмма золы-уноса Новочеркасской ГРЭС

Таблица 2.3 – Физико-механические свойства золы-уноса 1-8 энергоблоков Новочеркасской ГРЭС

Показатели	Величина
Истинная плотность кг/м ³	2650
Насыпная плотность, кг/м ³	1050
Влажность, %	Менее 1
Удельная поверхность, см ² /г	2800
Остаток на сите 008, %	7
П.П.П.	22,8

2.1.2 Шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростова-на-Дону

В качестве минерального наполнителя в работе взят шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону (рисунок 2.4), образующийся при умягчении речной воды гашеной известью и содой. Образующийся при этом гидрокарбонат кальция и магния в воде переходит в нерастворимый осадок. Образующийся осадок, состоящий в основном из CaCO_3 и $\text{Mg}(\text{OH})_2$, после осаждения и фильтрации образует шлам, состоящий из тонкодисперсной твердой фазы и физически свободной воды. Обезвоженный шлам представляет тонкодисперсный материал желтовато кремового цвета с удельной поверхностью 7600-8200 см²/г и характеризующийся остатком на сите №008 не более 8%. Его насыпная плотность составляет 760 кг/м³, истинная плотность 2.61 г/см³. Химический анализ шлама химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Химический анализ шлама химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону

ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ.	CaO	MgO	SO ₃ общ	TiO ₂	SrO	Na ₂ O + K ₂ O	H ₂ O гигроск.
40,18	1,77	0,31	5,20	78,1	12,89	0,72	0,05	0,29	0,12	2,55

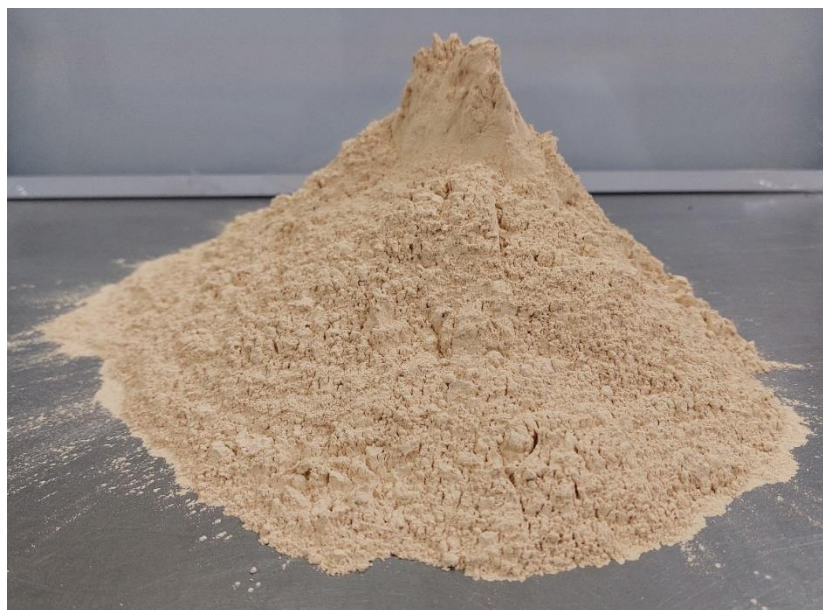


Рисунок 2.4 – Внешний вид шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону

При проведении дериватографического анализа шлама эндотермический эффект в интервале температур 40-150 °С указывает на остатки физически свободной воды в анализируемой пробе. Эндотермический эффект при температуре 410°С соответствует дегидратации присутствующего в шламе небольшого количества $Mg(OH)_2$. Сильный эндотермический эффект при температур 880 °С в сочетании с потерей 33,2% массы, согласно литературным данным, соответствует диссоциации $CaCO_3$ на CaO и CO_2 . Что в пересчете на $CaCO_3$ говорит о его содержании в шламе порядка 75%.

Проведенный рентгенофазовый анализ также подтверждает, что шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону, в основном, представлен карбонатом кальция. Об этом свидетельствуют наличие рефлексов с $d = 3,02; 2,49; 2,28; 1,90; 1,87 \text{ \AA}$ (рисунок 2.5). Физико-механические свойства шлама химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону представлены в таблице 2.5.

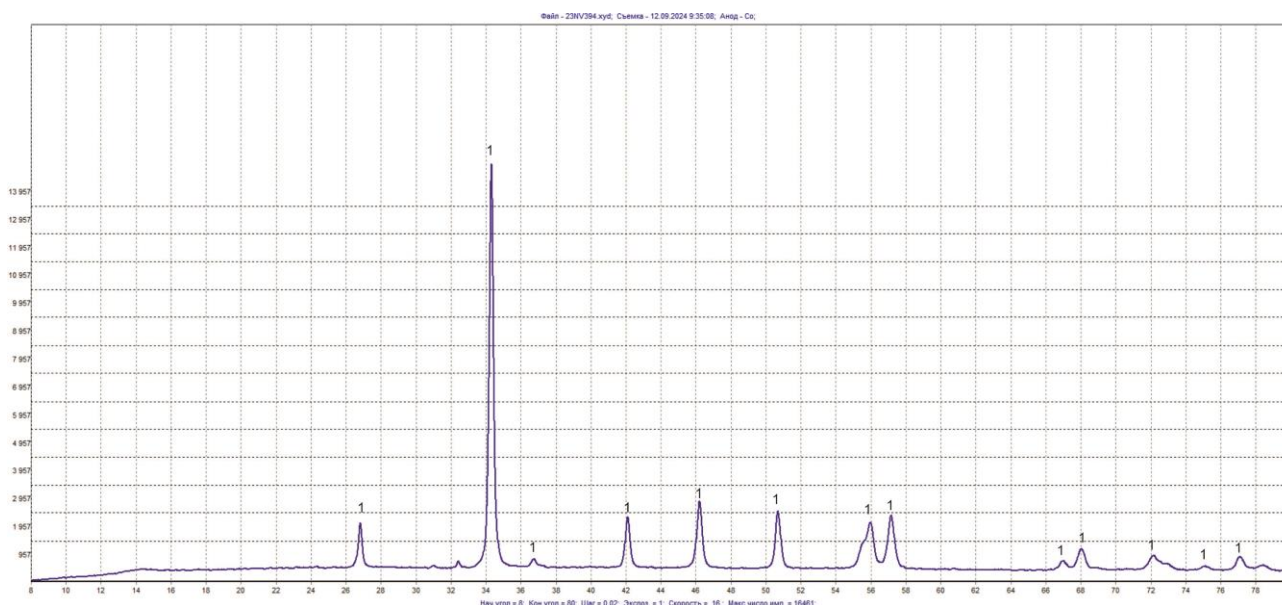


Рисунок 2.5 – рентгенограмма шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону

Таблица 2.5 – Физико-механические свойства шлама химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростов-на-Дону

Показатели	Величина
Истинная плотность г/см ³	2,59
Насыпная плотность, кг/м ³	780
Влажность, %	25-35
Удельная поверхность, см ² /г	7800-8500
Остаток на сите 008, %	8,4
Внешний вид, цвет	Материал желтого цвета

2.1.3 Опоки Нагольновского месторождения

Опоки – прочная пористая кремнистая осадочная горная порода. О. состоит в основном из микрозернистого водного аморфного кремнезёма (до 97%) обычно с примесью глины, песка, глауконита и др.

Нагольновская опока (рисунок 2.6), относится к группе карбонатно-глинистых пород, имеет равномерный светло-желтый цвет, который при увлажнении становится темно-желтым. Порода имеет плотную и массивную

структуру, ее средняя плотность составляет $1,40 - 1,55 \text{ г/см}^3$, истинная – около $2,35 - 2,45 \text{ г/см}^3$. Предел прочности при сжатии варьируется от 6 до 20 МПа, при увлажнении не размокает.

Месторождение Нагольновской опоки расположено в Константиновском районе Ростовской области в 5,5 км к северу от х. Нижнее – Журавского и в 21 км к северу от г. Константиновска. Длина участка вдоль склона составляет 250 – 390 м, ширина ограничена границами горного отвода – 127 – 325 м. Химический состав карбонатной опоки указан в таблице 2.6, а ее гранулометрический состав представлен в таблице 2.7.

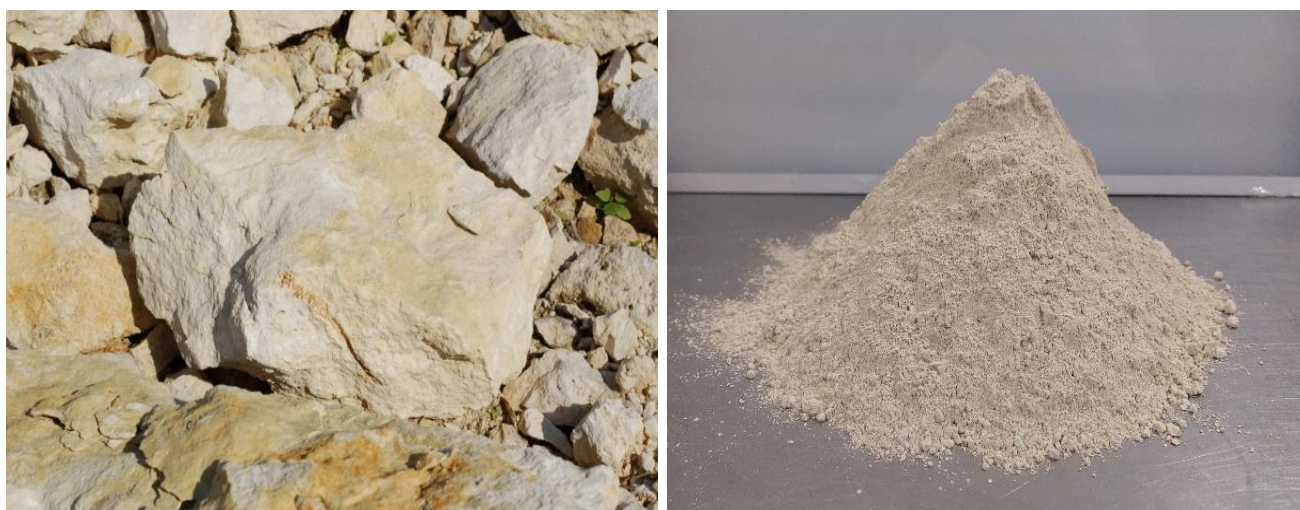


Рисунок 2.6 – Внешний вид опок Нагольновского месторождения

Таблица 2.6 – Химический состав карбонатной опоки Нагольновского месторождения (% по массе)

П.п.п	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
7,84	67,03	9,81	3,15	9,1	0,83	0,28	1,37	0,59

По содержанию Al₂O₃ в прокаленном состоянии опоки Нагольновского месторождения классифицируются как кислые с средним содержанием красящих оксидов (Fe₂O₃ и TiO₂).

Таблица 2.7 – Гранулометрический состав опоки Нагольновского месторождения

Содержание частиц размером, мм, в %							
> 0,5	0,5 – 0,25	0,2 – 0,09	0,09 – 0,063	0,063 – 0,01	0,01 – 0,005	0,005 – 0,001	< 0,001
25,22	3,41	5,26	6,12	18,98	11,31	19,50	11,26

В соответствии с классификацией приведенной в ГОСТ 9169 – 75 опоки Нагольновского месторождения по содержанию тонкодисперсных фракций относятся к низкодисперсным карбонатным опокам

Результаты дифференциально-термического и дифференциально – термогравиметрического анализов карбонатной опоки Нагольновского месторождения представлены на рисунке 2.7.

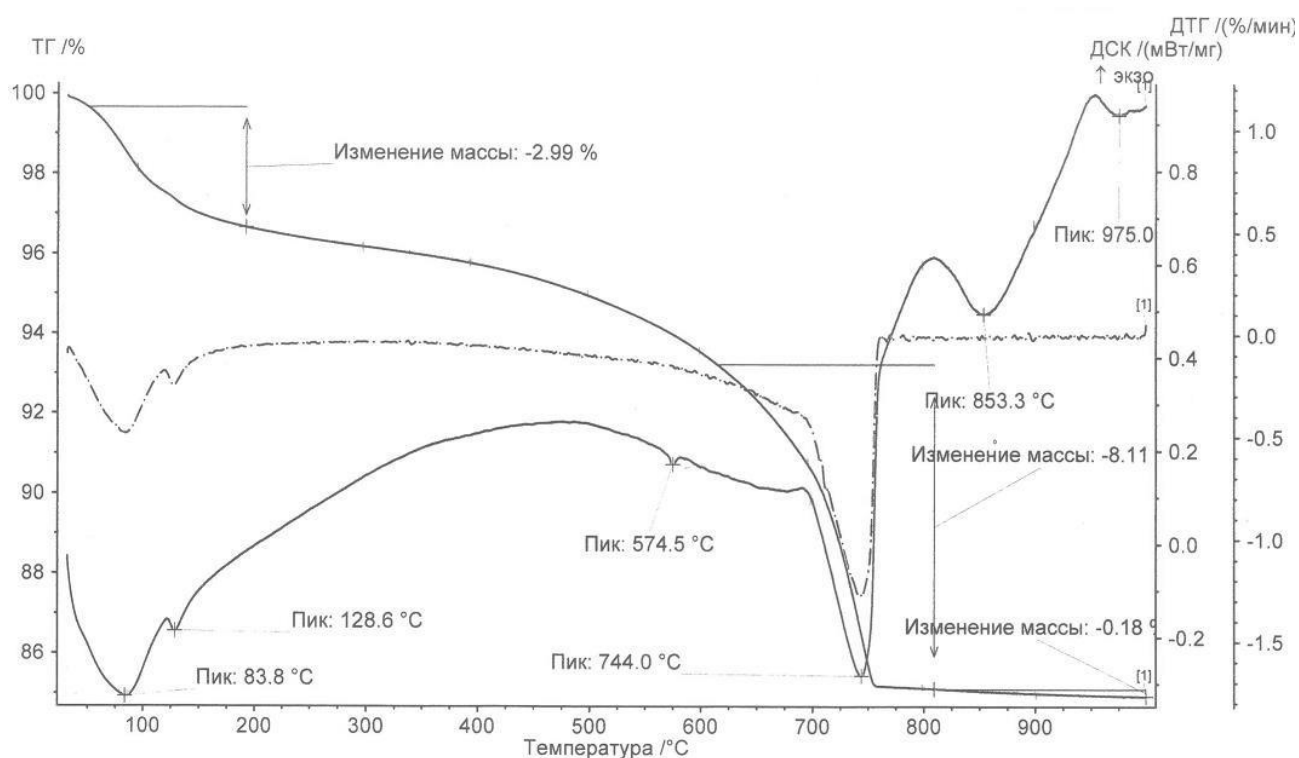


Рисунок 2.7 – Термограмма опоки Нагольновского месторождения

Кривая ДТА на дериватограмме в основном применяется для фазового анализа, а кривые ДТГ и ТГ позволяют подсчитать количество какого – либо соединения в сложном по составу веществе. Благодаря комплексному

исследованию кривых ДТА и ДТГ термические реакции, протекающие в материале, могут одновременно интерпретироваться по изменению теплового баланса и изменению массы.

На основании полученных результатов ДТА и ДТГ, можно судить о наличии эндоэффекта в интервале температур 80 – 100 °С, что характеризует процесс дегидратации свободных молекул воды, адсорбированной как опалом, так и глинистыми минералами. Количество удаленной воды при температуре 80 – 100 °С в сумме составляет до 0,15%.

С температуры 200 °С наблюдается постепенное увеличение скорости потери массы, при температуре 300 – 400 °С прослеживается экзотермический эффект, при котором происходит выгорание тонкорассеянных органических примесей. У карбонатных разностей часто этот экзотермический эффект осложнён в области более низких температур слабо выделяющимся небольшим плечом, обусловленным скорее всего присутствием цеолитов, кристаллическая решётка которых разрушается при этих температурах. На кривой ДТА прослеживается пик температуры 574 °С, при котором происходят полиморфные превращения кварца [160].

При температуре 750 °С резкая потеря массы связана с термической диссоциацией кальцита. В температурном интервале 800 – 950 °С на кривой ДТА фиксируется плавный экзотермический эффект, обусловленный началом образования минерала воластонита, анортита и моноалюмината кальция.

Данные выводы согласуются с результатами других исследований [157].

Проведенный рентгенофазовый анализ состав опоки Нагольновского месторождения свидетельствует о том, что минералогический состав преимущественно представлен кальцитом CaCO_3 с пиками разной интенсивности [d , Å, 3,04; 2,49; 2,28; 2,09; 1,91; 1,90] и диоксид кремния SiO_2 с пиками [d , Å, 3,35; 4,26; 1,82]. Кроме этого в их составе присутствуют алюмосиликат кальция $\text{Ca}_3\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{16}$ [d , Å, 8,68; 5,00; 2,98; 2,88], иллит $\text{K}(\text{Al},\text{Fe},\text{Mg})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ [d , Å, 10,00; 4,48; 3,33; 2,61; 1,53] и гидроксид гидра карбоната магния и алюминия $(\text{Mg}_{0.83}\text{Al}_{0.16})(\text{OH})_2(\text{CO})_{0.08}(\text{H}_2\text{O})_{0.75}$ [d , Å, 7,93; 3,96; 2,6; 2,32; 1,98].

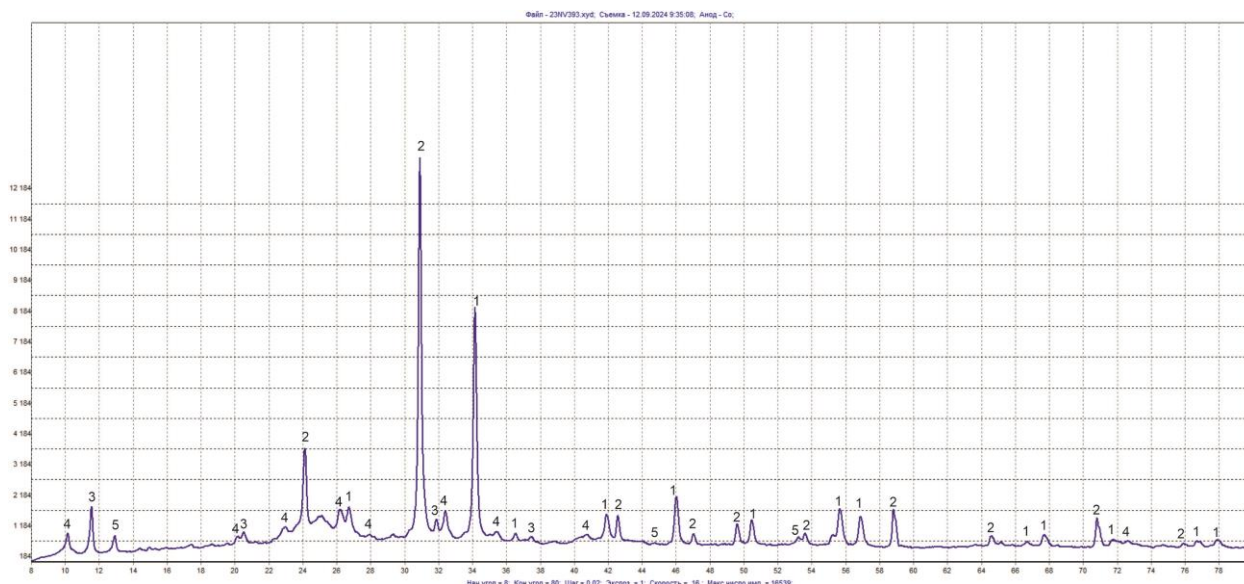


Рисунок 2.8 – Рентгенограмма опоки Нагольновского месторождения, где 1 - Кальцит; 2 - Диоксид кремния; 3 -алюмосиликат кальция; 4 - Иллит; 5 - Магний алюминий гидроксид карбонат гидрат.

2.1.4 Горелая порода Шахтинско-Несветаевского района Ростовской области

В качестве минерального компонента в работе были использованы горелые шахтные породы Шахтинско-Несветаевского геолого-промышленного района Ростовской области (рисунок 2.9)

Среднее значение содержания основных породообразующих оксидов в используемой перегорелой шахтной породе составляет от 43,3 до 62,1 в среднем 53,74 % для SiO_2 и от 15,74 до 27,11 в среднем 23,43 % для Al_2O_3 (таблица 2.8)

Таблица 2.8 – Химический состав горелой породы Шахтинско-Несветаевского района Ростовской области (% по массе)

ППП	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 общ.	CaO	MgO	SO_3 общ.	TiO_2	P_2O_5	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	MnO
8,34	53,74	23,43	7,61	3,49	2,58	2,77	0,81	0,24	4,81	0,19

Силикатный модуль ($\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$) горелой шахтной породы составляет от 1,5 до 2,6, в среднем 2,0, глиноземистый модуль ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$) колеблется от 2,0 до 7,5 в среднем 3,5.



Рисунок 2.9 – Внешний вид горелой шахтной породы Шахтинско-Несветаевского геолого-промышленного района Ростовской области

Минералогический состав опоки Шахтинско -Несветаевского геолого-промышленного района Ростовской области согласно проведенному рентгенофазовому анализу (рисунок 2.10) представлен диоксид кремния SiO_2 с пиками [d, Å, 3,35; 4,26; 1,82], гематитом с пиками Fe_2O_3 [d, Å, 3,68; 2,70; 2,51; 1,84; 1,69], оксидом железа $\text{Fe}_{0,96}$ с пиками [d, Å, 2,47; 2,14], сульфатом калия K_2SO_4 [d, Å, 4,32; 4,04; 3,17; 2,94; 2,16; 1,66; 1,47], микроклин KAlSi_3O_8 [d, Å, 4,22; 3,49; 3,37; 3,29; 3,26; 3,25; 2,15] и форстеритом Mg_2SiO_4 [d, Å, 3,82; 2,71; 2,44; 2,24].

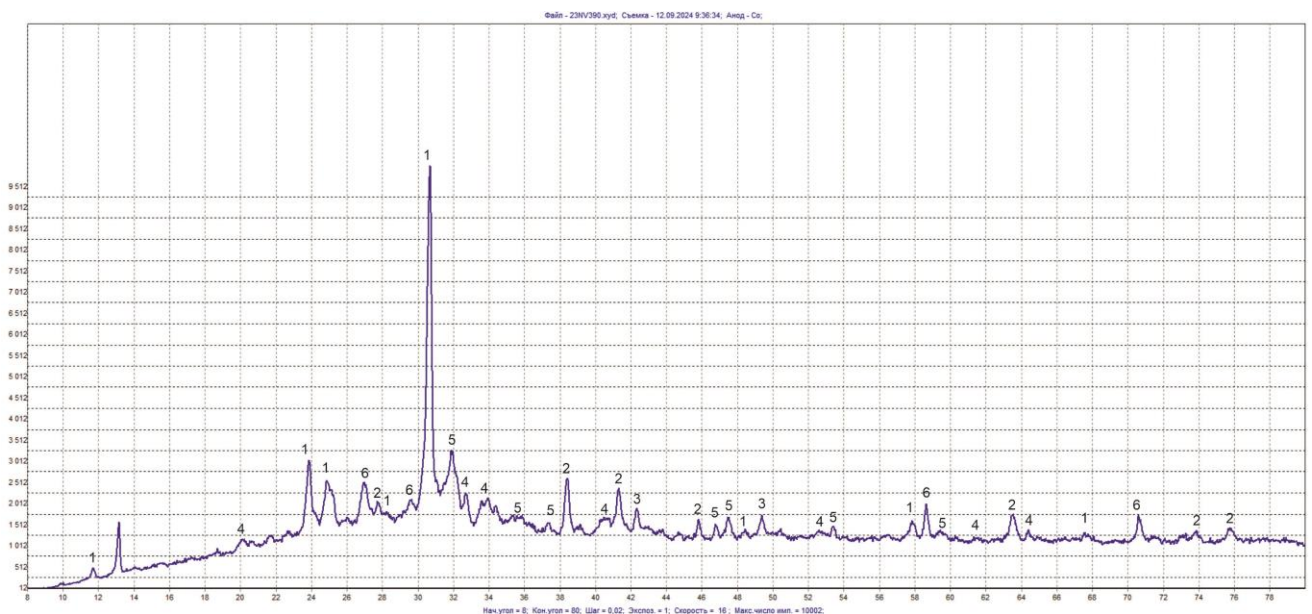


Рисунок 2.10 – Рентгенограмма горелой породы Шахтинско -Несветаевского геолого-промышленного района Ростовской области, где 1 - Диоксид кремния, 2 - Гематит, 3 – Оксид железа, 4 - Калия сульфат, 5 – Микроклин, 6 – Форстерит .

2.1.5 Песок Астаховского месторождения

При выполнении экспериментальной части работы был использован природный кварцевый песок, добываемый ООО «КВАРЦ» на Астаховском месторождении песков, свойства которого представлены в таблице 2.9 и 2.10.

Таблица 2.9 – Гранулометрический состав песка Астаховского месторождения

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах							Примечания
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Частный остаток, %	0	0	3,04	6,37	32,21	44,66	10,16	Группа – средний, II класса, $M_k = 2,37$
Полный остаток, %	-	-	3,04	9,41	41,62	86,28	96,44	

Таблица 2.10 – Физико-механические свойства песка Астаховского месторождения

Наименование показателей	Требования ГОСТ 8736- 2014	Фактические показатели
Модуль крупности	Св. 2,0 до 2,5	2,37
Группа песка	-	Средний
Класс песка	-	II
Полный остаток на сите 0,63, % по массе	Св 30 до 45	41,62
Содержание зёрен крупностью менее 0,16 мм, % по массе	Не более 15	3,56
Содержание зёрен крупностью свыше 5 мм, % по массе	Не более 15	0
Содержание зёрен крупностью свыше 10 мм, % по массе	Не более 5	0
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	Не более 3	2,5
Содержание глины в комках, % по массе	Не более 0,5	0,6
Насыпная плотность, кг/м ³	-	1442
Истинная плотность, г/см ³	От 2 до 2,8	2,64
Пустотность, %	-	45,4

2.1.6 Портландцемент

Использован портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2016 производства ОАО «Новоросцемент», завод «Первомайский»; активностью 51,9 МПа, НС/КС 150/220 мин, НГ 27,75% (далее Ц).

По результатам проведенного рентгенофазового анализа минералогический состав портландцемента (рисунок 2.11) представлен трехкальциевым силикатом C_3S [d, Å, 3,03; 2,97; 2,78; 2,75; 2,59; 2,18; 1,76], двухкальциевым силикатом C_2S [d, Å, 2,87; 2,78; 2,73; 2,61; 2,44; 2,40; 2,28; 2,19], трехкальциевым алюминатом C_3A [d, Å, 2,70], четырехкальциевым алюмоферитом C_4AF [d, Å, 7,24; 2,63], двуводным $C\bar{S} 2H_2O$ [d, Å, 7,61; 4,28; 3,07; 2,87; 2,68] и полуводным $C\bar{S} 0,5H_2O$ [d, Å, 6,01; 3,46; 3,00; 2,80] сульфатом кальция.

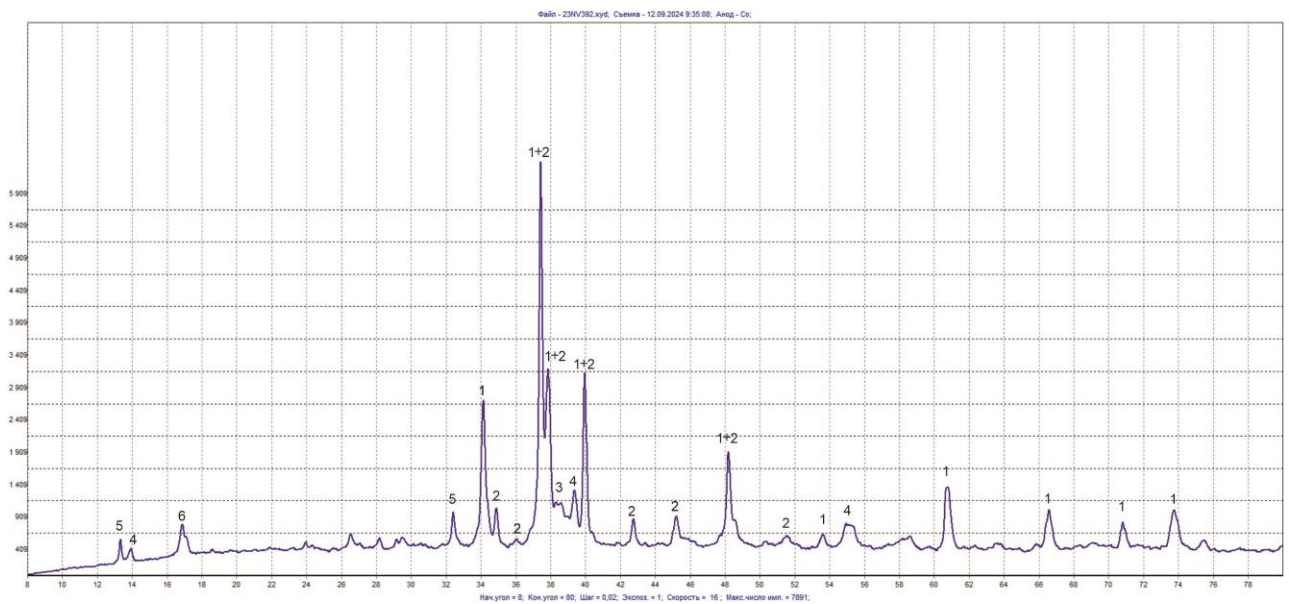


Рисунок 2.11 – Рентгенограмма портландцемента

2.1.7 Химические добавки

В качестве РПП использован Vinavil E06PA при дозировке 0 – 3 % от массы минеральной части ССС.

В качестве водоудерживающей добавки использована «Mecellose 23701» при дозировке 0,3% от минеральной части ССС во всех составах.

2.2 Методы исследования

2.2.1 Химико-минералогический состав

Определение фазового состава выполнено с использованием рентгенометрической картотеки PDF-2 и программы ProfileShow. Подготовка образцов к исследованию заключалась в их измельчении в агатовой ступке и переносе в кювету прибора, выполненную из алюминия. Качественный фазовый анализ полученных дифрактограмм проводили с помощью программного обеспечения ProfileShow, содержащего базу данных ICDD Powder diffraction file (PDF-2). Фазовый состав исследуемых образцов определяли путем сопоставления экспериментальных дифрактограмм и данных из указанной базы.

Термические анализы проводились на приборе Derivatograf системы Паулик – Паулик и NETZCH STA 449 C. Навески нагревались до температуры 1000-1100 0С. Анализ полученных результатов выполнялся с использованием соответствующих методик и ранее опубликованных данных.

Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 2642.0 – 2014; ГОСТ 2642.8 – 97; ГОСТ 21216 – 2014

2.2.2 Измерение усадочных деформаций

Выполнялось на образцах 40x40x160 мм по методике ГОСТ Р 56378-2015, ГОСТ 24544-2020 в течение 120 сут (рисунок 2.12).

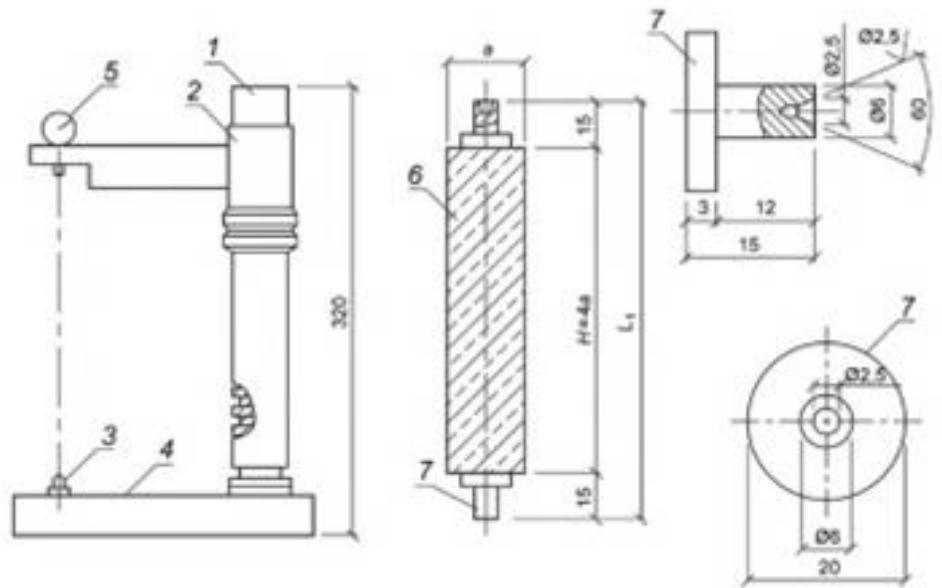


Рисунок 2.12 – Измерение усадочных деформаций, где 1 – стойка; 2 – кронштейн; 3 – конусообразный выступ; 4 – нижняя опора; 5 – индикатор; 6 – образец; 7 – репер; а – размер стороны поперечного сечения образца; Н – высота образца; L_1 – база измерений

2.2.3 Показатели затвердевших строительных растворов

- предел прочности при сжатии и растяжении при изгибе по ГОСТ Р 58277-2018 в возрасте 2, 28 и 120 сут (образцы 40x40x160 мм, рисунок 2.13);

- начальный модуль упругости E по формуле 2.1 через динамический модуль упругости E_d , рисунок 2.14, [161]:

$$E = kE_d = kk_1\rho V^2 \quad (2.1)$$

где, ρ – средняя плотность раствора (мелкозернистого бетона);

V – скорость ультразвука;

$kk_1 = 0,62$;

k – коэффициент

- морозостойкость – по ГОСТ ГОСТ Р 58277-2018.

В качестве критериев морозостойкости после 100 циклов замораживания и оттаивания (F) рассматривались показатели:

- изменение динамического модуля упругости E (ГОСТ 10060-2012):

$$k_E = \frac{E_F}{E_0}; \quad (2.2)$$

где E_F – модули упругости образцов, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

E_0 – модули упругости контрольных образцов.

- изменение скорости ультразвука V (ГОСТ 10060-2012):

$$k_V = \frac{V_F}{V_0}; \quad (2.3)$$

где v_F – среднее значение скоростей ультразвука в образцах, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

v_0 – средние значения скоростей ультразвука в контрольных образцах;

- изменение предела прочности при сжатии R :

$$k_R = \frac{R_F}{R_0}; \quad (2.4)$$

где R_F – предел прочности при сжатии образцов, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

R_0 – предел прочности при сжатии контрольных образцов;

- изменение предела прочности при сжатии с учетом внутрисерийного коэффициента вариации $R(v)$ (ГОСТ 10060-2012):

$$k_{R(v)} = \frac{R(v)_F}{R(v)_0}; \quad (2.5)$$

где $R(v)_F$ – предел прочности при сжатии образцов, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

$R(v)_0$ – предел прочности при сжатии контрольных образцов;

- изменение предела прочности при изгибе R_f :

$$k_{R_f} = \frac{R_{fF}}{R_{f0}}; \quad (2.6)$$

где R_{fF} - предел прочности при изгибе образцов, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

R_{f0} - предел прочности при изгибе контрольных образцов;

- изменение прочности сцепления с бетонным основанием A (морозостойкость контактной зоны, рисунок 2.15):

$$k_A = \frac{A_F}{A_0}; \quad (2.7)$$

где A_f – прочности сцепления с бетонным основанием после циклов попеременного замораживания и оттаивания

A_0 - прочности сцепления с бетонным основанием до попеременного замораживания и оттаивания



Рисунок 2.13 – Определение предела прочности при изгибе и сжатии



Рисунок 2.14 – Определение скорости ультразвука

- прочность сцепления со стандартным бетонным основанием по ГОСТ 31356-2007 в возрасте 28 и 120 сут.

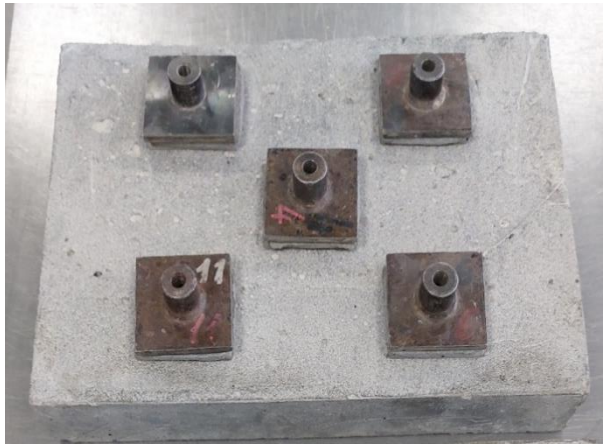


Рисунок 2.15 – Определение прочности сцепления со стандартным бетонным основанием

2.2.4 Образцы

Использованы образцы призмы 40х40х160 мм.

Выдерживание образцов после формования осуществлялось первые сутки в форме под пленкой, далее до 7 сут в нормальных условиях (НУ), далее в соответствии с планом эксперимента.

При реализации экспериментальных исследований применялись методы математического планирования эксперимента, а также технологическое планирование.

Минеральная часть ССС в настоящем исследовании представлена соотношением ПЦ:П:МД = 1:(1,5-X):X, либо (ПЦ+МД):П = 1:1,5, где X принималось в соответствии с планом эксперимента. Величина водо/вяжущего отношения принята постоянной и равной 0,4.

В качестве критериев морозостойкости рассматривались:

- изменение предела прочности при сжатии (ГОСТ 10060-2012);
- изменение динамического модуля упругости (ГОСТ 10060-2012, Приложение А);
- изменение деформаций остаточного расширения (ГОСТ 10060-2012, Приложение А);

– изменение предела прочности при изгибе, это критерий стандартом не предусмотрен.

Определение динамического модуля упругости произведено по данным о скорости ультразвука и средней плотности исследованных строительных растворов по методике [162].

Выводы по главе 2

1. При реализации экспериментальных исследований использован портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2016 производства ОАО «Новоросцемент», завод «Первомайский»; активностью 51,9 МПа, НС/КС 150/220 мин, НГ 27,75%.

2. При реализации экспериментальных исследований использован РПП зарубежного производства Vinavil E06PA при дозировке 0 – 3 % от массы минеральной части ССС (сополимеры этилена-винилацетата). В качестве водоудерживающей добавки использована «Mecellose 23701» при дозировке 0,3% от минеральной части РПП во всех составах.

3. При реализации экспериментальных исследований использованы регламентируемые действующими государственными стандартами на испытания различных материалов из ССС методики.

4. При обработке результатов экспериментальных исследований использовались методы математической статистики и ПО MS Office Excel.

Глава 3 Влияние комплексной минеральной добавки на свойства мелкозернистых бетонов и строительных растворов

При исследовании влияния комплексной минеральной добавки (КМД), содержащей шлам (Ш) химводоочистки + МД (зола-уноса (З), либо опока (О), либо горелая порода (ГП) на свойства мелкозернистых бетонов (МЗБ) либо строительных растворов (СР) принято:

- исследования реализованы в два этапа: первый этап – постоянный расход вяжущего (ПЦ + КМД), второй этап – постоянный расход ПЦ;

- общая доза КМД изменялась в соответствии с планом эксперимента от 10 до 30% от массы вяжущего (ПЦ + КМД) на первом этапе исследований и от массы ПЦ на втором этапе исследований;

- соотношение Ш/МД изменялось от 20% / 80% до 80% / 20% (МД либо З, либо О, либо ГП в соответствии с планом эксперимента);

- в первом блоке исследований состав МЗБ по массе принят: Вяж:П = 1:1,5, т.е. 40% ПЦ+МД и 60% П при В/Вяж = 0,4, т.е. на первом этапе величина В/Ц не являлась постоянной;

- во втором блоке исследований состав МЗБ по массе принят: ПЦ:(П+МД) = 1:1,5, т.е. 40% ПЦ и 60% П+МД при В/Ц = 0,4, т.е. на втором этапе величина В/Ц являлась постоянной;

Средняя плотность МЗБ при реализации первого этапа в проектном возрасте составила от 2128 до 2231 кг/м³, а второго этапа от 2178 до 2280 кг/м³ при средней плотности бездобавочного эталона 2271 кг/м³ [69].

В таблицах 3.1, 3.2 представлены значения пределов прочности при сжатии и изгибе в возрасте 2, 28 и 120 сут и значения деформаций усадки после 120 сут измерений в зависимости от дозировки КМД от 10 до 30% и соотношения Ш/МД в составе КМД от 20/80 до 80/20% соответственно для первого и второго блока исследований.

Таблица 3.1 – Результаты первого блока исследований

Состав			Предел прочности, МПа						Усадка, ϵ_{120} , мм/м
КМД, %	Ш/МД %	Вид МД	R ₂	R ₂₈	R ₁₂₀	R _{f2}	R _{f28}	R _{f120}	
10	20/80	З	17,7	33,2	30,5	3,64	3,77	4,58	0,649
	50/50		21,3	41,6	37,8	4,66	5,48	5,91	0,867
	80/20		16,1	31,1	28,8	3,51	4,19	4,51	0,563
	20/80	О	21,8	43,6	39,5	4,71	5,29	6,49	0,837
	50/50		25,7	51,8	46,8	5,67	6,96	7,62	1,071
	80/20		20,7	41,2	37,9	4,45	5,62	6,01	0,783
	20/80	ГП	18,2	35,6	31,4	3,82	4,08	5,39	0,634
	50/50		21,6	43,7	38,8	4,72	5,7	6,31	0,884
	80/20		16,9	33,1	29,7	3,43	4,31	4,49	0,612
20	20/80	З	18,7	40,1	35,3	4,38	5,35	5,91	0,917
	50/50		23,4	48,9	42,9	5,46	6,86	7,2	1,15
	80/20		18,6	38,9	33,9	4,36	5,38	5,75	0,862
	20/80	О	23,7	50,2	44,5	5,46	6,83	7,73	1,07
	50/50		27,9	58,8	52,1	6,48	8,3	8,81	0,832
	80/20		23,4	48,7	43,3	5,31	6,76	7,15	1,098
	20/80	ГП	20,2	41,9	35,8	4,57	5,57	6,54	0,843
	50/50		24,2	50,4	43,7	5,53	6,99	7,41	0,76
	80/20		19,8	40,1	34,9	4,29	5,4	5,54	1,01
30	20/80	З	10,5	26,6	23,2	2,84	4,15	4,49	0,738
	50/50		15,4	35,8	31,8	3,98	5,47	5,73	0,879
	80/20		11,3	26,2	22,3	2,93	3,78	4,23	1,145
	20/80	О	15,5	36,3	32,5	3,92	5,58	6,22	0,889
	50/50		20,2	45,4	40,3	4,99	6,85	7,25	0,607
	80/20		16,1	35,7	31,9	3,88	5,12	5,54	0,889
	20/80	ГП	12,3	27,6	24	3,04	4,28	4,95	0,65
	50/50		16,5	36,6	32,1	4,04	5,5	5,76	0,649
	80/20		12,6	26,8	23,1	2,86	3,72	3,85	0,867
0	-	-	33,9	61,6	55,6	6,78	7,64	6,78	1,147

Таблица 3.2 – Результаты второго блока исследований

Состав			Предел прочности, МПа						Усадка, ε_{120} , мм/м
КМД, %	Ш/МД %	Вид МД	R ₂	R ₂₈	R ₁₂₀	R _{f2}	R _{f28}	R _{f120}	
10	20/80	З	28,5	37,1	31,2	4,61	4,78	4,67	0,69
	50/50		31,5	48,6	42,3	5,45	5,98	6,58	0,86
	80/20		19,8	36,1	32,1	3,65	4,55	5,21	0,45
	20/80	О	33,9	48,2	42,5	5,68	5,79	6,33	0,884
	50/50		37,1	59,3	52,9	6,54	7,43	8,12	1,087
	80/20		25,6	46,4	42,4	4,77	5,74	6,64	0,714
	20/80	ГП	27,1	35,9	33,2	4,54	4,47	4,74	0,679
	50/50		30,4	46,6	43,3	5,42	5,84	6,42	0,917
	80/20		19,1	33,3	32,5	3,66	3,89	4,82	0,578
20	20/80	З	29,9	50,2	43,9	5,28	5,69	6,22	0,906
	50/50		35,4	61,6	54,6	6,48	7,74	8,12	1,116
	80/20		26,4	49,1	44,5	5,04	6,46	6,73	0,749
	20/80	О	36,9	61,7	54,6	6,44	7,36	7,87	1,116
	50/50		42,7	72,7	64,7	7,66	9,15	9,65	0,928
	80/20		33,1	59,7	54,1	6,23	7,6	8,15	1,207
	20/80	ГП	31,7	49,8	44,5	5,38	6,01	6,27	0,908
	50/50		37,7	60,4	54,1	6,61	7,53	7,94	0,733
	80/20		29,1	47,1	43,3	5,21	5,72	6,32	0,983
30	20/80	З	19,6	38,6	35,1	3,49	4,18	4,72	0,657
	50/50		27,9	50,1	45,6	5,04	6,38	6,6	0,96
	80/20		21,5	37,4	35,3	3,95	5,24	5,2	1,244
	20/80	О	28,3	50,5	45,1	4,73	5,82	6,35	0,952
	50/50		36,7	61,5	55,2	6,3	7,75	8,11	0,789
	80/20		30,6	48,5	44,2	5,23	6,35	6,6	1,107
	20/80	ГП	24,8	39,2	34,3	3,75	4,43	4,73	0,849
	50/50		33,4	49,6	43,7	5,34	6,09	6,38	0,69
	80/20		27,4	36,1	32,4	4,29	4,43	4,75	0,86
0	-	-	34,0	64,1	54,8	6,91	7,32	8,68	1,03

По данным таблицы 3.1 и таблицы 3.2 получены уравнения регрессии вида R (R_f) = f (дозировка КМД от 10 до 30%; Ш/МД от 20/80 до 80/20%, вид МД- зола-уноса, опока, горелая порода). Полученные уравнения регрессии использованы для оценки степени влияния указанных факторов на основные свойства МЗБ с целью определения дозировки КМД, обеспечивающей лучшие показатели, которая обозначена как «рациональная».

На рисунке 3.1 представлены результаты оценки соотношения пределов прочностей при изгибе и сжатии МЗБ от дозы, состава комплексной добавки и вида МД при содержании ГП, О, З в составе КМД соответственно 80, 50 и 20% и содержании КМД 10, 20 и 30%.

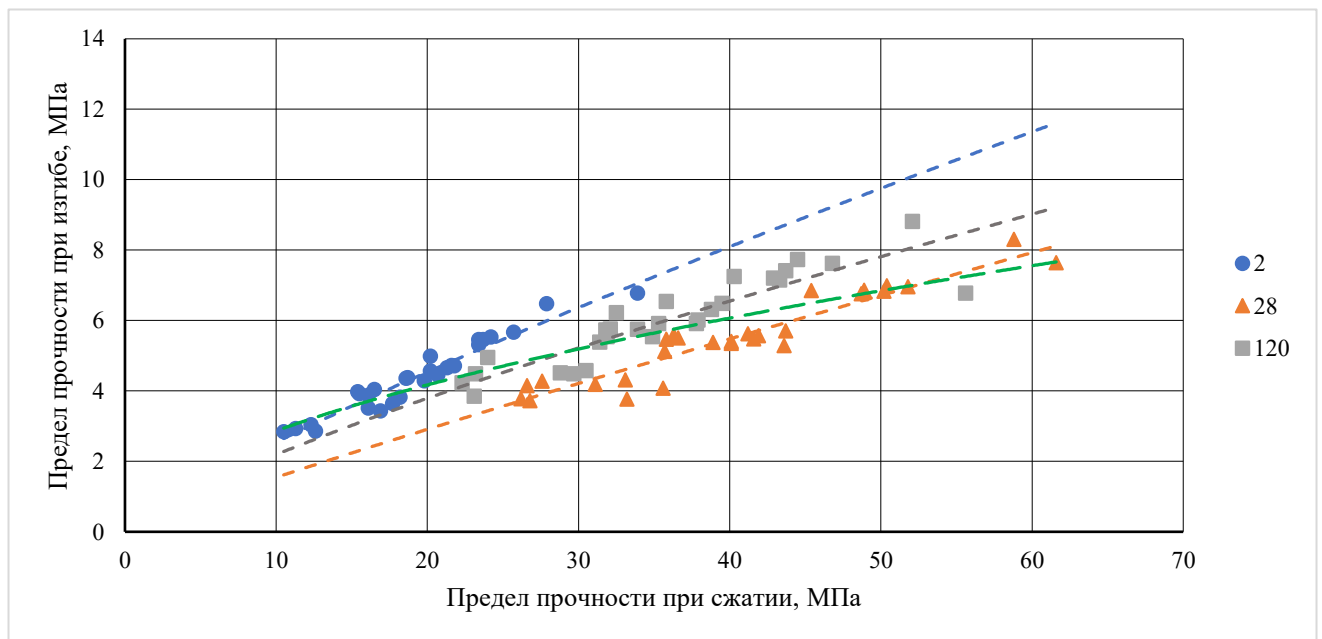


Рисунок 3.1 – Влияние рецептурных факторов и возраста СР на соотношение пределов прочностей при изгибе и сжатии, где 2,28,120 – возраст СР

Соотношение пределов прочностей при изгибе R_f и сжатии R описывается уравнениями вида:

$$R_f = aR^b, \quad (3.1)$$

где a , b – коэффициенты, представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры уравнения формулы (3.1)

Возраст СР, сут	Параметры уравнения формулы (3.1)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2
2	0,37	0,84	0,94
28	0,19	0,91	0,89
120	0,36	0,79	0,81
2 - 120	0,83	0,54	0,72

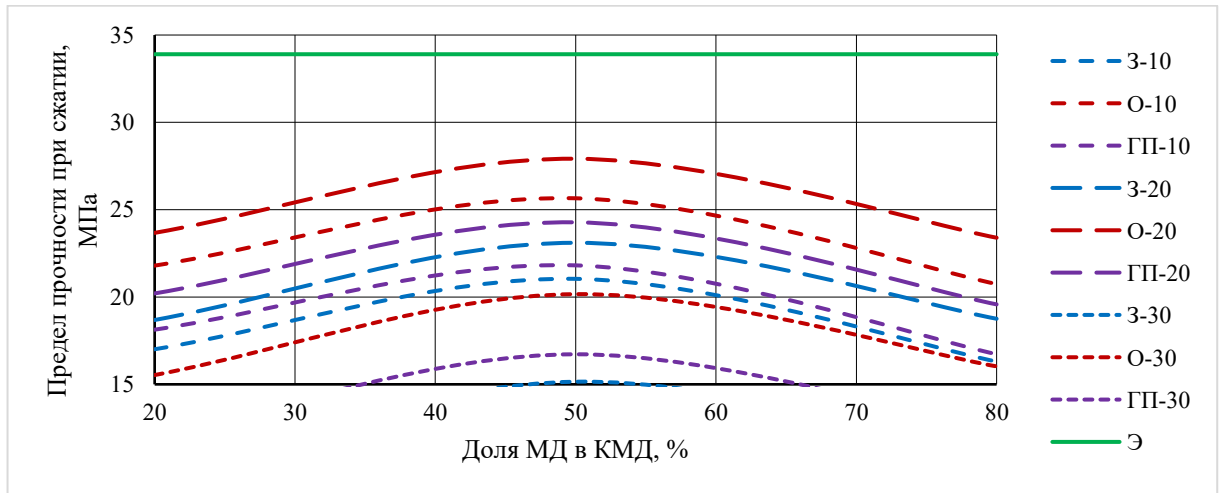
Представленные данные позволяют сделать следующие заключения:

- возраст СР оказывает значительное влияние на соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии, причем с увеличением возраста оказывают все большее влияние рецептурные факторы, поскольку снижается показатель R^2 ;
- снижение величины R_f/R с увеличением возраста до 28 сут является следствием влияния КМД на кинетику прочности при сжатии и изгибе, что проявляется в более быстром нарастании прочности при изгибе в раннем возрасте;
- повышение величины R_f/R с увеличением возраста от 28 до 120 сут является следствием влияния КМД на неоднозначное изменение прочностей при изгибе и сжатии при длительном выдерживании в воздушно-сухих условиях, связанное с влиянием рецептурных факторов, что подтверждается снижением величины R^2 .

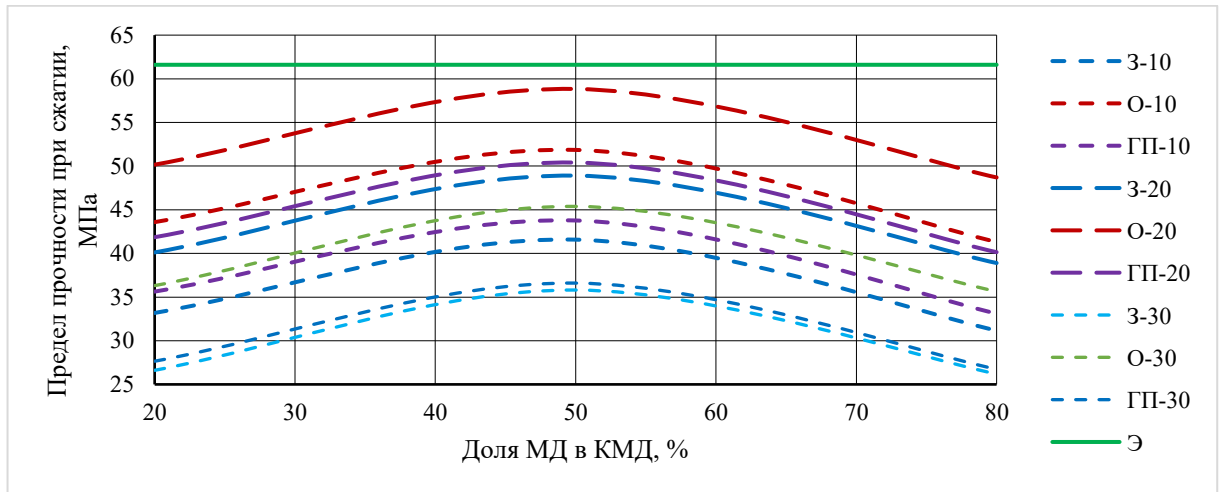
3.1 Определение рациональной дозировки комплексной минеральной добавки

На рисунке 3.2 представлены результаты оценки предела прочности при сжатии МЗБ от дозы, состава комплексной добавки и вида МД при содержании ГП, О, З в составе КМД соответственно 80, 50 и 20% и содержании КМД 10, 20 и 30% по результатам 1 блока исследований (таблица 3.1), а на Рисунке 3.3 – по результатам 2 блока исследований (таблица 3.2).

а)



б)



в)

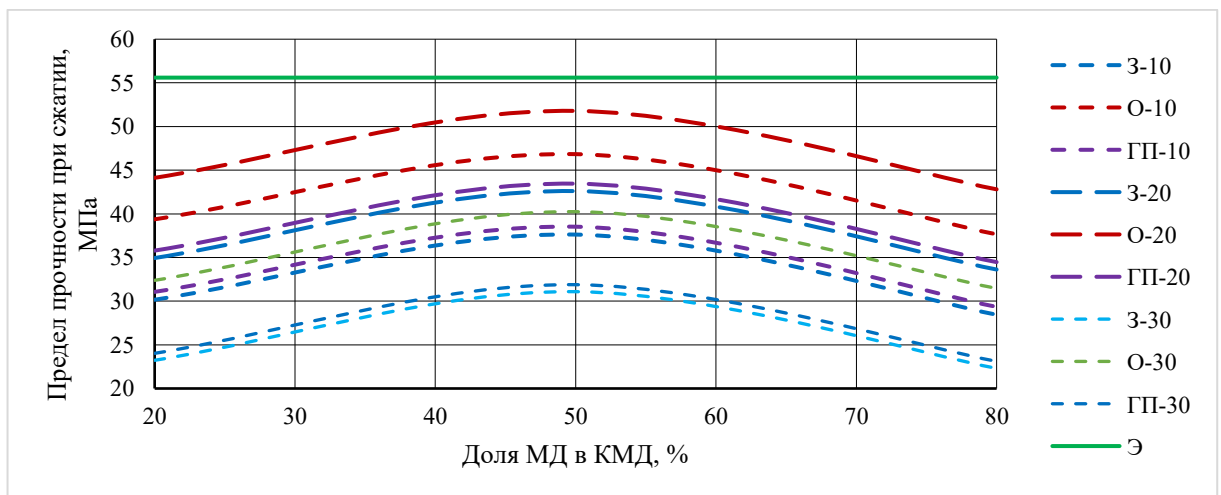
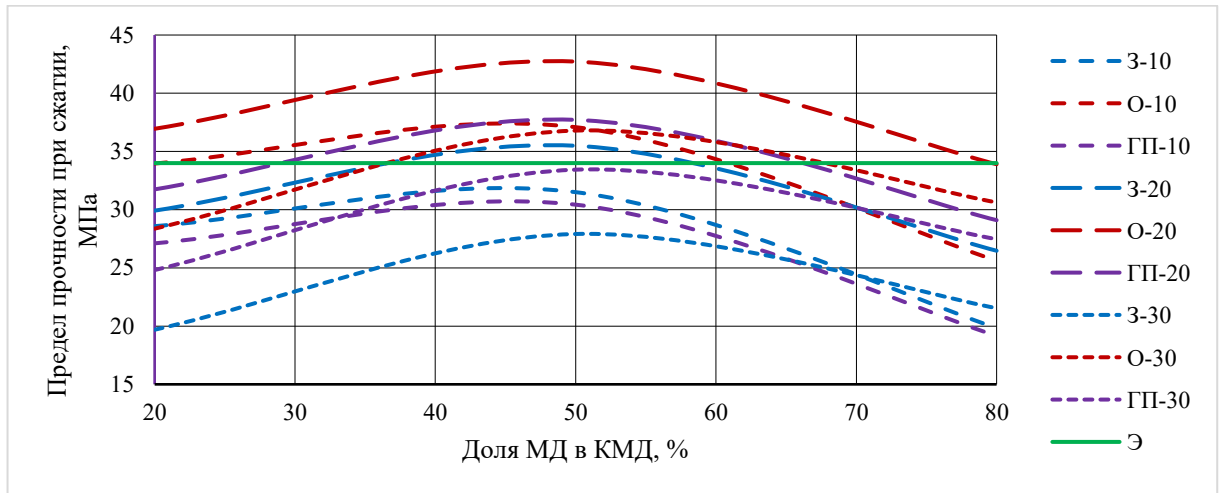
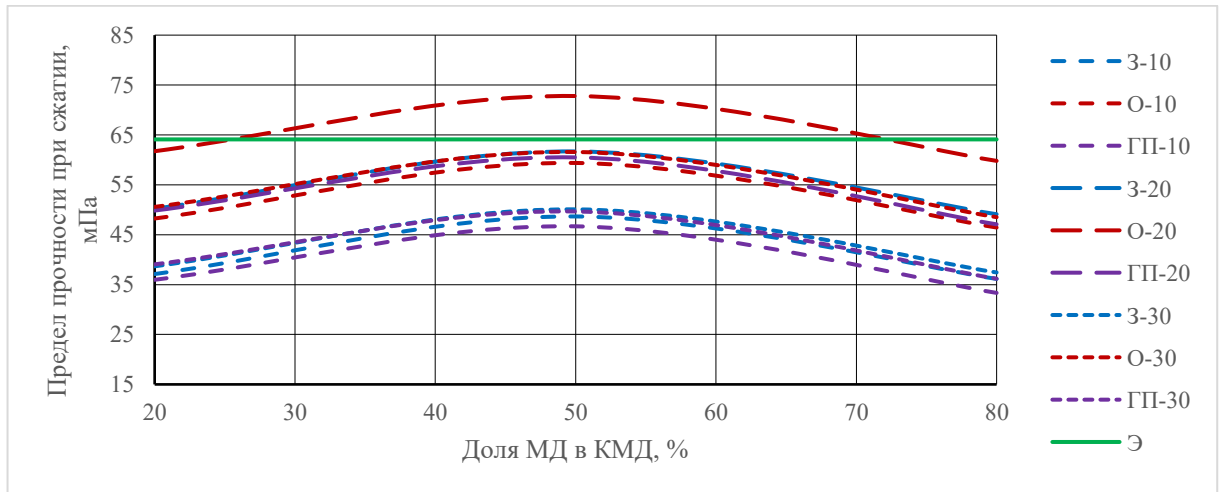


Рисунок 3.2 – Влияние дозировки, состава и вида КМД на зависимость предела прочности МЗБ при сжатии, где ГП, О, З – горелая порода, опока, зола; 10, 20, 30 – содержание КМД; Э – бездобавочный эталон
а) возраст 2 сут; б) возраст 28 сут; в) возраст 120 сут

а)



б)



в)

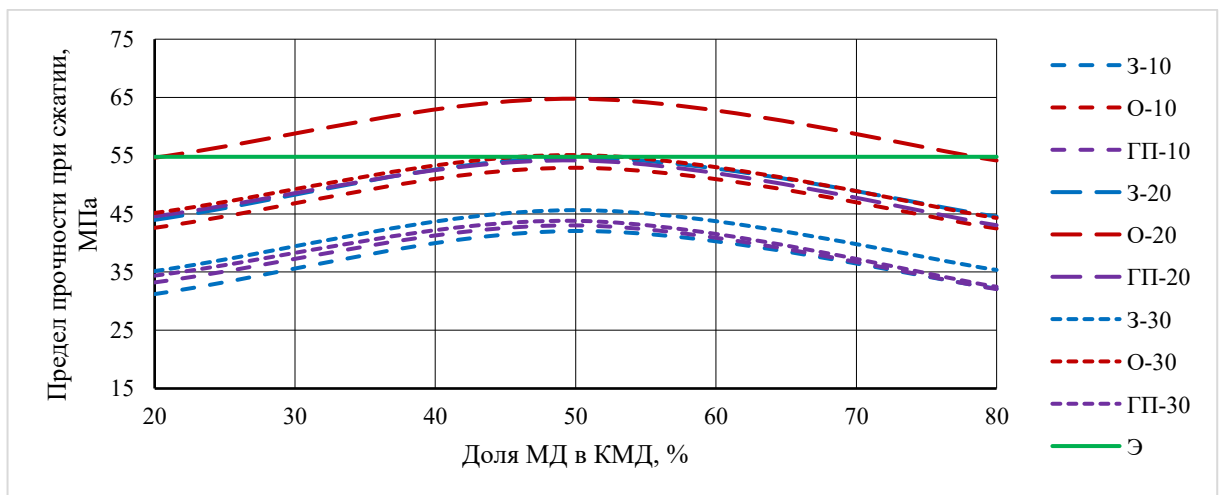


Рисунок 3.3 – Влияние дозировки, состава и вида КМД на зависимость предела прочности МЗБ при сжатии, где ГП, О, З – горелая порода, опока, зола; 10, 20, 30 – содержание КМД; Э – бездобавочный эталон
а) возраст 2 сут; б) возраст 28 сут; в) возраст 120 сут

Из представленных на рисунках 3.2 и 3.3 результатов следуют выводы [69]:

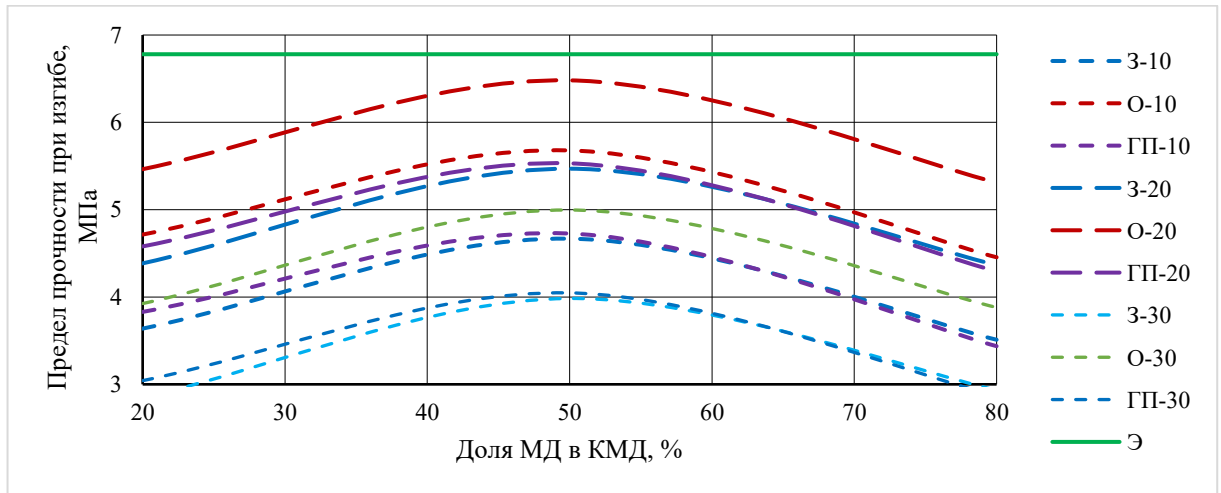
- экстремум зависимости предела прочности при сжатии от дозы КМД приходится примерно на 20% добавки от массы вяжущего;
- экстремум зависимости предела прочности при сжатии от соотношения Ш/МД приходится примерно на соотношение Ш/МД = 50%/50%;
- лучшие результаты обеспечиваются при использовании в составе КМД в качестве МД опоки, а при использовании З либо ГП обеспечиваются примерно равные показатели;
- КМД при введении взамен части ПЦ приводит к снижению предела прочности при сжатии вследствие повышения в этом случае величины В/Ц.

На рисунке 3.4 представлена зависимость предела прочности на растяжение при изгибе МЗБ от дозы, состава комплексной добавки и вида МД по таблице 3.1 при содержании ГП, О, З в МД 80, 50 и 20% соответственно по результатам 1 блока исследований, а на рисунке 3.5 – по результатам 2 блока исследований (таблица 3.2).

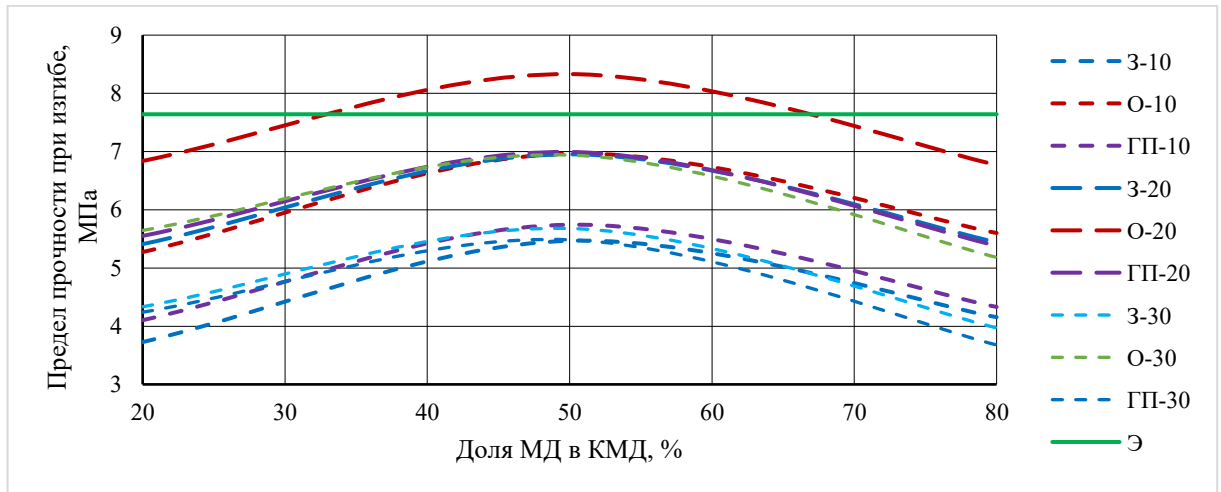
Из представленных на рисунках 3.4, 3.5 результатов следуют выводы [69]:

- экстремум зависимости предела прочности при изгибе от дозы КМД также как и при сжатии приходится примерно на 20% добавки от массы вяжущего;
- экстремум зависимости предела прочности при изгибе от соотношения Ш/МД у всех МД приходится примерно на соотношение Ш/МД = 50%/50%;
- при использовании в качестве МД опоки при любом соотношении Ш/МД в исследованном диапазоне обеспечиваются практически равные результаты с содержащими З либо ГП составами при рациональном соотношении Ш/МД = 50%/50%;
- КМД при введении взамен части ПЦ приводит как правило к снижению предела прочности при изгибе за исключением составов, содержащих опоку при соотношении Ш/МД = 50%/50%.

а)



б)



в)

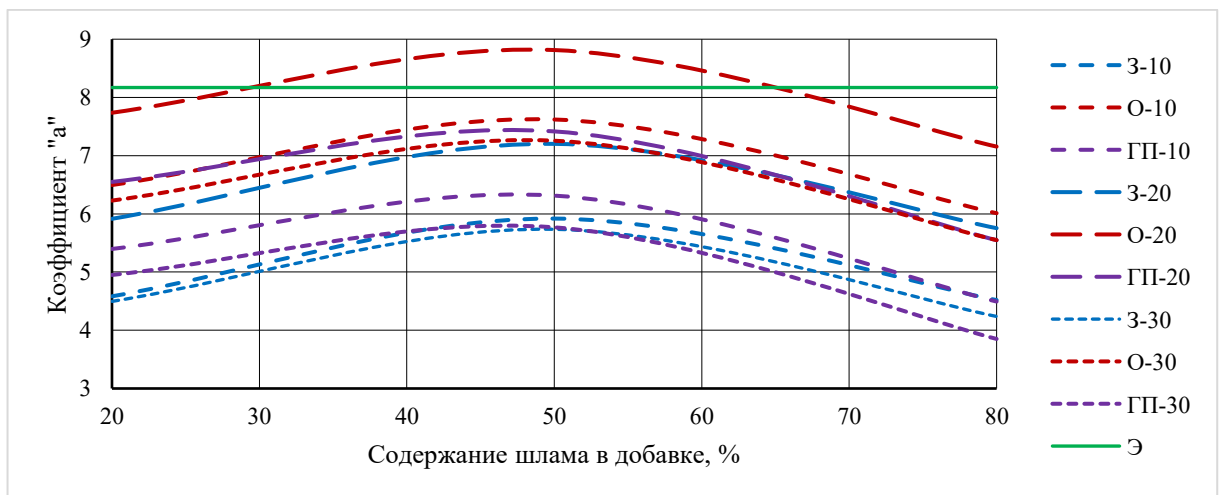
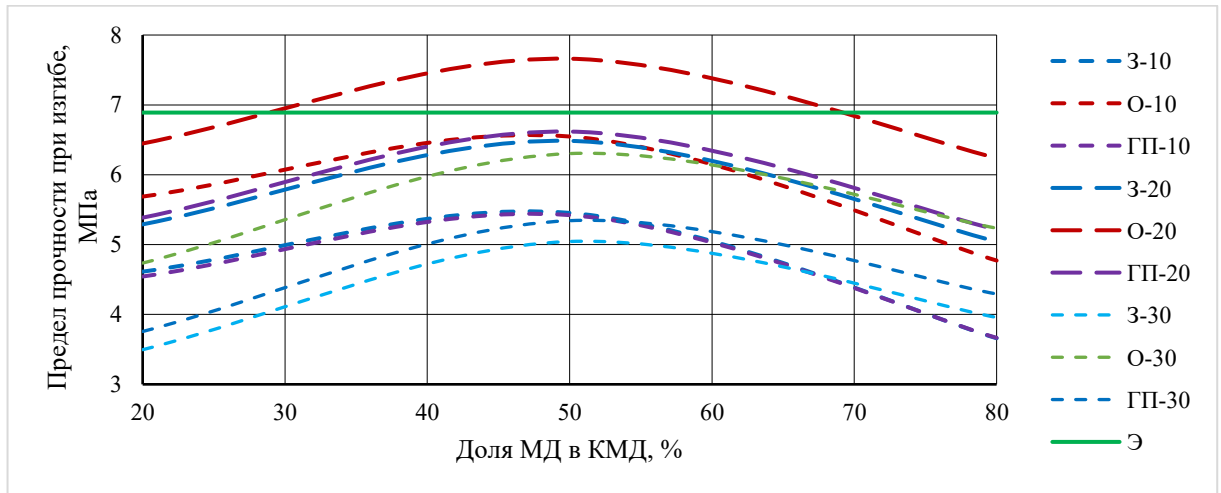
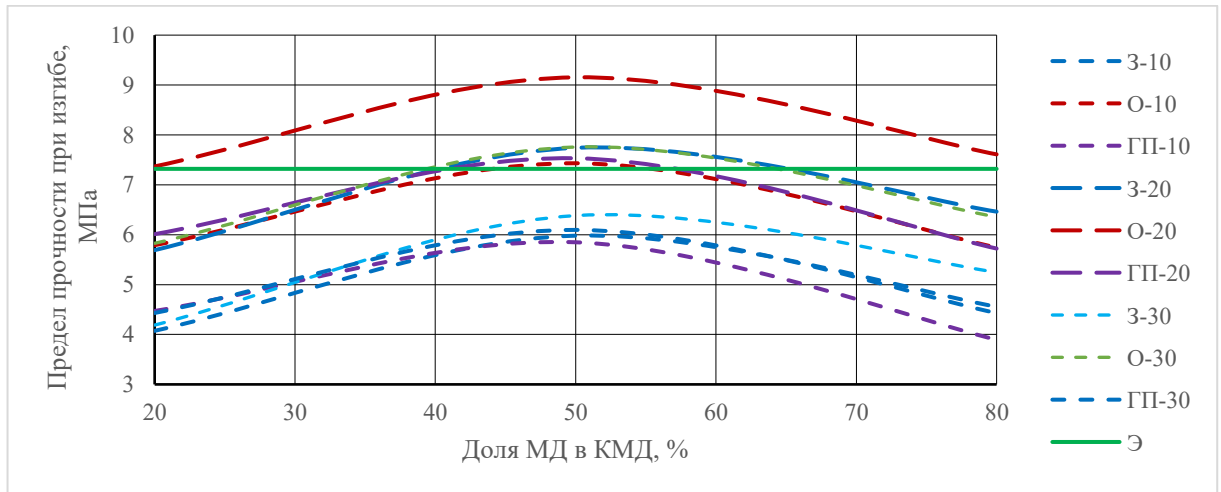


Рисунок 3.4 – Влияние дозировки, состава и вида КМД на зависимость предела прочности МЗБ при изгибе, где ГП, О, З – горелая порода, опока, зола; 10, 20, 30 – содержание КМД; Э – бездобавочный эталон
а) возраст 2 сут; б) возраст 28 сут; в) возраст 120 сут

а)



б)



в)

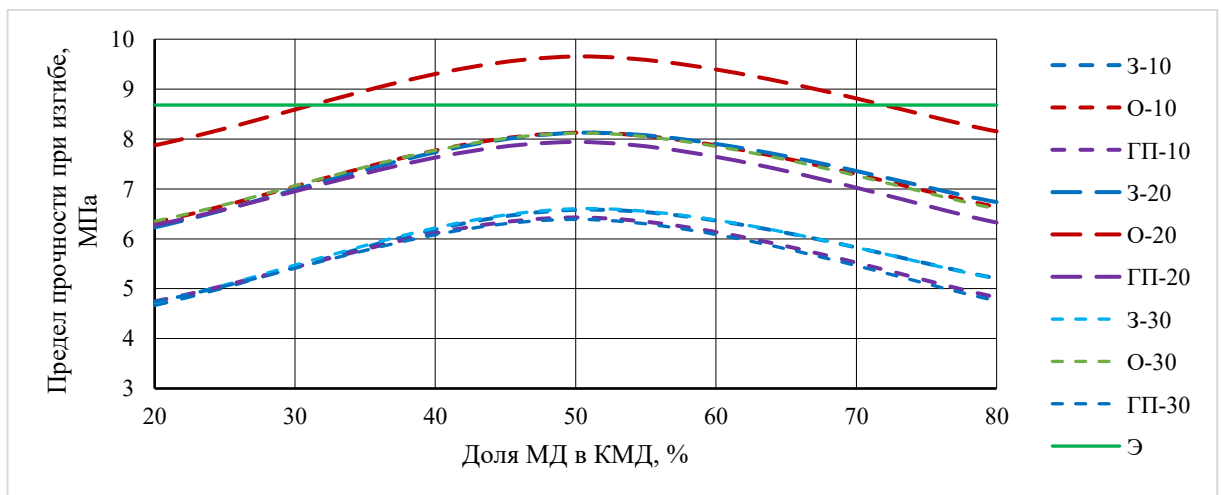


Рисунок 3.5 – Влияние дозировки, состава и вида КМД на зависимость предела прочности МЗБ при изгибе, где ГП, О, З – горелая порода, опока, зола; 10, 20, 30 – содержание КМД; Э – бездобавочный эталон
а) возраст 2 сут; б) возраст 28 сут; в) возраст 120 сут

На рисунке 3.6 представлена зависимость предела прочности при сжатии R от величины В/Ц и содержания комплексной добавки 10, 20 и 30% соответственно для первого и второго (-2) этапа исследований в сравнении с бездобавочным эталоном (э) и некоторыми известными зависимостями:

- Т на рисунке 3.6 – по формуле (3.2) [161] при $a = 0,332$: $R_{Ц} = 51,9$ МПа:

$$R = aR_{Ц} \left(\frac{B}{Ц}\right)^{-1,39}; \quad (3.2)$$

- T2 – по формуле (3.3) Баженова Ю.М. [161] при $b = 0,7$, $R_{Ц} = 51,9$ МПа:

$$R = bR_{Ц} \left(\frac{Ц}{B} - 0,8\right). \quad (3.3)$$

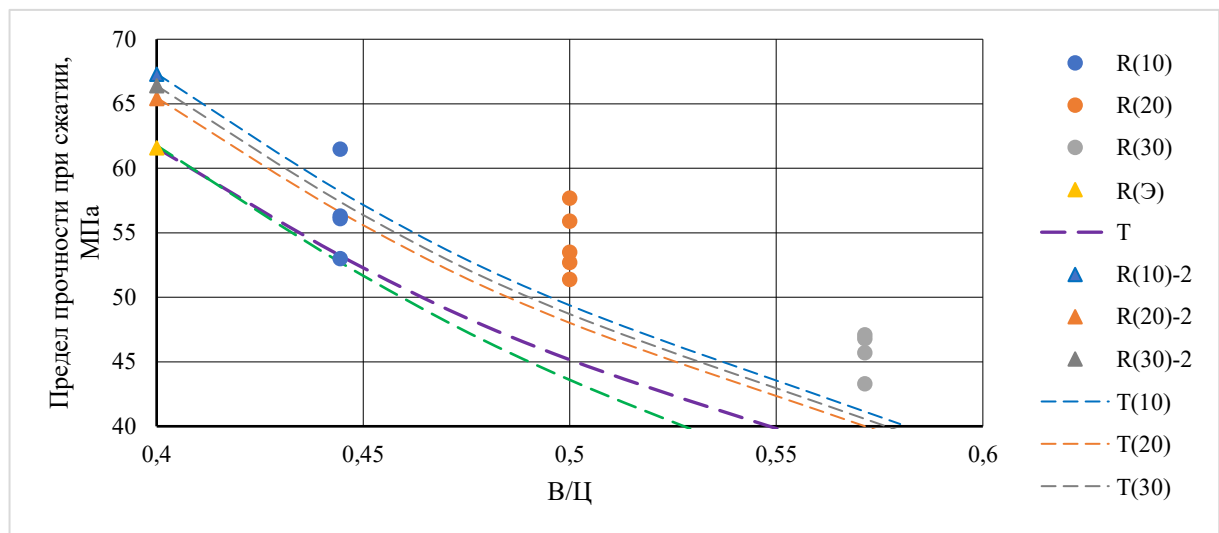


Рисунок 3.6 – Влияние дозировки КМД и величины В/Ц на зависимость предела прочности при сжатии, где (10), (20), (30) – содержание КМД, %; R (э), R (10), R(10)-2 – измеренные по 1 и 2 этапам; T(10), T(20), T(30) - по формуле (3.2) при $a = 0,363$; $0,353$; $0,358$ соответственно

Очевидно и закономерно, что с ростом В/Ц предел прочности при сжатии закономерно снижается, при этом:

- предел прочности по результатам 2 этапа, т.е. при независимой от состава и дозировки КМД величины В/Ц, увеличился относительно бездобавочного эталона на 6 - 9%;

- предел прочности по результатам 1 этапа, т.е. при уменьшенной в зависимости от состава и дозировки КМД величины В/Ц, закономерно снижается,

но превышает расчетные значения относительно бездобавочного эталона на 7 - 20% при содержании КМД 20% и на 7 - 17% при содержании КМД 30%, что связано, вероятно, с проявлением некоторых вяжущих свойств у комплексной добавки Ш + МД, что позволяет рассматривать КМД как активную минеральную добавку (АМД).

На рисунке 3.7 показано влияние содержания комплексной добавки (10, 20 и 30%) и величины В/Ц на предел прочности при изгибе от для первого и второго (-2) этапа исследований. Представлено сравнение:

- с бездобавочным эталоном (э):

- зависимостями СоюзДорНИИ [161] при $a = 0,55$, $R_{цн} = 6,12$ МПа, ВВ = 2% (Т1 на рисунке 3.7, формуле (3.4) и Баженова Ю.М. [161] при $b = 0,54$, $R_{цн} = 6,12$ МПа, ВВ = 2% (Т2 на рисунке 3.7, формуле (3.5):

$$R_f = aR_{цн} (1 - 0,025ВВ) \left(\frac{Ц}{В} - 0,1 \right); \quad (3.4)$$

$$R_f = bR_{цн} \left(\frac{Ц}{В+ВВ} - 0,2 \right). \quad (3.5)$$

Представленные на рисунке 3.7 расчетные зависимости Т(10), Т(20) Т(30) получены по формуле (3.4) при $a = 0,603$; 0,645; 0,666 соответственно.

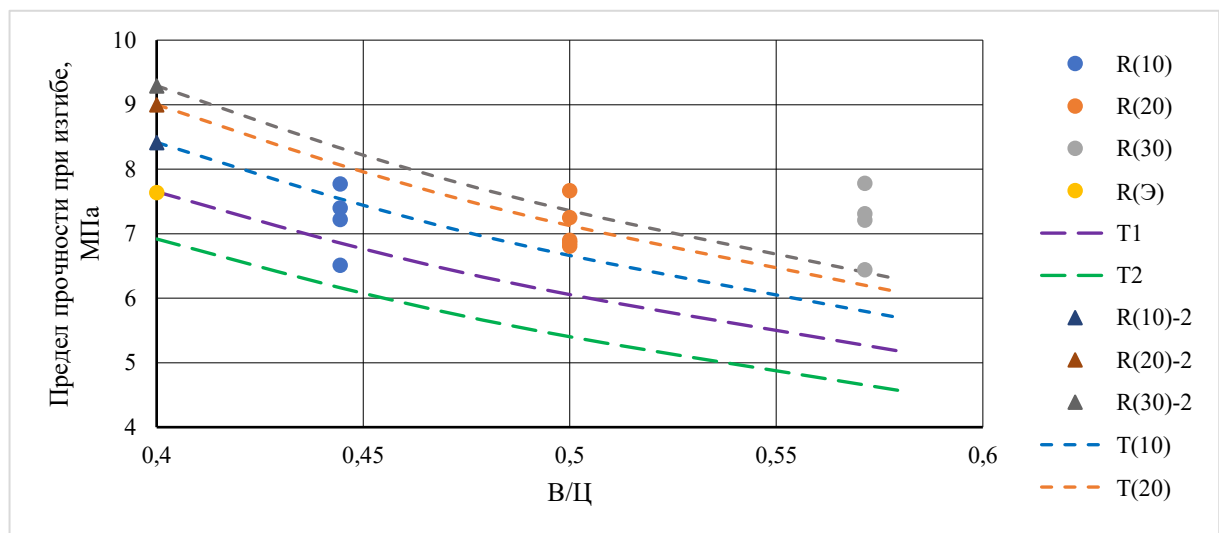


Рисунок 3.7 – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от величины В/Ц, где (10), (20), (30) – содержание КМД, %; R (э), R (10), R(10)-2 – измеренные по 1 и 2 этапам; Т(10), Т(20), Т(30) - по формуле (3.4) при $a = 0,363$; 0,353; 0,358 соответственно

Из представленных на рисунке 3.7 результатов следуют выводы [69]:

- с ростом величины В/Ц предел прочности МЗБ с комплексной добавкой на растяжение при изгибе практически не изменяется, при этом часть значений превышает значения эталона, а часть результатов показывает значения менее бездобавочного эталона;

- при дозировке комплексной добавки до 30 % превышение предела прочности на растяжение при изгибе относительно расчетных значений с учетом изменения величины В/Ц составляет от 12 до 22%.

На рисунке 3.8 показано влияние вида МД (ГП, О, З) в составе КМД на соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии в проектом возрасте 28 сут, в т.ч в сравнении с бездобавочным эталоном (Э28) и некоторыми данными.

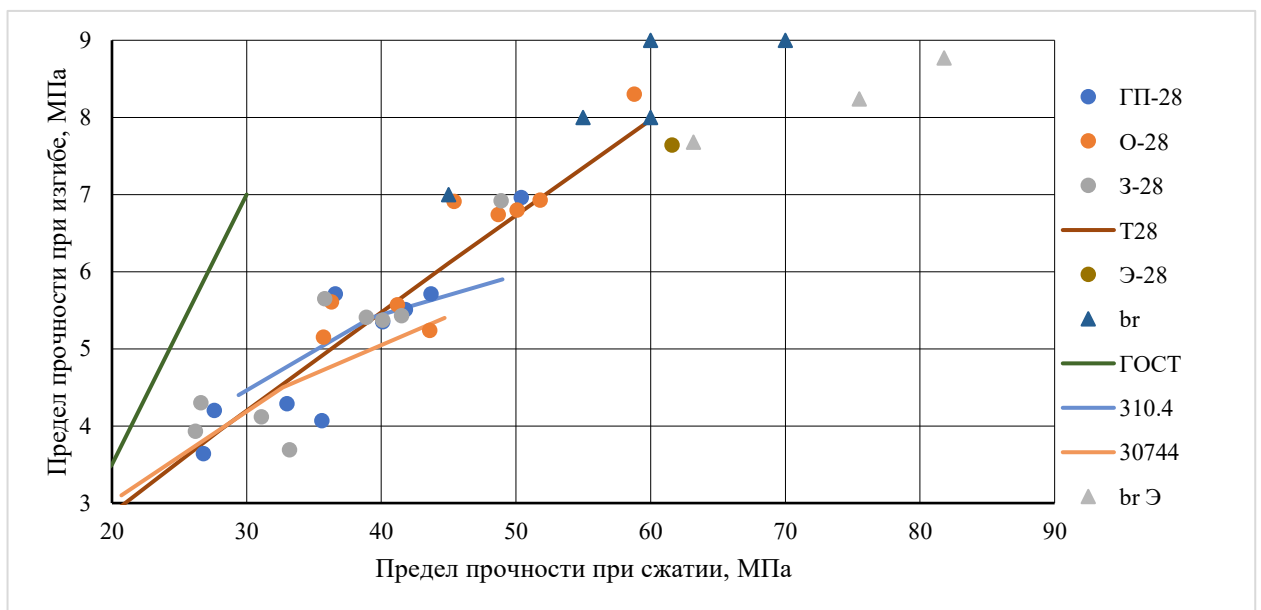


Рисунок 3.8 – Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от предела прочности при сжатии, где ГП, О, З – вид МД; 2; 28 – возраст МЗБ; Т28 – по формуле (3.5); Э28 – бездобавочный эталон; br – декларированные данные некоторых производителей; ГОСТ – ГОСТ 31358-2019; 310.4 – ГОСТ 10178-85; 30744 – ГОСТ 31108-2020; br Э – экспериментальные данные некоторых производителей [163]

Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии исследованных составов описывается уравнением при значениях, представленных в таблице 3.4 параметров k , x :

$$R_f = kR^x; \quad (3.6)$$

Таблица 3.4 – Значения параметров k , x , R^2 в формуле (3.6)

МД	Значения параметров в формуле (3.5)		
	k	x	R^2 *
ГП	0,184	0,914	0,839
О	0,226	0,873	0,828
З	0,238	0,849	0,779
Все МД	0,182	0,923	0,864
Примечание – * – показатель достоверности аппроксимации			

Из представленных на рисунке 3.8 и в таблице 3.4 данных можно сделать следующие выводы [69]:

- предел прочности на растяжение при изгибе по ГОСТ 31358-2019 является основным показателем, при этом между данными таблицы 3.4 и ГОСТ по показателям прочности при изгибе и при сжатии корреляция отсутствует;
- результаты по этапам 1 и 2 хорошо согласуются с соотношением пределов прочности при изгибе и сжатии по ГОСТ 10178-85 (отменен) и ГОСТ 31108-2020;
- декларированные и экспериментальные данные некоторых производителей неплохо коррелируют с результатами этапов 1 и 2;
- введение рассматриваемых МД (О, З, ГП), вводимых в состав МЗБ в виде КМД (Ш+МД) не приводит к снижению предела прочности при изгибе;
- достаточно тесная корреляция позволяет использовать зависимость формуле (3.6) для практических целей.

На рисунке 3.9 показано влияние вида МД в составе КМД на изменение предела прочности при сжатии МЗБ первой серии экспериментов до 120 сут, при этом до 28 сут образцы выдерживались в НУ, далее в воздушно-сухих условиях.

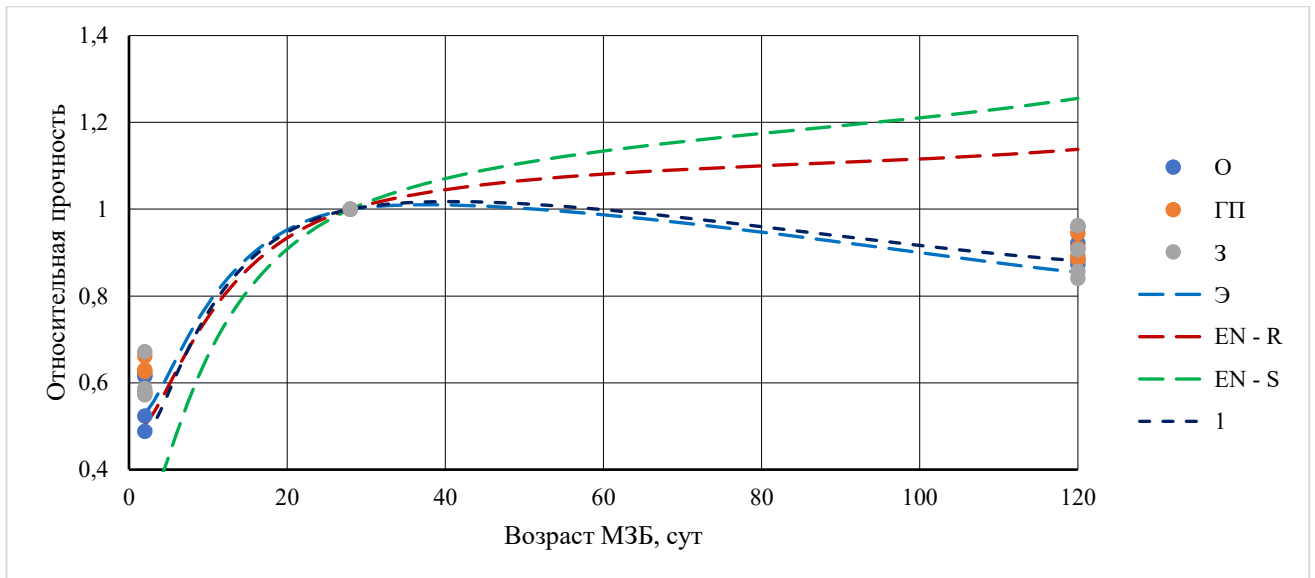


Рисунок 3.9 – Влияние вида МД в составе КМД на изменение предела прочности при сжатии во времени (первая серия), где О, ГП, З – опока, горелая порода, зола уноса; EN – по формуле (3.6), R – быстротвердеющий; S – медленнотвердеющий; 1 – по средним значениям 1 блока исследований

Изменение предела прочности при сжатии при нормальных условиях выдерживания формулой EN 1992-1-1:

$$\frac{R_{\tau}}{R_{28}} = \exp \left(k \left(1 - \sqrt{\frac{28}{\tau}} \right) \right), \quad (3.7)$$

где значение коэффициента k зависит от типа бетона по кинетике твердения, соответственно не более 0,25 – быстротвердеющие; не менее 0,44 – медленнотвердеющие.

Согласно EN 206.1 все бетоны по кинетике твердения делятся на четыре группы в зависимости от соотношения R_2/R_{28} :

- быстротвердеющие $> 0,5$;
- нормальнотвердеющие $0,3 - 0,5$;
- медленнотвердеющие $0,15 - 0,3$;
- очень медленнотвердеющие $< 0,15$.

Согласно ГОСТ 25192 все бетоны по темпу твердения делятся на быстротвердеющие $R_2/R_{28} > 0,4$ и медленнотвердеющие R_2/R_{28} не более 0,4.

Исследованные МЗБ характеризуются показателем R_2/R_{28} от 0,36 до 0,55, который зависит от соотношения Ш/МД в составе КМД и вида МД, т.е. по

классификации EN относятся к быстро и нормально твердеющим, по ГОСТ к быстро и медленно твердеющим. Эталон имеет показатель $R_2/R_{28} = 0,55$. Все содержащие КМД составы имеют показатель R_2/R_{28} ниже, чем у эталона, что частично связано, как будет показано далее, с более высоким значением В/Ц в составах с КМД в первой серии. Для предварительной оценки степени влияния выдерживания в воздушно-сухих условиях определены значения отношения прочностей R_{120} измеренной к R_{120} расчетной по формуле (3.7) при k равном 0,25 (max) и 0,44 (min). Результаты показаны на Рисунке 3.10.

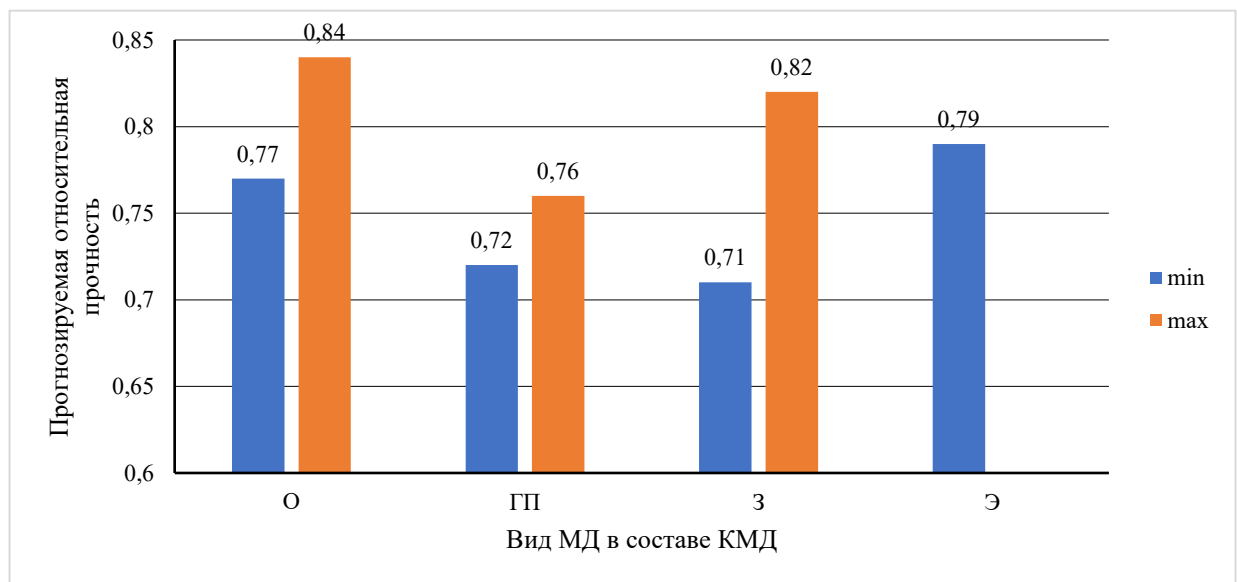


Рисунок 3.10 – Влияние вида МД в составе КМД на снижение предела прочности МЗБ при сжатии при выдерживании в воздушно-сухих условиях (прогноз)

В составах с опокой и золой в зависимости от соотношения Ш/МД возможно меньшее снижение предела прочности при сжатии после выдерживания в воздушно-сухих условиях, что, безусловно, позволяет утверждать о целесообразности использования КМД, например, для штукатурных составов.

На рисунке 3.11 показано влияние вида МД в составе КМД на изменение предела прочности при сжатии МЗБ второй серии экспериментов до 120 сут, при этом до 28 сут образцы выдерживались в НУ, далее в воздушно-сухих условиях.

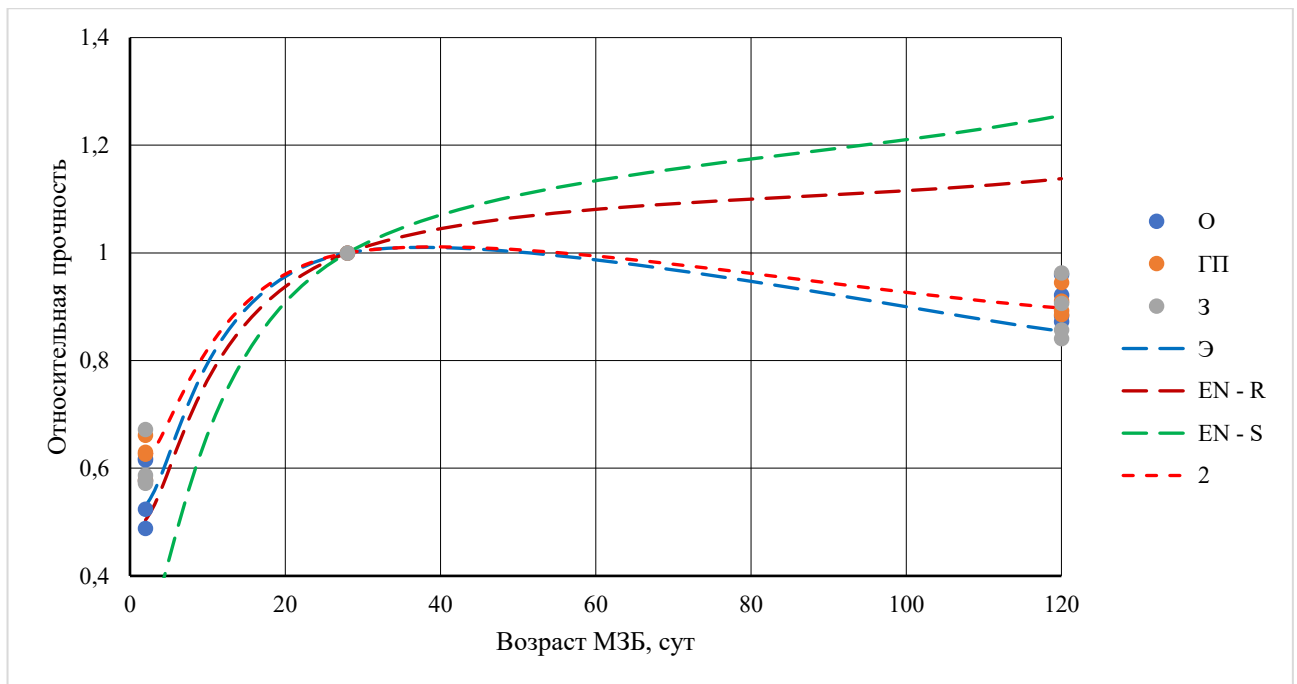


Рисунок 3.11 – Влияние вида МД в составе КМД на изменение предела прочности при сжатии во времени (вторая серия), где О, ГП, З – опока, горелая порода, зола уноса; EN – по формуле (3.7), R – быстротвердеющий; S – медленнотвердеющий; 2 – по средним значениям 2 блока исследований

Исследованные МЗБ характеризуются показателем R_2/R_{28} от 0,49 до 0,67, который зависит от соотношения Ш/МД в составе КМД и вида МД, т.е. по классификации EN практически все относятся к быстротвердеющим. Эталон имеет показатель $R_2/R_{28} = 0,53$. Большинство содержащих КМД составов имеют показатель R_2/R_{28} выше, чем у эталона, что, во-первых, позволяет утверждать о положительной роли КМД в обеспечении стойкости МЗБ по критерию прочности при сжатии при выдерживании в воздушно-сухих условиях, во-вторых, подтверждает ранее высказанное положение о влиянии повышенного значения В/Ц на замедление темпа твердения МЗБ в первой серии. Для предварительной оценки степени влияния выдерживания в воздушно-сухих условиях определены значения отношения прочностей R_{120} измеренной к R_{120} расчетной по формуле (3.7) при k равном 0,25 (max) и 0,44 (min). Результаты показаны на рисунке 3.12.

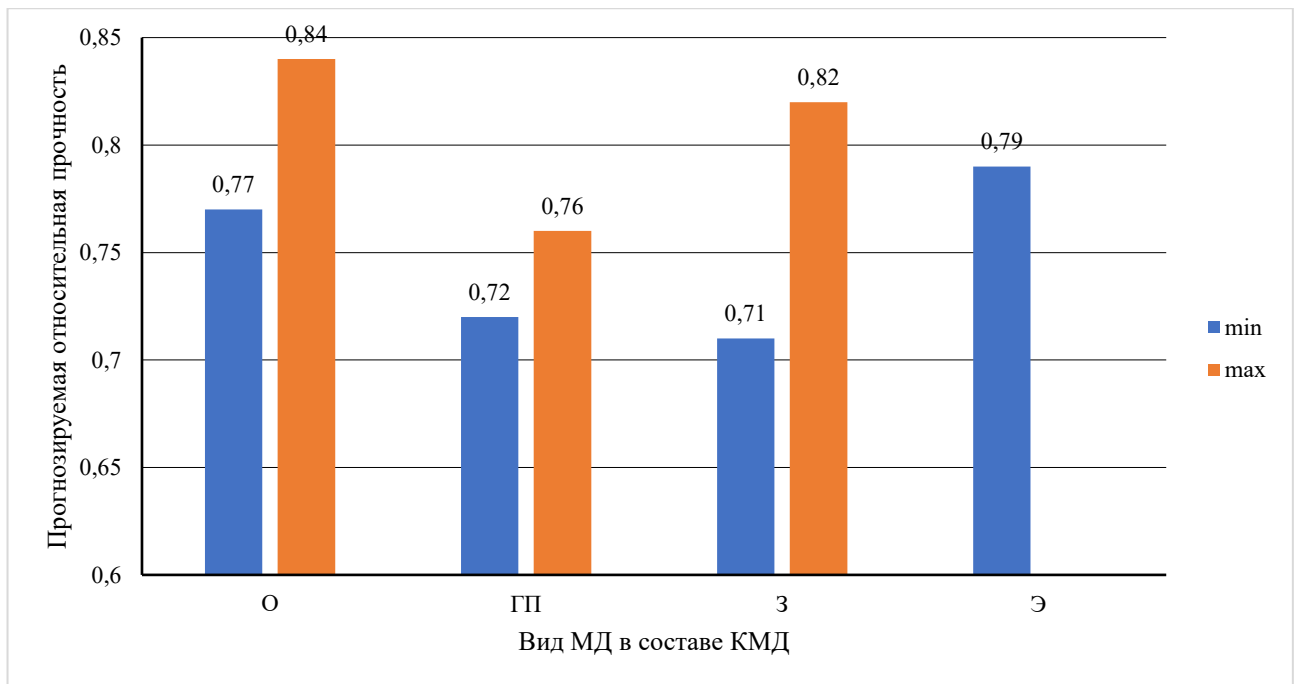


Рисунок 3.12 – Влияние вида МД в составе КМД на снижение предела прочности МЗБ при сжатии при выдерживании в воздушно-сухих условиях (прогноз)

Сопоставление представленных на рисунках 3.12 и 3.10 данных позволяет утверждать, что степень негативного влияния выдерживания МЗБ в воздушно-сухих условиях практически не зависит от величины В/Ц.

На рисунке 3.13 представлена зависимость начального модуля упругости МЗБ от предела прочности при сжатии в проектном возрасте 28 сут для первого (1) и второго (2) этапа исследований. Приведено сравнение полученных результатов с нормативными значениями по СП 63.13330.2018 (СП) и ГОСТ 31358-2019 (ГОСТ), а также декларированными и экспериментальными данными некоторых производителей (br, br Э).

Зависимость начального модуля упругости E_0 от предела прочности при сжатии R по результатам испытаний МЗБ первого и второго этапов описывается уравнением:

$$E_0 = 2316R^{0,568}, \quad (3.8)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,69$.

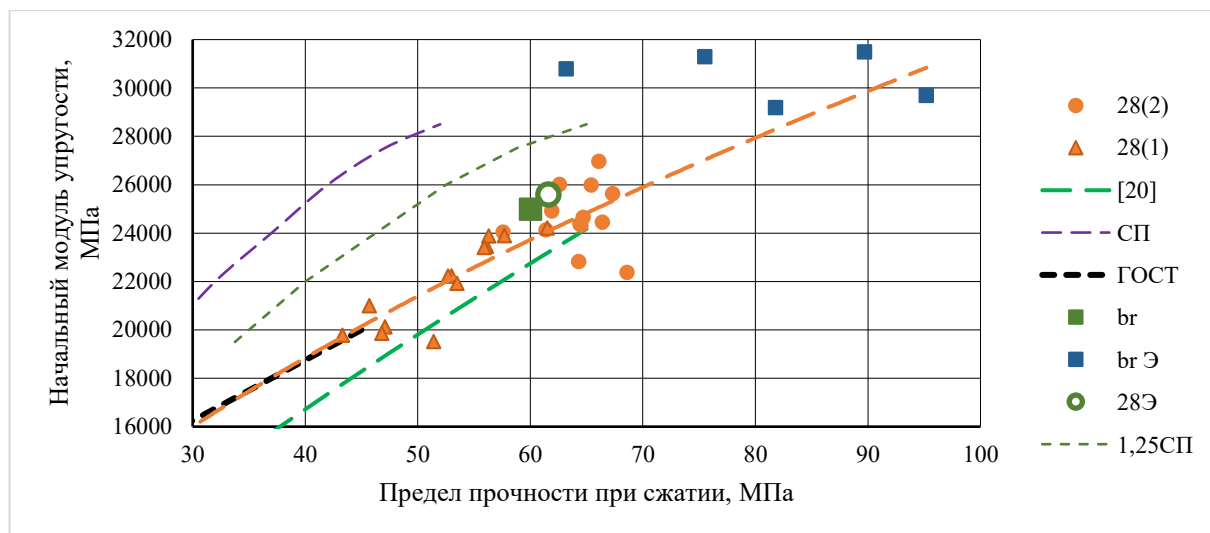


Рисунок 3.13 – Зависимость начального модуля упругости МЗБ от предела прочности при сжатии, где 28(1), 28(2) – данные первого и второго этапов; [20] – по данным [20] для строительных растворов с редиспергируемыми полимерными порошками; СП – по 63.13330.2018 для МЗБ; ГОСТ – по 31358-2019; br – по данным сайтов некоторых производителей; br Э – экспериментальные результаты испытаний ССС некоторых производителей; 28Э – бездобавочный эталон; 1,25СП – с учетом масштабного фактора (размера образцов)

Представленные на рисунке. 3.13 результаты позволяют сделать следующие выводы:

- значения начального модуля упругости МЗБ по формуле (3.8) практически совпадают с нормируемыми ГОСТ Р 56378 - 2015 значениями;
- нормируемые для МЗБ в СП 63.13330.2018 значения значительно превышают экспериментальные данные (линия СП на рис. 6), в том числе и при переходе от кубиковой прочности (СП) к прочности при сжатии, полученной на образцах 40x40x160 мм (линия 1,25 СП на рисунке 3.13, по нашим данным $R_b = 1,25R_k$);
- экспериментальные значения, полученные при реализации 1 и 2 этапа исследований неплохо коррелируют с декларируемыми и экспериментальными данными некоторых производителей;
- введение КМД в состав МЗБ как взамен части ПЦ, так и взамен части П не повышает начальный модуль упругости МЗБ, что, с учетом положительного влияния КМД рационального состава на предел прочности при изгибе, должно

благоприятно повлиять, в частности, на усадочную трещиностойкость строительного раствора.

Таким образом, введение КМД рационального состава в МЗБ не приводит к снижению предела прочности на растяжение при изгибе и не повышает начальный модуль упругости МЗБ, что положительно влияет на усадочную трещиностойкость. Среднестатистические значения начального модуля упругости МЗБ с КМД рационального состава практически совпадают с нормируемыми ГОСТ Р 56378 - 2015 значениями. Применение шлама химводоочистки ТЭЦ в составе КМД при рациональном соотношении Ш/МД = 50/50 и рациональной дозировке КМД 20% обеспечило при введении КМД взамен части цемента повышение предела прочности при сжатии при равном значении В/Ц относительно бездобавочного эталона на 7 – 20%, а предела прочности на растяжение при изгибе на 12 до 22%.

Для количественной оценки усадочной трещиностойкости использован условный показатель k_{crc} усадочной трещиностойкости [161]:

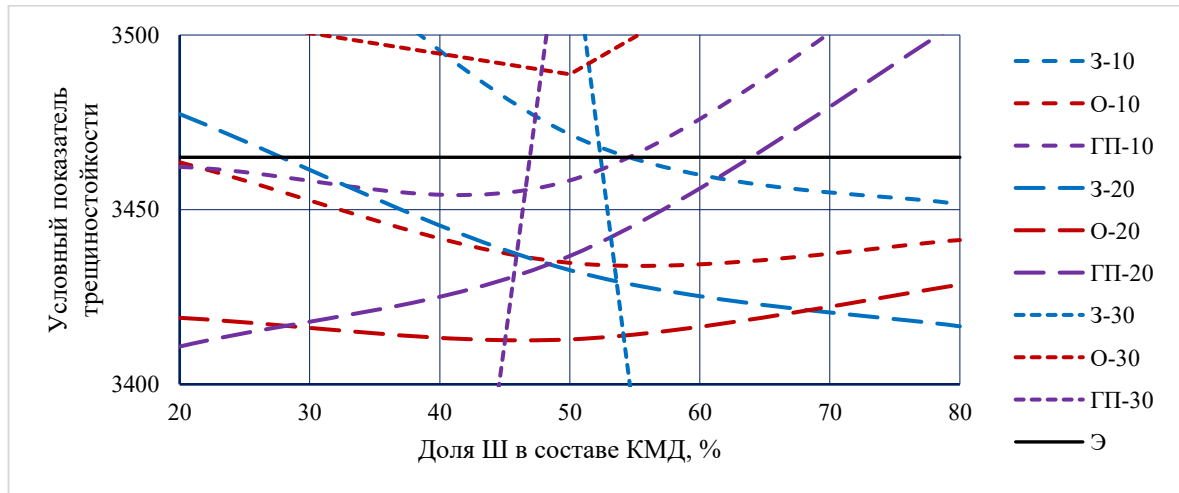
$$k_{crc} = \frac{E_0}{R_f}. \quad (3.9)$$

На рисунке 3.14 показано влияние вида МД в составе КМД, дозировки КМД и возраста МЗБ на величину условного показателя трещиностойкости в сравнении с бездобавочным эталоном.

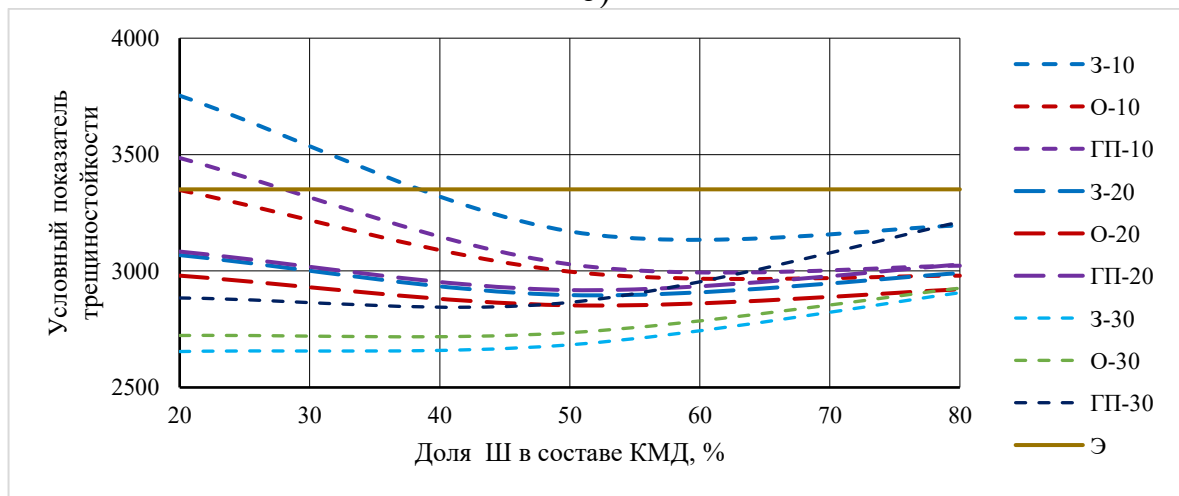
Оценка влияния вида МД в составе КМД, дозировки КМД и возраста МЗБ на величину условного показателя трещиностойкости показала, что значения показателя, не превышающие величину у бездобавочного эталона, обеспечиваются:

- в возрасте 2 сут при дозировке КМД 10% в случае использования О – всегда, при использовании З – при содержании шлама в КМД более 40%, при использовании ГП – при содержании шлама в КМД менее 55%; при дозировке КМД 20% в случае использования О – всегда, при использовании З – при содержании шлама в КМД более 30%, при использовании ГП – при содержании шлама в КМД менее 65%; при дозировке КМД 30% в случае использования О – никогда, при использовании З – при содержании шлама в КМД примерно 55%, при использовании ГП – при содержании шлама в КМД примерно 45%;

а)



б)



в)

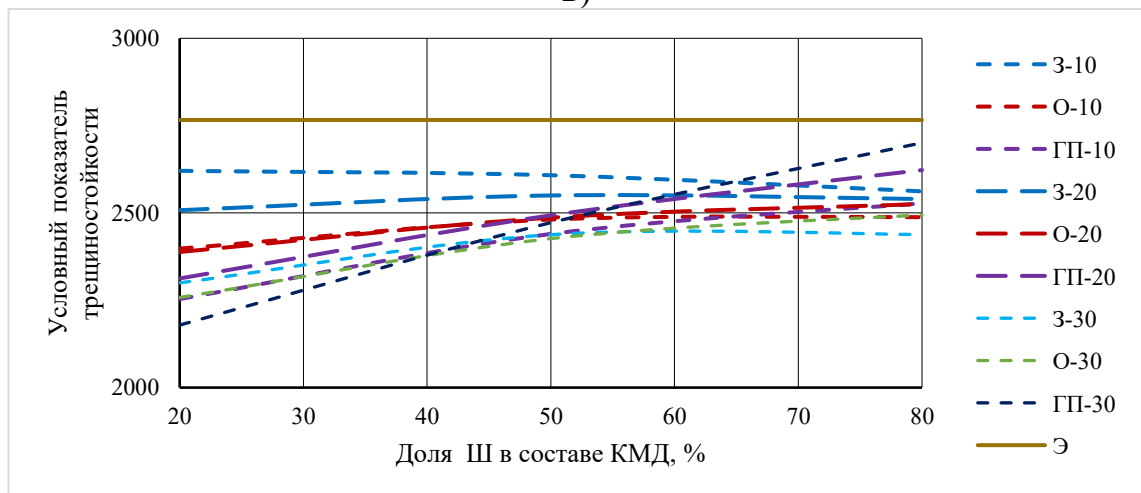


Рисунок 3.14 – Влияние доли III в составе КМД и продолжительности выдерживания на условный показатель трещиностойкости СР, где З, О, ГП – зола, опока, горелая порода в качестве МД в составе КМД; 10-30 – дозировка КМД, %; Э – бездобавочный эталон
а) 2 сут, б) 28 сут, в) 120 сут

- в возрасте 28 сут при дозировке КМД 10% в случае использования О – всегда, при использовании З – при содержании шлама в КМД более 40%, при использовании ГП – при содержании шлама в КМД более 30%; при дозировке КМД 20% и более – всегда;

- после выдерживания в воздушно-сухих условиях 120 сут – всегда.

3.2 Влияние КМД на пористость мелкозернистых бетонов и строительных растворов

В таблице 3.5 представлены расчетные значения дополнительной относительно бездобавочного эталона полной пористости, определенные по уравнению:

$$\Delta P = 1 - \frac{\rho_{\text{КМД}}}{\rho_{\text{Э}}}, \quad (3.10)$$

где $\rho_{\text{КМД}}, \rho_{\text{Э}}$ – соответственно средняя плотность модифицированных растворов и бездобавочного эталона.

Таблица 3.5 – Расчетная дополнительная полная пористость

Этап	Средняя плотность, кг/м ³		Дополнительная пористость	
	минимальная	максимальная	минимальная	максимальная
1	2128	2231	- 0,018	- 0,063
2	2178	2280	0,04	- 0,041
Примечание – со знаком «минус» – повышение относительно эталона				

При реализации первого этапа изменение пористости происходило за счет изменения величины В/Ц и за счет введения КМД, при реализации второго этапа изменение пористости происходило только за счет введения КМД, поскольку величина В/Ц оставалась постоянной. Можно сделать заключение, что использование КМД при неизменном значении В/Ц может привести к изменению (уменьшению) полной пористости в пределах 4%, что может привести к снижению предела прочности относительно эталона ориентировочно на 16 – 20%. При

увеличении полной пористости до 6,3% (этап 1) возможно снижение прочности на 24 – 30%. По данным рисунка 3.3 максимальный разброс значений прочности при сжатии при В/Ц = 0,4 (этап 2) составил 8%, а при В/Ц = 0,445 (этап 1) составил 16%. Меньшее снижение прочности в сравнении с ожидаемым по данным об изменении пористости связано с положительным влиянием КМД на прочность цементного камня.

3.2.1 Влияние дополнительной полной пористости на предел прочности при сжатии

На рисунке 3.15 показано влияние вида МД (О либо З) в составе КМД и дозировки РПП [164] на полную пористость строительных растворов относительно бездобавочного эталона. Во всех представленных на рисунке 3.15 составах использована ВУД в количестве 0,3 % от массы сухой смеси. Именно она обеспечила значительный рост полной пористости относительно бездобавочного (без ВУД) эталона за счет воздухововлечения, что сопровождалось значительным уменьшением средней плотности исследованных растворов. Дозировка КМД составила 20% от массы ПЦ, соотношение Ш/(О либо З) составило 50%/50%.

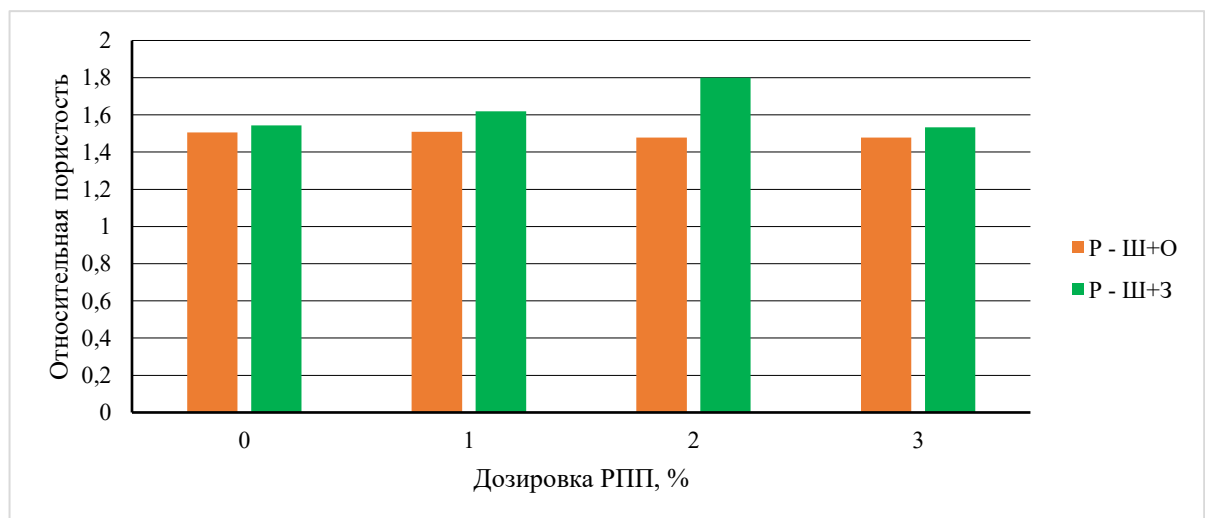


Рисунок 3.15 – Влияние вида МД (О либо З) в составе КМД и дозировки РПП на полную пористость строительных растворов, где Р-Ш+О – состав с РПП и МКД(Ш+О); где Р-Ш+З – состав с РПП и МКД(Ш+З);

Представленные на рисунке 3.15 результаты позволяют сделать следующие заключения:

- практически во всех случаях, за исключением состава с золой-уноса при содержании РПП 2% вид МД (З либо О) мало влияет на полную пористость;
- дозировка РПП, за исключением 2% в составе с золой мало влияет на полную пористость;
- максимальное повышение полной пористости при введении в состав РПП и ВУД составляет $\Delta P = 0,23$.

При оценке степени влияния полной пористости на предел прочности при сжатии реализован следующий подход:

- определена дополнительная полная пористость:

$$\Delta P = P_{\text{д}} - P_{\text{э}}, \quad (3.11)$$

где $P_{\text{д}}, P_{\text{э}}$ – соответственно полная пористость составов с ВУД, РПП и КМД (Ш+О либо З либо ГП) и полная пористость бездобавочного (без РПП) эталона;

- определены параметры уравнения, устанавливающего зависимость предела прочности относительно бездобавочного эталона [161,163]:

$$\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{э}}} = \exp(-kP), \quad (3.12)$$

где P - полная пористость;

$R_{\text{д}}/R_{\text{э}}$ - зависимость предела прочности относительно бездобавочного эталона;

k – коэффициент пористости.

Зависимость формулы (3.12) представлена на рисунке 3.16. Значение коэффициента k в уравнении формулы (3.12) равно 4,46, что практически совпадает с данными [161,163]. Показатель достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$.

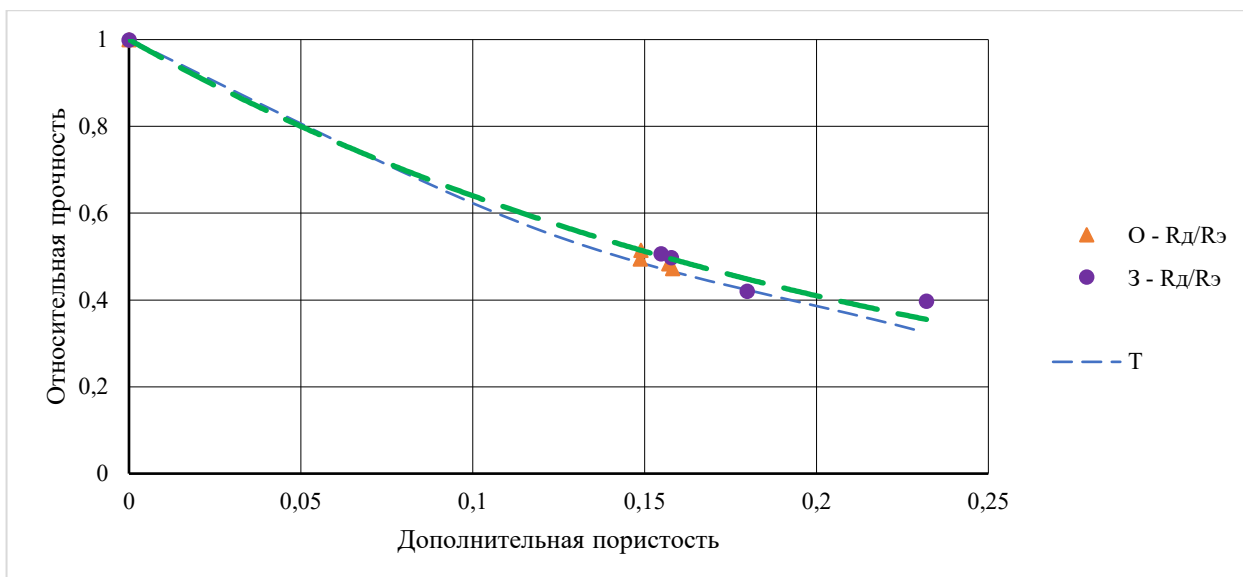


Рисунок 3.16 – Зависимость относительной прочности исследованных строительных растворов от дополнительной относительно эталона полной пористости, где О, З – соответственно в составе КМД опока или зола; Т – по данным [165], зеленая пунктирная линия - зависимость предела прочности по формуле (3.12)

3.2.2 Открытая капиллярная пористость и условно закрытая пористость

Как известно, такие параметры поровой структуры как открытая капиллярная пористость и условно закрытая пористость влияют на основной нормируемый показатель стойкости строительных растворов при циклическом замораживании и оттаивании – морозостойкость. При оценке степени влияния состава и дозировки комплексного модификатора ВУД+РПП+КМД на параметры пористости исследованных строительных растворов использовано сравнение пористости модифицированных составов с пористостью бездобавочного эталона.

На рисунке 3.17 представлены результаты определения относительной открытой капиллярной пористости в зависимости от вида МД (О либо З) в составе КМД и дозировки РПП [164]. Дозировка КМД составила 20% от массы ПЦ, соотношение Ш/(О либо З) составило 50%/50%. Во всех состава использована ВУД в количестве 0,3 % от массы сухой смеси. ВУД практически не влияет на величину открытой капиллярной пористости в сравнении с бездобавочным эталоном.

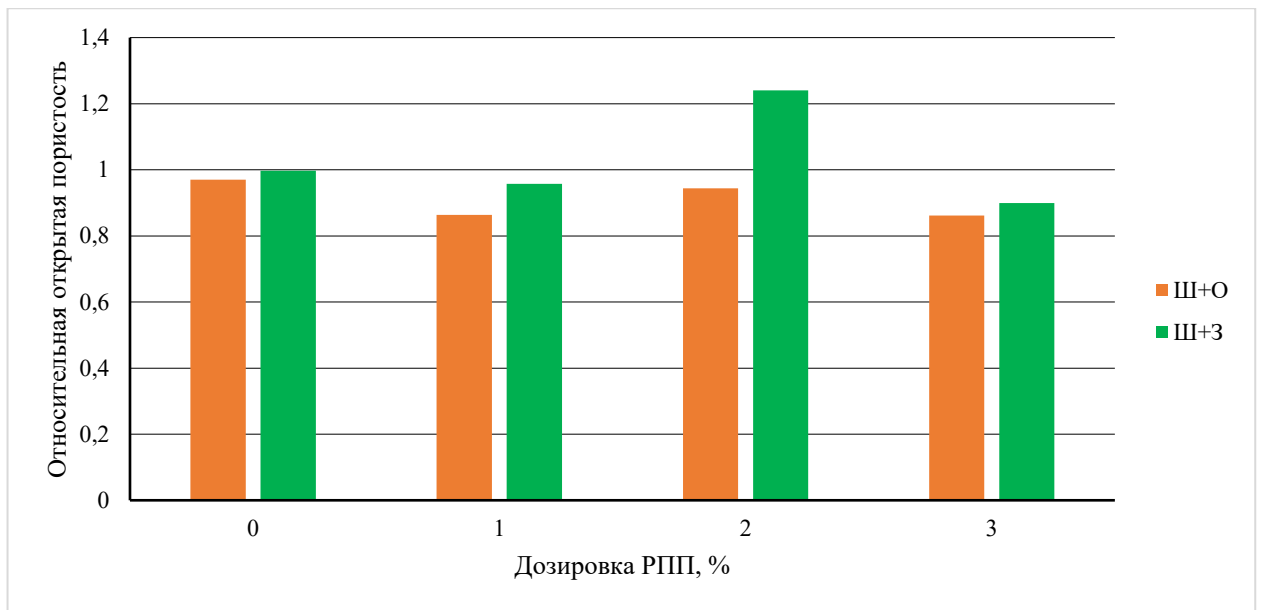


Рисунок 3.17 – Влияние состава КМД и дозировки РПП на относительную открытую капиллярную пористость

Представленные на рисунке 3.17 результаты позволяют сделать заключение:

- влияние вида МД (О либо З) на величину открытой капиллярной пористости в составах без РПП практически отсутствует;

- при наличии РПП открытая капиллярная пористость в случае применения золы-уноса несколько выше в сравнении с опокой, особенно при дозировке РПП 2%, когда открытая капиллярная пористость возросла более чем на 20% относительно бездобавочного эталона, в остальных случаях имеет место снижение открытой капиллярной пористости до 14%.

На рисунке 3.18 представлены результаты определения относительной условно закрытой капиллярной пористости в зависимости от вида МД (О либо З) в составе КМД и дозировки РПП [164]. Дозировка КМД составила 20% от массы ПЦ, соотношение Ш/(О либо З) составило 50%/50%. Во всех состава использована ВУД в количестве 0,3% от массы сухой смеси. Условно закрытая пористость при введении ВУД возрастает значительно, до 2,8 раза в зависимости от вида МД.

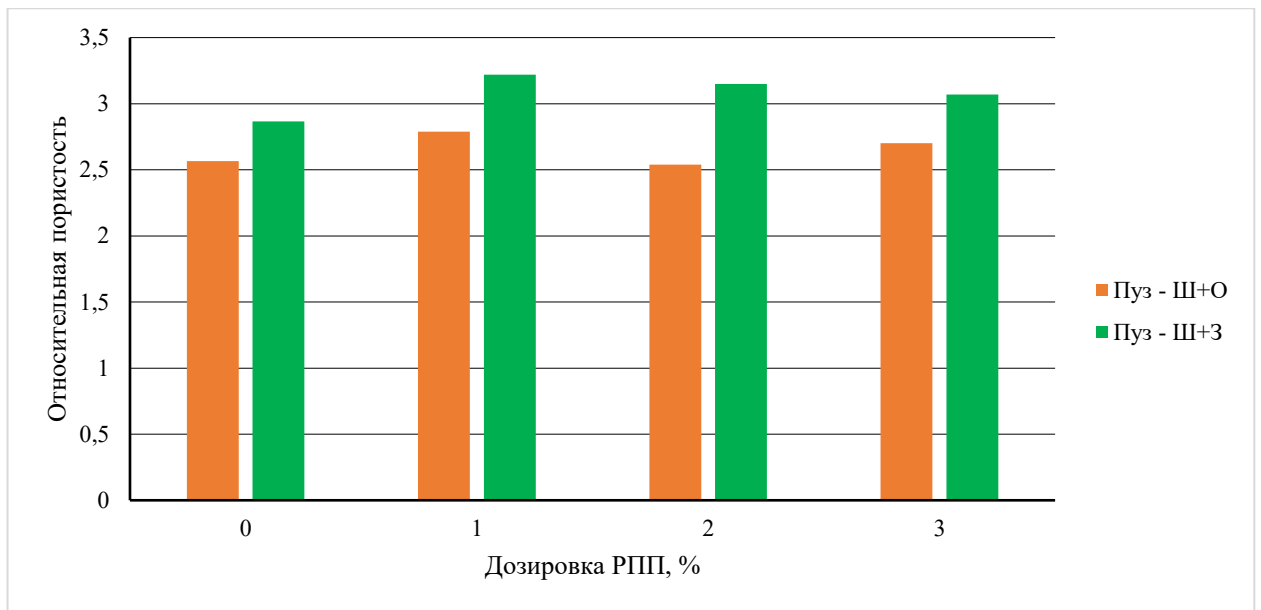


Рисунок 3.18 – Влияние состава КМД и дозировки РПП на относительную условно закрытую капиллярную пористость

Представленные на рисунке. 3.18 результаты позволяют сделать заключение:

- введение РПП обеспечивает повышение относительной условно закрытой пористости до 0,3 – 0,4;
- в составах с опокой условно закрытая пористость несколько ниже в сравнении с золой.

Таким образом, введение в состав растворов КМД при рациональной дозировке порядка 20% от ПЦ и рациональном соотношении Ш/МД = 50%/50% не оказывает отрицательного влияния на пределы прочности при сжатии и изгибе, не вызывает повышения модуля упругости, что благоприятно влияет на обеспечение усадочной трещиностойкости. При введении ВУД и РПП существенно изменяются численные значения показателей пористости, особенно вследствие введения ВУД, что закономерно влияет на среднюю плотность и показатели прочности, при этом негативное влияние указанных добавок на условно закрытую пористость не выявлено, что позволяет прогнозировать отсутствие их негативного влияния на морозостойкость.

3.3 Влияние дозировки РПП на прочностные и деформационные свойства строительных растворов с КМД

Влияние дозировки РПП на прочностные и деформационные свойства СР с КМД произведено на составах, содержащих в качестве МД в составе КМД опоку либо золу уноса. Все исследованные составы содержали ВУД в дозировке 0,3% от массы минеральной части ССС. Состав КМД представлен соотношением Ш/МД = 50%/50%, дозировка КМД 20% от массы вяжущего. На рисунках 3.19, 3.20 показано влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на предел прочности при сжатии исследованных СР в возрасте 2, 28 и 120 сут.

Представленные на рисунках 3.19, 3.20 результаты показывают, что:

- влияние дозировки РПП на предел прочности при сжатии зависит от вида МД в составе КМД, в меньшей степени влияет опока;
- выдерживание до 120 сут в воздушно-сухих условиях приводит к снижению предела прочности при сжатии относительно 28 сут, но этот эффект не связан с наличием РПП;
- наличие РПП положительно влияет на стойкость по критерию прочности при сжатии в воздушно-сухих условиях;
- соотношение R_2/R_{28} исследованных СР составляет от 0,37 до 0,45 в составах с опокой и от 0,37 до 0,51 в составах с золой, и снижается с ростом содержания РПП, что свидетельствует о некотором замедляющем твердение эффекте в раннем возрасте при введении РПП;
- соотношение R_{120}/R_{28} исследованных СР составляет от 0,87 до 0,98 в составах с опокой и от 0,81 до 0,99 в составах с золой, причем при наличии РПП во всех случаях соотношение R_{120}/R_{28} выше в сравнении с бездобавочным эталоном, что позволяет утверждать о положительном влиянии РПП на стойкость по критерию прочности при сжатии в воздушно-сухих условиях.

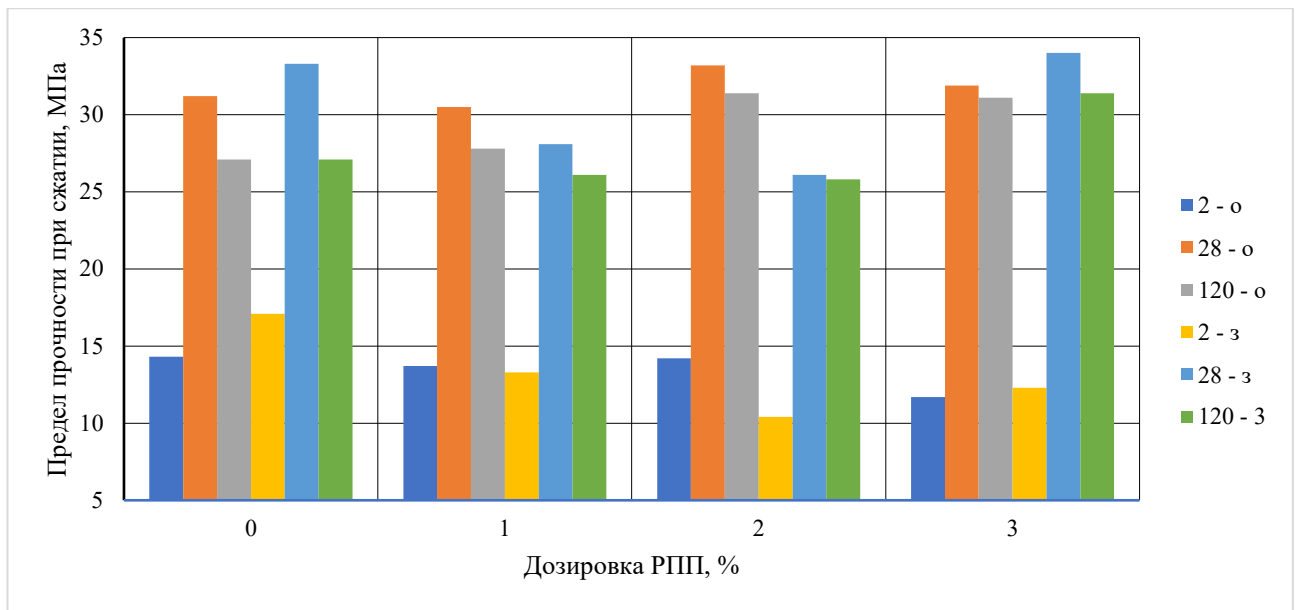


Рисунок 3.19 – Влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на предел прочности при сжатии СР, где 2, 28, 120 – возраст раствора, сут; О, З – соответственно опока или зола уноса в составе КМД

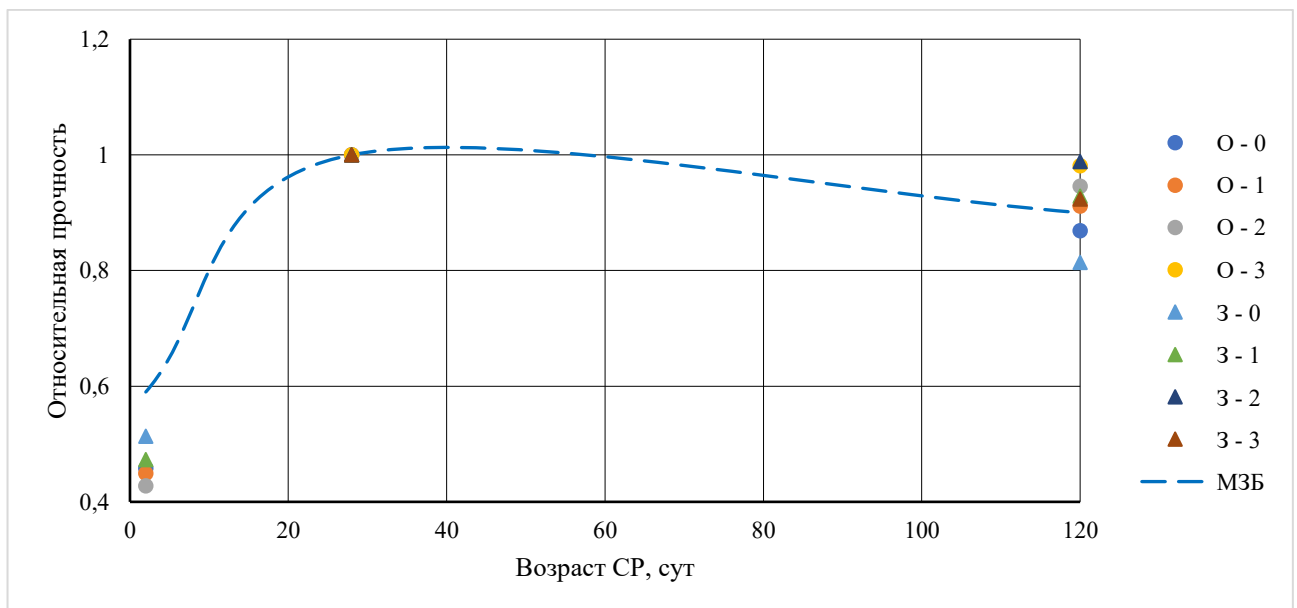


Рисунок 3.20 – Влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на изменение прочности при сжатии СР в зависимости от возраста, где 0 - 3 – дозировка РПП, %; О, З – соответственно опока или зола уноса в составе КМД; МЗБ – средние значения составов с КМД по данным рисунка 3.6

Вследствие введения в состав строительного раствора ВУД и РПП произошло существенное снижение средней плотности, что привело к увеличению за счет дополнительного воздухововлечения общей пористости до 20% в сравнении с

составами без указанных добавок [149], следствием чего стало снижение предела прочности при сжатии до 25,8 – 33,3 МПа, который у бездобавочного эталона составлял в 120 сут 56,3 МПа [149], т.е. произошло снижение предела прочности при сжатии до 41 – 55%, или до 2,75% на один процент дополнительной за счет воздухововлечения пористости.

На рисунке 3.21 показано влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на соотношение пределов прочности при изгибе R_f и при сжатии R исследованных СР.

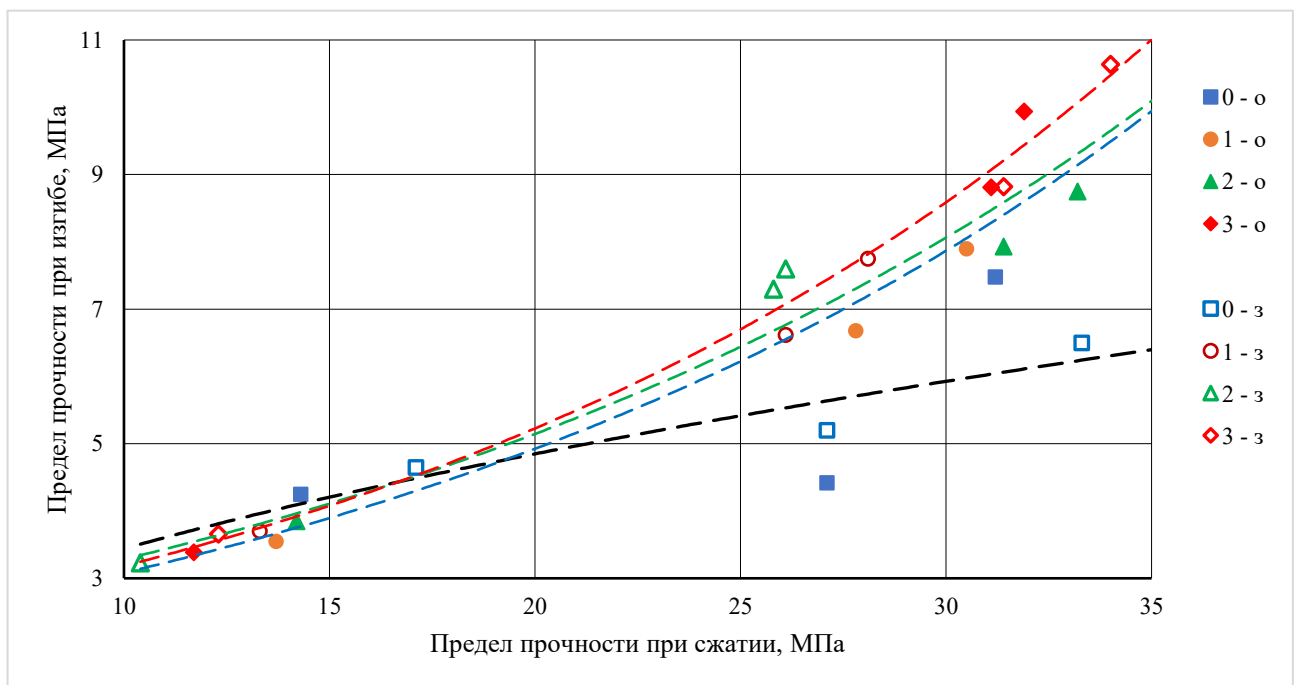


Рисунок 3.21 – Влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на соотношение пределов прочности при изгибе R_f и при сжатии R , где 0 – 3 – содержание РПП, %; О, 3 – соответственно опока или зола в составе КМД; черный пунктир – О + 3 без ВУД и РПП; синий, зеленый, красный пунктир – соответственно О + 3, ВУД, содержание РПП 1, 2, 3%

Представленные на рисунке 3.21 результаты показывают, что:

- в возрасте 2 сут при прочности при сжатии до 20 МПа такие факторы, как состав КМД и содержание РПП практически не влияют на зависимость $R_f = f(R)$;
- с увеличением продолжительности выдерживания СР в воздушно-сухих условиях имеет место тенденция не только количественного, но и качественного

изменения зависимости $R_f = f(R)$ при наличии в составе РПП, что позволяет сделать вывод о положительной роли РПП в повышении предела прочности при изгибе при выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях.

Влияние исследованных факторов на соотношение пределов прочности при изгибе R_f и при сжатии R описывается уравнением:

$$R_f = a \cdot \exp(bR), \quad (3.13)$$

где коэффициенты a, b и показатель достоверности аппроксимации R^2 представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры уравнения формулы (3.13)

Состав	Параметры уравнения формулы (3.9)		
	a	b	R^2
О – 0	2,76	0,026	0,565
О – 1	1,87	0,047	0,996
О – 2	2,1	0,043	0,999
О – 3	1,85	0,051	0,989
З – 0	3,24	0,02	0,9
З – 1	1,94	0,048	0,989
З – 2	1,85	0,054	0,997
З – 3	2,02	0,048	0,993
О+З – 0	1,1	0,495	0,552
О+З – 1	1,93	0,047	0,972
О+З – 2	2,1	0,045	0,936
О+З – 3	1,94	0,05	0,99

На рисунке 3.22 показано влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на соотношение начального модуля упругости E и предела прочности при сжатии R исследованных СР.

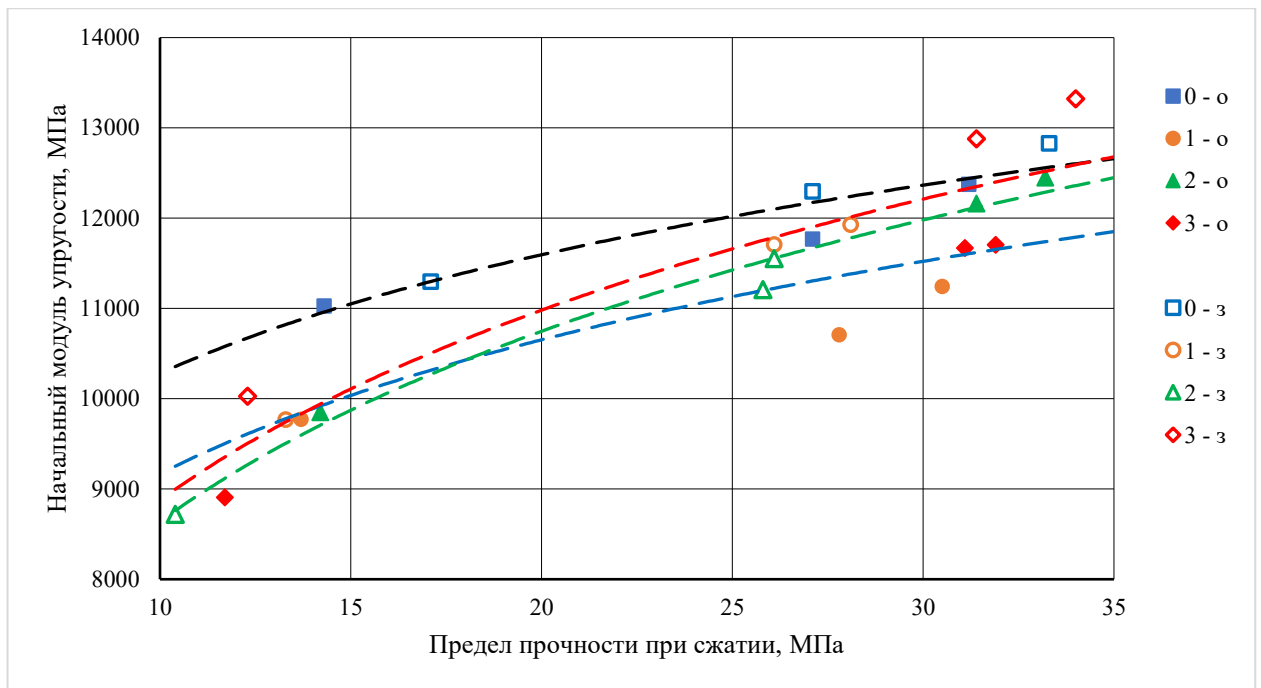


Рисунок 3.22 – Влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на соотношение начального модуля упругости E и предела прочности при сжатии R , где 0 – 3 – содержание РПП, %; О, З – соответственно опока или зола в составе КМД; черный пунктир – О + З без ВУД и РПП; синий, зеленый, красный пунктир – соответственно О + З, ВУД, содержание РПП 1, 2, 3%

Представленные на рисунке 3.22 результаты показывают, что:

- в возрасте 2 сут при прочности при сжатии до 20 МПа такие факторы, как состав КМД и содержание РПП практически не влияют на зависимость $E = f(R)$
- с увеличением продолжительности выдерживания СР в воздушно-сухих условиях имеет место тенденция во-первых, количественного изменения зависимости $E = f(R)$ при наличии РПП в составе СР, при этом содержание РПП также оказывает некоторое влияние на численные значения, во-вторых, отмечается сближение значений модуля упругости составов, не содержащих и содержащих РПП в дозировке 2-3%, что позволяет сделать вывод о влиянии РПП в формировании деформационных свойств растворов при выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях. Следует отметить, что повышение модуля упругости в данном случае является негативным результатом, поскольку повышает уровень растягивающих напряжений при проявлении, например, температурных и влажностных деформаций.

Зависимость начального модуля упругости E от предела прочности при сжатии R описывается уравнением:

$$E = a \cdot \ln(R) + b, \quad (3.14)$$

где коэффициенты a, b и показатель достоверности аппроксимации R^2 представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Параметры уравнения формулы (3.14)

Состав	Параметры уравнения формулы (3.13)		
	a	b	R^2
О – 0	1560	6868	0,915
О – 1	1642	5455	0,933
О – 2	2999	1889	0,998
О – 3	2804	2014	0,999
З – 0	2275	4830	0,998
З – 1	2884	2307	1,0
З – 2	2915	1891	0,989
З – 3	3157	2099	0,997
О+З – 0	1897	5912	0,891
О+З – 1	2143	4234	0,759
О+З – 2	3040	1641	0,986
О+З – 3	3055	1858	0,845

На рисунке 3.23 показано влияние дозировки РПП, вида МД в составе КМД и возраста СР на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием.

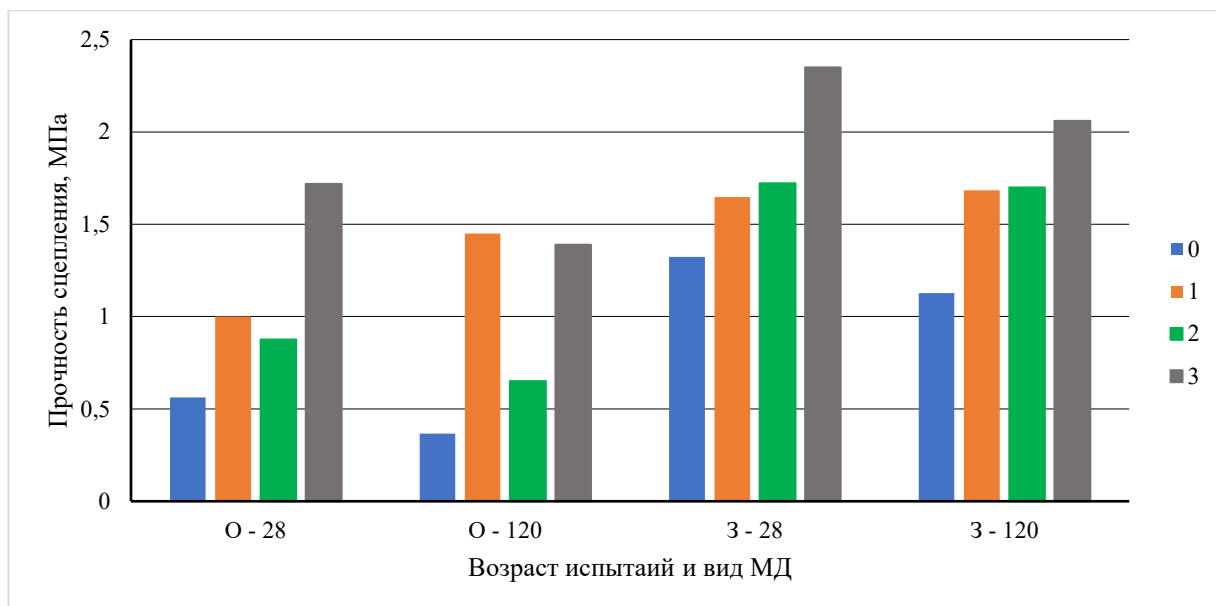


Рисунок 3.23 – Влияние дозировки РПП, вида МД в составе КМД и возраста СР на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием, где 0 - 3 – дозировка РПП, %; О или З – вид МД в составе КМД; 28, 120 – возраст СР, сут

Представленные на рисунке 3.23 результаты показывают, что:

- с повышением дозировки РПП как правило имеет место рост прочности сцепления со стандартным бетонным основанием;
- длительное (до 120 сут) выдерживание в воздушно-сухих условиях может вызывать снижение прочности сцепления до 25% в составах с РПП и опокой и до 13% в составах с РПП и золой, при этом в составах без РПП снижение прочности сцепления с опокой составило до 35%, с золой до 15%;
- составы с золой обеспечивают более высокую прочность сцепления со стандартным бетонным основанием.

На рисунке 3.24 показано влияние дозировки РПП, вида МД в составе КМД на соотношение прочности сцепления со стандартным бетонным основанием и предела прочности при изгибе исследованных СР. Данные наглядно демонстрирует роль вида МД в составе КМД (О или З) в формировании прочности сцепления со стандартным бетонным основанием.

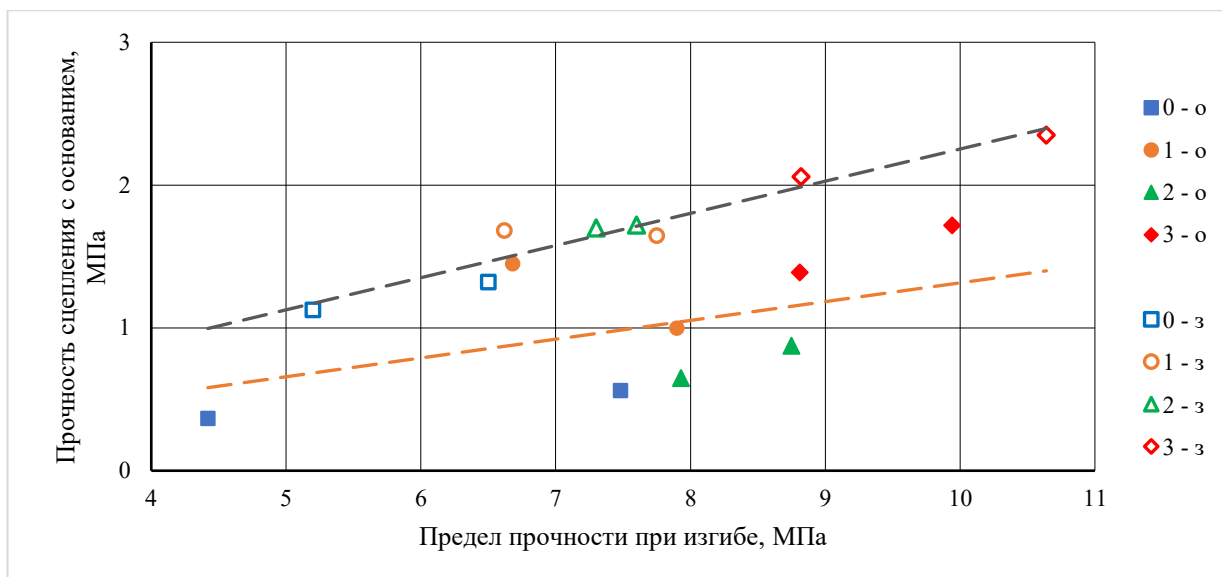


Рисунок 3.24 – Влияние дозировки РПП, вида МД в составе КМД на соотношение прочности сцепления со стандартным бетонным основанием и предела прочности при изгибе, где 0 – 3 – содержание РПП, %; О, З – соответственно опока или зола в составе КМД

Представленные на рисунке 3.24 результаты показывают, что существует тесная зависимость между прочностью сцепления и пределом прочности при изгибе, величина прочности сцепления составляет в среднем 0,13 от прочности при изгибе для составов с опокой при диапазоне 0,08 – 0,22 и 0,22 для составов с золой при диапазоне 0,2 – 0,25. По данным [28,29] прочность сцепления строительных растворов без КМД при содержании РПП 1-3% со стандартным бетонным основанием после 28 сут выдерживания в НУ составила в среднем 0,188 от прочности при изгибе, после выдерживания при 70°C в течение 2 недель 0,064, а после 60 циклов нагревания до 60°C и остывания 0,079. Согласно [22], при прочности на растяжение при изгибе изоляционных растворов от 7,0 до 9,1 МПа прочность сцепления с бетонным основанием составила от 0,7 до 1,2 МПа, т.е. 0,1 – 0,13, а согласно [30], при применении некоторых ремонтных смесей прочность сцепления с бетонным основанием достигает 2,5-3,4 МПа при прочности на растяжение при изгибе 8-13 МПа, т.е. 0,26 - 0,31.

Таким образом, в возрасте 2 сут на зависимость прочности при изгибе и начального модуля упругости от прочности при сжатии $R_f(E) = f(R)$ практически не влияют такие факторы, как состав КМД и содержание РПП. С ростом возраста

строительного раствора при выдерживании в воздушно-сухих условиях прослеживается тенденция не только количественного, но и качественного изменения зависимости $R_f = f(R)$ при наличии в составе РПП, что позволяет сделать вывод о положительной роли РПП в повышении предела прочности при изгибе в указанных условиях.

С повышением дозировки РПП в возрасте 28 сут имеет место рост прочности сцепления с основанием, при выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях возможно снижение прочности сцепления до 25% в составах с РПП и опокой и до 13% в составах с РПП и золой. Прочность сцепления со стандартным бетонным основанием составляет для составов с опокой 0,08 – 0,22 от прочности при изгибе и 0,2 – 0,25 для составов с золой.

Выводы по главе 3

1. Максимальное значение пределов прочности при сжатии и изгибе обеспечивается при соотношении Ш/МД = 50%/50% и дозировке КМД 20%. Лучшие показатели обеспечивает использование опоки, зола и горелая порода дают примерно равные значения. Повышение предела прочности при сжатии при равном значении В/Ц относительно бездобавочного эталона составляет от 7 до 20%, предела прочности при изгибе от 12 до 22%. Такие факторы, как состав КМД и содержание РПП незначительно влияют на соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии, особенно в раннем возрасте. В воздушно-сухих условиях в составах растворов с РПП имеет место повышение предела прочности при изгибе.

2. Соотношение прочности при сжатии R_2/R_{28} составляет, в зависимости от состава МЗБ, вида МД и соотношения Ш/МД от 0,36 до 0,67 при значении у эталона 0,53 – 0,55. В СР, содержащих РПП, показатель R_2/R_{28} составляет от 0,37 до 0,51 и снижается с ростом содержания РПП, что свидетельствует о некотором замедляющем твердение эффекте в раннем возрасте при введении РПП. Предел прочности при сжатии МЗБ после выдерживания в воздушно-сухих условиях

составляет от 0,71 до 0,84 относительно нормальных условий, а в СР, содержащих РПП, от 0,87 до 0,98, что свидетельствует о положительной роли КМД в обеспечении стойкости МЗБ по критерию прочности при сжатии при выдерживании в воздушно-сухих условиях.

3. Введение КМД в состав МЗБ не повышает начальный модуль упругости, его значения практически совпадают с нормируемыми ГОСТ Р 56378-2015 показателями, что, с учетом положительного влияния КМД рационального состава на предел прочности при изгибе благоприятно влияет на усадочную трещиностойкость МЗБ и СР. Такие факторы, как состав КМД и содержание РПП практически не влияют на зависимость модуля упругости от прочности при сжатии, особенно в раннем возрасте.

4. Введение КМД может привести к уменьшению полной пористости до 4%, при этом вид МД (зола либо опока) практически не оказывает влияния, снижение открытой капиллярной пористости составляет до 14%. Открытая капиллярная пористость в случае применения золы-уноса несколько выше в сравнении с опокой. Наличие РПП и ВУД повышают полную пористость СР за счет воздухововлечения, при этом снижение предела прочности при сжатии составляет до 2,75% на один процент дополнительной за счет воздухововлечения пористости.

5. Повышение дозировки РПП обеспечивает рост прочности сцепления со стандартным бетонным основанием в нормальных условиях, а в воздушно-сухих условиях возможно снижение прочности сцепления до 25% с РПП и до 35% без РПП при использовании в качестве МД опоки и, соответственно, до 13% и до 15% при использовании золы. Составы с золой обеспечивают более высокую прочность сцепления со стандартным бетонным основанием. Прочность сцепления составляет от предела прочности при изгибе в среднем 0,13 при диапазоне от 0,08 до 0,22 при использовании в качестве МД опоки и 0,22 при диапазоне от 0,2 до 0,25 при использовании золы.

Глава 4 Деформации усадки мелкозернистых бетонов и строительных растворов

4.1 Усадочные деформации МЗБ

Как известно, усадка бетонов, в т.ч. мелкозернистых, и строительных растворов на портландцементном вяжущем зависит, при прочих одинаковых условиях, от параметров поровой структуры цементного камня. Поскольку комплексный модификатор КМД + РПП + ВУД, как было показано, влияет на параметры пористости, целесообразно исследовать его влияние на усадочные деформации МЗБ и СР. В таблице 4.1 представлены результаты измерения деформаций усадки МЗБ первого этапа исследований, а именно при неизменном содержании вяжущего (ПЦ+КМД) и изменяющейся величине В/Ц, а в таблице 4.2 представлены результаты измерения деформаций усадки МЗБ второго этапа исследований, а именно при неизменной величине В/Ц и изменяющемся расходе вяжущего (ПЦ+КМД) в зависимости от дозировки и состава КМД. При измерении усадочных деформаций также фиксировались массопотери, т.е. фиксировалась кинетика высыхания образцов.

Таблица 4.1 – Деформации усадки МЗБ первого этапа исследований

Состав			Усадка, мм/м, в возрасте, сут					
КМД, %	Ш/МД, %	Вид МД	7	14	28	56	90	120
10	20/80	3	0,055	0,259	0,475	0,521	0,588	0,649
	50/50		0,09	0,404	0,641	0,723	0,782	0,867
	80/20		0,085	0,261	0,425	0,464	0,516	0,563

Продолжение таблицы 4.1

Состав			Усадка, мм/м, в возрасте, сут					
КМД, %	Ш/МД %	Вид МД	7	14	28	56	90	120
	20/80	О	0,078	0,375	0,629	0,698	0,769	0,837
	50/50		0,117	0,526	0,814	0,923	0,983	1,071
	80/20		0,117	0,39	0,614	0,686	0,736	0,783
	20/80	ГП	0,072	0,295	0,459	0,52	0,574	0,634
	50/50		0,116	0,452	0,661	0,767	0,807	0,884
	80/20		0,12	0,323	0,48	0,552	0,579	0,612
20	20/80	З	0,058	0,406	0,678	0,789	0,856	0,917
	50/50		0,082	0,545	0,846	1,0	1,065	1,15
	80/20		0,066	0,396	0,63	0,749	0,812	0,862
	20/80	О	0,07	0,488	0,812	0,93	1,005	1,07
	50/50		0,053	0,375	0,62	0,716	0,776	0,832
	80/20		0,086	0,526	0,823	0,971	1,022	1,098
	20/80	ГП	0,079	0,39	0,642	0,764	0,808	0,843
	50/50		0,027	0,394	0,58	0,694	0,725	0,76
	80/20		0,04	0,526	0,748	0,913	0,947	1,01
30	20/80	З	0,013	0,372	0,532	0,67	0,707	0,738
	50/50		0,027	0,442	0,692	0,799	0,84	0,879
	80/20		0,045	0,581	0,877	1,04	1,081	1,145
	20/80	О	0,022	0,433	0,679	0,819	0,86	0,889
	50/50		0,001	0,294	0,479	0,549	0,578	0,607
	80/20		0,021	0,44	0,682	0,812	0,838	0,889
	20/80	ГП	0,003	0,298	0,502	0,614	0,637	0,65
	50/50		0,055	0,259	0,475	0,521	0,588	0,649
	80/20		0,09	0,404	0,642	0,723	0,782	0,867
0	-	-	0,157	0,472	0,775	0,991	1,123	1,147

Таблица 4.2 – Деформации усадки МЗБ второго этапа исследований

Состав			Усадка, мм/м, в возрасте, сут					
КМД, %	Ш/МД, %	Вид МД	7	14	28	56	90	120
10	20/80	З	0,053	0,268	0,453	0,554	0,6	0,69
	50/50		0,064	0,371	0,596	0,76	0,773	0,86
	80/20		0,036	0,199	0,311	0,41	0,41	0,45
	20/80	О	0,063	0,409	0,6	0,779	0,8	0,884
	50/50		0,079	0,523	0,771	0,984	1,01	1,087
	80/20		0,057	0,364	0,513	0,634	0,681	0,714
	20/80	ГП	0,051	0,335	0,478	0,655	0,643	0,679
	50/50		0,072	0,461	0,675	0,861	0,883	0,917
	80/20		0,056	0,313	0,444	0,511	0,587	0,578
20	20/80	З	0,079	0,393	0,639	0,786	0,839	0,906
	50/50		0,091	0,511	0,803	1,02	1,038	1,116
	80/20		0,064	0,355	0,54	0,7	0,701	0,749
	20/80	О	0,086	0,515	0,787	1,0	1,041	1,116
	50/50		0,072	0,421	0,665	0,876	0,878	0,928
	80/20		0,094	0,563	0,883	1,11	1,144	1,207
	20/80	ГП	0,079	0,431	0,673	0,789	0,874	0,908
	50/50		0,065	0,357	0,543	0,638	0,714	0,733
	80/20		0,078	0,491	0,728	0,9	0,939	0,983
30	20/80	З	0,052	0,352	0,485	0,611	0,628	0,657
	50/50		0,069	0,46	0,692	0,851	0,914	0,96
	80/20		0,088	0,606	0,904	1,115	1,173	1,244
	20/80	О	0,068	0,478	0,688	0,823	0,895	0,952
	50/50		0,053	0,348	0,57	0,716	0,749	0,789
	80/20		0,076	0,505	0,809	0,98	1,042	1,107
	20/80	ГП	0,062	0,39	0,62	0,688	0,798	0,849
	50/50		0,053	0,268	0,453	0,555	0,6	0,69
	80/20		0,064	0,37	0,596	0,76	0,773	0,86
0	-	-	0,114	0,359	0,59	0,75	0,96	1,03

На Рисунке 4.1 показано развитие усадочных деформаций при реализации первого этапа исследований.

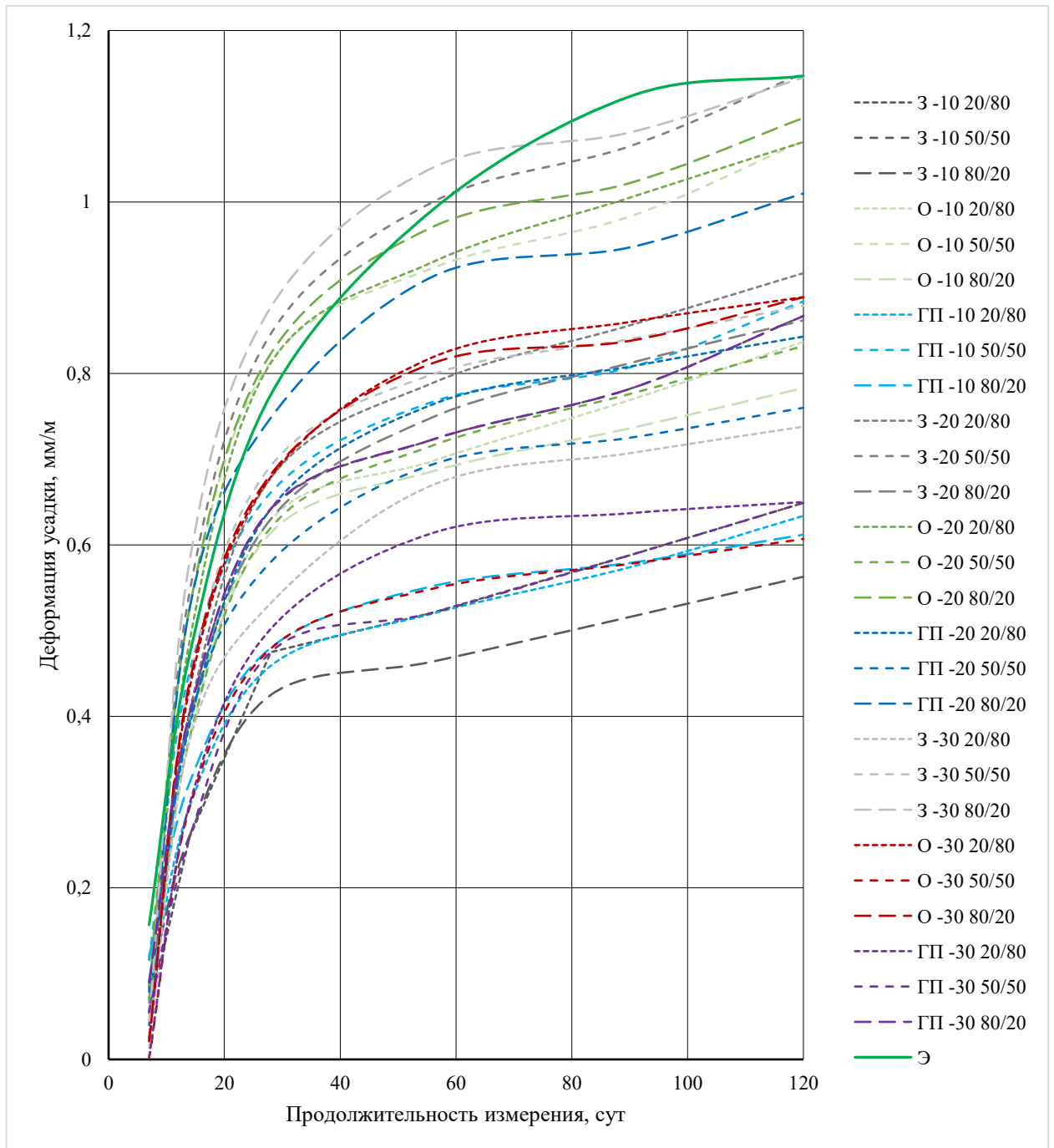


Рисунок 4.1 – Развитие усадочных деформаций МЗБ первого этапа исследований, где 10,20,30 – дозировка КМД, %; О, З, ГП – опока, зола, горелая порода; 20/80 – 80/20 – соотношение Ш/МД, % в составе КМД

Из представленных на рисунке 4.1 результатов очевидно, что:

- значительная часть усадочных деформаций исследованных МЗБ протекает в первые 3 – 4 недели;
- конечные значения деформаций усадки исследованных МЗБ в зависимости от рецептурных факторов различаются более чем в 2 раза, от 0,563 мм/м до 1,15 мм/м;
- конечные значения деформаций усадки в 120 сут практически всех исследованных МЗБ не превышают деформацию усадки не содержащего КМД эталона;
- значительное влияние на величину усадочных деформаций оказывает как вид МД и дозировка КМД, так соотношение Ш/МД, например, в МЗБ с золой при КМД = 30% и Ш/З = 80%/20% величина усадочных деформаций в 120 сут составила 1,145 мм/м, а при Ш/З = 20%/80% и той же дозировке КМД – 0,738 мм/м, при этом при использовании в качестве МД опоки при тех же параметрах значения усадочных деформаций практически одинаковы, т.е. величина усадочных деформаций существенно зависит от рецептурных факторов.

На рисунке 4.2 показано развитие усадочных деформаций при реализации второго этапа исследований, из которых следует, что:

- как и в случае первого этапа исследований значительная часть составов МЗБ с КМД имеет меньшую величину усадочных деформаций относительно не содержащего КМД эталона;
- значительная часть усадочных деформаций развивается, как и в первом этапе, в первые 3 – 4 недели;
- различие конечных значений в зависимости от состава МЗБ составляет до 2,5 раза, так, например, в МЗБ с золой при КМД = 30% и Ш/З = 80%/20% величина усадочных деформаций в 120 сут составила 1,244 мм/м, а при том же соотношении Ш/З и дозировке КМД 10% 0,45 мм/м, при использовании в качестве МД опоки различия менее выражены.

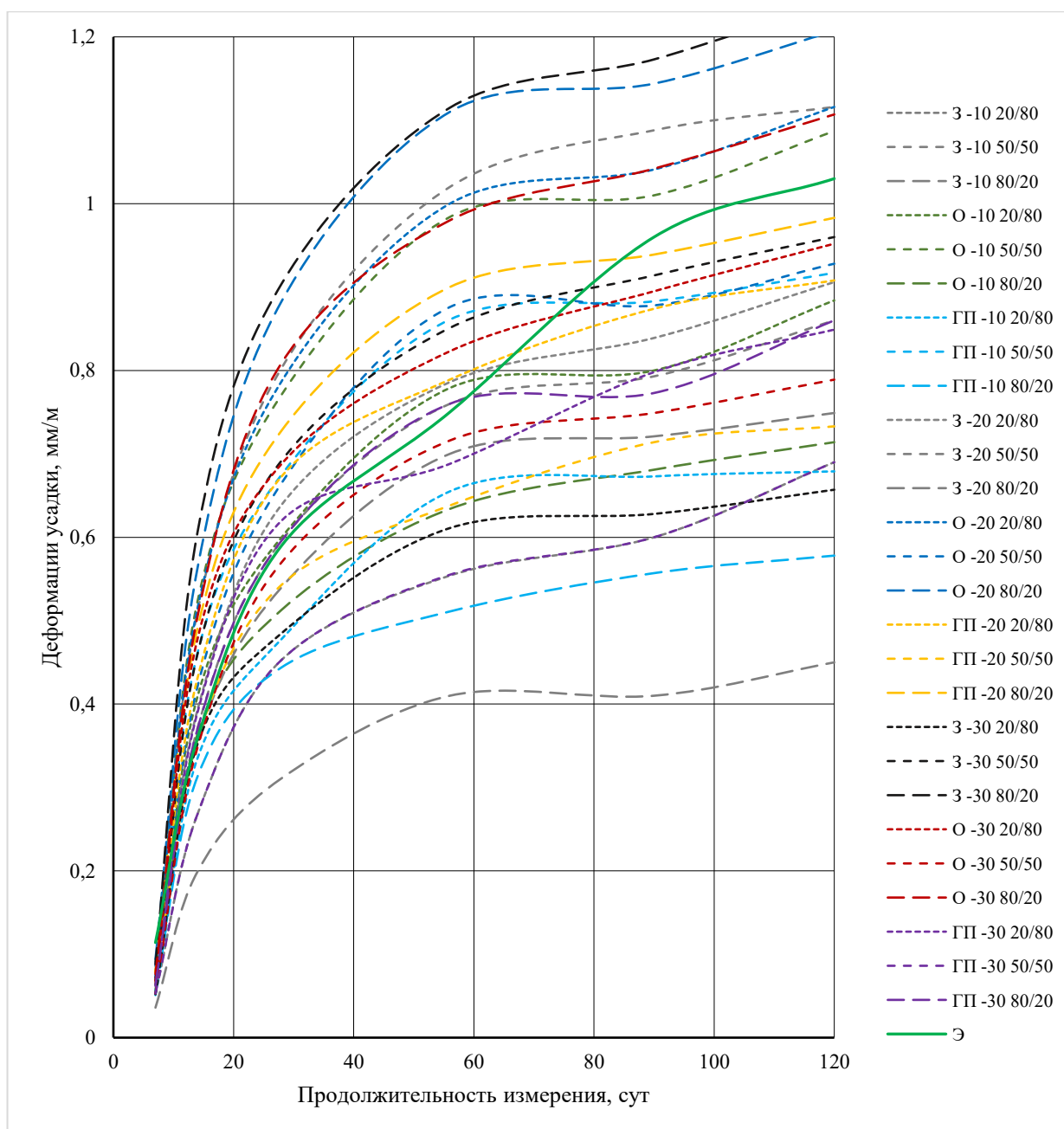


Рисунок 4.2 – Развитие усадочных деформаций МЗБ второго этапа исследований, где 10,20,30 – дозировка КМД, %; О, З, ГП – опока, зола, горелая порода; 20/80 – соотношение Ш/МД в составе КМД

Поскольку составы второго этапа исследований характеризуются большим содержанием вяжущего теста (ПЦ + КМД), закономерно повышение величины усадочных деформаций, поскольку они зависят от объема цементного камня (ПЦ + КМД). Поскольку во втором этапе исследований объем вяжущего теста составил относительно первого этапа 1,1 – 1,3, ожидаемое повышение усадочных деформаций вследствие повышенного объема цементного камня составляет от 1,16

до 1,5 раза. На результат повлияет также различие величин В/Ц в первом и втором этапах исследований. Как известно, с ростом В/Ц деформации усадки при высыхании возрастает.

На рисунке 4.3 показано влияние рецептурных факторов, а именно состава и дозировки КМД на конечные значения деформаций усадки после 120 сут выдерживания по ГОСТ 24544-2020, а на рисунке 4.4 – указанные деформации относительно бездобавочного эталона по результатам второго этапа исследований.

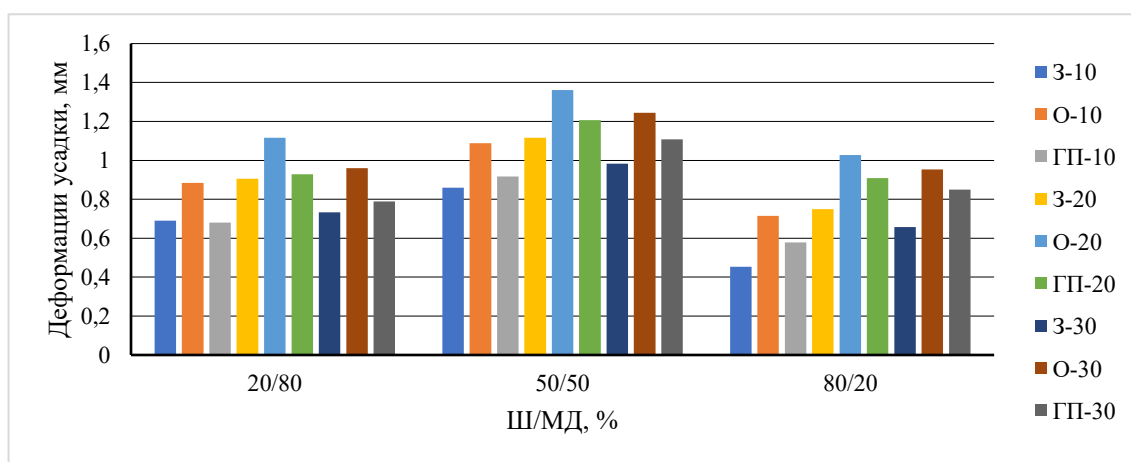


Рисунок 4.3 – Влияние дозировки и состава КМД на деформации усадки, где О, ГП, З – соответственно опока, горелая порода, зола в КМД; 80/20...20/80 – соотношение Ш/З или ГП или О

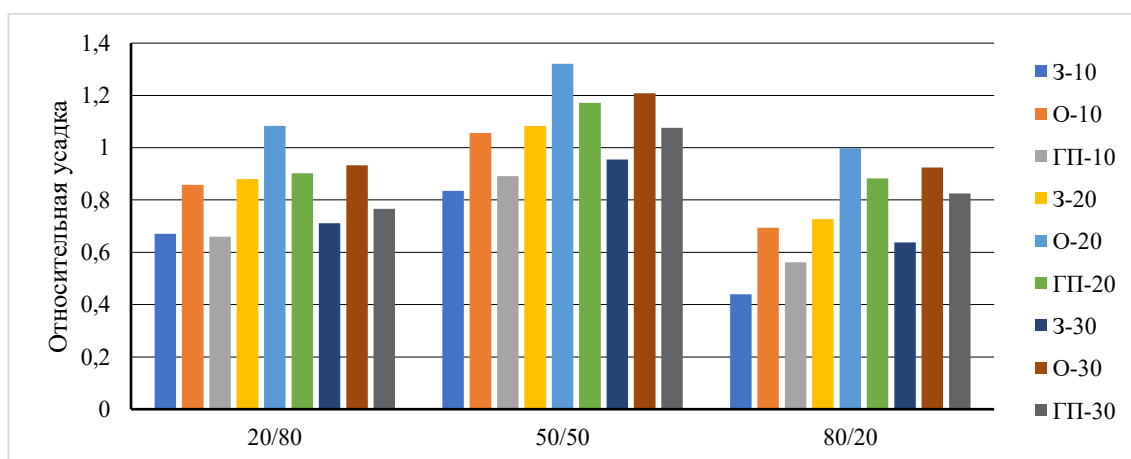


Рисунок 4.4 – Влияние дозировки и состава КМД на относительную усадку, где О, ГП, З – соответственно опока, горелая порода, зола в КМД; 80/20...20/80 – соотношение Ш/З или ГП или О

Из представленных на рисунках 4.3, 4.4 данных очевидно, что:

- максимальное снижение усадочных деформаций во втором этапе исследований составило более 50% относительно эталонного состава МЗБ без КМД;

- влияние КМД на усадочные деформации зависит как от дозировки, так и от состава КМД, при этом КМД способствует снижению величины деформаций усадки;

- значительная часть исследованных МЗБ, особенно при соотношении Ш/МД = 20/80 и 80/20% характеризуются величиной деформации усадки не более 1 мм/м.

По данным рисунков 4.1 – 4.4 очевидно, что рецептурные факторы оказывают влияние не только на численные значения деформаций усадки, но и на кинетику деформаций. На рисунке 4.5 показано, например, влияние дозировки КМД при соотношении Ш/МД = 50%/50% на развитие усадочных деформаций во времени для первого этапа экспериментальных исследований.

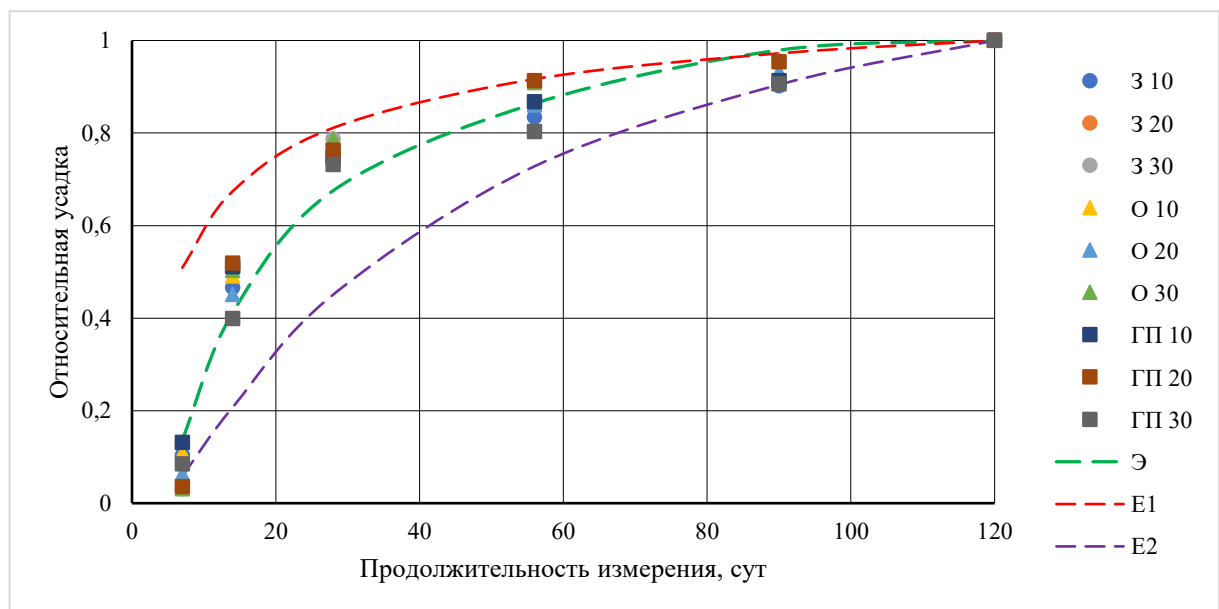


Рисунок 4.5 – Влияние дозировки и состава КМД на развитие усадочных деформаций, где Э – бездобавочный эталон; О, ГП, З – соответственно опока, горелая порода, зола в КМД; 10 – 30 – дозировка КМД

Из представленных на рисунке 4.5 результатов очевидно, что МЗБ, содержащие КМД, характеризуются более быстрым темпом развития усадочных деформаций в возрасте до 28 сут в сравнении с не содержащим КМД эталонным МЗБ, далее различие уменьшается. В принципе, развитие усадочных деформаций МЗБ во времени может быть описано уравнениями вида:

$$\frac{\varepsilon_{sh,\tau}}{\varepsilon_{sh,120}} = a \ln(\tau) + b, \quad (4.1)$$

параметры которых представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры уравнения формулы (4.1)

Зависимость	Параметры уравнения формулы (4.1)		
	a	b	$R^2 *$
Средняя для составов с КМД	0,3	-0,38	0,92
Максимум для составов с КМД	0,29	-0,31	0,92
Минимум для составов с КМД	0,32	-0,48	0,94
Эталон	0,31	-0,41	0,98

Но такая информация не дает представления о кинетике усадочных деформаций, поэтому на рисунке 4.5 приведены зависимости [166] вида:

$$\frac{\varepsilon_{sh,\tau}}{\varepsilon_{sh,120}} = \exp \left(k \left(1 - \left(\frac{120}{\tau} \right)^x \right) \right), \quad (4.2)$$

где значения k соответственно 0,15 для Е1 (быстропротекающая усадка) и 0,45 для Е2 (медленнопротекающая усадка), x соответственно 0,6 и 0,7.

Быстрое развитие усадочных деформаций в ранний период является неблагоприятным фактором с точки зрения обеспечения усадочной трещиностойкости.

На рисунке 4.6 показано влияние дозировки и состава КМД на развитие усадочных деформаций во времени для второго этапа экспериментальных исследований.

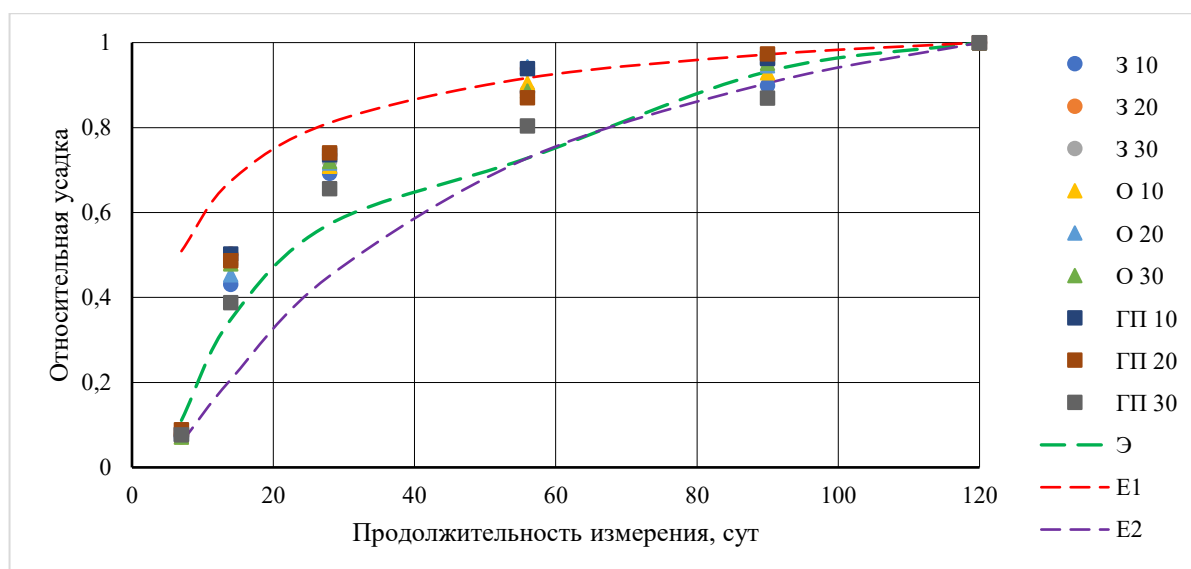


Рисунок 4.6 – Влияние дозировки и состава КМД на развитие усадочных деформаций, где Э – эталон; О, ГП, З – соответственно опока, горелая порода, зола в КМД; 10 – 30 – дозировка КМД

Из представленных на рисунке 4.6 результатов очевидно, что, как и при первом этапе исследований, МЗБ, содержащие КМД, характеризуются более быстрым темпом развития усадочных деформаций в возрасте до 28 и даже до 56 сут в сравнении с не содержащим КМД эталонным МЗБ, далее различие уменьшается. Как и для первого этапа, быстрое развитие усадочных деформаций в ранний период является неблагоприятным фактором с точки зрения обеспечения усадочной трещиностойкости. Развитие усадочных деформаций МЗБ второго этапа исследований может быть описано уравнениями формулы (4.1), параметры которых представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры уравнения формулы (4.1)

Зависимость	Параметры уравнения формулы (4.2)		
	a	b	$R^2 *$
Средняя для составов с КМД	0,31	-0,42	0,94
Максимум для составов с КМД	0,32	-0,39	0,93
Минимум для составов с КМД	0,31	-0,46	0,97
Эталон	0,31	-0,48	0,99

На рисунке 4.7 показано влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 14 сут относительно эталонного МЗБ без КМД.

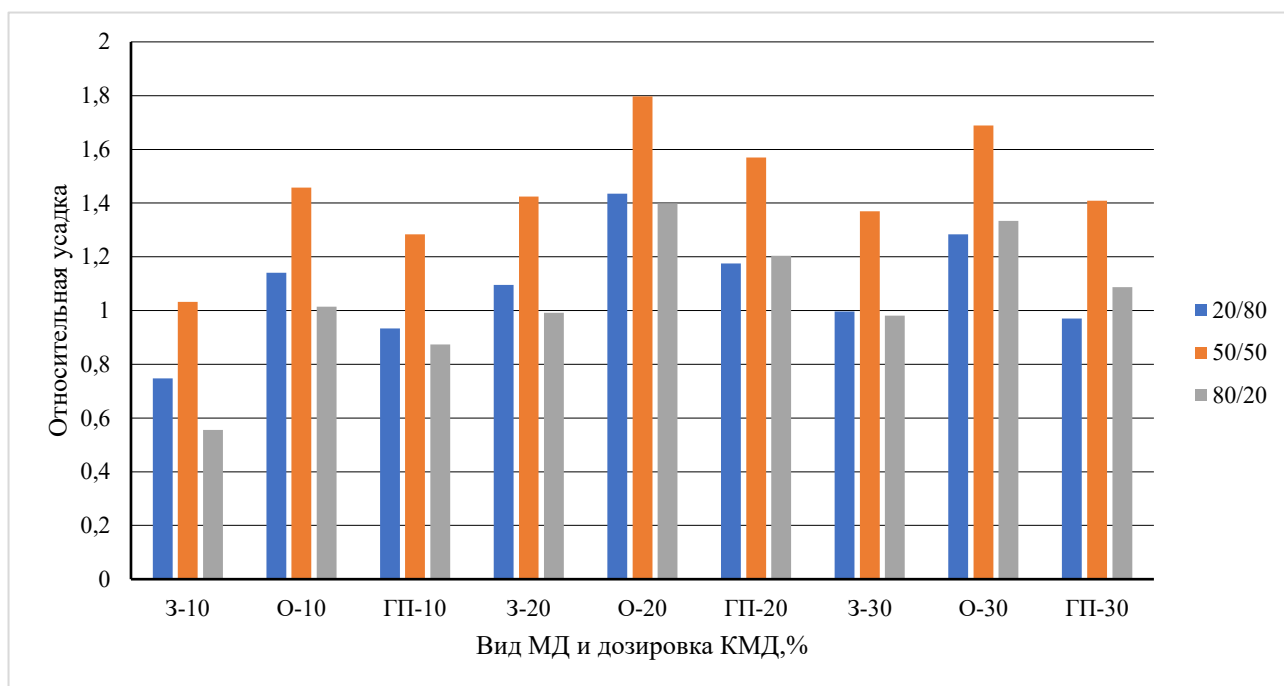


Рисунок 4.7 – Влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 14 сут относительно эталонного МЗБ без КМД, где 20/80...80/20 – соотношение Ш/МД в составе КМД; 3,О,ГП – зола, опока, горелая порода в составе КМД; 10...30 – дозировка КМД, %

Очевидно, что в возрасте 14 сут усадочные деформации, не превышающие значения усадочных деформаций эталонного МЗБ без КМД, в основном имеют место у составов, содержащих в качестве МД золу – уноса, предпочтительно при соотношении Ш/МД, отличном от 50/50%.

На рисунке 4.8 показано влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 28 сут относительно эталонного МЗБ без КМД.

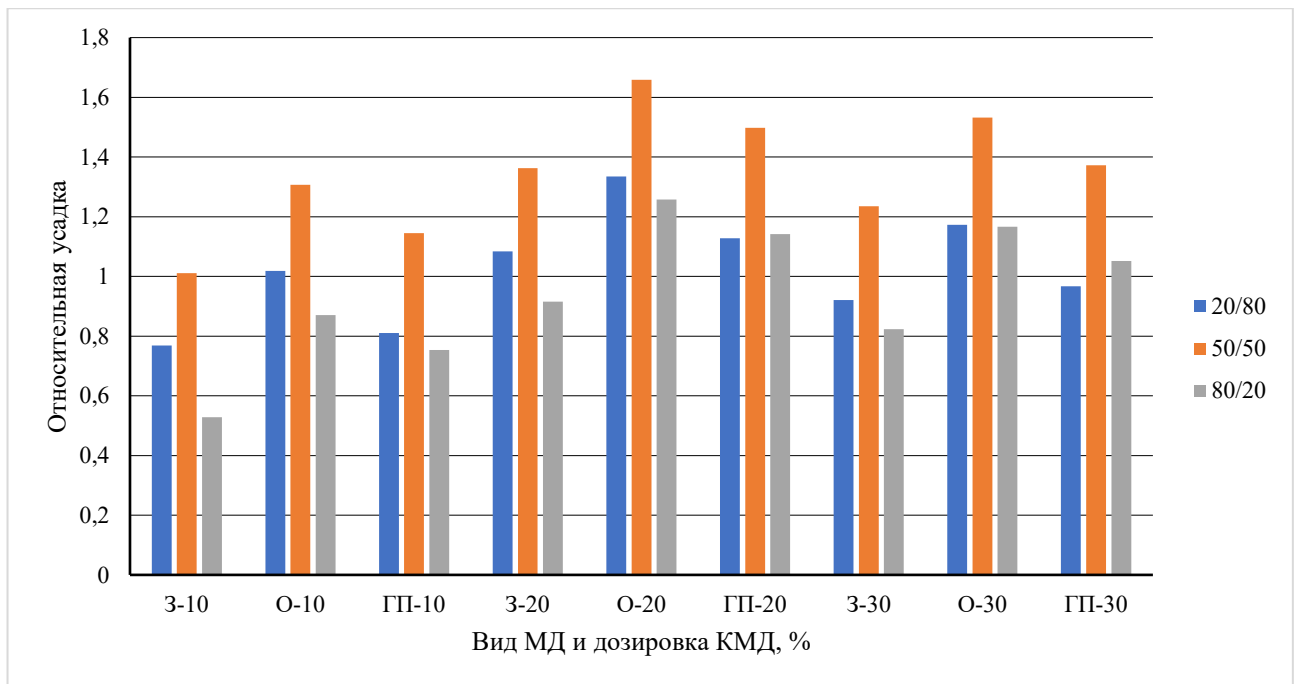


Рисунок 4.8 – Влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 28 сут относительно бездобавочного эталона, где 20/80...80/20 – соотношение Ш/МД в составе КМД; 3,О,ГП – зола, опока, горелая порода в составе КМД; 10...30 – дозировка КМД, %

Очевидно, что в возрасте 28 сут усадочные деформации, не превышающие значения усадочных деформаций эталонного МЗБ без КМД, так же, как и в 14 сут, в основном имеют место у составов, содержащих в качестве МД золу – уноса, предпочтительно при соотношении Ш/МД, отличном от 50/50%. Значения деформаций усадки менее эталона также имеют место в составах с опокой либо горелой породой при дозировке КМД 10% и 30% в составах с ГП при соотношении Ш/МД, отличном от 50/50%.

На рисунке 4.9 показано влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 56 сут относительно эталонного МЗБ без КМД.

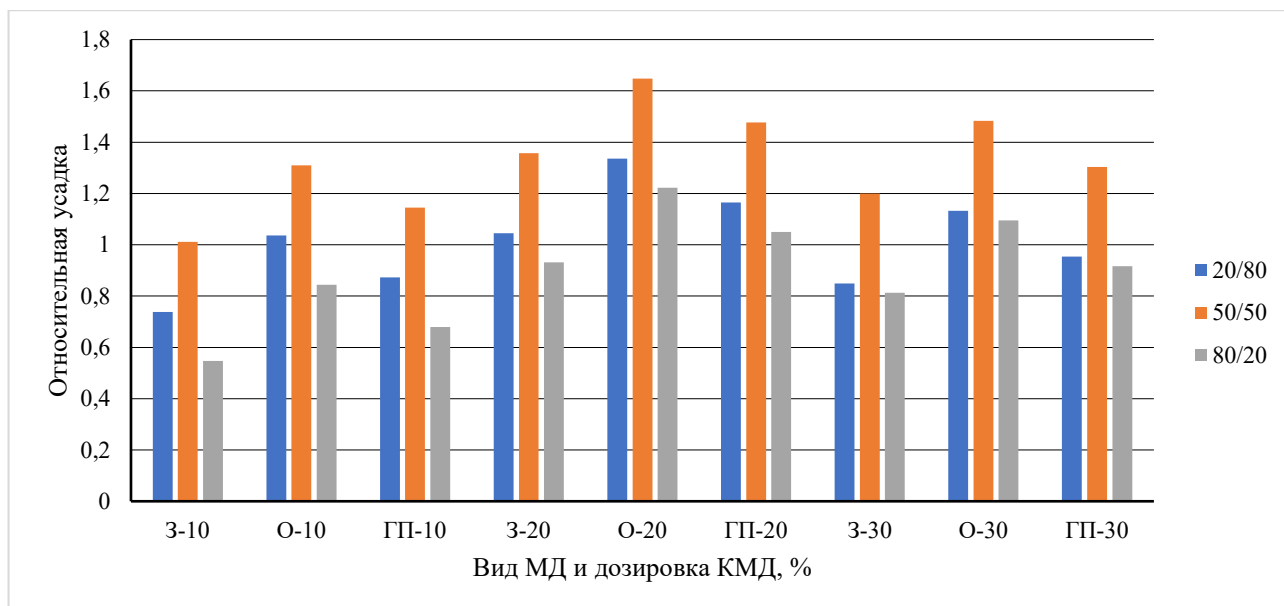


Рисунок 4.9 – Влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 56 сут относительно эталонного МЗБ без КМД, где 20/80...80/20 – соотношение Ш/МД в составе КМД; 3,О,ГП – зола, опока, горелая порода в составе КМД; 10...30 – дозировка КМД, %

Очевидно, что в возрасте 56 сут усадочные деформации, не превышающие значения усадочных деформаций эталонного МЗБ без КМД, в основном имеют место у составов, содержащих в качестве МД золу – уноса, предпочтительно при соотношении Ш/МД, отличном от 50/50%, и так же в составах, с опоккой либо горелой породой при дозировке КМД 10% и 30% в составах с ГП при соотношении Ш/МД, отличном от 50/50%.

На рисунке 4.10 показано влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 120 сут относительно эталонного МЗБ без КМД.

В возрасте 120 сут практически все МЗБ при соотношении Ш/МД = 20/80% либо Ш/МД = 80/20% независимо от вида КМД имеют деформации усадки не более эталонного МЗБ без КМД.

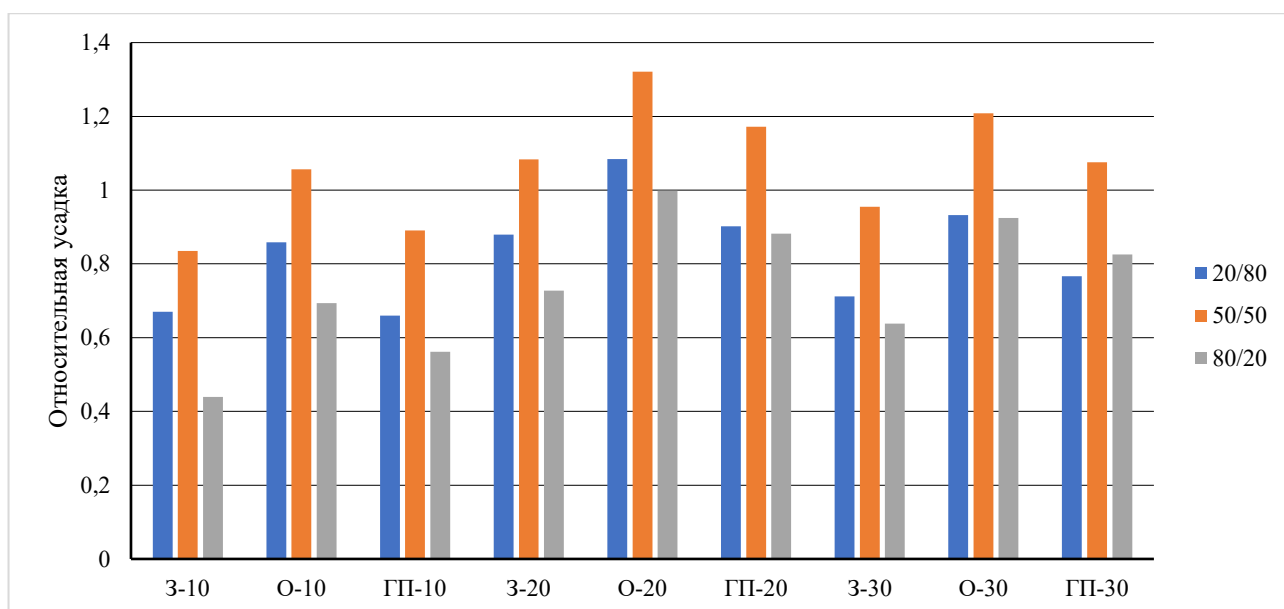


Рисунок 4.10 – Влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на усадочные деформации МЗБ в возрасте 120 сут относительно эталонного МЗБ без КМД, где 20/80...80/20 – соотношение Ш/МД в составе КМД; З,О,ГП – зола, опока, горелая порода в составе КМД; 10...30 – дозировка КМД, %

Далее в качестве одного из приемов для прогноза интегрального влияния вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на изменение свойств МЗБ при длительном выдерживании в воздушно-сухих условиях используем условный показатель усадочной трещиностойкости [139] в виде:

$$k_{crc} = \frac{d \cdot E \cdot \varepsilon_{sh}}{(1 + \varphi) R_f}, \quad (4.3)$$

где d – коэффициент, учитывающий долю не проявившейся усадки, принято $d = 1$;

E – модуль упругости МЗБ, МПа;

φ – коэффициент ползучести, принято $\varphi = 0$;

ε_{sh} – деформации усадки;

R_f – предел прочности при изгибе, МПа.

Физический смысл показателя заключается в том, что он численно равен уровню напряжений от не проявившейся усадки. Поскольку, как известно, внутрискруктурные напряжения оказывают неблагоприятное влияние на формирование структуры и свойств цементного камня (МЗБ, СР), данный

показатель может быть информативен при определении, например, рациональных дозировок и составов КМД по критерию усадочной трещиностойкости.

На рисунке 4.11 показано влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости МЗБ в возрасте 28 сут относительно эталонного МЗБ без КМД.

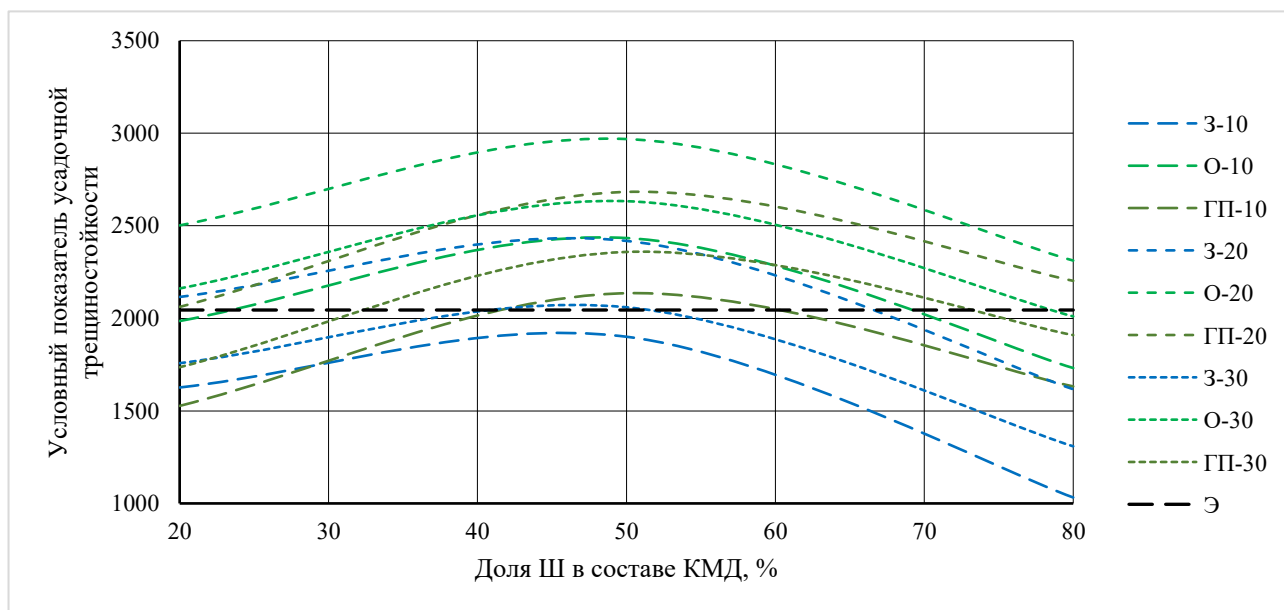


Рисунок 4.11 – Влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости МЗБ в возрасте 28 сут относительно бездобавочного эталона, где З,О,ГП – зола, опока, горелая порода в составе КМД; 10...30 – дозировка КМД,%; Э – эталонный МЗБ без КМД

Представленные на рисунке 4.11 результаты показывают, что в возрасте 28 сут по критерию формулы (4.3) предпочтение следует отдать составам, содержащим в качестве МД золу либо горелую породу при дозировке КМД 10% либо 30 % и содержании Ш в составе КМД до 40% либо более 60%.

На рисунке 4.12 показано влияние вида МД и соотношения Ш/МД при различных дозировках КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости МЗБ в возрасте 120 сут относительно эталонного МЗБ без КМД.

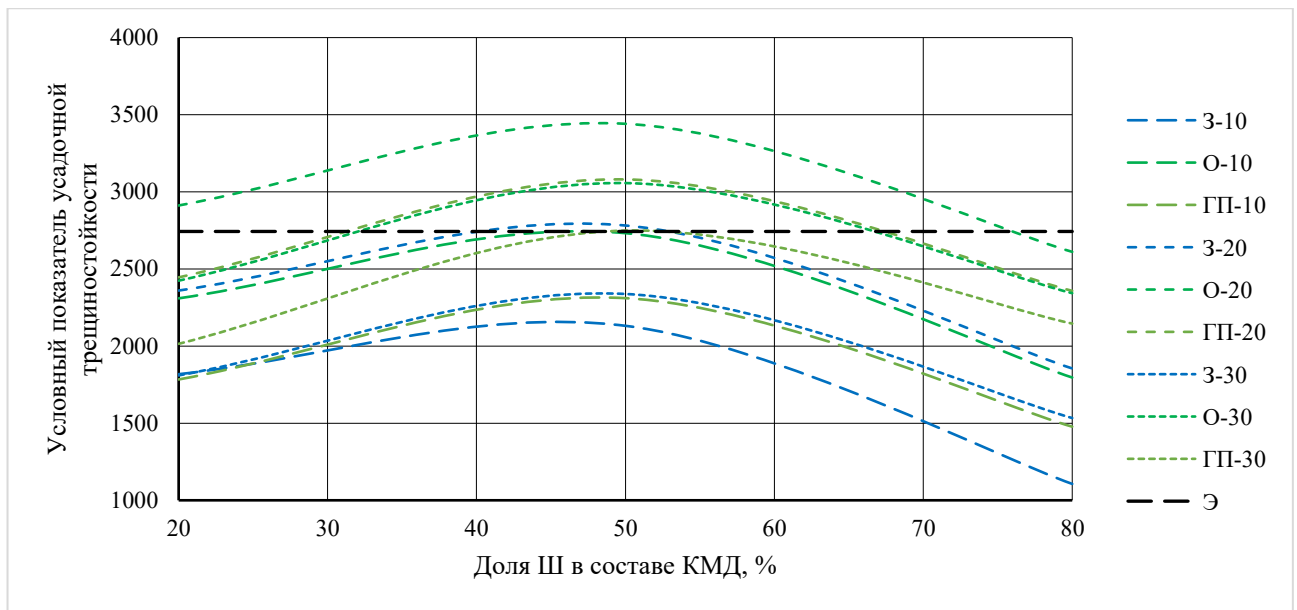


Рисунок 4.12 – Влияние вида МД и соотношения III/МД при различных дозировках КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости МЗБ в возрасте 120 сут относительно бездобавочного эталона, где З,О,ГП – зола, опока, горелая порода в составе КМД; 10...30 – дозировка КМД,%; Э – эталонный МЗБ без КМД

Представленные на рисунке 4.12 результаты показывают, что в возрасте 120 сут по критерию формулы (4.3) предпочтение следует отдать тем же составам, что и в возрасте 28 сут, и содержащим в качестве МД опоку при дозировке КМД 10 либо 30 % и содержании III в составе КМД до 30% либо более 70%.

Величина условного показателя усадочной трещиностойкости по формуле (4.3) зависит, в т.ч., от кинетики входящих в формуле (4.3) величин, а именно модуля упругости, предела прочности при изгибе и деформаций усадки. Как известно [161], кинетика усадочных деформаций определяется не только рецептурными факторами, но и, в значительной степени, параметрами окружающей среды – относительная влажность воздуха, скорость ветра, температура, условия массообмена со средой, поскольку эти факторы определяют кинетику обезвоживания МЗБ или СР. Произведена оценка влияния изменения влажностного состояния (кинетики высыхания) МЗБ на развитие усадочных деформаций при стандартных условиях испытаний по ГОСТ 24544-2020.

На рисунке 4.13 показано влияние изменения влажности образцов от максимального значения перед началом измерений деформаций усадки (условная относительная влажность МЗБ = 1) до минимального значения (условная относительная влажность МЗБ = 0) на изменение деформаций усадки МЗБ, содержащих в качестве компонента КМД золу-уноса, известная как «диаграмма Цилосани» [161], для второй серии экспериментов. Рецептурные факторы – дозировка КМД от 10 до 30% и соотношение Ш/З от 20%/80% до 80%/20%. Приведено сравнение с эталонным МЗБ без КМД.

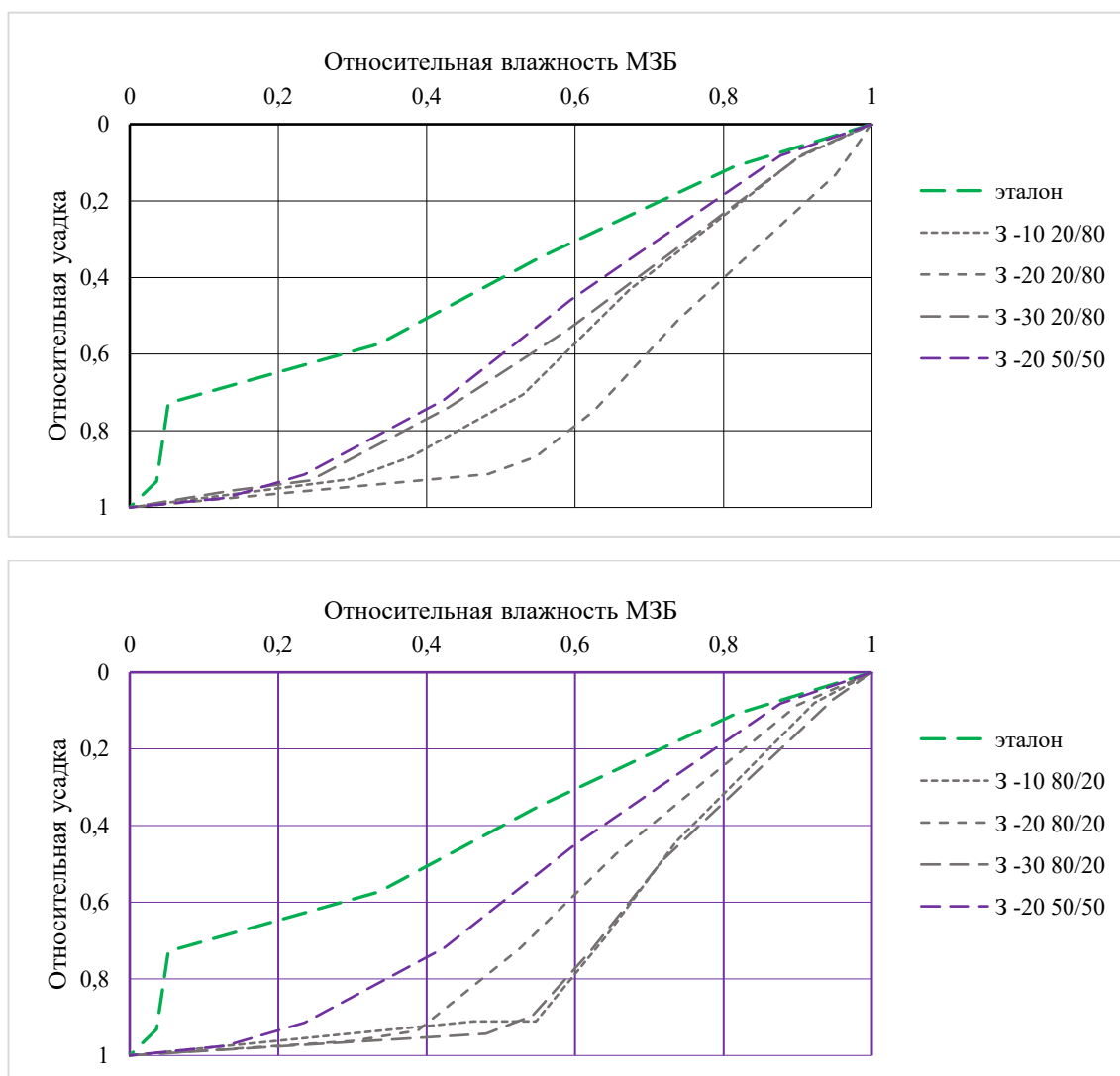


Рисунок 4.13 – Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) МЗБ на развитие усадочных деформаций, где 10,20,30 – содержание КМД; 80/20...20/80 – соотношение Ш/З

Представленные на рисунке 4.13 результаты показывают, что:

- развитие деформаций усадки содержащих КМД составов при одинаковой степени высыхания происходит значительно интенсивнее в сравнении с эталонным МЗБ без КМД, причем наиболее интенсивно процесс развивается при соотношении Ш/З = 80%/20% и дозировке КМД 10 и 30%, в меньшей степени при дозировке КМД 20% и Ш/З = 50%/50%, что связано с влиянием КМД на характер поровой структуры, определяющей кинетику обезвоживания, и кинетику формирования модуля упругости МЗБ, определяющей степень сопротивления внутренним усилиям, т.е. проявлению деформаций;

- при относительной влажности МЗБ 60% относительная усадка МЗБ изменяется от 0,3 до 0,8, интенсивное развитие деформаций усадки протекает в содержащих КМД составах при Ш/З = 20%/80% и 80%/20% до относительной влажности МЗБ 0,55 – 0,4, далее резко затухает, т.е. содержащие КМД составы являются более чувствительными к изменению

- при относительной влажности МЗБ 0,4 относительная усадка составила от 0,5 у эталонного МЗБ без КМД и до 0,75 – 0,95 у составов с КМД, из чего следует, что дозировка КМД и состав МД имеют существенное значение в плане регулирования кинетики усадочных деформаций. По данным [138] относительная усадка цементного камня без МД при аналогичной относительной влажности составила от 0,6 до 0,77.

На рисунке 4.14 показано влияние изменения влажности образцов от максимального значения перед началом измерений деформаций усадки (относительная влажность МЗБ = 1) до минимального значения (относительная влажность МЗБ = 0) на изменение деформаций усадки МЗБ, содержащих в качестве компонента КМД опоку, известная как «диаграмма Цилюсани» [161], для второй серии экспериментов. Рецептурные факторы – дозировка КМД от 10 до 30% и соотношение Ш/О от 20%/80% до 80%/20%. Приведено сравнение с эталонным МЗБ без КМД.

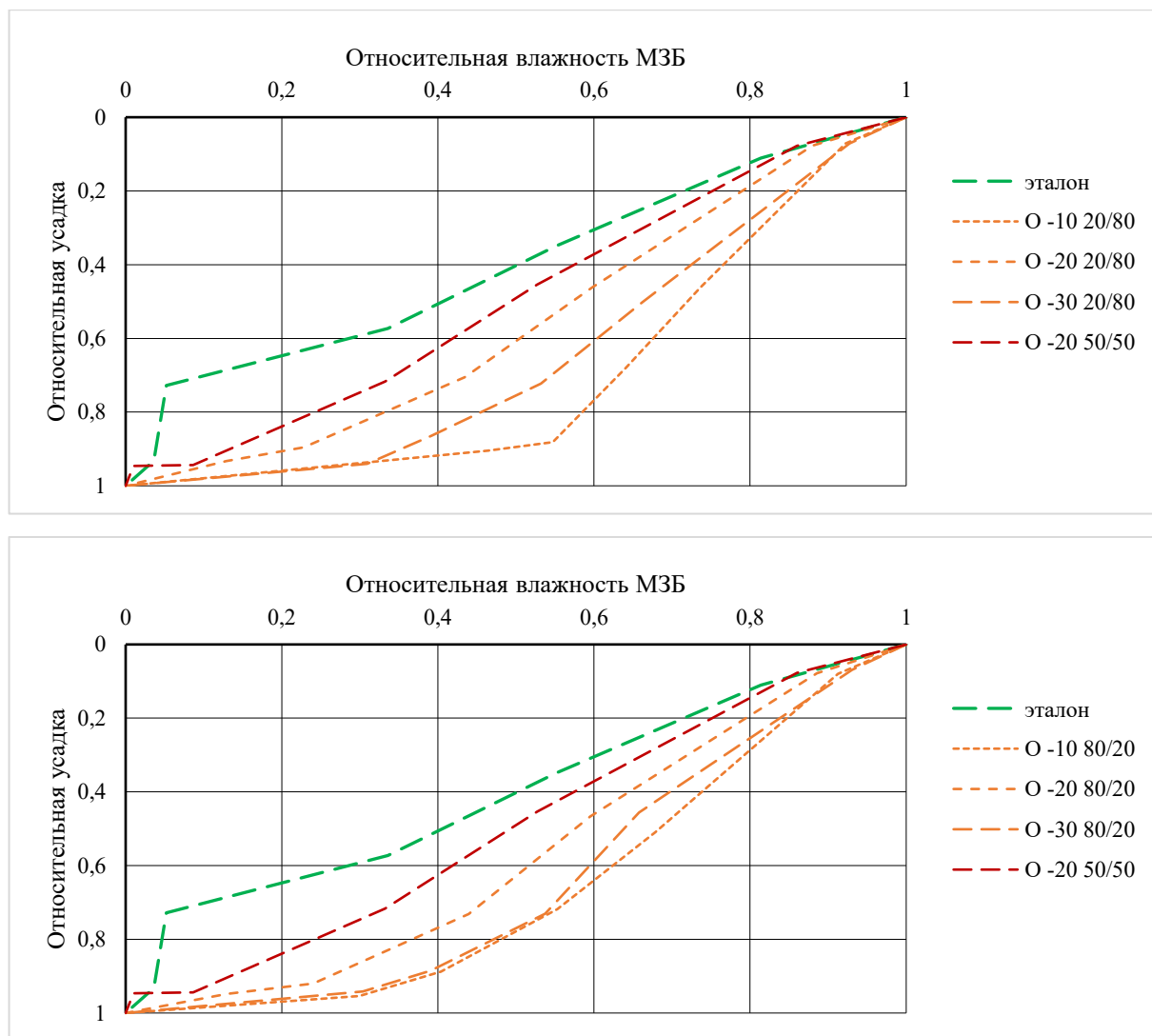


Рисунок 4.14 – Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) МЗБ на развитие усадочных деформаций, где 10,20,30 – содержание КМД; 80/20...20/80 – соотношение Ш/О

Представленные на рисунке 4.14 результаты показывают, что:

- при использовании в составе МД опоки интенсивность развития деформаций усадки содержащих КМД составов при одинаковой степени высыхания в сравнении с содержащими в качестве МД золу-уноса составами менее выражена в сравнении с эталонным МЗБ без КМД, так же как и в составах с золой-уноса наиболее интенсивно процесс развивается при соотношении Ш/О = 80%/20% и дозировке КМД 10 и 30%, в меньшей степени при дозировке КМД 20% и Ш/О = 50%/50%;

- при относительной влажности МЗБ 60% относительная усадка МЗБ изменяется от 0,3 до 0,78, интенсивное развитие деформаций усадки протекает в содержащих КМД составах при Ш/О = 20%/80% и 80%/20% до относительной влажности МЗБ 0,55 – 0,3, далее имеет место затухание, т.е. как и содержащие золу – уноса составы с опокой являются более чувствительными к изменению влажностных условий в сравнении с эталонным МЗБ без КМД;

- при относительной влажности МЗБ 0,4 относительная усадка составила от 0,5 у эталонного МЗБ без КМД и до 0,62 – 0,93 у составов с КМД, что не противоречит данным [138], согласно которым относительная усадка цементного камня без МД при аналогичной относительной влажности цементного камня составила от 0,6 до 0,77.

На рисунке 4.15 показано влияние изменения влажности исследуемых образцов МЗБ от максимального значения перед началом измерений деформаций усадки (относительная влажность МЗБ = 1) до минимального значения (относительная влажность МЗБ = 0) на изменение деформаций усадки МЗБ, содержащих в качестве компонента КМД горелую породу, известная как «диаграмма Цилосани» [161], для второй серии экспериментов. Рецептурные факторы – дозировка КМД от 10 до 30% и соотношение Ш/ГП от 20%/80% до 80%/20%. Приведено сравнение с эталонным МЗБ без КМД. Представленные на рисунке 4.15 результаты показывают, что:

- как и в случаях с золой – уноса и опокой в составе КМД развитие деформаций усадки содержащих КМД составов при одинаковой степени высыхания происходит значительно интенсивнее в сравнении с эталонным МЗБ без КМД, причем наиболее интенсивно процесс развивается при соотношении Ш/ГП = 80%/20% и дозировке КМД 10 и 30%, в меньшей степени при дозировке КМД 20% и Ш/ГП = 50%/50%, развитие усадочных деформаций в содержащих горелую породу составах более похоже на развитие деформаций в составах с золой-уноса, чем с опокой, что, безусловно, связано с особенностями химического и минералогического состава материалов;

- при относительной влажности МЗБ 60% относительная усадка МЗБ изменяется от 0,3 до 0,82, интенсивное развитие деформаций усадки протекает в содержащих КМД составах при Ш/ГП = 20%/80% и 80%/20% до относительной влажности МЗБ 0,45 – 0,3, далее имеет место затухание;

- при относительной влажности МЗБ 0,4 относительная усадка составила от 0,5 у эталонного МЗБ без КМД и до 0,77 – 0,98 у составов с КМД, из чего следует, что дозировка КМД и состав МД имеют существенное значение в плане регулирования кинетики усадочных деформаций в составах с горелой породой.

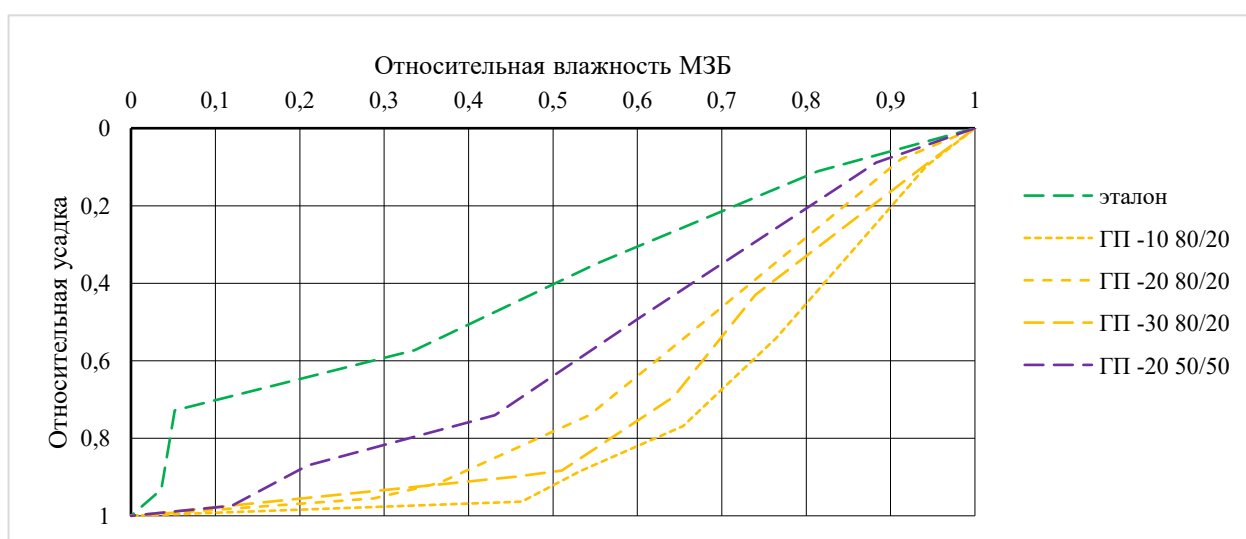
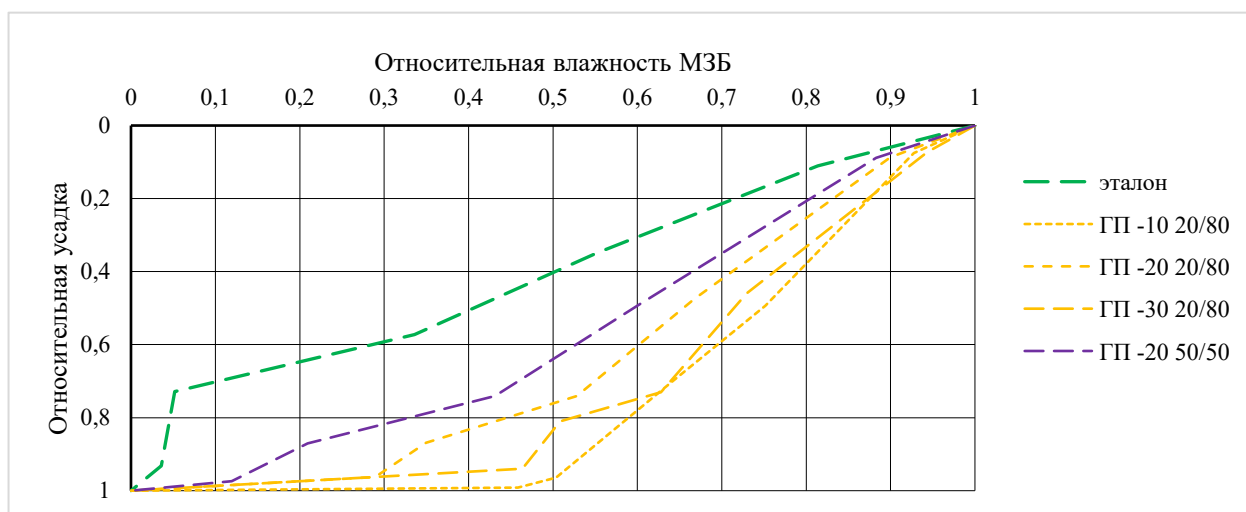


Рисунок 4.15 – Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) МЗБ на развитие усадочных деформаций, где 10,20,30 – содержание КМД; 80/20...20/80 – соотношение Ш/ГП

Таким образом, выявленное влияние дозировки и состава КМД на деформации усадки МЗБ позволяет посредством управления рецептурными факторами регулировать величину деформаций усадки МЗБ.

На рисунке 4.16 показано влияние дозировки и состава КМД на деформации усадки в возрасте 120 сут в сравнении с эталонным МЗБ без КМД по результатам второго этапа исследований.

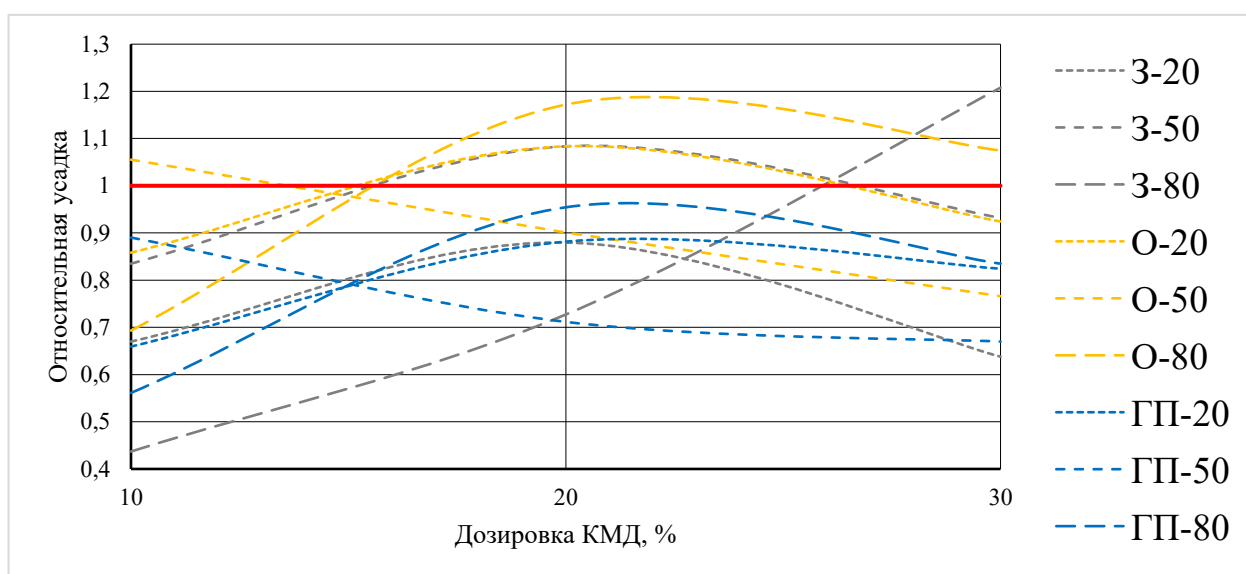


Рисунок 4.16 – Влияние дозировки и состава КМД на относительные деформации усадки в возрасте 120 сут, где З, О, ГП – соответственно зола-уноса, опока, горелая порода; 20...80 – содержание шлама в составе КМД, %

Показанная на рисунке 4.16 зависимость может быть использована с целью определения рационального состава и дозировки КМД по критерию ограничения усадочных деформаций. Влияние вида МД в составе КМД на степень снижения усадочных деформаций в первом приближении выглядит следующим образом: опока (минимальное влияние) – зола уноса – горелая порода (максимальное влияние). Это предопределило выбор вида МД для последующих третьего и четвертого этапов исследований – горелая порода была исключена по следующим соображениям:

- влияние ГП и З достаточно подобны, при этом ГП обеспечивает лучшие показатели по усадке;

- 3 является техногенным отходом, практически готовым для применения в качестве компонента ССС, тогда как ГП требует помола.

4.2. Усадочные деформации СР

На третьем и четвертом этапах экспериментальных исследований произведена оценка влияния дозировки РПП от 1 до 3% и водоудерживающей добавки в дозировке 0,3% на деформации усадки. Использован базовый состав с постоянной величиной В/Ц и постоянным расходом Ц (КМД в дозировке 20% вводилась взамен части мелкого заполнителя). В качестве МД в составе КМД использованы на третьем этапе зола – уноса, на четвертом этапе опока. Помимо усадочных деформаций произведены исследования влияния вышеуказанных факторов на морозостойкость СР и морозостойкость контактной зоны.

4.2.1 Деформации усадки СР с опокой в составе КМД

На рисунке 4.17 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/О = 50%/50% (шлам/опока) в составе КМД на развитие усадочных деформаций СР во времени для третьего этапа экспериментальных исследований. Там же приведены данные по МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/О = 50%/50%.

Влияние РПП и ВУД проявилось в следующем:

- при введении в состав МЗБ полимерных модификаторов, а именно РПП и ВУД, помимо резкого, как было показано в главе 3, снижения средней плотности МЗБ за счет воздухововлечения, обусловленного в основном введением ВУД, произошло также резкое увеличение значений деформаций усадки, как следует из данных на рис. 4.17, более чем в 2 раза;
- основное повышение деформаций усадки, от 0,83 до 1,82 мм/м обусловлено присутствием в составе ВУД, РПП

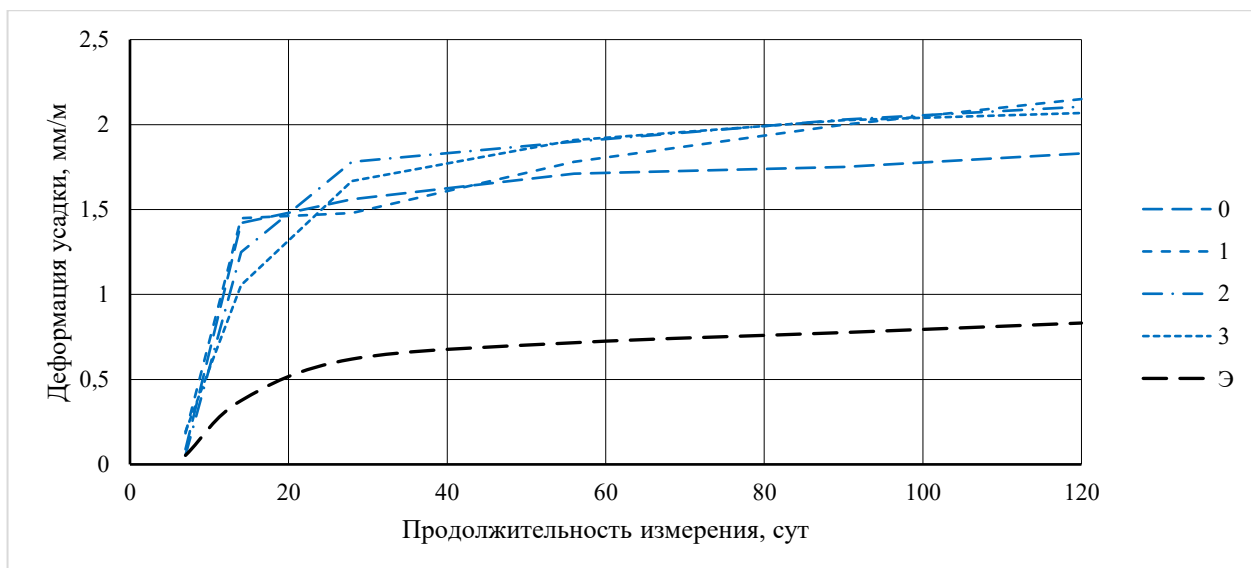


Рисунок 4.17 – Влияние дозировки РПП на развитие усадочных деформаций СР с опокой в составе КМД, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/О = 50%/50%

На рисунке 4.18 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/О = 50%/50% (шлам/опока) в составе КМД на развитие усадочных деформаций СР во времени для третьего этапа экспериментальных исследований относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/О = 50%/50%.

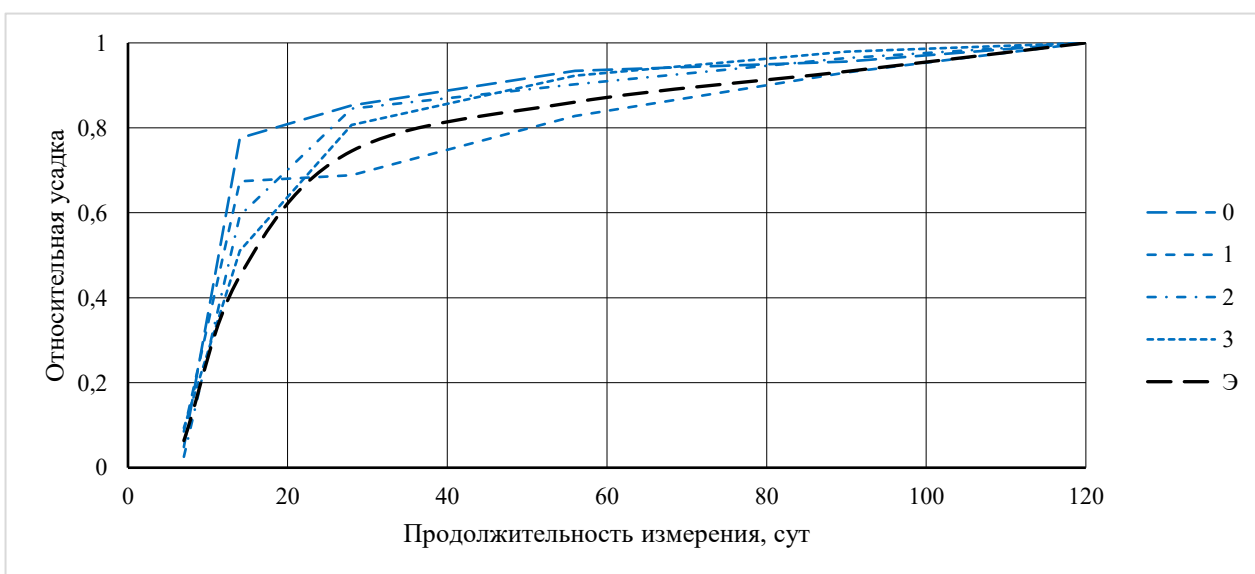


Рисунок 4.18 – Влияние дозировки РПП на развитие усадочных деформаций СР с опокой в составе КМД относительно МЗБ, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/О = 50%/50%

Влияние РПП и ВУД на развитие усадочных деформаций СР во времени относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/О = 50%/50% проявилось в следующем:

- при введении ВУД в состав МЗБ имеет место резкий рост интенсивности развития деформаций усадки в первые 14 сут, в т.ч. при введении РПП в дозировке 1%;

- при введении РПП в состав МЗБ с дозировкой 2 и 3 % имеет место замедление развития деформаций усадки после 14 сут в сравнении с эталонным МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/О = 50%/50%.

На рисунке 4.19 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% (шлам/зола) в составе КМД на кинетику обезвоживания (высыхания) СР для третьего этапа экспериментальных исследований. Там же приведены данные эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50%.

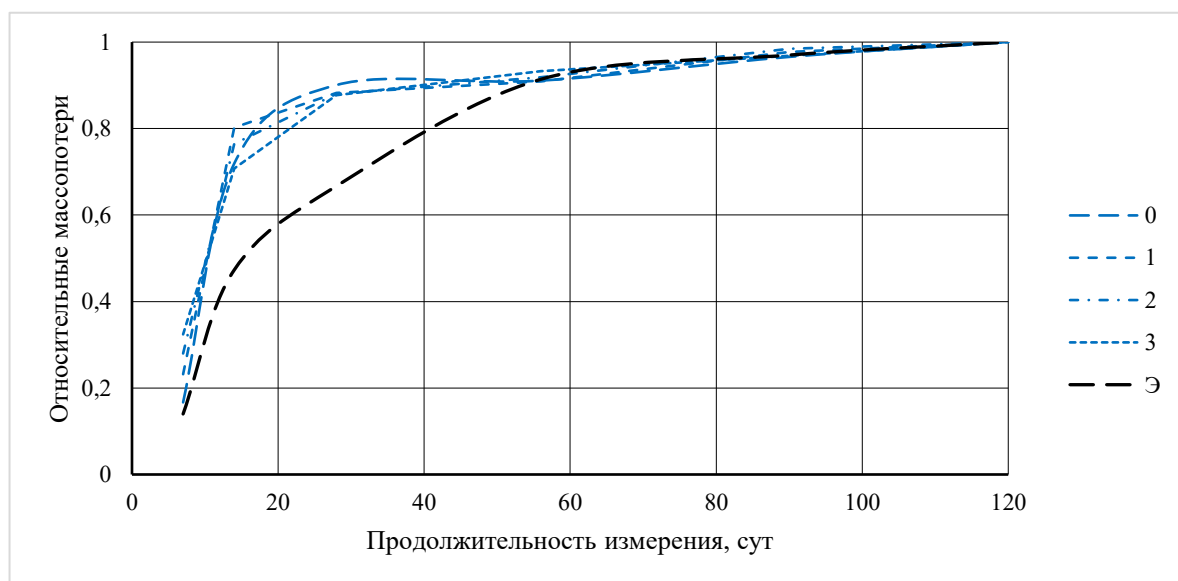


Рисунок 4.19 – Изменение влажностного состояния (высыхание) во времени СР с опокой в составе КМД, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/З = 50%/50%

Влияние РПП и ВУД на кинетику обезвоживания СР относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/О = 50%/50% проявилось в следующем:

- имеет место резкий рост интенсивности обезвоживания в первые 14 сут, причем рецептурные факторы практически не влияют на протекание процесса, что связано с изменением характера пористости СР при введении РПП и ВУД;

- дозировка РПП практически не влияет на кинетику обезвоживания в первые 14 сут, т.е. различие в кинетике обезвоживания в сравнении с эталонным составом без ВУД и РПП обусловлено действием ВУД.

На рисунке 4.20 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/О = 50%/50% (шлам/опока) в составе КМД на развитие усадочных деформаций СР в зависимости от кинетики обезвоживания (высыхания) для третьего этапа экспериментальных исследований. Там же приведены данные эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/О = 50%/50%.

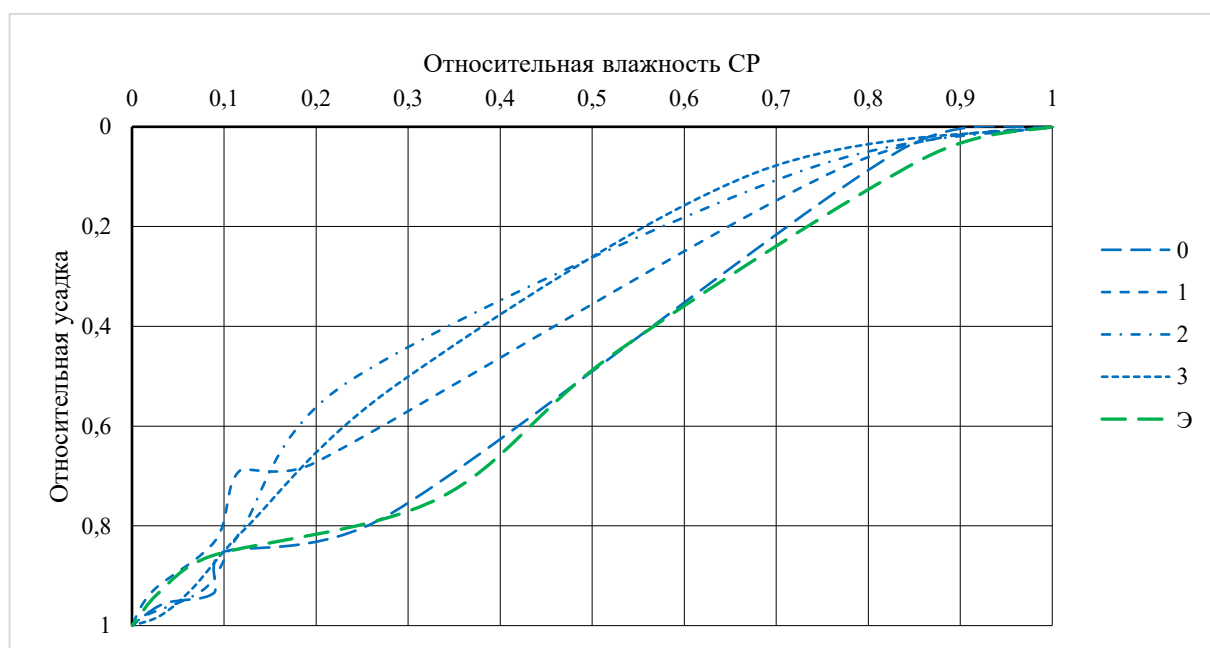


Рисунок 4.20 – Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) СР с опокой в составе КМД на развитие усадочных деформаций, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – бездобавочный эталон Ш/О = 50%/50%

Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) СР с опокой в составе КМД на развитие усадочных деформаций проявилось в следующем:

- СР без РПП характеризуется практически аналогичной с бездобавочным эталоном закономерностью изменения усадочных деформаций при высыхании образцов;

- при введении РПП в состав СР имеет место уменьшение кинетики усадочных деформаций по мере высыхания образцов, в наибольшей степени проявляющееся при дозировке РПП 2 и 3%, что связано с наличием в структуре таких СР большего количества крупных пор, испарение воды из которых практически не сопровождается деформациями усадки.

На рисунке 4.21 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/О = 50%/50% (шлам/опока) в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости по уравнению формулы (4.2) для третьего этапа экспериментальных исследований в возрасте СР 28 и 120 сут. Там же приведены данные эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/О = 50%/50%.

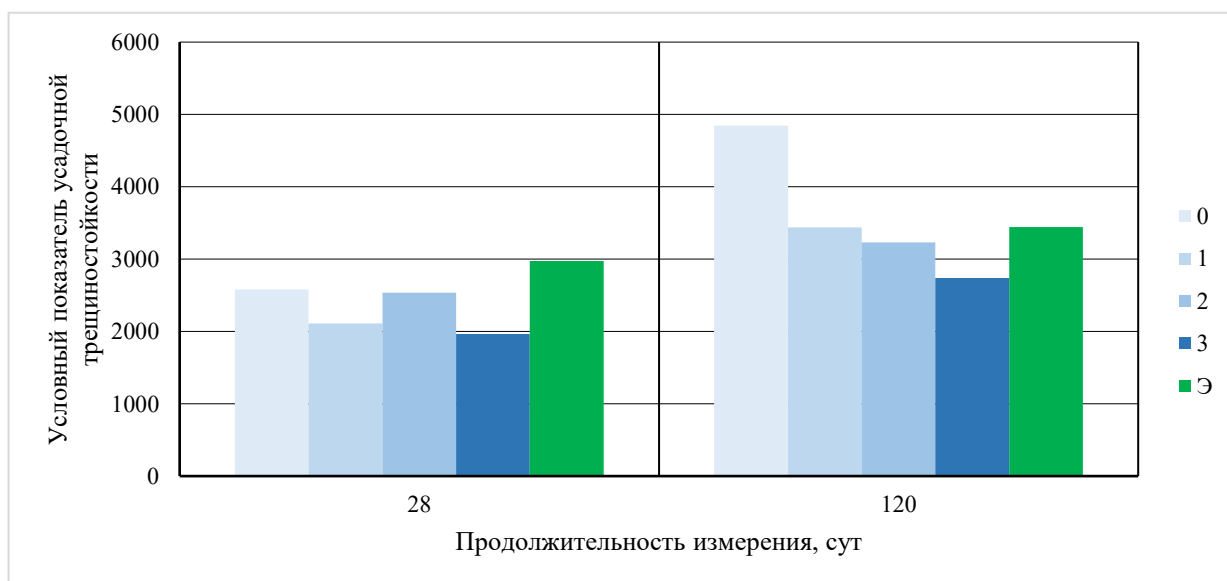


Рисунок 4.21 – Влияние дозировки РПП при соотношении Ш/О = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с КМД = 20% и Ш/О = 50%/50%

Влияние дозировки РПП при соотношении Ш/О = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости проявляется в следующем:

- независимо от дозировки РПП и возраста определения условного показателя усадочной трещиностойкости его значение не превышает показателя эталонного МЗБ без РПП и ВУД;

- в возрасте 120 сут в составе без РПП значение условного показателя усадочной трещиностойкости превышает значение показателя эталонного МЗБ, что наглядно демонстрирует положительное влияние РПП на усадочную трещиностойкость при длительном выдерживании в воздушно-сухих условиях.

4.2.2 Деформации усадки СР с золой-уноса в составе КМД

На рисунке 4.22 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% (шлам/зола) в составе КМД на развитие усадочных деформаций СР во времени для четвертого этапа экспериментальных исследований. Там же приведены данные по МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50%.

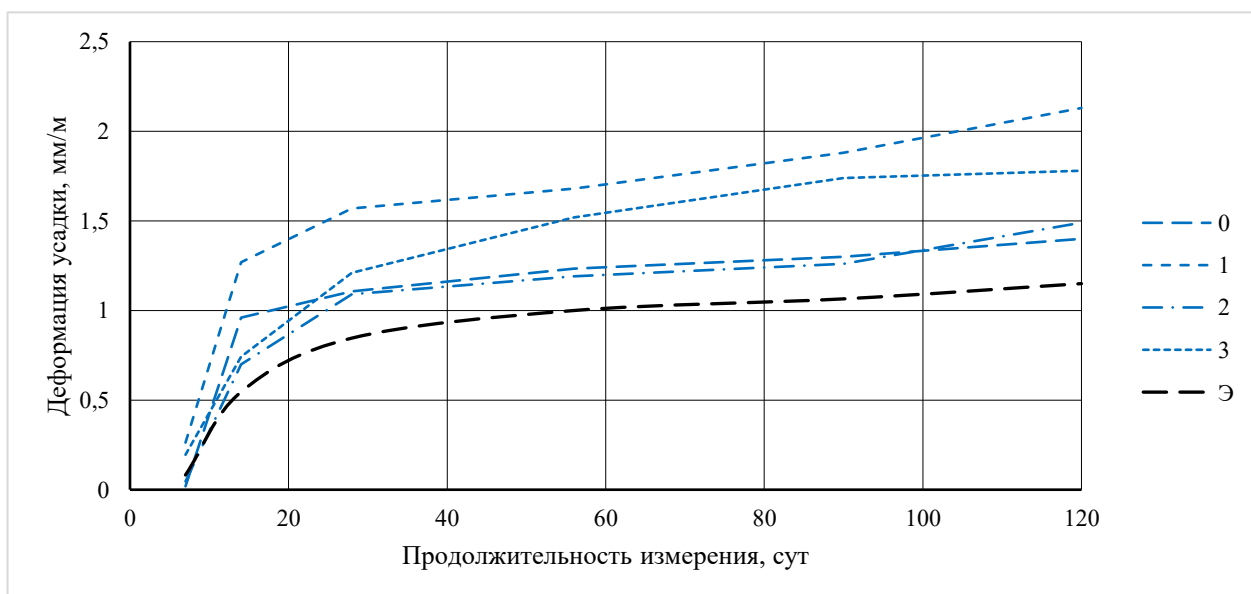


Рисунок 4.22 – Влияние дозировки РПП на развитие усадочных деформаций СР с золой-уноса в составе КМД, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/З = 50%/50%

Влияние РПП и ВУД на кинетику обезвоживания СР относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50% проявилось в следующем:

- имеет место резкий рост интенсивности обезвоживания в первые 14 сут в составе без РПП и при дозировке РПП 1%, при дозировке РПП 2 и 3% интенсивность обезвоживания значительно менее выражена;
- при дозировке РПП 2 и 3% после 28 сут интенсивность обезвоживания в значительно меньшей степени отличается от эталонного МЗБ в сравнении с содержащими опоку составами.

На рисунке 4.23 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% в составе КМД на развитие усадочных деформаций СР во времени для четвертого этапа экспериментальных исследований относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50%.

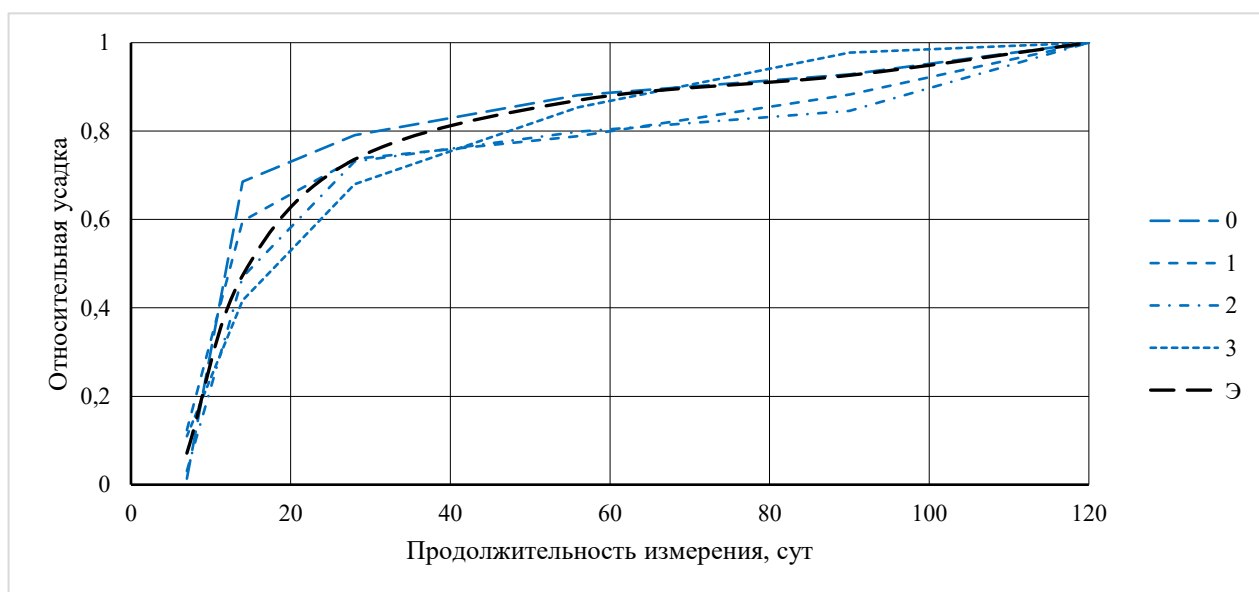


Рисунок 4.23 – Влияние дозировки РПП на развитие усадочных деформаций СР с золой-уноса в составе КМД относительно МЗБ, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/З = 50%/50%

Влияние РПП и ВУД на развитие усадочных деформаций СР во времени относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50% проявилось в следующем:

- при введении ВУД в состав МЗБ имеет место резкий рост интенсивности развития деформаций усадки в первые 14 сут, в т.ч. при введении РПП в дозировке 1%, что аналогично поведению составов с опокой;

- при введении РПП в состав МЗБ с дозировкой 2 и 3 % развитие деформаций усадки до 14 сут аналогично эталонному МЗБ, а после 14 сут имеет место замедление развития деформаций усадки в сравнении с эталонным МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/З = 50%/50%, особенно при дозировке РПП 3%.

На рисунке 4.24 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% в составе КМД на кинетику обезвоживания (высыхания) СР для третьего этапа экспериментальных исследований. Там же приведены данные эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50%.

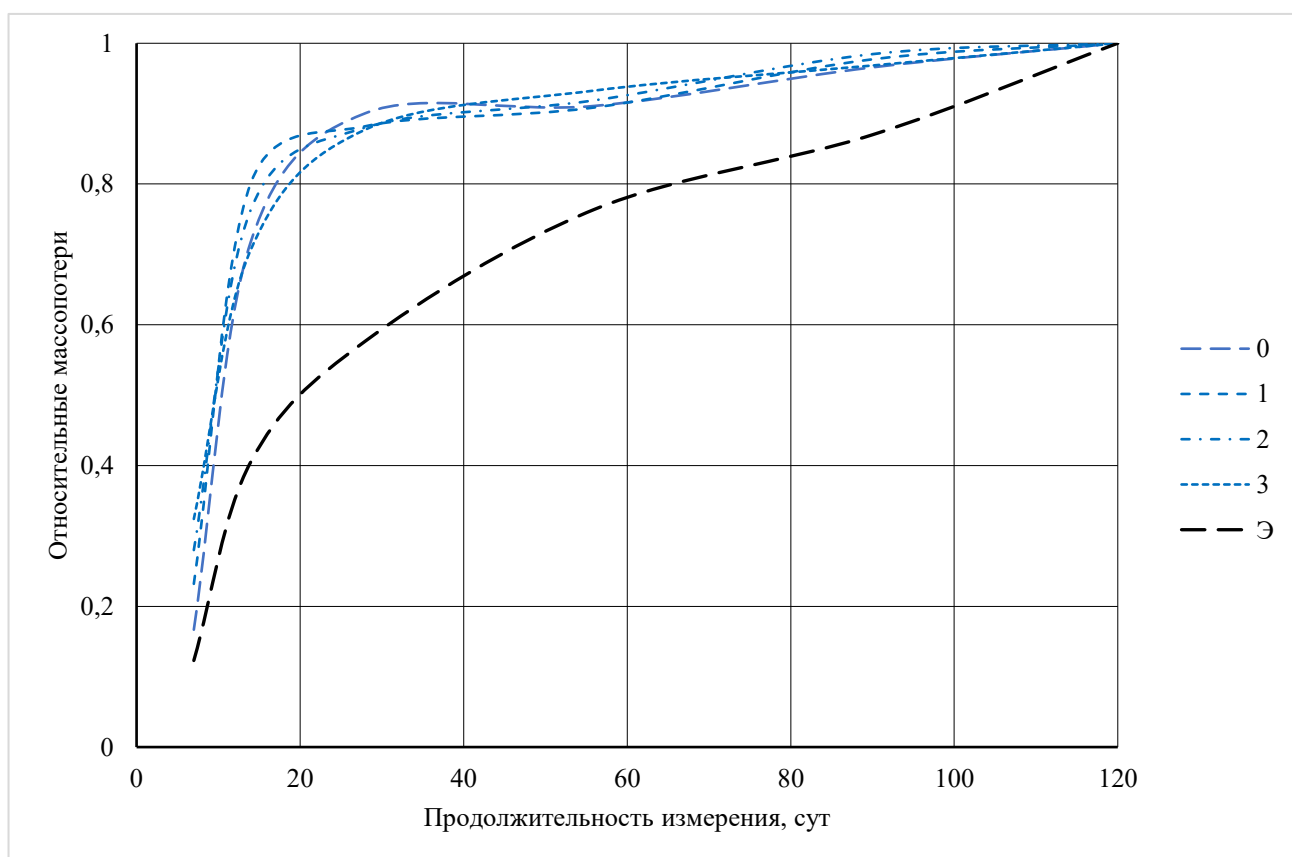


Рисунок 4.24 – Изменение влажностного состояния (высыхание) во времени СР с золой-уноса в составе КМД, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с дозировкой КМД 20% при Ш/З = 50%/50%

Влияние РПП и ВУД на кинетику обезвоживания СР относительно МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50% проявилось в следующем:

- имеет место резкий рост интенсивности обезвоживания в первые три недели, причем, как и в составах с опокой, рецептурные факторы практически не влияют на протекание процесса, что связано, как уже отмечалось, с изменением характера пористости СР при введении РПП и ВУД;

- дозировка РПП практически не влияет на кинетику обезвоживания в первые три недели, т.е. различие в кинетике обезвоживания в сравнении с эталонным составом без ВУД и РПП обусловлено, как и в составах с опокой, действием ВУД.

На рисунке 4.25 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% в составе КМД на развитие усадочных деформаций СР в зависимости от кинетики обезвоживания (высыхания) для третьего этапа экспериментальных исследований. Там же приведены данные эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50%.

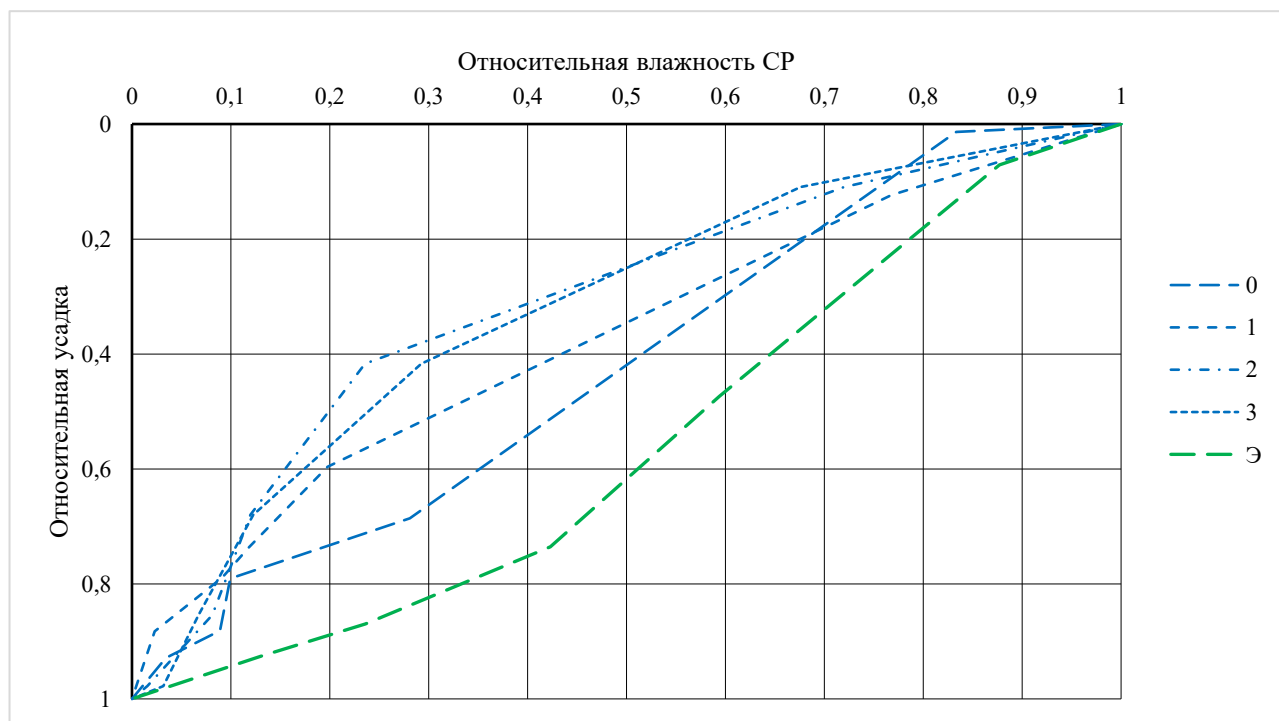


Рисунок 4.25 – Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) СР с опокой в составе КМД на развитие усадочных деформаций, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – бездобавочный эталон Ш/З = 50%/50%

Влияние изменения влажностного состояния (высыхания) СР с опокой в составе КМД на развитие усадочных деформаций проявилось в следующем:

- СР без РПП имеет отличную от бездобавочного эталона закономерность изменения усадочных деформаций при высыхании образцов, в отличие от составов с опокой, что свидетельствует о некотором отличии влияния опоки и золы-уноса на параметры поровой структуры;

- при введении РПП в состав СР имеет место, как и в составах с опокой, уменьшение кинетики усадочных деформаций по мере высыхания образцов, в наибольшей степени проявляющееся при дозировке РПП 2 и 3%, что связано с наличием в структуре таких СР большего количества крупных пор, испарение воды из которых практически не сопровождается деформациями усадки.

На рисунке 4.32 показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости по уравнению формулы (4.2) для четвертого этапа экспериментальных исследований в возрасте СР 28 и 120 сут. Там же приведены данные эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З = 50%/50%.

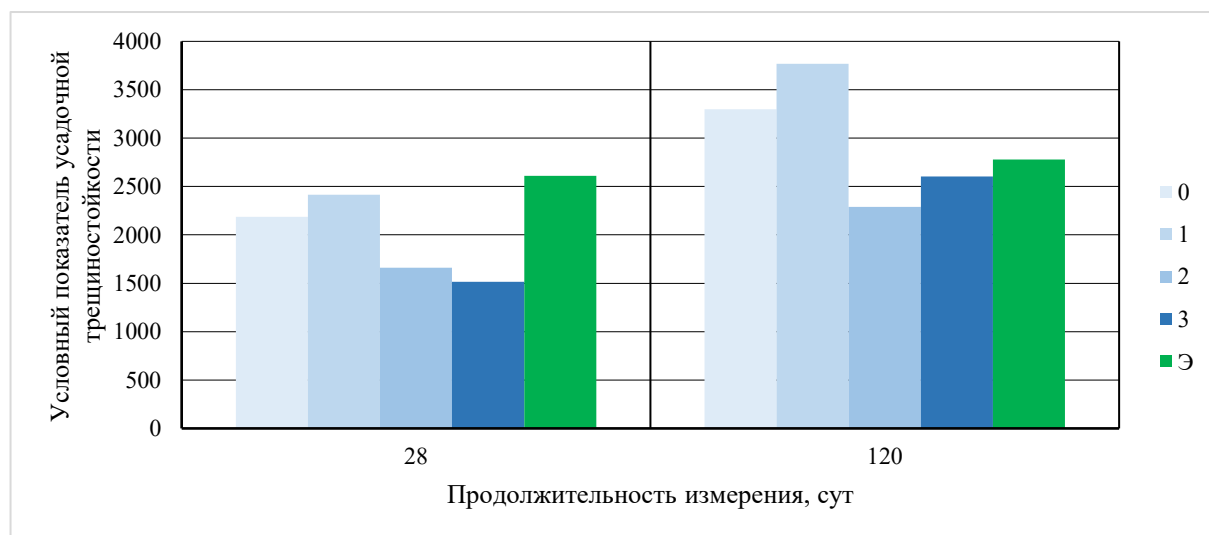


Рисунок 4.26 – Влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с КМД = 20% и Ш/З = 50%/50%

Влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости проявляется в следующем:

- независимо от дозировки РПП в возрасте 28 сут условный показатель усадочной трещиностойкости не превышает показатель эталонного МЗБ без РПП и ВУД, причем при дозировке РПП 2 и 3% снижение показателя относительно эталона больше, чем в составах с опокой;

- в возрасте 120 сут в составе без РПП и при дозировке РПП 1% значение условного показателя усадочной трещиностойкости превышает значение показателя эталонного МЗБ, а при дозировке 2 и 3% не превышает и несколько ниже показателей в составах с опокой, что наглядно представлено на рисунке 4.27.

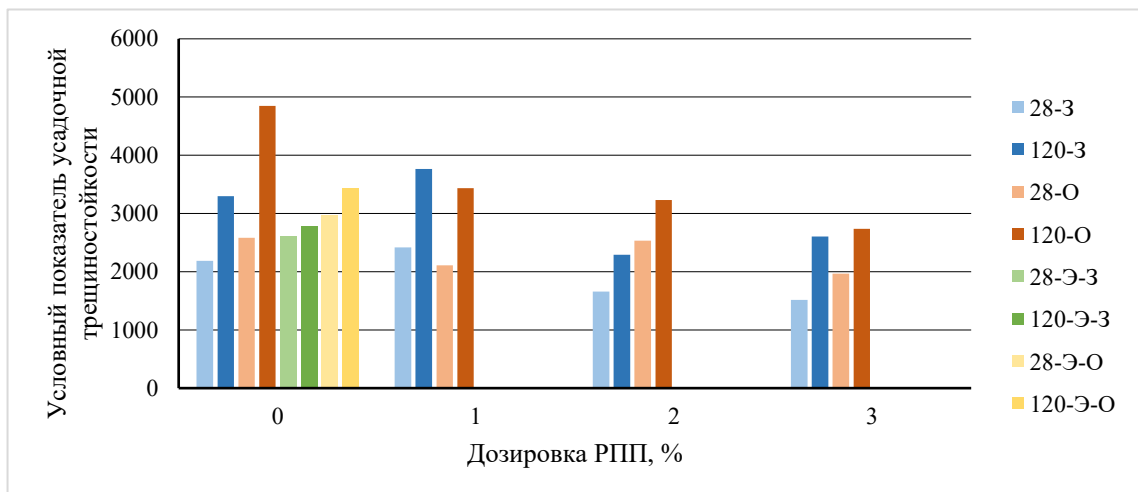


Рисунок 4.27 – Влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З или Ш/О = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; Э – эталонный МЗБ с КМД = 20% и Ш/З или Ш/О = 50%/50%; 28,120 – возраст СР

На рисунке 4.28 для удобства анализа показано влияние дозировки РПП при соотношении Ш/З и Ш/О = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости по уравнению формулы (4.2) для третьего этапа экспериментальных исследований в возрасте СР 28 и 120 сут относительно эталонного МЗБ с дозировкой КМД 20% и соотношением Ш/З или Ш/О = 50%/50%.

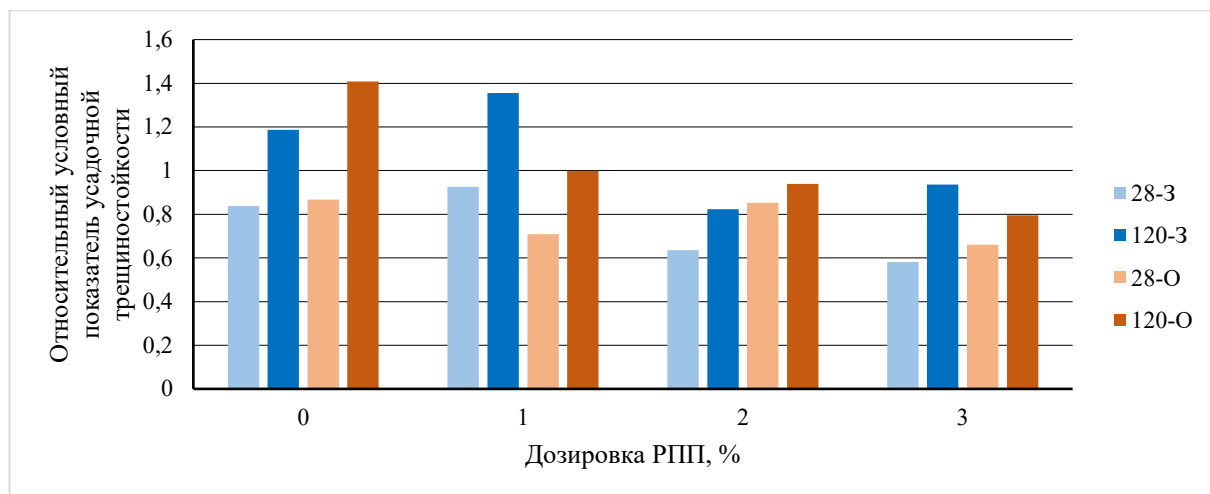


Рисунок 4.28 – Влияние дозировки РПП при соотношении Ц/З или Ш/О = 50%/50% в составе КМД на условный показатель усадочной трещиностойкости относительно эталонного МЗБ с КМД = 20% и Ш/З или Ш/О = 50%/50%; 28,120 – возраст СР

Очевидно, что при дозировке РПП 2 и 3% имеет место повышение усадочной трещиностойкости составов относительно не содержащего РПП и ВУД эталонного МЗБ, причем независимо от вида МД.

Выводы по главе 4

1. В зависимости от рецептурных факторов в первые две недели протекает от 40% до 79% усадочных деформаций МЗБ. В 120 сут значения деформаций усадки составили от 0,563 мм/м до 1,15 мм/м при неизменном значении вяжущее/заполнитель и от 0,45 мм/м до 1,244 мм/м при неизменном расходе цемента. Практически все исследованные МЗБ при соотношении Ш/МД = 20/80% либо Ш/МД = 80/20% не превышают деформацию усадки эталона без КМД. В большей степени различие деформаций имеет место в составах с золой. По условному критерию трещиностойкости $\varepsilon_{sh} = E/R_f$ в возрасте 28 и 120 сут предпочтение следует отдать составам, содержащим опоку при дозировке КМД 10 либо 30 % и содержании Ш в составе КМД до 30% либо более 70%.

2. Развитие деформаций усадки в составах с КМД при одинаковой степени высыхания происходит значительно интенсивнее в сравнении с эталонным МЗБ без КМД, особенно при соотношении Ш/З = 80%/20% и дозировке КМД 10 и 30% и, в меньшей степени, при дозировке КМД 20% и Ш/З = 50%/50%, что связано с влиянием КМД на характер поровой структуры, определяющей кинетику обезвоживания и кинетику формирования модуля упругости МЗБ. При относительной влажности МЗБ 60% от полной относительная усадка МЗБ составила от 0,3 до 0,8. Интенсивное развитие деформаций усадки протекает в содержащих КМД составах при Ш/З = 20%/80% и 80%/20% до относительной влажности МЗБ 0,55 – 0,4, далее резко затухает. При относительной влажности МЗБ 0,4 относительная усадка составила от 0,5 у эталонного МЗБ без КМД до 0,75 – 0,95 у составов с золой.

3. При использовании в составе МД опоки интенсивность развития деформаций усадки в составах с КМД при одинаковой степени высыхания в сравнении с содержащими в качестве МД золу-уноса составами менее выражена. Аналогично составам с золой-уноса наиболее интенсивно процесс развивается при соотношении Ш/О = 80%/20% и дозировке КМД 10 и 30%, в меньшей степени при дозировке КМД 20% и Ш/О = 50%/50%. При относительной влажности МЗБ 60% относительная усадка составила от 0,3 до 0,78. Интенсивное развитие деформаций усадки протекает при Ш/З = 20%/80% и 80%/20% до относительной влажности МЗБ 0,55 – 0,3, далее имеет место затухание. При относительной влажности МЗБ 0,4 относительная усадка составила от 0,5 у эталонного МЗБ без КМД до 0,62 – 0,93 у составов с опокой. Развитие усадочных деформаций в содержащих горелую породу составах более похоже на развитие деформаций в составах с золой-уноса, чем с опокой. При относительной влажности МЗБ 0,4 относительная усадка составила от 0,5 у эталонного МЗБ и до 0,77 – 0,98 у составов с горелой породой.

4. При введении РПП и ВУД вследствие воздухововлечения, обусловленного в основном введением ВУД, произошло увеличение значений деформаций усадки более чем в 2 раза. Основное повышение деформаций усадки обусловлено присутствием в составе ВУД, РПП влияет в значительно меньшей степени. ВУД

вызывает резкий рост интенсивности развития деформаций усадки в первые 14 сут, в т.ч. при введении РПП в дозировке 1%. При дозировке РПП 2 и 3 % имеет место замедление развития деформаций усадки после 14 сут, что обусловлено резким ростом интенсивности обезвоживания в первые 14 сут. Рецептурные факторы практически не влияют на протекание процесса.

5. Независимо от дозировки РПП значения условного показателя усадочной трещиностойкости не превышают значения показателя эталонного МЗБ без РПП и ВУД. В возрасте 120 сут в составе с ВУД, но без РПП, значение условного показателя усадочной трещиностойкости превышает значение показателя эталонного МЗБ, что наглядно демонстрирует положительное влияние РПП на усадочную трещиностойкость при длительном выдерживании в воздушно-сухих условиях.

Глава 5 Влияние комплексной минеральной добавки на стойкость строительных растворов при различных воздействиях

При эксплуатации многие МЗБ и СР могут подвергаться воздействию внешней среды, т.е. в зимний период циклическому замораживанию и оттаиванию, в т.ч. в водонасыщенном состоянии, в летний период воздействию повышенных температур, например, штукатурные поверхности фасадов зданий. Обеспечение стойкости в указанных условиях эксплуатации определяют такие показатели, как морозостойкость и стойкость при воздействии высоких температур. Согласно ГОСТ Р 71597-2024, морозостойкость СР, полученных из ССС, характеризуется двумя показателями:

- морозостойкость – это «способность раствора в водонасыщенном состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без признаков разрушения, снижения прочности, изменения массы и других технических характеристик»;

- морозостойкость контактной зоны – это «способность раствора в водонасыщенном состоянии сохранять прочность сцепления с основанием при многократном попеременном замораживании и оттаивании без признаков разрушения».

Морозостойкость СР является одним из основных нормируемых в ГОСТ 31357-2007 показателей качества. Марки по морозостойкости установлены по критерию прочности при сжатии от F15 до F400, а по морозостойкости контактной зоны для всех смесей, кроме клеевых, от $F_{кз}25$ до $F_{кз}100$. При этом согласно ГОСТ 31356-2007 за критерий морозостойкости контактной зоны принимается снижение прочности сцепления не более 20%. Для клеевых смесей согласно ГОСТ Р 56387-2018 после 25 циклов замораживания и оттаивания не допускается снижение прочности сцепления, относительно установленной для классов С1 и С2 соответственно 0,5 и 1,0 МПа. Методика определения морозостойкости полученных из ССС строительных растворов регламентируется ГОСТ Р 58277-2018.

Согласно ГОСТ Р 56387-2018 для клеевых смесей определяется прочность клеевого соединения после воздействия высоких температур. Результаты подобных исследований представлены, например, в [38].

5.1 Влияние комплексной минеральной добавки на определяющие морозостойкость параметры пористости

Как известно, морозостойкость капиллярно-пористых тел, в частности, МЗБ в значительной степени определяется открытой и условно-закрытой капиллярной пористостью по ГОСТ 12730.4-2020. Последняя часто в литературе именуется «резервной».

На рисунке 5.1 показано влияние возраста СР и вида МД на максимальные и минимальные, зависящие от соотношения Ш/МД и дозировки КМД, значения открытой капиллярной пористости исследованных СР относительно бездобавочного эталона.

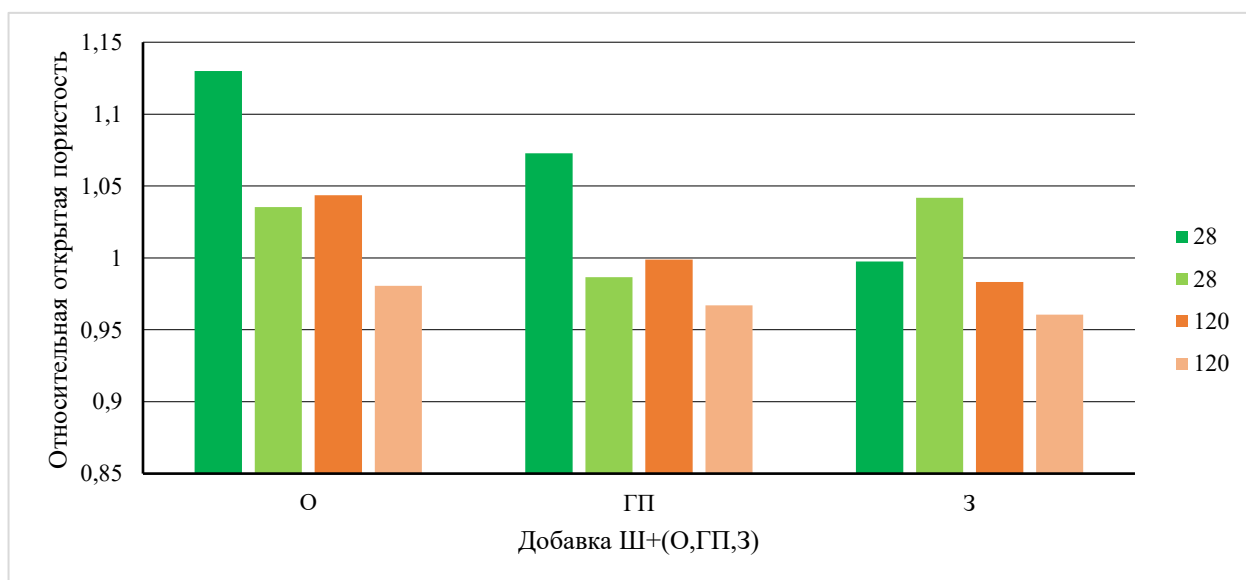


Рисунок 5.1 – Влияние возраста СР и вида МД на относительные значения открытой капиллярной пористости, где 28, 120 – возраст СР, сут; О – опока; ГП – горелая порода; З – зола

Представленные на рисунке 5.1 результаты свидетельствуют, что:

- с возрастом относительная открытая капиллярная пористость содержащих КМД строительных растворов снижается;

- относительная открытая капиллярная пористость содержащих КМД строительных растворов изменяется в зависимости от возраста и состава КМД в диапазоне от 0,96 до 1,13 относительно бездобавочного эталона, т.е., поскольку одним из условий повышения морозостойкости является уменьшение открытой капиллярной пористости, не следует рассматривать введение КМД как фактор, обеспечивающий снижение открытой капиллярной пористости и повышения морозостойкости.

На рисунке 5.2 показано влияние возраста СР и вида МД на максимальные и минимальные, зависящие от соотношения Ш/МД и дозировки КМД, значения условно-закрытой капиллярной (резервной) пористости исследованных СР относительно бездобавочного эталона.

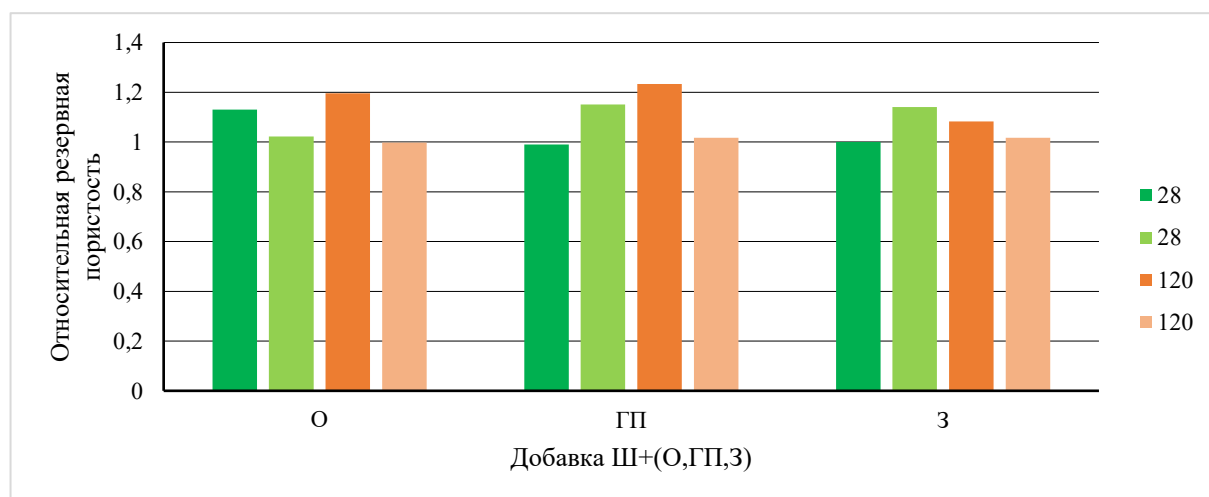


Рисунок 5.2 – Влияние возраста СР и вида МД на значения условно-закрытой капиллярной (резервной) пористости, где где 28, 120 – возраст СР, сут; О – опока; ГП – горелая порода; З – зола

Представленные на рисунке 5.2 результаты свидетельствуют, что:

- с возрастом относительная условно-закрытая капиллярная (резервная) пористость содержащих КМД строительных растворов несколько возрастает;

- условно-закрытая капиллярная (резервная) пористость содержащих КМД строительных растворов изменяется в зависимости от возраста и состава КМД в диапазоне от 1,0 до 1,23 относительно бездобавочного эталона, т.е., поскольку одним из условий повышения морозостойкости является увеличение условно-закрытой капиллярной пористости, не следует рассматривать введение КМД как фактор, обеспечивающий увеличение условно-закрытой капиллярной пористости.

На рисунке 5.3 показано влияние возраста СР и вида МД в составе КМД на относительные показатели критерия морозостойкости Шейкина А.Е. $k = \Pi_3/0,09\Pi_0$, где Π_3 – величина условно-закрытой капиллярной пористости, Π_0 – величина открытой капиллярной пористости, и расчетные значения морозостойкости $F[1]$ $F[2]$ по различным формулам [167].

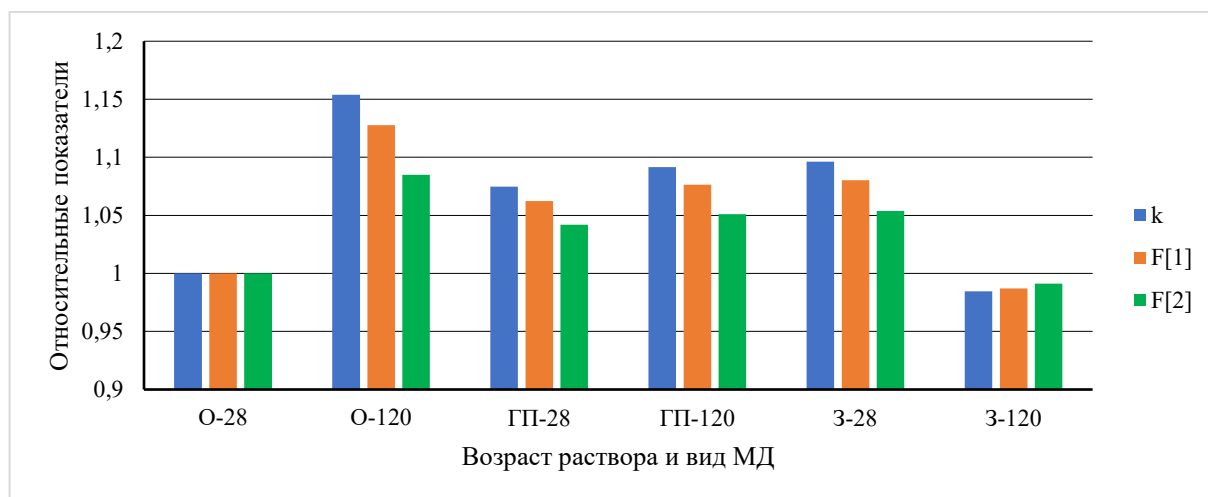


Рисунок 5.3 – Влияние возраста СР и вида МД в составе КМД на относительные показатели критерия морозостойкости и расчетные значения морозостойкости $F[1]$ $F[2]$, где 28, 120 – возраст СР, сут; О – опока; ГП – горелая порода; З – зола

Представленные на рисунке 5.3 результаты свидетельствуют, что:

- критерий морозостойкости в составах с опокой и горелой породой с возрастом повышается, в составах с золой имеет место обратная картина;
- прогнозируемые (расчетные) значения морозостойкости закономерно изменяются аналогично изменению критерия морозостойкости;
- по степени эффективности влияния на параметры пористости, определяющие морозостойкость, исследованные МД целесообразно расположить в следующий ряд по степени убывания: ГП, О, З;

- при использовании ГП и О в качестве МД в составе КМД не ожидается негативного влияния КМД на морозостойкость строительных растворов;
- при введении КМД в состав ССС не следует рассчитывать на существенный рост морозостойкости.

5.2 Влияние РПП и ВУД на изменение определяющих морозостойкость параметров пористости после воздействий

Как известно, полимеры, вводимые в состав цементных материалов, оказывают влияние на процессы гидратации, пористость и свойства МЗБ и СР [36, 39-41]. На рисунке 5.4 показано влияние вида МД в составе КМД в сочетании с РПП при дозировке от 0 до 3% на полную и условно-закрытую капиллярную (резервную) пористости исследованных СР после 120 сут. выдерживания в воздушно-сухих условиях и после 100 циклов замораживания и оттаивания. Все составы содержали ВУД в дозировке 0,3%.

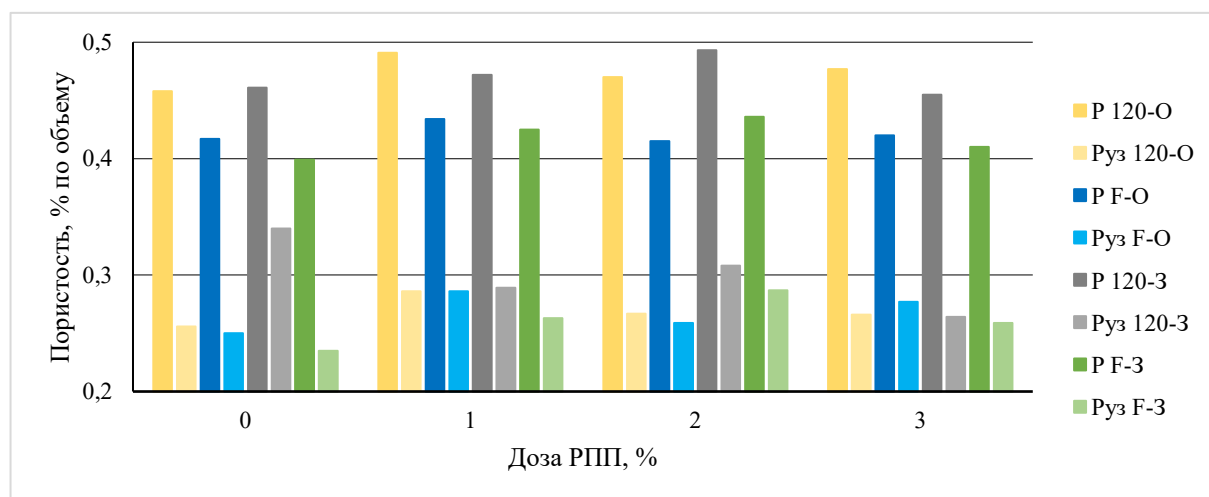


Рисунок 5.4 – Влияние вида МД и дозировки РПП на полную и условно-закрытую капиллярную (резервную) пористости после 120 сут. выдерживания в воздушно-сухих условиях и после 100 циклов замораживания и оттаивания, где 120 – после 120 сут воздушно-сухих условий; F – после 100 циклов замораживания и оттаивания; P, P_{уз} – полная и условно-закрытая пористости; О – опока; З – зола

Представленные на рисунке 5.4 данные свидетельствуют, что:

- имеет место некоторое увеличение величины полной пористости с ростом дозировки РПП, что связано с дополнительным воздухововлечением;
- величина полной пористости после выдерживания в воздушно-сухих условиях несколько выше, чем после замораживания и оттаивания;
- вид минеральной добавки (О или З) мало влияет на полную пористость после различных видов воздействий;
- в составах с РПП несколько повышается условно-закрытая пористость, при этом степень повышения зависит как от дозировки РПП, так и от вида МД, что свидетельствует о положительной роли РПП в обеспечении стойкости СР при рассматриваемых воздействиях.

5.3 Влияние циклического замораживания и оттаивания на прочностные и деформационные показатели СР

Исследования выполнены на составах, содержащих в качестве МД либо опоку, либо золу, поскольку, в связи с тем, что в разделе 4.1 сделан вывод о том, что горелая порода потенциально оказывает наиболее благоприятное влияние на повышение морозостойкости, принято решение исключить ее из дальнейшего рассмотрения. Исследования выполнены по следующим критериям морозостойкости:

- изменение предела прочности при сжатии:
- критерий по ГОСТ 10060-2012 (формула 5.1):

$$k = \frac{x_{min}^{II}}{x_{min}^I} \geq 0,9, \quad (5.1)$$

где x_{min}^I — нижняя граница доверительного интервала прочности контрольных образцов;

x_{min}^{II} — нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов.

- критерий по ГОСТ Р 58277-2018:

$$k = \frac{R_F}{R_0} \geq 0,8, \quad (5.2)$$

где R_F – предел прочности при сжатии образцов, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

R_0 – предел прочности при сжатии контрольных образцов.

- изменение скорости ультразвука и динамического модуля упругости (ГОСТ 10060-2012, Приложение А):

-- критерий для изменения скорости ультразвука:

$$k = \frac{v_F}{v_0} \geq 0,85, \quad (5.3)$$

где v_F – среднее значение скоростей ультразвука в образцах, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

v_0 – средние значения скоростей ультразвука в контрольных образцах.

-- критерий для изменения динамического модуля упругости:

$$k = \frac{E_F}{E_0} \geq 0,75, \quad (5.4)$$

где E_F – модули упругости образцов, подвергшихся испытанию на морозостойкость;

E_0 – модули упругости контрольных образцов.

- изменение деформаций остаточного расширения (ГОСТ 10060-2012, Приложение А);

- изменение предела прочности при изгибе (критерий стандартами не предусмотрен).

Исследования выполнены на базе от 100 до 125 циклов замораживания и оттаивания в зависимости от вида МД и дозировки РПП.

На рисунке 5.5 показано влияние вида МД в составе КМД и дозировки РПП на критерий морозостойкости по относительной прочности при сжатии R_F/R_0 . Показанная на Рисунке 5.5 зависимость относительной прочности при сжатии R_F/R_0 от числа циклов замораживания и оттаивания N описывается уравнением:

$$\frac{R_F}{R_0} = 1 + 0,002N, \quad (5.5)$$

с достаточно высоким показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,855$, что позволяет использовать зависимость формулы (5.5) для практических целей.

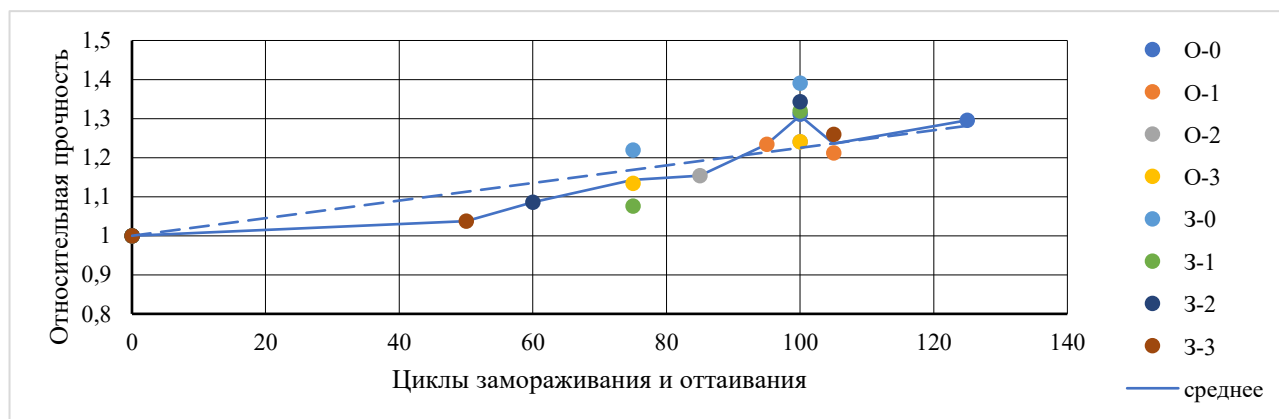


Рисунок 5.5 – Влияние вида МД в составе КМД и дозировки РПП на критерий морозостойкости по относительной прочности при сжатии R_F/R_0 , где О – опока; З – зола уноса; 0-3 – дозировка РПП, %

Приведенные на рисунке 5.5 данные позволяют сделать заключение, что по критерию относительной прочности при сжатии R_F/R_0 все исследованные составы выдержали испытания.

На рисунке 5.6 показано влияние дозировки РПП в сравнении с бездобавочным эталоном на критерий морозостойкости по относительной прочности при сжатии R_F/R_0 .

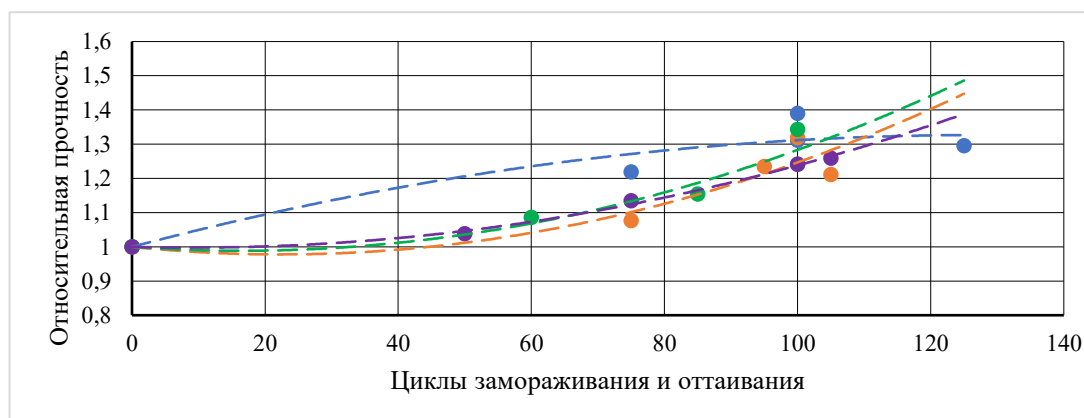


Рисунок 5.6 – Влияние дозировки РПП в сравнении с бездобавочным эталоном на критерий морозостойкости по относительной прочности при сжатии R_F/R_0 , где Э – бездобавочный эталон; 1-3 – дозировка РПП, %

Влияние дозировки РПП на зависимость относительной прочности при сжатии R_F/R_0 от числа циклов замораживания и оттаивания N на рисунке 5.6 описывается уравнением:

$$\frac{R_F}{R_0} = 1 + aN + bN^2, \quad (5.6)$$

где a , b – коэффициенты, параметры которого представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры уравнения формулы (5.6)

Составы	Параметры уравнения формулы (5.6)		
	a	b	R^2
Эталон	0,0051	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,888
1% РПП	-0,002	$4 \cdot 10^{-5}$	0,828
2% РПП	-0,0014	$4 \cdot 10^{-5}$	0,905
3% РПП	-0,0005	$3 \cdot 10^{-5}$	0,996

Представленные на рисунке 5.6 и в таблице 5.1 результаты позволяют сделать следующие заключения:

- характер изменения предела прочности при сжатии с ростом числа циклов замораживания и оттаивания в содержащих РПП составах принципиально отличается от бездобавочного эталона, что подтверждает уже высказанное положение о положительном влиянии РПП на морозостойкость строительных растворов;

- во всех исследованных составах после 100 циклов замораживания и оттаивания выполняется условие $R_F/R_0 > 1,2$, что позволяет сделать заключение, что по критерию прочности при сжатии по ГОСТ Р 58277-2018 после 100 циклов замораживания и оттаивания морозостойкость исследованных СР не исчерпана;

- значения критерия $k = X_{min}^{II}/X_{min}^I$, определенные в соответствии с методикой обработки результатов испытаний по п. 5.2.4 ГОСТ 10060-2012 после 100 – 125 циклов замораживания и оттаивания составили от 0,94 до 1,73 (таблица 5.2), что позволяет сделать заключение, что по критерию «изменение предела

прочности при сжатии» морозостойкость исследованных строительных растворов после 100 циклов не исчерпана;

- в случае оценки предельного значения числа циклов замораживания и оттаивания по критерию «изменение предела прочности при сжатии» методом экстраполяции (+30%) получим ожидаемое предельное число циклов $125 \cdot 1,3 \approx 160$.

Таблица 5.2 – Значения критерия $k = X_{min}^{II}/X_{min}^I$

Показатель	Составы							
	О-0	О-1	О-2	О-3	3-0	3-1	3-2	3-3
k в ф.(4.9)	1,59	1,10	1,22	1,02	1,73	1,63	1,63	0,94
Примечание – О – опока; З – зола уноса; 0-3 – содержание РПП, %.								

Представленные в таблице 5.2 значения критерия k позволяют сделать заключение о нецелесообразности применения дозировки РПП более 2% с точки зрения обеспечения морозостойкости.

На рисунке 5.7 показаны данные о соотношении критериев морозостойкости по изменению предела прочности при сжатии для исследованных СР по ГОСТ Р 58277-2018 и по ГОСТ 10060-2012. Там же приведено соотношение критериев морозостойкости по ГОСТ 10060-95 и по ГОСТ 10060-2012 по данным [168] для МЗБ (зеленый пунктир).

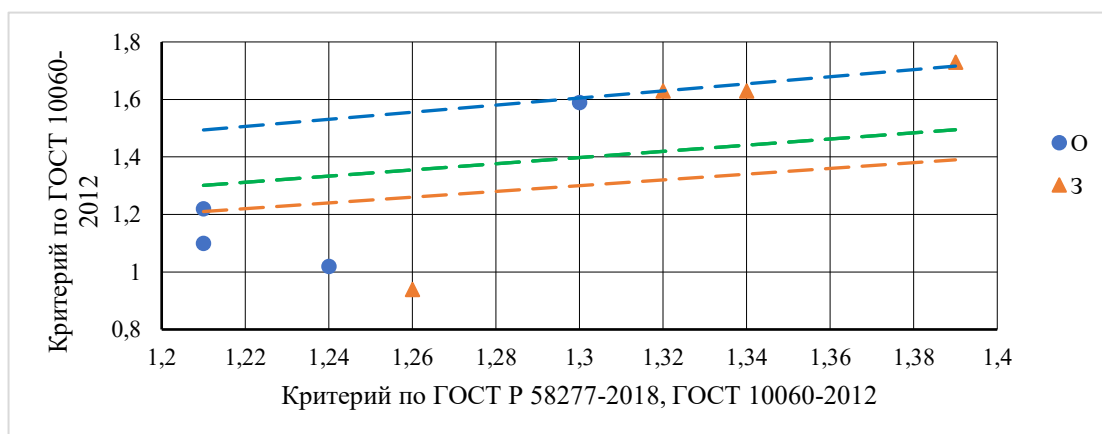


Рисунок 5.7 – Соотношение критериев морозостойкости по различным нормативным документам, где О – опока; З – зола в качестве МД в составе КМД

Соотношение критериев морозостойкости по различным нормативным документам по данным Рисунка 5.7 описывается уравнениями:

$$k_{\text{ГОСТ 10060-2012}} = b k_{\text{ГОСТ Р 58277-2018}}, \quad (5.7)$$

где $k_{\text{ГОСТ 10060-2012}}$ – критерий изменения предела прочности при сжатии по ГОСТ 10060-2012;

$k_{\text{ГОСТ Р 58277-2018}}$ – критерий изменения предела прочности при сжатии по ГОСТ 58277-2018;

b – коэффициент, значения которого представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры уравнений формулы (5.7)

Данные	Параметры уравнений формулы (5.7)	
	b	$R^2 *$
Бездобавочный эталон	1,23	0,99
Составы с РПП	1,0	0,966
МЗБ по данным [Нес Иванчук]	1,075	1,0
Примечание – * – показатель достоверности аппроксимации.		

Анализ представленных выше результатов позволяет сделать заключение о том, что содержащие РПП исследованные СР по критерию «изменение предела прочности при сжатии» характеризуются показателем морозостойкости, превышающим марку F 100.

На рисунках 5.8, 5.9 показано влияние дозировки РПП и вида МД в составе КМД на критерий морозостойкости по изменению динамического модуля упругости исследованных СР.

Среднестатистическое изменение относительного динамического модуля упругости E_F/E_0 от числа циклов замораживания и оттаивания N по приведенным на рисунке 5.8 данным описывается уравнением (синий пунктир):

$$\frac{E_F}{E_0} = 1 + 0,0007N, \quad (5.8)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,7$, что свидетельствует о значительном влиянии рецептурных факторов на зависимость $E_F/E_0 = f(N)$.

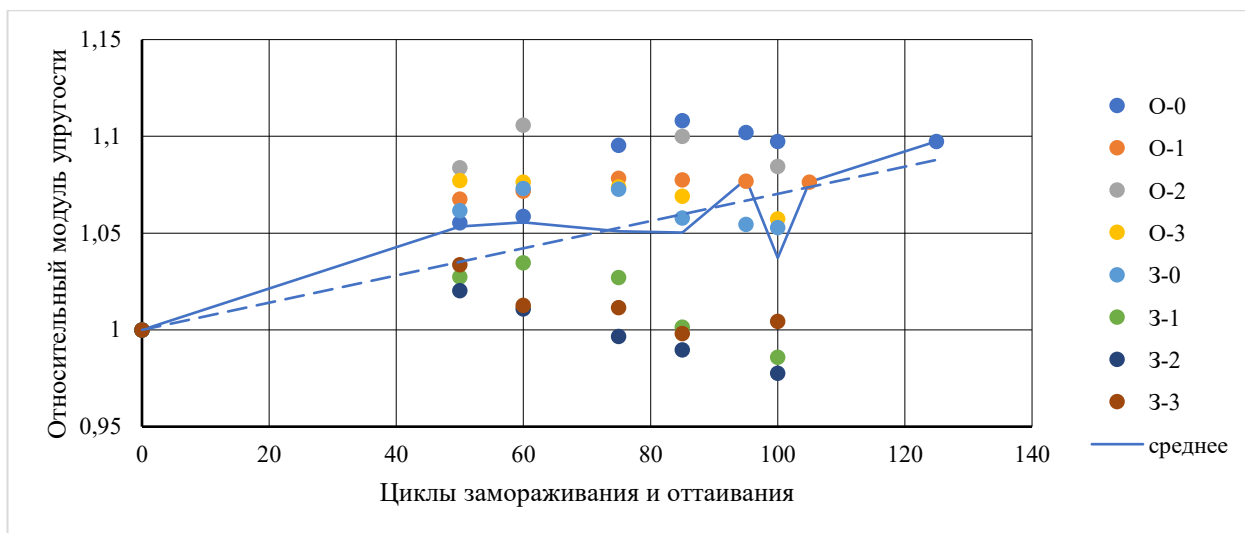


Рисунок 5.8 – Влияние вида МД в составе КМД и дозировки РПП на критерий морозостойкости по изменению динамического модуля упругости, где О – опока; З – зола уноса; 0-3 – дозировка РПП, %

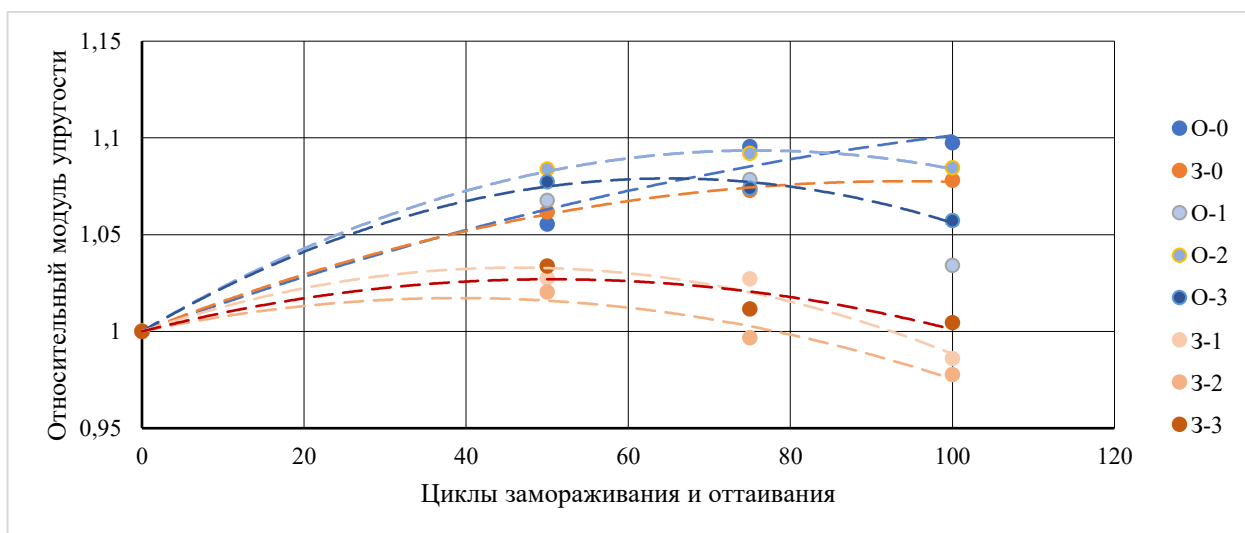


Рисунок 5.9 – Влияние вида МД и дозировки РПП на критерий морозостойкости «изменение динамического модуля упругости», где О – опока; З – зола уноса; 0 – 3 – дозировка РПП, %

Изменение относительного динамического модуля упругости E_F/E_0 от числа циклов замораживания и оттаивания N по данным рисунка 5.9 описывается уравнением:

$$\frac{E_F}{E_0} = 1 + cN + dN^2, \quad (5.9)$$

параметры которого представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры уравнений формулы (5.9)

Составы	Параметры уравнений формулы (5.9)		
	c	d	R^2
Эталон	0,0015 / 0,0016*	$-5 \cdot 10^{-6} / -9 \cdot 10^{-6}$	0,972 / 0,999
1% РПП	-0,002 / 0,0014	$-2 \cdot 10^{-5} / -2 \cdot 10^{-5}$	0,828 / 0,936
2% РПП	0,0025 / 0,0009	$-2 \cdot 10^{-5} / -1 \cdot 10^{-5}$	0,999 / 0,935
3% РПП	0,0024 / 0,0011	$-2 \cdot 10^{-5} / -1 \cdot 10^{-5}$	0,996 / 0,996
Примечание – числитель – опока, знаменатель – зола уноса			

Приведенные результаты позволяют сделать заключения о том, что:

- качественно зависимость изменения модуля упругости от числа циклов замораживания и оттаивания подобна, количественно незначительно зависит от вида минеральной добавки, максимальное значение в составах с опокой составляет $E_F/E_0 = 1,04$, с золой уноса $E_F/E_0 = 1,09$;

- минимальное значение $E_F/E_0 = 0,97$ после 100 циклов замораживания и оттаивания свидетельствует о том, что по критерию «изменение динамического модуля упругости» морозостойкость не исчерпана, поскольку по п. А.5 ГОСТ 10060-2012 критерием является значение $E_F/E_0 = 0,75$;

- использование уравнений таблице 5.4 дает предельные значения числа циклов замораживания и оттаивания по критерию «изменение динамического модуля упругости», представленные в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Предельные расчетные значения числа циклов замораживания и оттаивания по критерию «изменение динамического модуля упругости»

Вид МД	Число циклов при содержании РПП		
	1	2	3
Опока	не определено	325	290
Зола-уноса	150	135	140

На рисунке 5.10 показано влияние дозировки РПП и вида МД (опока или зола-уноса) на изменение деформаций остаточного расширения в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания.

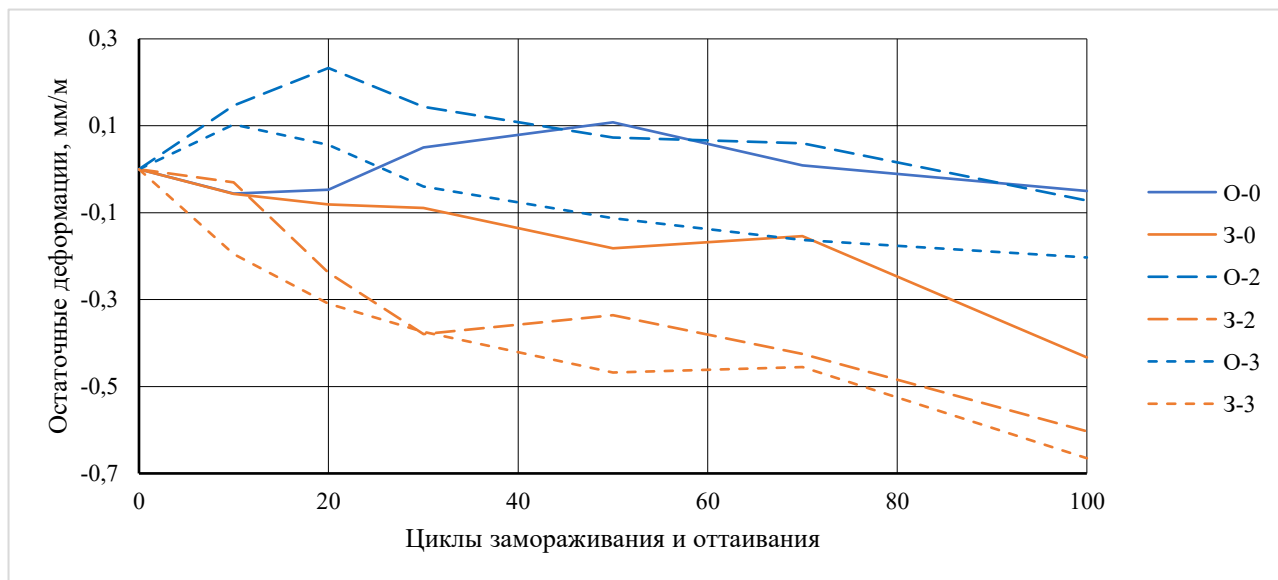


Рисунок 5.10 – Влияние дозировки РПП и вида МД (опока или зола-уноса) на изменение деформаций остаточного расширения, где О – опока; З – зола уноса; 0 – 3 – дозировка РПП, %

Показанные на рисунке 5.10 данные позволяют сделать заключение, что:

- после 100 циклов замораживания и оттаивания значения деформаций остаточного расширения не превысили предельных величин по п. А.5 ГОСТ 10060-2012 0,1 % (1 мм/м);
- после незначительного расширения в ранний период циклического замораживания и оттаивания имеет место тенденция к уменьшению объема испытуемых образцов, более выраженная у составов с золой-уноса;
- по критерию деформаций остаточного расширения после 100 циклов замораживания и оттаивания морозостойкость исследованных строительных растворов не исчерпана;
- критерий «изменение деформаций остаточного расширения» в рассматриваемом случае не информативен.

На рисунке 5.11, 5.12 показано влияние дозировки РПП и вида МД (опока или зола-уноса) на изменение относительной прочности при изгибе $R_{f,F}/R_{f,0}$ в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания. Следует отметить, что и ГОСТ 10060-2012, и ГОСТ Р 58277-2018 не предусматривают в качестве критерия морозостойкости изменение предела прочности при изгибе.

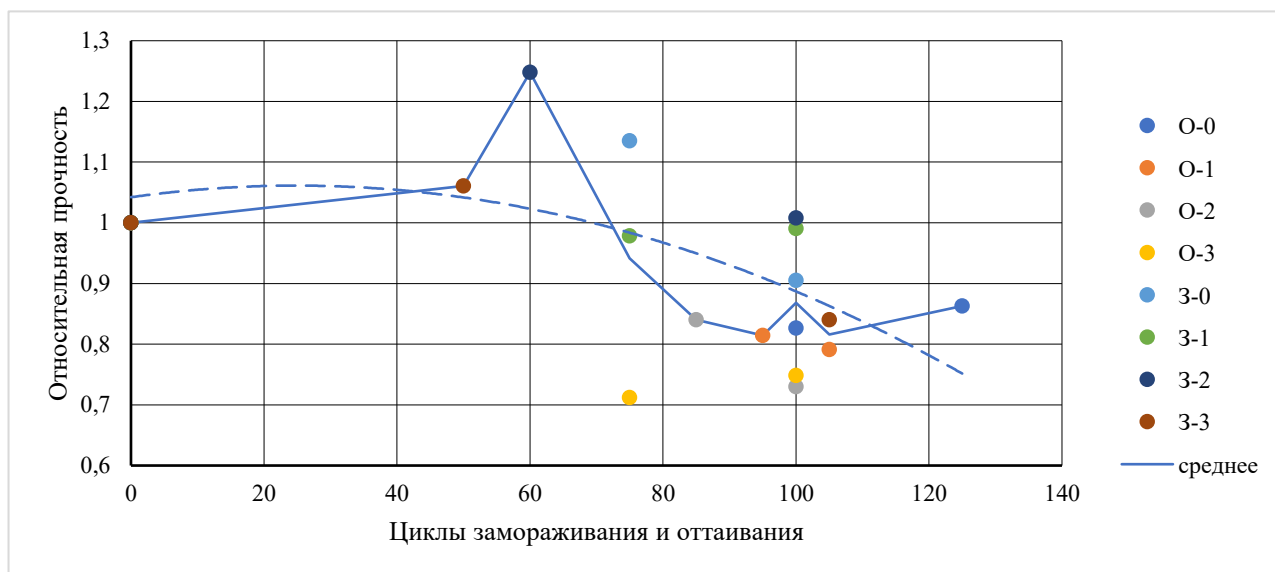


Рисунок 5.11 – Зависимость относительной прочности при изгибе от числа циклов замораживания и оттаивания, где О – опока; 3 – зола уноса; 0 – 3 – дозировка РПП, %

Влияние дозировки РПП и вида МД (опока или зола-уноса) на изменение относительной прочности при изгибе $R_{f,F}/R_{f,0}$ от числа циклов замораживания и оттаивания N по представленным на рисунке 5.11 данным описывается уравнением:

$$\frac{R_{f,F}}{R_{f,0}} = 1,04 + 0,0015N - 3 \cdot 10^{-5}N^2, \quad (5.10)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,45$, что исключает целесообразность его использования для практических целей и свидетельствует о весьма значительном влиянии на зависимость $R_{f,F}/R_{f,0}$, помимо числа циклов замораживания и оттаивания, рецептурных факторов.

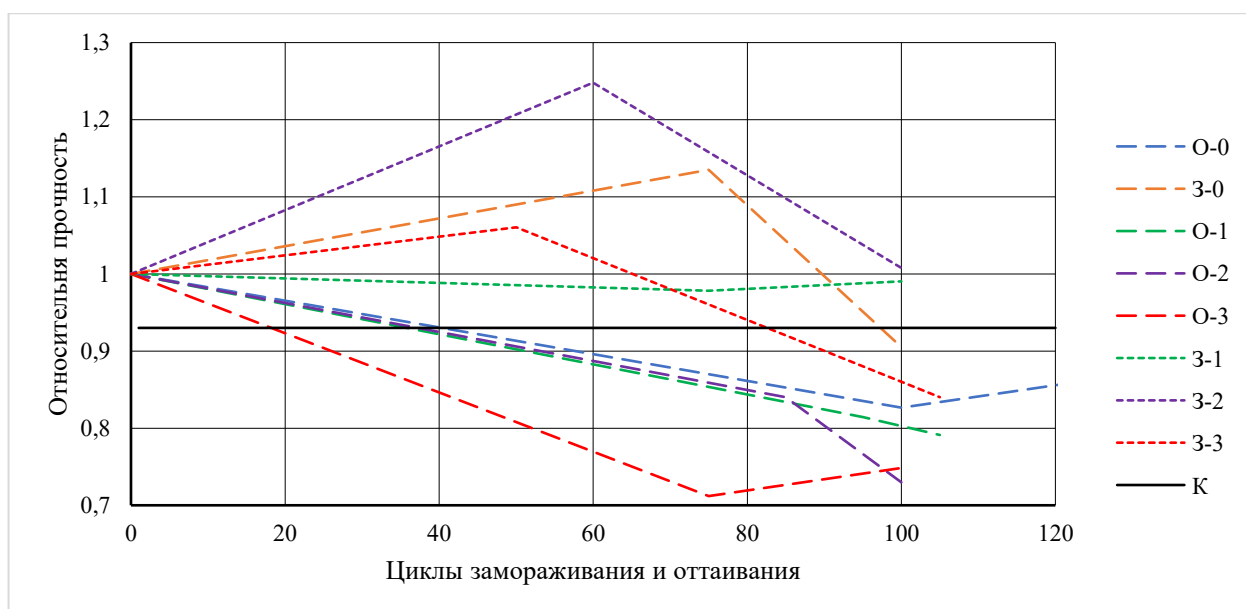


Рисунок 5.12 – Зависимость относительной прочности при изгибе от числа циклов замораживания и оттаивания, где О – опока; З – зола уноса; 0 – 3 – дозировка РПП, %; К – предлагаемый критерий морозостойкости по изменению предела прочности при изгибе

Представленные на рисунке 5.12 данные позволяют сделать заключение, что изменение величины $R_{f,F}/R_{f,0}$ зависит от вида минеральной добавки – составы с золой уноса показывают меньшее снижение показателя $R_{f,F}/R_{f,0}$ с ростом числа циклов замораживания и оттаивания. Поскольку и ГОСТ 10060-2012, и ГОСТ Р 58277-2018 не предусматривают оценку морозостойкости по критерию изменение предела прочности при изгибе, для обоснования критерия используем следующий подход:

- во-первых, в ГОСТ Р55224-2020 в таблице А.2 приведены значения пределов прочности при сжатии R и при изгибе R_f при стандартных испытаниях портландцементов. Зависимость R_f/R описывается уравнением:

$$\frac{R_f}{R} = 0,47R^{0,646} \quad (5.11)$$

с весьма высоким показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,964$, что позволяет использовать зависимость формулы (5.11) для практических целей;

- принимая в качестве критерия морозостойкости изменение предела прочности при сжатии, например, $R_f/R_0 = 0,9$, из формулы (5.11) получим значения

критерия морозостойкости по изменению предела прочности при изгибе $R_{f,F}/R_{f,0} = 0,93$;

- во-вторых, при использовании уравнений $R_f = f(R)$, представленных в табл. 3.3, получим, что при значении $R_F = 0,8R$, получим значения соотношений $R_{f,F}/R_{f,0}$, представленные в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Значения критерия $R_{f,F}/R_{f,0}$ по уравнениям таблицы 5.4 при $R_F = 0,8R$

Величина R, МПа	Значения критерия	
	min	max
15,0	0,85	0,88
20,0	0,81	0,84
25,0	0,76	0,81

В таблице 5.7 представлены предельные значения циклов замораживания и оттаивания по рассматриваемому критерию изменение предела прочности при изгибе исходя из представленных на рисунке 5.12 и в таблице 5.6 результатов.

Таблица 5.7 – Морозостойкость по критерию «изменение предела прочности при изгибе»

Показатель	Составы							
	О-0	О-1	О-2	О-3	З-0	З-1	З-2	З-3
Циклы при $R_{f,F}/R_{f,0} = 0,93$	40	38	39	19	98	>100	>100	81
Циклы при $R_{f,F}/R_{f,0} = 0,76$	70	63	65	66	>100	>100	>100	95
Циклы при $R_{f,F}/R_{f,0} = 0,88$	>100	>100	95	30	>100	>100	>100	>100

На рисунке 5.13 показано влияние дозировки РПП и вида МД (опока или зола-уноса) на предельное значение числа циклов замораживания и оттаивания по рассматриваемому критерию «изменение предела прочности при изгибе» $R_{f,F}/R_{f,0}$.

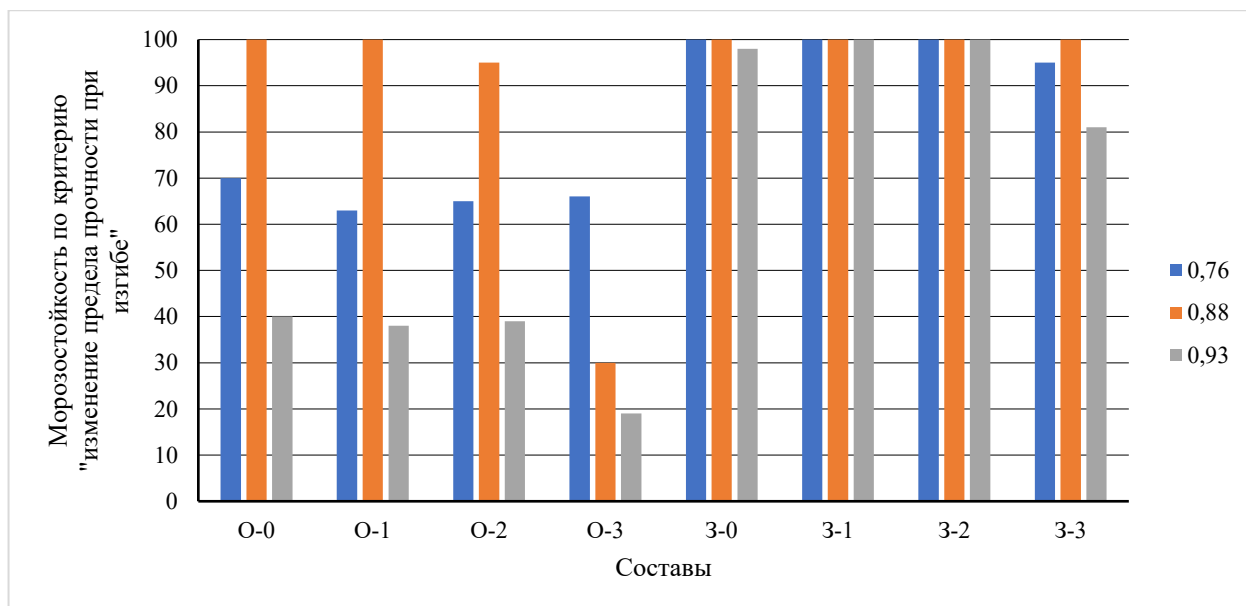


Рисунок 5.13 – Влияние дозировки РПП и вида МД (опока или зола-уноса) на предельное значение числа циклов замораживания и оттаивания по критерию «изменение предела прочности при изгибе», где О – опока; З – зола уноса; 0 – 3 – дозировка РПП, %; 0,76-0,93 – значения рассматриваемого критерия морозостойкости «изменение предела прочности при изгибе»

Представленные в таблицах 5.5, 5.6 и на рисунке 5.11-5.13 результаты позволяют сделать следующие заключения:

- исследованные СР с золой уноса в качестве МД в составе КМД обладают более высокой морозостойкостью по критерию «изменение предела прочности при изгибе» относительно СР с опоккой, что, вероятно, связано с особенностями минералогии указанных МД;

- введение РПП в дозировке более 2 % в составы ССС с точки зрения обеспечения морозостойкости по критерию «изменение предела прочности при изгибе», как и по критерию «изменение предела прочности при сжатии», нецелесообразно;

- критерий морозостойкости «изменение предела прочности при изгибе» является более «жестким» относительно критериев по ГОСТ 10060-2012.

5.4 Морозостойкость контактной зоны

На рисунке 5.14 показано влияние дозировки РПП на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием по результатам настоящего исследования и некоторым опубликованным данным в возрасте 28 сут.

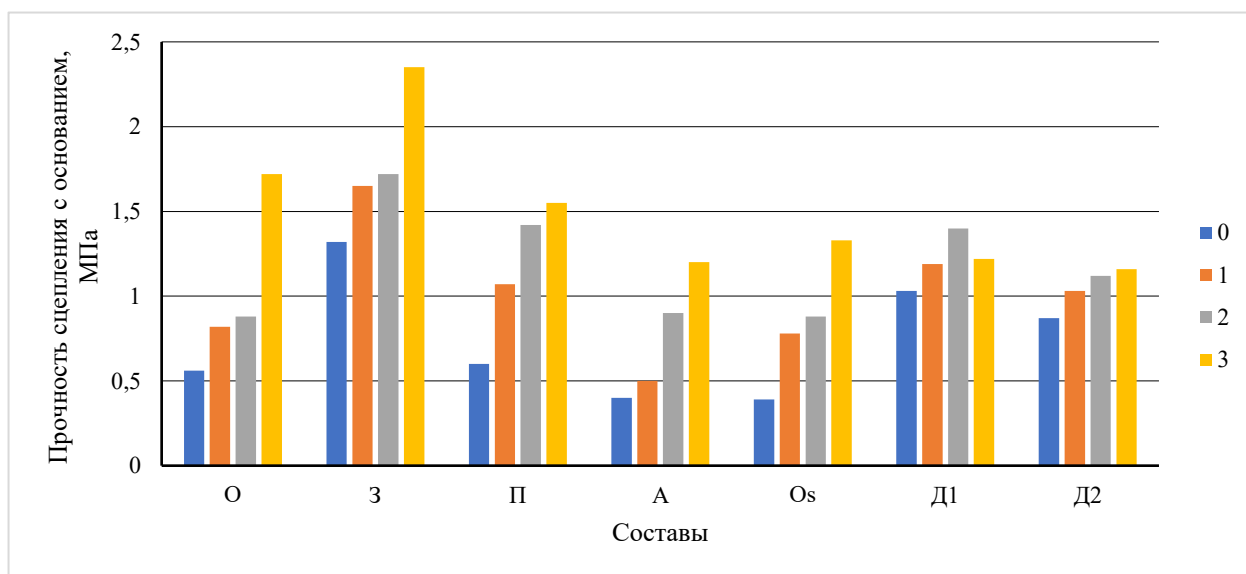


Рисунок 5.14 – Влияние дозировки РПП на прочность сцепления (адгезию), где 0 – 3 – дозировка РПП, %; О – опока в составе КМД; З – зола в составе КМД; П – по данным [39]; А – по данным [169]; Os – по данным [32]; Д1, Д2 – по данным [122]

На рисунке 5.15 показано влияние дозировки РПП на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием в сравнении с бездобавочным эталоном без РПП по результатам настоящего исследования и некоторым опубликованным данным.

Из представленных на рисунке 5.14, 5.15 данных следует, что с увеличением дозировки РПП имеет место рост прочности сцепления со стандартным бетонным основанием до 3-4 раз, при этом значительная разница в результатах связана, вероятно, с различным эффектом используемых РПП, особенностями цементов и МД.

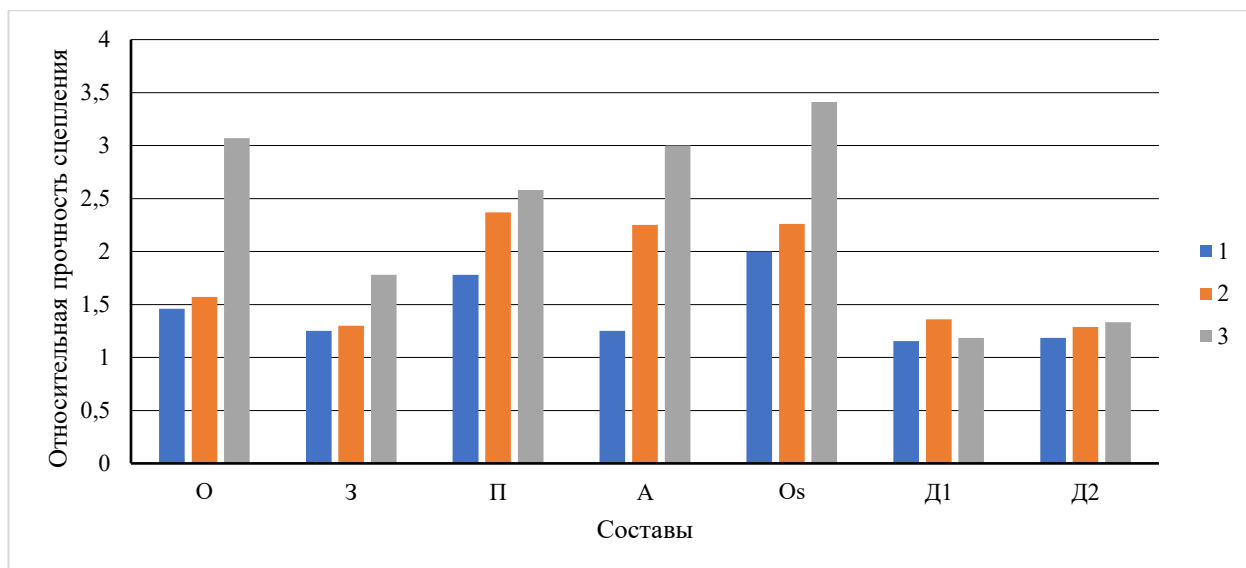


Рисунок 5.15 – Влияние дозировки РПП на относительную прочность сцепления (адгезию), где 1 – 3 – дозировка РПП, %; О – опока в составе КМД; З – зола в составе КМД; П – по данным [39]; А – по данным [169]; Os – по данным [32]; Д1, Д2 – по данным [122]

На рисунке 5.16 показано влияние дозировки РПП, вида МД в составе КМД на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием после определенного количества циклов замораживания и оттаивания.

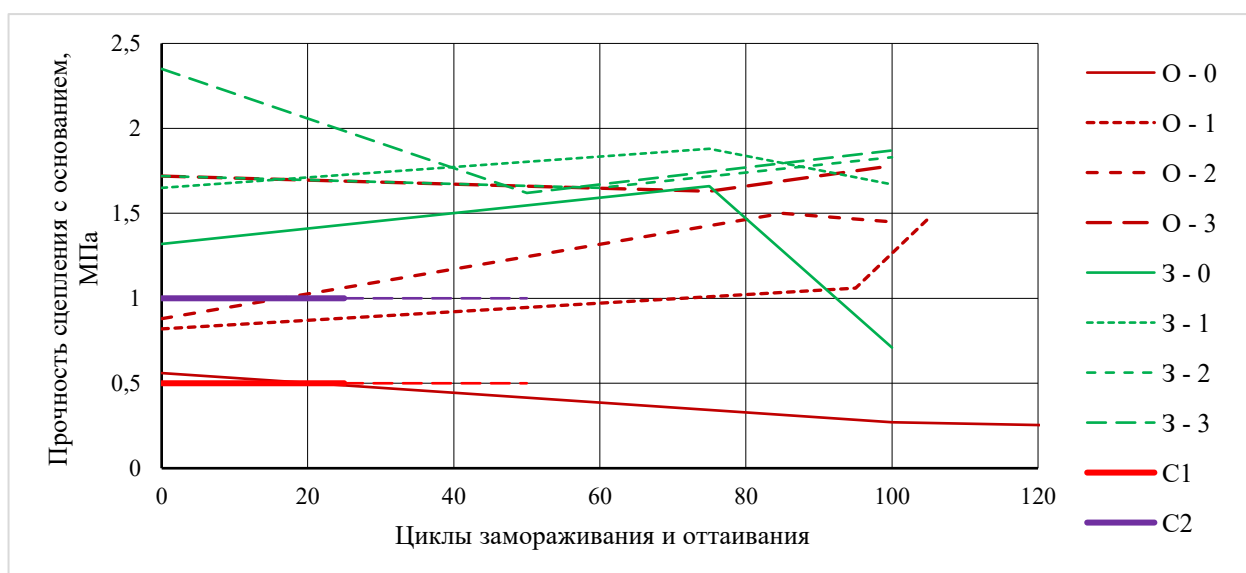


Рисунок 5.16 – Влияние дозировки РПП на изменение прочности сцепления (адгезии) при циклическом замораживании и оттаивании, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; О – опока в составе КМД; З – зола в составе КМД; C1, C2 – класс клеевой смеси по ГОСТ Р 56387-2018

На рисунке 5.17 показано влияние дозировки РПП, вида МД в составе КМД на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием после определенного количества циклов замораживания и оттаивания в сравнении начальным до циклического замораживания и оттаивания значением.

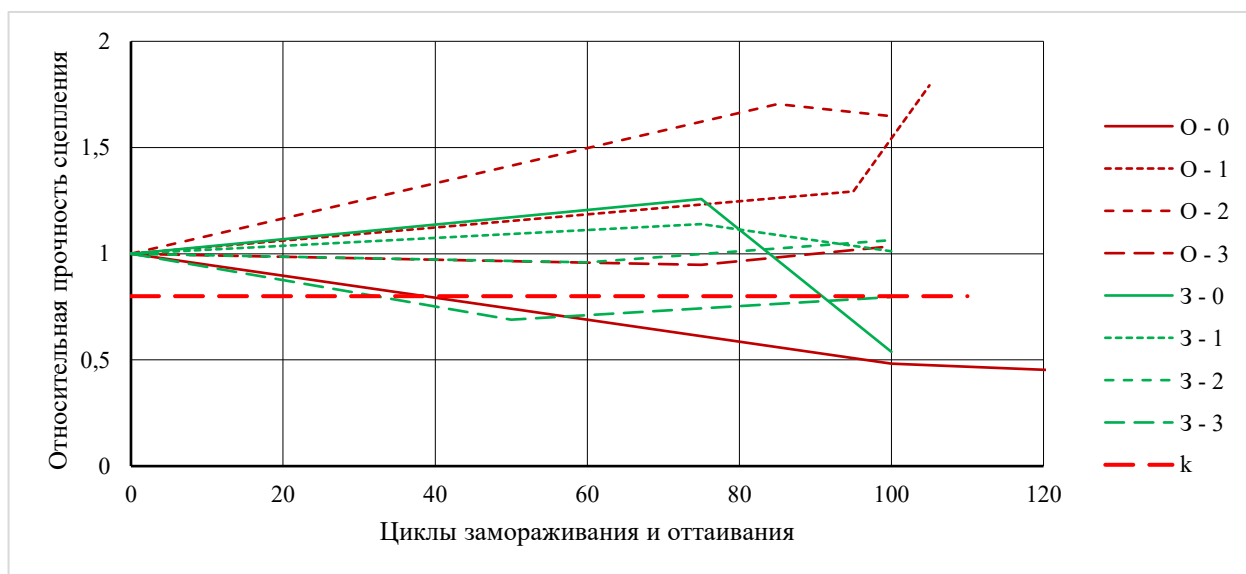


Рисунок 5.17 – Влияние дозировки РПП на изменение относительной прочности сцепления (адгезии) при циклическом замораживании и оттаивании, где 0 – 3 – дозировка РПП, %; О – опока в составе КМД; З – зола в составе КМД; k – рассматриваемый критерий стойкости $k = 0,8$

Из представленных на рисунке 5.16, 5.17 следует:

- все содержащие в качестве МД в составе КМД золу-уноса составы после 100 циклов замораживания и оттаивания имели прочность сцепления более 1 МПа, что соответствует классу клеевой смеси С2 по ГОСТ Р 56387-2018;
- составы с РПП, содержащие в качестве МД в составе КМД опоку после 100 циклов замораживания и оттаивания имели прочность сцепления более 1 МПа, что соответствует классу клеевой смеси С2 по ГОСТ Р 56387-2018;
- в случае использования в качестве критерия соотношение $A_F/A_0 = 0,8$, состав с золой при РПП = 3% и составы с опокой и золой без РПП не выдержали 100 циклов замораживания и оттаивания, в связи с чем вопрос о выборе критерия стойкости по показателю изменения прочности сцепления с основанием – либо не

менее фиксированной величины прочности сцепления, как, например, в ГОСТ Р 56387-2018, либо соотношение A_F/A_0 не менее некоторого значения, подобно критерию изменения предела прочности при сжатии, заслуживает специального рассмотрения. В настоящей работе далее будет рассматриваться критерий A_F/A_0 .

На рисунке 5.18 показано влияние вида МД и дозировки РПП на критерий A_F/A_0 по результатам настоящего исследования после 100 циклов замораживания и оттаивания и по данным [122] после 75 циклов.

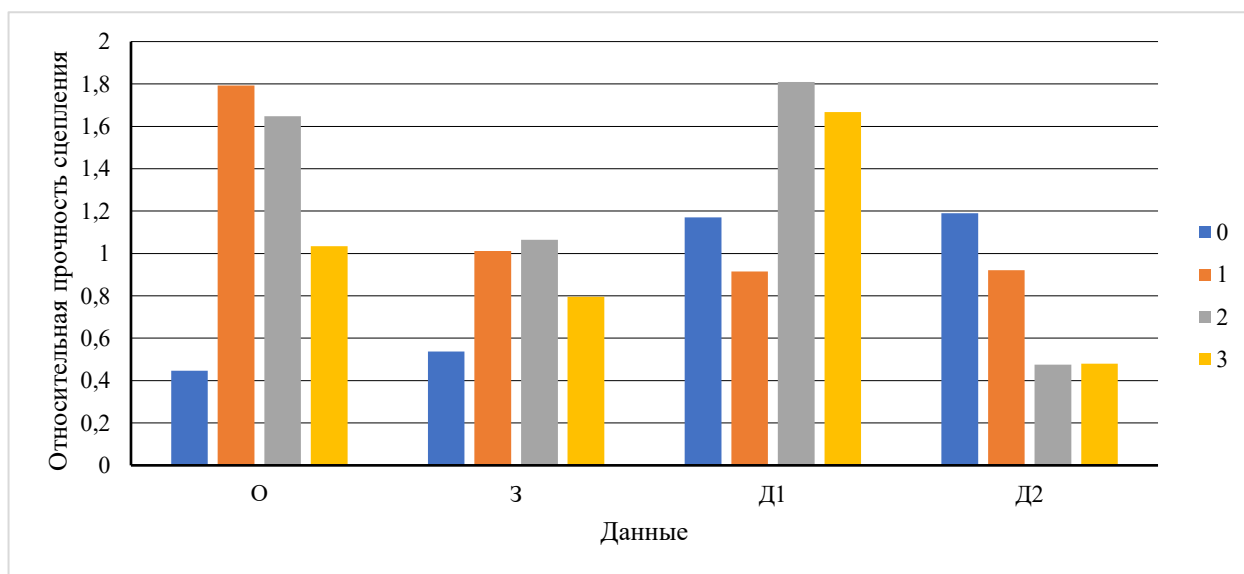


Рисунок 5.18 – Влияние дозировки РПП на критерий A_F/A_0 по результатам после 100 циклов замораживания и оттаивания (автор) и после 75 циклов [122], где 0-3 – дозировка РПП, %; О – опока в составе КМД; З – зола в составе КМД; Д1, Д2 – данные [122]

Анализ представленных на рисунке 5.18 данных показывает, что:

- изменение критерия A_F/A_0 зависит от свойств исходных материалов и дозировки РПП;
- без учета реального значения величины A_0 до начала циклического замораживания и оттаивания величина A_F/A_0 может привести к не совсем корректным выводам;
- по результатам наших исследований применение дозировки РПП 3% нецелесообразно.

На рисунке 5.19 показано влияние циклического замораживания и оттаивания на соотношение прочности сцепления со стандартным бетонным основанием (адгезии) и предела прочности при изгибе в зависимости от рецептурных факторов.

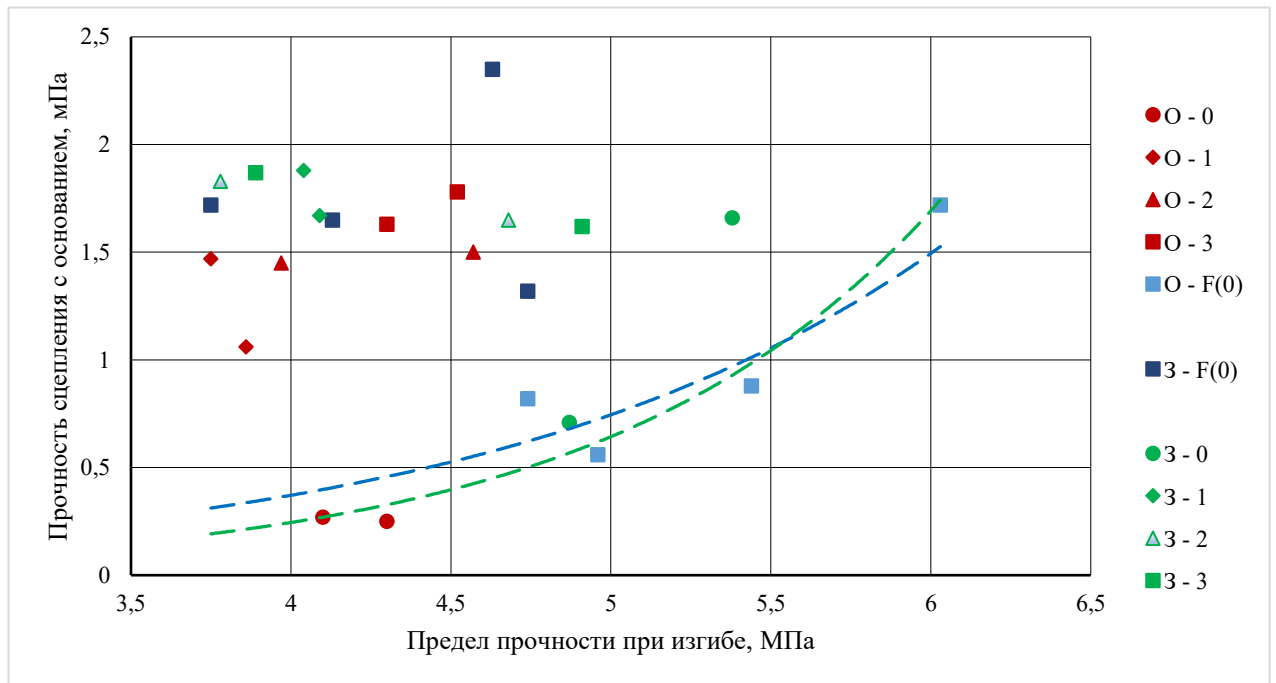


Рисунок 5.19 – Влияние циклического замораживания и оттаивания на соотношение прочности сцепления (адгезии) и предела прочности при изгибе, где 0-3 – дозировка РПП, %; О – опока в составе КМД; 3 – зола в составе КМД; F(0) – начальные значения

Соотношение прочности сцепления (адгезии) A и предела прочности при изгибе R_f при отсутствии в составе РПП описывается уравнениями:

$$A = k \exp(b R_f), \quad (5.12)$$

параметры которых представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Параметры уравнений формулы (5.12)

Вид МД	k	b	R^{2*}
Опока	0,023	0,7	0,857
Зола - уноса	0,005	0,97	0,921
Примечание – * – показатель достоверности аппроксимации			

Таким образом, при отсутствии РПП в составе ССС имеет место довольно тесная корреляция между прочностью сцепления и пределом прочности при изгибе. Наличие РПП в составе ССС принципиально меняет картину – явная зависимость отсутствует, а прочность сцепления с основанием составляет от 0,275 до 0,507 величины предела прочности при изгибе в зависимости от дозировки РПП, вида МД и числа циклов замораживания и оттаивания.

5.5 Анализ критериев морозостойкости

На рисунке 5.20 показано влияние содержания РПП на значения рассматриваемых критериев морозостойкости:

- изменение предела прочности при сжатии по ГОСТ 10060-2012 ($R(v)$), по ГОСТ Р 58277-2018 (R), после 100 циклов замораживания и оттаивания.

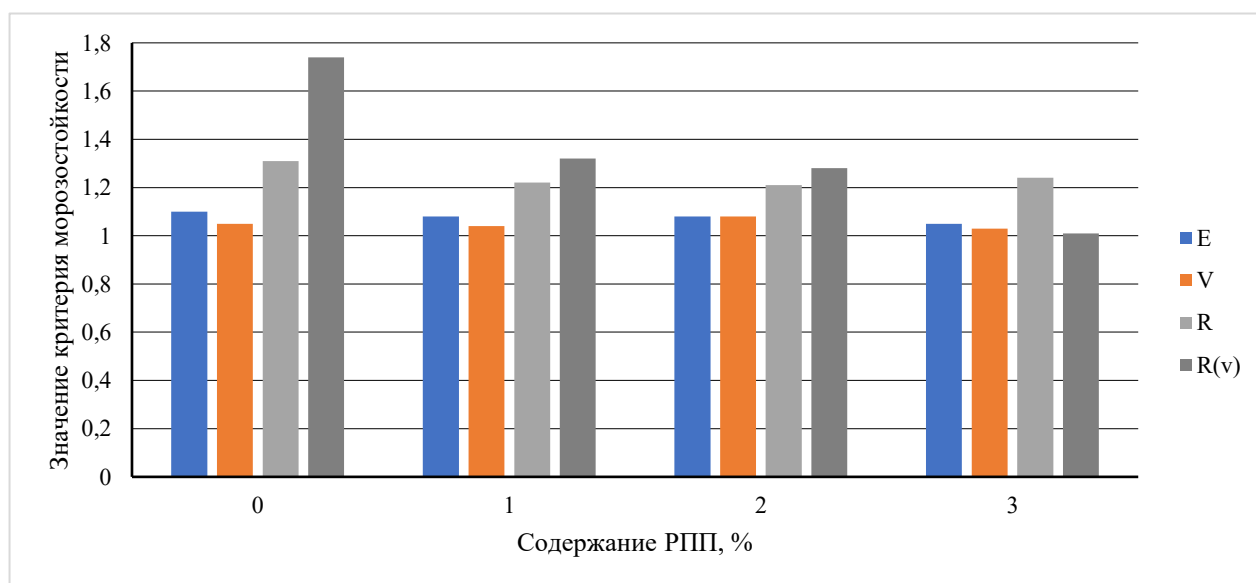


Рисунок 5.20 – Влияние содержания РПП на значения критериев морозостойкости после 100 циклов замораживания и оттаивания

Из представленных на рисунке 5.20 данных очевидно, что, во-первых, после 100 циклов замораживания и оттаивания все установленные нормативными документами критерии не позволяют сделать вывод о фактической

морозостойкости исследованных СР, которая по всем критериям превышает марку F100, и, во-вторых, численные значения различных критериев различаются в широком диапазоне, более, чем в 1,7 раза.

Поскольку после 100 циклов замораживания и оттаивания прямые предельные нормируемые значения по рассматриваемым критериям морозостойкости в большинстве случаев не достигнуты, а прогнозируемые значения изменяются в широком диапазоне, для анализа взаимосвязи критериев и прогноза морозостойкости использован следующий подход:

- на первом этапе, как показано выше, для прямых критериев k_E , k_V , k_R , $k_{R(v)}$, k_{Rf} получены уравнения регрессии (таблица 5.9) в зависимости от дозировки РПП:

$$k_i = 1 + aN + bN^2, \quad (5.13)$$

на основании анализа которых для всех критериев при их предельных значениях k_i и измеренных значениях после 100 циклов замораживания и оттаивания (таблица 5.10) определены ожидаемые значения числа циклов замораживания и оттаивания (таблица 5.10);

- на втором этапе в качестве критериев морозостойкости рассмотрены косвенные показатели:

- капиллярная открытая пористость по ГОСТ 10060.4-95 (отменен):

$$\Pi_i = \frac{W_i - K_5 \Delta V_i \text{Ц}_i}{10}, \quad (5.14)$$

где Π_i – капиллярно-открытая пористость, %;

W_i – объем воды затворения в 1л уплотненной смеси образца бетона за вычетом водоотделения или водопоглощения заполнителями в процессе уплотнения, см³. Для заполнителей из плотных пород (гранит, базальт, кварц) водопоглощение принимают равным 1% их массы;

ΔV_i – удельная контракция применяемого цемента к сроку испытаний материала на морозостойкость, см³/г. Значение определяют заранее по мере поступления цемента, используя методику, изложенную в приложении А;

K_5 – стехиометрический коэффициент контракции цемента

Ц_i – масса цемента в 1 л бетонной смеси, г.

- критерий Шейкина А.Е., Добшица Л.М.:

$$K_{\text{мрз}} = \frac{\Pi_{\text{уз}}}{0,09 \cdot \Pi_{\text{и}}}, \quad (5.15)$$

где $\Pi_{\text{уз}}$ – объем условно закрытых пор;

$\Pi_{\text{и}}$ – объем интегральных (открытых) пор.

по которым рассчитаны ожидаемые значения числа циклов замораживания и оттаивания, также представленные в таблице 5.11.

Таблица 5.9 – Показатели уравнений регрессии формуле (5.13) $k_i = f(N)$

Критерий	Параметры уравнения формулы (5.13)	Значения коэффициентов при содержании РПП, %			
		0	1	2	3
k_E	a	0,0015	0,0015	0,0027	0,0023
	b	$-5 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-5}$
	R^{2*}	0,916	0,908	0,931	0,925
k_V	a	0,0007	0,0009	0,0012	0,0011
	b	$-2 \cdot 10^{-6}$	$-4 \cdot 10^{-6}$	$-8 \cdot 10^{-6}$	$-8 \cdot 10^{-6}$
	R^{2*}	0,953	0,888	0,937	0,935
k_R	a	0,0061	0,0067	не определены	
	b	$-3 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-5}$		
	R^{2*}	1	1		
$k_{R(v)}$	a	0,0178	0,0556	не определены	
	b	-0,0001	-0,0005		
	R^{2*}	1	1		
k_{Rf}	a	-0,0013	-0,002	-0,0024	-0,003
	b	0	0	0	0
	R^{2*}	0,856	0,999	0,925	0,972
k_A	a	-0,0045	0,0028	0,0186	-0,0038
	b	0	0	-0,0001	$4 \cdot 10^{-5}$
	R^{2*}	0,982	0,4	1	1
Примечание – * – показатель достоверности аппроксимации					

Таблица 5.10 – Критерии морозостойкости после 100 циклов замораживания и оттаивания

Критерии и предельные значения	Величина критерия после 100 циклов замораживания и оттаивания при содержании РПП, %			
	0	1	2	3
$k_E (0,75)^*$	1,1	1,08	1,08	1,05
$k_V (0,85)$	1,05	1,04	1,04	1,03
$k_R (0,8)$	1,31	1,22	1,21	1,24
$k_{R(v)} (0,9)^*$	1,74	1,32	1,22	1,01
$k_{Rf} (?)^{**}$	0,83	0,8	0,73	0,74
Примечание – * – предельное значение критерия морозостойкости; по ГОСТ 10060-2012; ** – в нормативных документах отсутствует				

Таблица 5.11 – Ожидаемые значения числа циклов замораживания и оттаивания

Критерий		Ожидаемые значения числа циклов замораживания и оттаивания при содержании РПП, %			
		0	1	2	3
k_E	0,955	400 - 425	325	200	150 - 175
	0,75	325	240	150	130
k_V		500	325 - 350	225 - 250	225
k_R	0,95	210	175	не определены	
	0,8	230	190		
$k_{R(v)}$	0,95	180	110		
	0,8	185	115		
k_{Rf}	0,76	70 (>100) *	63 (>100)	65 (>100)	66 (95)
	0,88	>100	>100	95 (>100)	30 (>100)
	0,93	40 (98)	39 (>100)	39 (>100)	19 (81)
Π_i		155-285	230-310	155-285	190-300
$K_{мпз}$		550	635	560	620
Примечание – в скобках – зола-уноса					

На рисунке 5.21 показано влияние дозировки РПП на значения оценки морозостойкости $F_{РПП}$ исследованных СР относительно бездобавочного эталона $F_{Э}$ по различным рассматриваемым критериям:

$$k_F = \frac{F_{РПП}}{F_{Э}}. \quad (5.16)$$

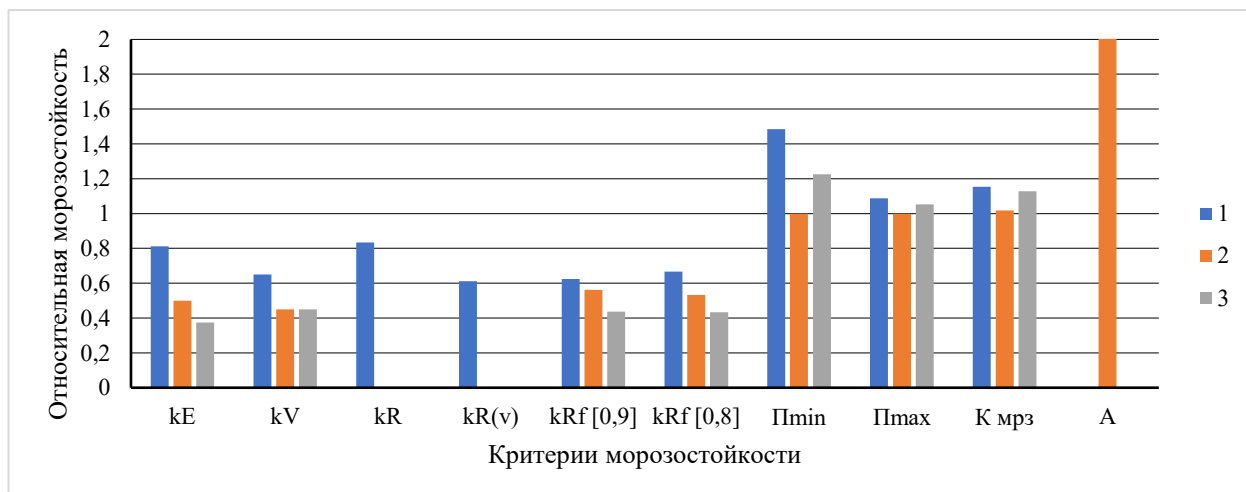


Рисунок 5.21 – Влияние дозировки РПП на значения оценки морозостойкости относительно бездобавочного эталона по различным критериям, где 1-3 – дозировка РПП, %

Представленные выше результаты позволяют сделать следующие заключения:

- после 100 (125) циклов замораживания и оттаивания морозостойкость исследованных строительных растворов с РПП не исчерпана по критериям прочности при сжатии, динамического модуля упругости, скорости ультразвука и прочности сцепления с бетонным основанием, т.е. исследованные СР с РПП и КМД шлам химводоочистки + опока после 100 циклов замораживания и оттаивания по прямым критериям соответствуют марке по морозостойкости не ниже F100;

- поскольку в соответствии с ГОСТ 31356-2013 для всех ССС, кроме клеевых, предусмотрена максимальная марка по морозостойкости контактной зоны $F_{кз}100$, а для клеевых по ГОСТ Р 56387-2018 испытания проводят на базе только 25 циклов, очевидно, что все исследованные СР по данному критерию соответствуют требованиям нормативных документов, причем РПП в рациональной дозировке 1-

2% оказывает значительное положительное влияние на повышение морозостойкости контактной зоны;

- оценка по всем прямым критериям, кроме прочности сцепления с бетонным основанием, показывает некоторое негативное влияние РПП, особенно при дозировке 3% на морозостойкость исследованных строительных растворов;

- оценка по косвенным критериям не выявила негативного влияния РПП на морозостойкость исследованных СР, что в принципе не согласуется с предыдущим заключением, причем следует отметить, что отсутствие связи морозостойкости строительных растворов из ССС с критерием Шейкина А.Е., Добшица Л.М. отмечено в [141], хотя в [144] содержится несколько противоположная информация, т.е., поскольку в зависимости от выбранного прямого критерия морозостойкости и содержания РПП ожидаемое предельное число циклов замораживания и оттаивания по косвенным критериям может различаться на порядок, возможность использования косвенных критериев по показателям пористости требует продолжения исследований;

- анализ данных таблицы 5.11 показывает, что в зависимости от критерия морозостойкости ожидаемое количество циклов замораживания и оттаивания может существенно различаться, при этом, безусловно, наибольшая достоверность результатов связана с критериями по прочности при сжатии k_R и $k_{R(v)}$;

- по представленным в СП 63.13330.2018 данным зависимость модуля упругости E МЗБ от предела прочности при сжатии R может быть описана уравнением:

$$E = 9425 \ln(R) - 6170, \quad (5.17)$$

анализ которого показывает, что при снижении модуля упругости на 25% (критерий морозостойкости по изменению динамического модуля упругости по ГОСТ 10060-2012) снижение предела прочности при сжатии составит 44%, а при снижении предела прочности при сжатии, например, 10 %, снижение модуля упругости составит 4,5%, при этом ожидаемое число циклов замораживания и оттаивания по критерию изменения динамического модуля упругости снизится на 17-30% относительно представленных в таблице 5.11 данных. В связи с

выявленным несоответствием критериев исследования в области взаимоувязки критериев морозостойкости целесообразно продолжить, что актуально не только для строительных растворов, но и бетонов [167];

- самым «жестким» критерием морозостойкости следует считать критерий по изменению предела прочности при изгибе k_{Rf} , причем, учитывая влияние вида МД на этот критерий, исследования влияния рецептурных факторов на морозостойкость СР и бетонов по этому критерию целесообразно продолжить.

5.6 Сравнение различных воздействий на стойкость СР

В таблице 5.12 приведены значения показателей назначения СР, содержащих в составе КМД опоку, после 100 циклов замораживания и оттаивания и после 120 сут выдерживания в воздушно-сухих условиях.

Таблица 5.12 – Значения показателей СР с опокой в составе КМД после различных воздействий

Показатели	Дозировка РПП, %			
	0	1	2	3
R_0	25,4	22,2	22,7	21,6
$R(F)$	32,9	26,9	27,4	26,8
$R(120)$	27,1	27,8	31,4	31,1
$R_{f,0}$	4,96	4,74	5,44	6,04
$R_f(F)$	4,28	3,75	3,97	4,52
$R_f(120)$	4,42	6,68	7,93	8,81
E_0	14980	12610	13630	12320
$E(F)$	16330	13610	14740	13000
$E_0(120)$	11100	9750	9850	8910
$E(120)$	11760	10720	12160	11670
A_0	0,56	0,82	0,88	1,72
$A(F)$	0,25	1,47	1,45	1,78
$A(120)$	0,37	1,45	0,65	1,39

В таблице 5.13 приведены значения показателей назначения СР, содержащих в составе КМД золу-уноса, после 100 циклов замораживания и оттаивания и после 120 сут выдерживания в воздушно-сухих условиях.

Таблица 5.13 – Значения показателей СР с золой-уноса в составе КМД после различных воздействий

Показатели	Дозировка РПП, %			
	0	1	2	3
R_0	25,1	21	17,5	21,2
$R(F)$	34,9	27,7	23,5	26,7
$R(120)$	27,1	26,1	25,8	31,4
$R_{f,0}$	4,74	4,13	3,75	4,62
$R_f(F)$	4,87	4,09	3,78	3,89
$R_f(120)$	5,72	6,62	7,3	8,81
E_0	15390	13800	12280	13440
$E(F)$	16210	13600	12000	13400
$E_0(120)$	12800	11920	11560	13320
$E(120)$	12300	11710	11210	12880
A_0	1,32	1,65	1,72	2,35
$A(F)$	0,71	1,67	1,83	1,87
$A(120)$	1,13	1,68	1,7	2,06

На рисунке 5.22 показано влияние дозировки РПП на коэффициенты стойкости СР с опокой в составе КМД после различных воздействий.

На рисунке 5.23 показано влияние дозировки РПП на коэффициенты стойкости СР с золой-уноса в составе КМД после различных воздействий.

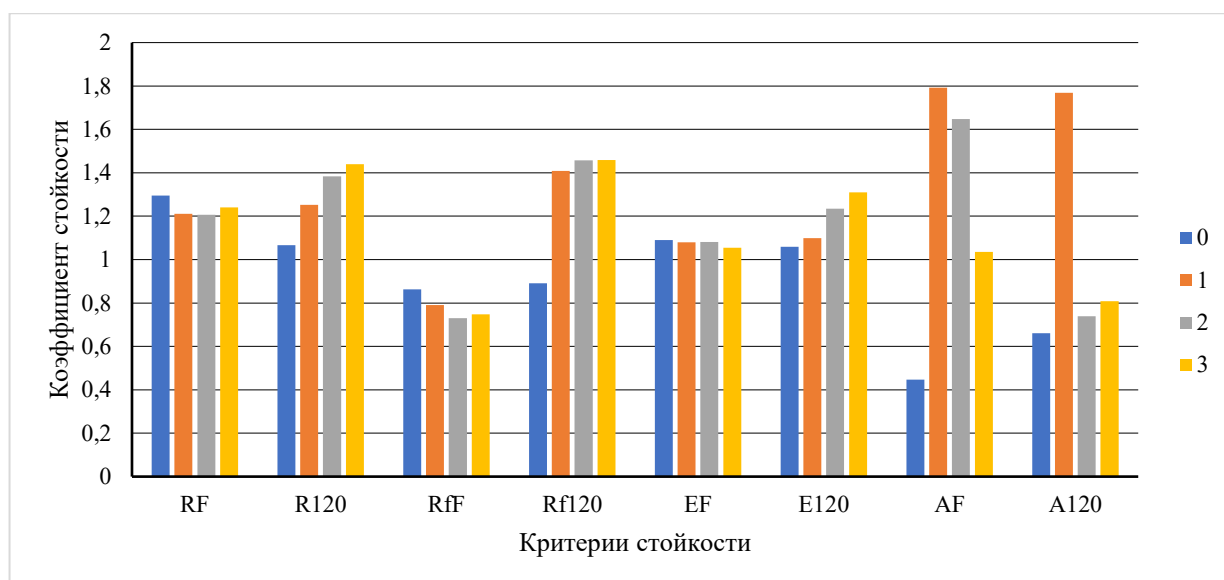


Рисунок 5.22 – Влияние дозировки РПП на коэффициенты стойкости СР с опоклой в составе КМД после различных воздействий, где 0-3 – дозировка РПП, %

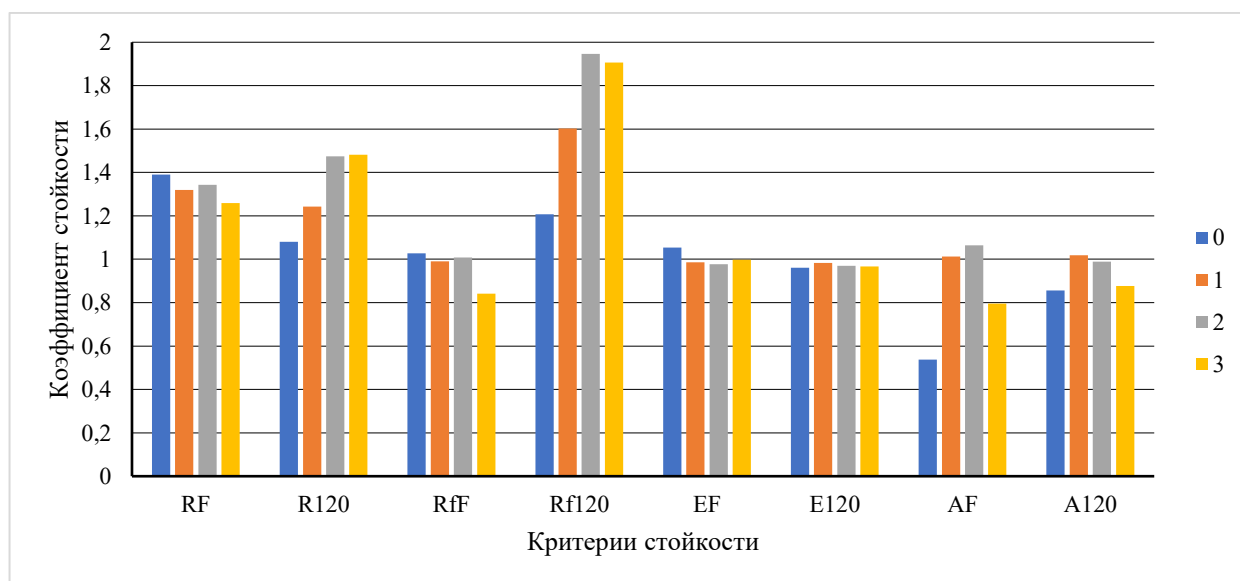


Рисунок 5.23 – Влияние дозировки РПП на коэффициенты стойкости СР с золой-уноса в составе КМД после различных воздействий, где 0 – 3 – дозировка РПП, %

Представленные в таблицах 5.11, 5.12 и на рисунках 5.22, 5.23 результаты позволяют сделать следующие заключения:

- в составах СР и с опоклой, и с золой влияние РПП на показатель стойкости по критерию «изменение предела прочности при сжатии» после циклического замораживания и оттаивания проявляется в некотором снижении показателя практически независимо от дозировки, при этом влияние РПП на показатель после

длительного выдерживания в воздушно-сухих условиях проявляется в повышении показателя стойкости с ростом дозировки РПП;

- в составах СР и с опокой, и с золой влияние РПП на показатель стойкости по критерию «изменение предела прочности при изгибе» после циклического замораживания и оттаивания проявляется в более выраженном снижении показателя в сравнении с показателем при сжатии, причем в составах с опокой в большей степени, при этом влияние РПП на показатель после длительного выдерживания в воздушно-сухих условиях проявляется в повышении показателя стойкости, причем в составах с золой в большей степени;

- в составах СР с золой влияние РПП на показатель стойкости по критерию «изменение динамического модуля упругости» практически отсутствует при обоих воздействиях, в составах с опокой при циклическом замораживании и оттаивании влияние РПП практически отсутствует, а после длительного выдерживания в воздушно-сухих условиях проявляется в повышении показателя стойкости с ростом дозировки РПП;

- в составах СР с опокой влияние РПП на показатель стойкости по критерию «изменение прочности сцепления» после циклического замораживания и оттаивания носит ярко выраженный характер, причем с ростом дозировки РПП показатель стойкости снижается, при длительном выдерживании в воздушно-сухих условиях применение РПП в дозировки более 1% нецелесообразно. В составах с золой влияние РПП менее выражено, при циклическом замораживании и оттаивании и при выдерживании в воздушно-сухих условиях нецелесообразна дозировка РПП 3%.

Для выявления причины установленных закономерностей проанализировано влияние дозировки РПП и вида МД на условный показатель трещиностойкости:

$$k_{crc} = \frac{E_0}{R_f}. \quad (5.18)$$

где E_0 – модуль упругости;

R_f – предел прочности при изгибе.

Показатель характеризует уровень возникающих в структуре напряжений при вынужденных деформациях, например, вследствие изменения температуры либо

влажностного состояния. Влияние дозировки РПП и вида МД на условный показатель трещиностойкости показано на рисунке 5.24.

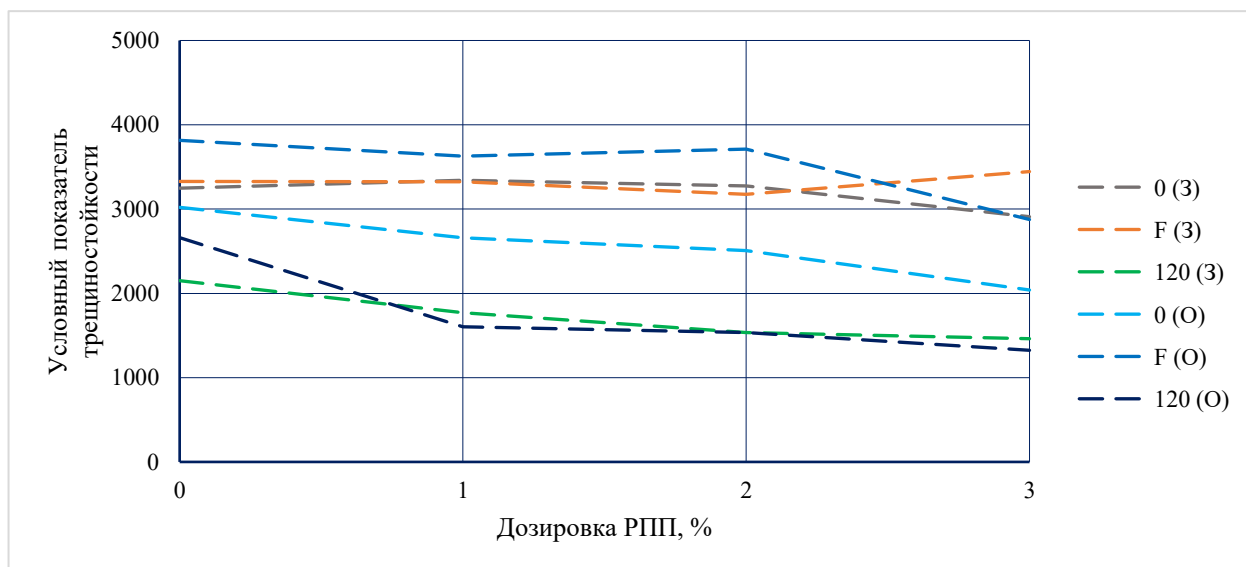


Рисунок 5.24 – Влияние дозировки РПП на условный показатель трещиностойкости СР после различных воздействий, где 0-3 – дозировка РПП, %; 0 – до начала воздействий; F – после 100 циклов замораживания и оттаивания; 120 – после выдерживания 120 сут в воздушно-сухих условиях; З, О – зола или опока в составе КМД

Из представленных на рисунке 5.24 данных очевидно:

- дозировка РПП практически не влияет на рассматриваемый показатель СР с золой в проектном возрасте после выдерживания 28 сут в указанных в главе 2 условиях, в составах с опокой имеет место снижение показателя с ростом дозировки РПП, что косвенно объясняет обеспечение лучших показателей в проектном возрасте в составах с опокой в сравнении с золой;

- после 100 циклов замораживания и оттаивания в составах с золой значения условного показателя трещиностойкости при дозировке РПП до 2% практически не изменились относительно проектного возраста, а при дозировке 3% несколько выросли, что объясняет нецелесообразность применения РПП в указанной дозировке в этом случае, в составах с опокой имеет место повышение величины условного показателя трещиностойкости до 1,5 раза, что объясняет худшие в сравнении с золой показатели при циклическом замораживании и оттаивании;

- после длительного выдерживания в воздушно-сухих условиях в составах с золой и опокой имеет место практически одинаковое снижение величины условного показателя трещиностойкости с ростом дозировки РПП, что объясняет более высокие показатели стойкости при указанных воздействиях в сравнении с циклическим замораживанием и оттаиванием.

Выводы по главе 5

1. Открытая капиллярная пористость содержащих КМД строительных растворов составляет от 0,96 до 1,13 относительно бездобавочного эталона, а условно-закрытая капиллярная (резервная) пористость содержащих КМД строительных растворов возрастает до 1,23 раза, в связи, с чем не следует рассматривать введение КМД как фактор, обеспечивающий повышение морозостойкости. Имеет место увеличение величины полной пористости с ростом дозировки РПП вследствие дополнительного воздухововлечения. Величина полной пористости после выдерживания в воздушно-сухих условиях выше, чем после замораживания и оттаивания. Вид минеральной добавки (опока или зола) мало влияет на полную пористость после различных видов воздействий. В составах с РПП несколько повышается условно-закрытая пористость, при этом степень повышения зависит как от дозировки РПП, так и от вида МД, что свидетельствует о положительной роли РПП в обеспечении стойкости строительных растворов при рассматриваемых воздействиях.

2. Характер изменения предела прочности при сжатии с ростом числа циклов замораживания и оттаивания в содержащих РПП составах принципиально отличается от бездобавочного эталона. Во всех исследованных составах после 100 циклов замораживания и оттаивания выполняется условие $R_F/R_0 > 1,2$, при нормируемом значении $> 0,8$ по ГОСТ Р 58277-2018. Значения критерия $k = X_{min}^{II}/X_{min}^I$, по п. 5.2.4 ГОСТ 10060-2012 после 100 – 125 циклов замораживания и оттаивания составили от 0,94 до 1,73 при нормируемом значении $> 0,9$, т.е. по

критерию «изменение предела прочности при сжатии» морозостойкость исследованных строительных растворов после 100 циклов не исчерпана, прогнозируемое значение превышает F150.

3. Изменение динамического модуля упругости строительных растворов после 100 циклов замораживания и оттаивания в составах с опокой составляет $E_F/E_0 = 1,04$, с золой уноса $E_F/E_0 = 1,09$. Минимальное значение $E_F/E_0 = 0,97$ свидетельствует о том, что по критерию «изменение динамического модуля упругости» по п. А.5 ГОСТ 10060-2012 морозостойкость не исчерпана, нормируемое значение $E_F/E_0 > 0,75$. По рассматриваемому критерию прогнозируемое число циклов замораживания и оттаивания в зависимости от вида МД и дозировки РПП составило от 140 до 325 циклов.

4. По критерию «изменение деформаций остаточного расширения» по п. А.5 ГОСТ 10060-2012 0,1 % (1 мм/м) все исследованные СР выдержали испытания. После незначительного расширения в ранний период циклического замораживания и оттаивания имеет место тенденция к уменьшению объема испытуемых образцов, более выраженная у составов с золой-уноса. Критерий «изменение деформаций остаточного расширения» в рассматриваемом случае не информативен.

5. Предложен не нормируемый критерий морозостойкости «изменение предела прочности при изгибе». Установлено, что составы с золой - уноса показывают меньшее снижение показателя $R_{f,F}/R_{f,0}$ в сравнении с опокой. Предложено и обосновано значение критерия морозостойкости $R_{f,F}/R_{f,0}$ со значениями от 0,76 до 0,93. Введение РПП в дозировке более 2 % с точки зрения обеспечения морозостойкости как по критерию «изменение предела прочности при изгибе», так и по критерию «изменение предела прочности при сжатии», нецелесообразно. Критерий морозостойкости «изменение предела прочности при изгибе» является более «жестким» относительно критериев по ГОСТ 10060-2012. Прогнозируемое число циклов замораживания и оттаивания в зависимости от величины критерия составило от 19 до более 100.

6. Все содержащие в составе КМД золу-уноса составы и составы с РПП, содержащие в составе КМД опоку после 100 циклов замораживания и оттаивания

имели прочность сцепления с основанием A_F более 1 МПа, что превосходит нормативные требования для классу клеевой смеси С2 по ГОСТ Р 56387-2018. При использовании в качестве критерия соотношение $A_F/A_0 = 0,8$ состав с золой при РПП = 3%, составы с опокой и золой без РПП не выдержали 100 циклов замораживания и оттаивания по критерию «изменение прочности сцепления». При отсутствии РПП в составе строительного раствора имеет место довольно тесная корреляция между прочностью сцепления с основанием и пределом прочности при изгибе. При наличии в составе РПП явная зависимость отсутствует, а прочность сцепления с основанием составляет от 0,275 до 0,507 величины предела прочности при изгибе. РПП при дозировке 1-2% оказывает значительное положительное влияние на повышение морозостойкости контактной зоны.

7. После выдерживания 120 сут в воздушно-сухих условиях имеет место повышение соотношений прочности при сжатии R_T/R_0 и при изгибе $R_{f,T}/R_{f,0}$, соотношение динамических модулей упругости E_T/E_0 с ростом дозировки РПП. Соотношение прочностей сцепления изменяется менее выражено, дозировка РПП 3% нецелесообразна.

Заключение

1. Рост пределов прочности при сжатии до 20%, при изгибе до 22% обеспечивает введение 20% КМД от массы цемента при соотношении Ш/МД=50%/50%. Лучшие показатели имеет КМД с опокой, зола-уноса и горелая порода имеют примерно равную эффективность. Состав КМД и дозировка РПП незначительно влияют на соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии. В воздушно-сухих условиях РПП обеспечивает повышение предела прочности при изгибе. В зависимости от вида МД и состава КМД значение R_2/R_{28} составляет от 0,36 до 0,67, у эталона 0,53 – 0,55. С ростом содержания РПП величина R_2/R_{28} снижается и составляет от 0,37 до 0,51. При выдерживании в воздушно-сухих условиях предел прочности при сжатии МЗБ составляет от 0,71 до 0,84 относительно нормальных условий, при наличии в составе РПП от 0,87 до 0,98. КМД не повышает начальный модуль упругости, состав КМД и содержание РПП практически не влияют на зависимость модуля упругости от прочности при сжатии.

2. Открытая капиллярная пористость содержащих КМД составов составляет от 0,96 до 1,13 относительно бездобавочного эталона, а условно-закрытая капиллярная (резервная) пористость возрастает до 1,23 раза. РПП и ВУД повышают полную пористость за счет воздухововлечения, при этом снижение предела прочности при сжатии составляет до 2,75% на один процент дополнительной пористости.

3. В нормальных условиях рост дозировки РПП повышает прочность сцепления со стандартным бетонным основанием, в воздушно-сухих условиях без РПП прочность сцепления снижается до 35-13% (опока-зола), с РПП до 25-15%. Прочность сцепления с основанием у составов с опокой составляет 0,08...0,22, с золой-уноса 0,2...0,25 от предела прочности при изгибе. В зависимости от состава и дозировки КМД деформации усадки составляют от 0,45 мм/м до 1,244 мм/м, при этом в первые две недели доля деформаций усадки составляет от 0,4 до 0,79 от полной. При равной степени высыхания составы с КМД характеризуются более интенсивным ростом деформаций усадки. Ведение РПП и ВУД приводит к росту

деформаций усадки до 2 и более раз, основное повышение вызывает ВУД. В воздушно-сухих условиях повышаются значения коэффициентов стойкости $k=R_T/R_0$ при сжатии и $k=R_{f,T}/R_{f,0}$ при изгибе, а также $k=E_T/E_0$ с ростом дозировки РПП до 2%.

4. Во всех составах после 100 циклов замораживания и оттаивания обеспечено условие $R_F/R_0 > 1,2$ (по ГОСТ Р 58277-2018 не менее 0,8). Значения критерия $k = X_{min}^H/X_{min}^I$, по п. 5.2.4 ГОСТ 10060-2012 составили от 0,94 до 1,73 (по ГОСТ не менее 0,9). Прогнозируемая морозостойкость по критерию прочности при сжатии превышает F150. Изменение динамического модуля упругости составило $E_F/E_0 = 1,04$ с опокой и $E_F/E_0 = 1,09$ с золой уноса при критерии по п. А.5 ГОСТ 10060-2012 $E_F/E_0 > 0,75$, прогнозируемое число циклов замораживания и оттаивания от 140 до 325. Не нормируемый критерий морозостойкости «изменение предела прочности при изгибе» является более «жестким» относительно критериев ГОСТ 10060-2012, значения $R_{f,F}/R_{f,0}$ от 0,76 до 0,93, прогнозируемое число циклов замораживания и оттаивания от 19 до 140.

5. Все содержащие в составе КМД золу-уноса составы и составы с РПП, содержащие в составе КМД опоку после 100 циклов замораживания и оттаивания имели превосходящие нормативные требования для класса клеевой смеси С2 по ГОСТ Р 56387-2018 значения прочности сцепления с основанием A_F более 1 МПа. Прочность сцепления с основанием после 100 циклов замораживания и оттаивания составила от 0,275 до 0,507 от предела прочности при изгибе. Прогнозируемая морозостойкость от 25 до 150 циклов. Дозировка РПП 1-2% оказывает значительное положительное влияние на повышение морозостойкости контактной зоны.

Список литературы

1. В 2015-2019 гг продажи сухих строительных смесей в России увеличились на 5,2%: с 9,3 до 9,7 млн т.//РБК. Магазин исследований. 20 ноября 2020. - URL:<https://marketing.rbc.ru/articles/11994/>
2. Анализ строительной отрасли в России в 2020-2024 гг, прогноз на 2025-2029 гг//BusinesStat. - URL:<https://businessstat.ru/catalog/id82676/>
3. Панченко, А. И. Сухие смеси в России: особенности производства и применения / А. И. Панченко, Г. В. Несветаев // Строительные материалы. – 2002. – № 5. – С. 19-22.
4. Тенденции развития производства сухих строительных смесей в России / Л. Х. Загороднюк, А. М. Гридчин, В. С. Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 6-14. – DOI 10.12737/22638.
5. Сухие смеси в современном строительстве / В. А. Безбородов, П. И. Мешков, Е. Г. Нерадовский, С. А. Петухов; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 1998. – 94 с.
6. Беляев, Е. В. Производство сухих строительных смесей: проблемы и перспективы / Е. В. Беляев // Сухие строительные смеси. – 2014. – № 4. – С. 8-9.
7. Кузьмина, В. П. Защита и ремонт железобетонных сооружений / В. П. Кузьмина // Сухие строительные смеси. – 2017. – № 2. – С. 23-26.
8. Коровкин, М. О. Ремонтные сухие строительные смеси для восстановления геометрических характеристик железобетонных конструкций / М. О. Коровкин, А. А. Короткова, Н. А. Ерошкина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 5(30). – С. 122-128.
9. Логанина, В. И. Сухие строительные смеси для реставрации зданий исторической застройки / В. И. Логанина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 3(24). – С. 34-42.

10. Теоретические основы создания сухих строительных смесей / Л. Х. Загороднюк, В. С. Лесовик, Е. С. Глагоев [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 40-52.
11. Карапузов, Е.К. Сухие строительные смеси / Е.К. Карапузов, Г. Лутц, Х. Герольд. – К.: Техника, 2000. – 226 с.
12. Козлов, В.В. Сухие строительные смеси / В.В. Козлов. - М.: Изд-во АСВ, 2000. - 96 с.
13. Шляхова, Е. А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона / Е. А. Шляхова, М. А. Шляхов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4(38). – С. 89.
14. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ / В. С. Лесовик, Л. Х. Загороднюк, Д. А. Беликов [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – № 7. – С. 82-85.
15. Анализ рынка сухих строительных смесей в России в 2020-2024 гг, прогноз на 2025-2029 гг//BusinesStat. – URL: https://businessstat.ru/images/demo/dry_building_mix_russia_demo_businessstat.pdf
16. Большаков, Э. Л. Специальные и специализированные сухие строительные смеси для строительства и эксплуатации транспортных сооружений / Э. Л. Большаков // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2009. – № 1(8). – С. 58-66.
17. Использование шлама химводоочистки теплоэлектростанций в производстве строительных материалов и изделий / А. В. Каклюгин, В. В. Боброва, М. П. Валов, В. С. Щербакова // Молодой исследователь Дона. – 2020. – № 4(25). – С. 28-33.
18. Prokopski, G. Granite dust as a mineral component of a dry cement mortar mixtures / G. Prokopski, A. Huts, V. Marchuk // Archives of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 66, No. 3. – P. 81-96. – DOI 10.24425/ace.2020.134385.

19. Состав и технология комплексных добавок для бетона на основе промышленных отходов / В. Т. Перцев, Я. З. Халилбеков, А. А. Леденев, Н. С. Перова // Цемент и его применение. – 2019. – № 3. – С. 98-101.
20. Оноприенко, Н. Н. К вопросу разработки отечественных реставрационных материалов для памятников архитектуры / Н. Н. Оноприенко, О. Н. Сальникова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 3. – С. 19-33. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-3-19-33.
21. Влияние минеральных и полимерных добавок на свойства плиточного клея / А. С. Манушина, А. В. Урбанов, А. М. Ахметжанов [и др.] // Сухие строительные смеси. – 2016. – № 2. – С. 17-20.
22. Белых, С. А. Сухая строительная смесь с повышенной адгезионной прочностью для отделки кирпичных поверхностей во влажных помещениях / С. А. Белых, А. И. Кудяков, А. А. Чикичев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1(60). – С. 122-133.
23. Работа штукатурных покрытий в составе современных теплоэффективных наружных стен зданий / В. В. Бабков, Д. А. Сеницын, А. Е. Чуйкин [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8(34). – С. 22-29.
24. Исследование свойств модифицированных штукатурных составов, наносимых при отрицательных температурах на блоки из автоклавного газобетона / В. В. Бабков, А. Е. Чуйкин, Д. А. Сеницын [и др.] // Сухие строительные смеси. – 2012. – № 4. – С. 15-18.
25. Кузьмина, В. П. Особенности применения сухих строительных смесей при проведении отделочных работ в различных климатических условиях. Часть 2 / В. П. Кузьмина // Сухие строительные смеси. – 2018. – № 6. – С. 30-36.
26. Налимова, А. В. Влияние комплексной полимерной добавки на прочность и усадочные деформации цементного камня / А. В. Налимова // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 1(19). – С. 553-557.

27. Кузьмина, В. П. Механизмы воздействия эфиров целлюлозы на свойства строительных материалов / В. П. Кузьмина // Сухие строительные смеси. – 2018. – № 1. – С. 33-40.
28. Несветаев, Г. В. Прочность сцепления с различными основаниями модифицированных строительных растворов в зависимости от условий выдерживания / Г. В. Несветаев, В. В. Осипов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 4(100). – С. 471-489.
29. Несветаев, Г. В. Изменение свойств строительных растворов с редиспергируемыми полимерными порошками после циклического нагревания - остывания / Г. В. Несветаев, В. В. Осипов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 2(98). – С. 335-350.
30. Нарин, С. Ю. Ремонтные составы CONCOLIT BARS для укрепления и восстановления бетонных конструкций и сооружений. Специальные цементы для бетонов / С. Ю. Нарин, А. П. Кронштатов // Сухие строительные смеси. – 2011. – № 6. – С. 13-15.
31. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Беликов Д.А. К проблеме проектирования сухих ремонтных смесей с учетом сродства структур // Вестник РААСН. – 2014. – № 18. – С.112-119.
32. Повышение прочности сцепления штукатурного покрытия с основанием / С. А. Ю. Муртазаев, А. С. Успанова, М. Р. Хаджиев, В. Х. Хадисов // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3, № 6. – С. 17-26.
33. Несветаев, Г. В. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня / Г. В. Несветаев, А. Н. Давидюк // Строительные материалы. – 2010. – № 1. – С. 44-46.
34. Несветаев, Г. В. Некоторые вопросы оценки качества клеев для плитки / Г. В. Несветаев, М. А. Ужахов // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2007. – № 1. – С. 64-66.
35. Несветаев, Г. В. Влияние редиспергируемых порошков и низкомодульных включений на свойства мелкозернистого бетона после

многократного замораживания-оттаивания / Г. В. Несветаев, А. В. Долгова // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 6(57). – С. 47.

36. Оценка эффективности добавок для сухих строительных смесей с нормируемыми показателями прочности сцепления с основанием / Г. В. Несветаев, А. В. Козлов, И. А. Филонов, В. В. Осипов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 1(85). – С. 404-414.

37. Несветаев, Г. В. О влиянии редиспергируемых полимерных порошков на модуль упругости и прочность сцепления строительных растворов / Г. В. Несветаев, В. В. Осипов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 7(91). – С. 493-505.

38. Несветаев, Г. В. Изменение свойств строительных растворов с редиспергируемыми полимерными порошками после выдерживания при высоких температурах / Г. В. Несветаев, В. В. Осипов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 10(94). – С. 406-420.

39. Пети, Ж. И. Разработка редисперсионных полимерных порошков для плиточных клеев: влияние молекулярной массы поливинилового спирта и вида противоспекательного агента на механические свойства растворов / Ж. И. Пети // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2018. – № 3(52). – С. 42-52.

40. Корнеев, В.И. О механизмах действия функциональных добавок при гидратации и твердении сухих строительных смесей // Доклад участника конференции Baltimix-2002. – 2002. – 10 с.

41. Влияние редиспергируемых порошков на свойства цементных строительных растворов / А. Е. Захезин, Т. Н. Черных, Б. Я. Трофимов, Л. Я. Крамар // Строительные материалы. – 2004. – № 10. – С. 6-7.

42. Голунов, С. А. Модификация плиточных клеев редисперсионными полимерными порошками VINNAPAS® / С. А. Голунов // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С. 47-49.

43. Василик, П. Г. Обзор современных эфиров целлюлозы торговой марки Mecellose для плиточных клеев на цементной основе / П. Г. Василик, И. В. Голубев // Сухие строительные смеси. – 2012. – № 1. – С. 18-21.

44. Бийтц, Р. Химические добавки для улучшения качества строительных растворов / Р. Бийтц, Х. Динденау // Строительные материалы. – 1999 г. – №3. – С. 13-15.
45. Баталин, Б. С. Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей / Б. С. Баталин // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 7. – С. 60-62.
46. Абрамова, А. Ю. Применение поверхностно-активных веществ в составе бетонов, растворов и сухих строительных смесей на цементном вяжущем / А. Ю. Абрамова, А. П. Пустовгар // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2021. – № 3(64). – С. 54-69.
47. ГОСТ 31357-2007 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008
48. ГОСТ Р 58277-2018 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2019
49. ГОСТ 31189-2015 Смеси сухие строительные. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2015
50. ГОСТ Р 56378 - 2015 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и адгезионным соединениям контактной зоны при восстановлении конструкций. – М.: Стандартинформ, 2015
51. Прочность на растяжение при изгибе бетонов нового поколения / А. Г. Булгаков, И. В. Ерофеева, А. А. Ишутин [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2(17). – С. 21-27. – DOI 10.51608/26867818_2022_2_21.
52. Кузьмина, В. П. Наполнители для сухих строительных смесей / В. П. Кузьмина // Сухие строительные смеси. – 2017. – № 3. – С. 8-15.
53. Влияние некоторых минеральных добавок на параметры прочности при сжатии мелкозернистого бетона//Академическая наука. – 2025. – № 2. – С. 93-96. – DOI 10.24412/3034-4042-2025-2-93-96.

54. Белов, В. В. Расчет плотных упаковок частицв смесях тонкодисперсных компонентов / В. В. Белов, И. В. Образцов // Сухие строительные смеси. – 2014. – № 3. – С. 32-35.

55. Анализ методов составления рецептур модифицированных сухих строительных смесей / М. Ш. Саламанова, З. Х. Исмаилова, П. Х. Окуева, М. С. Эскиев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2017. – № 4(8). – С. 67-72.

56. Теоретические аспекты получения сухих строительных смесей на основе природных ресурсов Чеченской Республики / А. Х. Аласханов, М. Ш. Саламанова, Р. Г. Бисултанов, С. С. Юсупов // Теоретические основы создания эффективных композитов : Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки, Белгород, 08 февраля 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 12-17.

57. Органо-неорганические вяжущие для ремонта и реставрации памятников истории и культуры башенного типа / С. Г. Шеина, Д. К. С. Батаев, С. А. Ю. Муртазаев, П. Д. Батаева // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика : Материалы Международной научно-практической онлайн-конференции, приуроченной к 60-летию член-корреспондента Академии наук ЧР, доктора технических наук, профессора Сайд-Альви Юсуповича Муртазаева, Грозный, 28 апреля 2021 года. – Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, 2021. – с. 129-135. – doi 10.34708/gstou.conf..2021.15.72.030.

58. Бейсембаева, С. А. Теоретические основы использования безусадочных золо-цементно-песчаных растворов / С. А. Бейсембаева, А. С. Рахтаев, С. Қ. Сыздыкова // Эпоха науки. – 2019. – № 20. – С. 136-142. – DOI 10.24411/2409-3203-2019-12023.

59. Кашибадзе, Н. В. Разработка и оптимизация свойств сухих строительных смесей для наливных полов с использованием шлаков / Н. В.

Кашибадзе, Л. Х. Загороднюк, М. А. Стрекозова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 89-94.

60. Несветаев, Г. В. Управление собственными деформациями цементного камня изменением состава и количества расширяющей добавки / Г. В. Несветаев, Ю. И. Потапова // Научное обозрение. – 2013. – № 11. – С. 46-49.

61. Кузьмина, В. П. Составы и способы получения сухих строительных смесей / В. П. Кузьмина // Сухие строительные смеси. – 2018. – № 5. – С. 25-30.

62. Сивков, С. П. Особенности процессов гидратации цементов в сухих строительных смесях / С. П. Сивков // Строительные материалы. – 2008. – № 2. – С. 4-5.

63. Усов, Б. А. Механизм действия функциональных добавок при гидратации и твердении сухих строительных смесей / Б. А. Усов, С. Ю. Акимов // Системные технологии. – 2015. – № 4(17). – С. 23-35.

64. 61. Шляхова, Е. А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона / Е. А. Шляхова, М. А. Шляхов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4(38). – С. 89.

65. К вопросу использования техногенного сырья в производстве бетонных и растворных строительных смесей//Неделя науки 2024: сб. матер. 45 итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Махачкала: ДГТУ, 2024

66. 62. Nguyen, D. V. Q. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete / D. V. Q. Nguyen, Yu. M. Bazhenov, O. V. Aleksandrova // Vestnik MGSU. – 2019. – Vol. 14, No. 1(124). – P. 102-117. – DOI 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117.

67. 63. Несветаев, Г. В. О соотношении пределов прочности цементных бетонов на растяжение при изгибе и сжатие / Г. В. Несветаев, Т. Г. Кузьменко // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 8(104). – С. 304-316.

68. ГОСТ Р 56592-2015 Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019

69. 65. Шишакина, О. А. Обзор направлений утилизации техногенных отходов в производстве строительных материалов / О. А. Шишакина, А. А. Паламарчук // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 4. – С. 198-203.

70. Использование отходов производства в строительстве//ВГП. Технологии и оборудование для гиперпрессования. - URL:<https://www.vgpress.ru/ispolzovanie-othodov-proizvodstva/>

71. Несветаев, Г. В. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов и строительных растворов / Г. В. Несветаев, И. А. Животкова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 5(113). – С. 388-402.

72. Высокопрочный бетон из материалов Вьетнама / Ю. М. Баженов, О. В. Александрова, Д. В. К. Нгуен [и др.] // Строительные материалы. – 2020. – № 3. – С. 32-38. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-779-3-32-38.

73. Буравчук, Н. И. Исследование активности минеральных добавок из техногенного сырья / Н. И. Буравчук, О. В. Гурьянова // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 10. – С. 26-31. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-10-26-31.

74. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н. И. Ватин, Д. В. Петросов, А. И. Калачев, П. Лахтинен // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4(22). – С. 16-21.

75. Каприелов, С. С. Некоторые особенности механизма действия органо-минеральных модификаторов на цементные системы / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 1. – С. 40-46.

76. Влияние содержания золы-уноса на прочность бетонов на основе сульфатостойкого портландцемента / Н. С. Хунг, Т. В. Лам, Б. И. Булгаков [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 1. – С. 51-58. – DOI 10.33622/0869-7019.2021.01.51-58.

77. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона / С. В. Макаренко, Б. М. Лозовский, О. В.

Хохряков, В. Г. Хозин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – № 3(53). – С. 39-46.

78. Структура и свойства известково-золяного цемента и его модификация / А. Н. Рязанов, В. И. Винниченко, И. В. Недосеко [и др.] // Строительные материалы. – 2018. – № 1-2. – С. 18-22.

79. Сафаров, К. Б. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС 20 Производство стеновых панелей на длинных стендах Nordimpianti в Грузии (Информация) / К. Б. Сафаров, В. Ф. Степанова, В. Р. Фаликман // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 20-25.

80. Петрик, И. Ю. Коррозионная стойкость бетона с высоким содержанием золы-уноса ТЭС / И. Ю. Петрик, В. Н. Губарь, С. В. Корниенко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – № 4(126). – С. 103-107.

81. Петрик, И. Ю. Влияние добавки Sika Visco Crete 5600 N PL на подвижность цементнозоляных паст с различным содержанием золы-уноса ТЭС / И. Ю. Петрик, В. Н. Губарь, С. В. Корниенко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – № 2(124). – С. 121-125.

82. Смоленский, О. В. Использование зол-уноса ТЭЦ в производстве строительных материалов и строительстве / О. В. Смоленский // Технологии бетонов. – 2012. – № 1-2(66-67). – С. 10-11. (Смоленский О.В. Технологии бетонов. 2012. №3-4. С. 27-29.)

83. Строителева, Е. А. Применение кислых зол в цементных бетонах / Е. А. Строителева // International Scientific Review. – 2015. – № 2(3). – С. 18-22.

84. Зверева, Э. Р. Утилизация карбонатного шлама систем химводоочистки тепловых электростанций / Э. Р. Зверева // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2011. – № 4(11). – С. 26-35.

85. Животкова И. А. К вопросу использования шлама химводоочистки в производстве строительных материалов. Обзор//Научно-инновационные исследования и разработки: новые вызовы современности: Сборник статей II

Международной научно-практической конференции, Москва, 09 апреля 2024 года.
– Москва: Центр дополнительного профессионального образования «Цифровая академия», 2024. – С. 75-83.

86. Валеев, Р. Ш. Утилизация шлама химводоочистки в составе бетонов (обзор мировой литературы) / Р. Ш. Валеев, И. Г. Шайхиев // Академический вестник ELPIT. – 2024. – Т. 9, № 2(28). – С. 28-40.

87. Сучков, В. П. Технология получения вяжущего из шлама химводоподготовки ТЭЦ / В. П. Сучков, А. В. Веселов, А. А. Зюзин // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2016. – № 19. – С. 269-274.

88. Дворкин, Л. И. Сухие строительные смеси с добавкой известково-карбонатной пыли / Л. И. Дворкин, В. В. Житковский // Технологии бетонов. – 2021. – № 3(176). – С. 61-65.

89. Авксентьев, В. И. Шлам химической водоочистки - эффективный наполнитель в самоуплотняющихся песчаных бетонах / В. И. Авксентьев, Н. М. Морозов, В. Г. Хозин // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2014. – № 4. – С. 20-23.

90. Медяник, Ю. В. Свойства штукатурных растворов с добавкой-наполнителем из шламовых отходов теплоэлектростанций / Ю. В. Медяник // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4(38). – С. 365-369.

91. Исследование эксплуатационных свойств самоуплотняющихся песчаных бетонов / Н. М. Морозов, В. Г. Хозин, В. И. Авксентьев, И. В. Боровских // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 3(37). – С. 211-216.

92. Использование шлама химводоочистки теплоэлектростанций в производстве строительных материалов и изделий / А. В. Каклюгин, В. В. Боброва, М. П. Валов, В. С. Щербакова // Молодой исследователь Дона. – 2020. – № 4(25). – С. 28-33.

93. Опоковидные породы юга России и перспективные направления их использования в производстве строительных материалов / В. Д. Котляр, Ю. В. Терехина, А. В. Котляр, С. И. Шека // Новые технологии. – 2012. – № 4. – С. 61-65.

94. Суханов, А. М. Исследование возможности применения местных строительных материалов для получения сухих строительных смесей / А. М. Суханов, П. И. Грехов // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережения : сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова, Якутск, 27–28 октября 2016 года / под ред. доц. А.Е. Саввиной. – Якутск: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2016. – С. 255-260.

95. Оценка активности минеральных добавок для композиционных цементов / Л. Д. Шахова, Д. Е. Кучеров, Ю. А. Аксютин, А. А. Гридчина // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сборник докладов (XIX научные чтения), Белгород, 05–08 октября 2010 года. Том 2. – Белгород, 2010. – С. 306-314.

96. Береговой, В. А. Стеновые Строительные материалы с наполнителем из опочных горных пород / В. А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1(22). – С. 88-92. – EDN TNDXUV.

97. Модифицированные вяжущие из природных и техногенных пород для получения сухих строительных смесей / В. Ф. Панова, И. В. Камбалина, С. А. Панов, А. А. Карпачева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 1(709). – С. 36-46.

98. Плотникова, Д. А. Разработка состава строительного раствора, модифицированного введением минеральной добавки из местных материалов - опок Каменоярского месторождения Черныярского района Астраханской области / Д. А. Плотникова, Ю. Г. Кожевникова // Исследования молодых ученых - вклад в инновационное развитие России : Доклады молодых ученых в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК»),

Астрахань, 13–15 мая 2015 года / сост. М.В. Лозовская, А.Г. Баделин. – Астрахань: Нижневолжский экоцентр, 2015. – С. 121-122.

99. Коровкин, М. О. Влияние опоки и суперпластификатора на свойства цемента / М. О. Коровкин, Н. А. Ерошкина // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4(43). – С. 167.

100. Коровкин, М. О. Влияние опоки и суперпластификатора на свойства цемента / М. О. Коровкин, Н. А. Ерошкина // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4(43). – С. 167.

101. Гамалий, Е. А. Горелые породы как активная минеральная добавка в бетон / Е. А. Гамалий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2008. – № 25(125). – С. 22-27.

102. Батаев, Д. К. С. Опыт и перспективы использования строительных композитов на основе техногенного сырья для высотного строительства / Д. К. С. Батаев, С. А. Ю. Муртазаев, М. С. Сайдумов // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2013. – № 3(20). – С. 29-35.

103. Дергунов, С. А. Сухие строительные смеси (состав, технология, свойства): учебное пособие для обучающихся, по образовательной программе высшего образования по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 Строительство / С. А. Дергунов, С. А. Орехов, А. И. Кравцов. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2024. – 106 с. – ISBN 978-5-7410-3314-2.

104. Синайко, Н. П. Комплексные добавки в бетоны, цементы и сухие строительные смеси системы "Релаксол" / Н. П. Синайко, А. П. Лихопуд, Т. В. Бабаевская // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 26-30.

105. Беляев, Е. В. Производство сухих строительных смесей: проблемы и перспективы / Е. В. Беляев // Сухие строительные смеси. – 2014. – № 4. – С. 8-9.

106. Khan, K. A. Effect of Ethylene Vinyl Acetate (EVA) on the Setting Time of Cement at Different Temperatures as well as on the Mechanical Strength of Concrete / K. A. Khan, I. Ahmad, M. Alam // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – Vol. 44, No. 5. – P. 4075-4084. – DOI 10.1007/s13369-018-3249-4.

107. Effects of surfactants on the properties of mortar containing styrene/methacrylate superplasticizer / E. S. Negim, J. Khatib, L. Bekbayeva [et al.] // The Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – P. 942978. – DOI 10.1155/2014/942978.
108. Wypych, G. Handbook of Adhesion Promoters / G. Wypych // Handbook of Adhesion Promoters, 2018. – P. 1-235.
109. Wang R., Wang P.-M. Action of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder in cement mortar. Construct. Build. Mater. 25 (11). (2011). 4210–421.
110. Polymer-Modified Concrete: Reported by ACI Committee 548. URL: 548.3R-03. 5483r_03.PDF-Yandex.Documents.
111. Jenni, A. Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars / A. Jenni, L. Holzer, R. Zurbriggen, M. Herwegh // Cement and Concrete Research. – 2005. – 35 (1). – P. 35-50. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.039.
112. Dvorkin, L. I. The influence of polyfunctional modifier additives on properties of cement-ash fine-grained concrete / L. I. Dvorkin // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – No. 1(93). – P. 121-133. – DOI 10.18720/MCE.93.10.
113. Bülichen, D. Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose as water retention agent / D. Bülichen, J. Kainz, J. Plank // Cem Concr Res. – 2012. – 42 (7). – P. 953-959. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.03.016.
114. Черных, Т. Н. Влияние эфиров целлюлозы на свойства растворных смесей и растворов / Т. Н. Черных, Б. Я. Трофимов, Л. Я. Крамар // Строительные материалы. – 2004. – № 4. – С. 42-43.
115. Цюрбригер Р., Дильгер П. Дисперсионные полимерные порошки – особенности поведения в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 1999. №3. С. 10-13.
116. Трофименко, А. А. Теории адгезии и механизм адгезионного действия / А. А. Трофименко // Modern Science. – 2019. – № 11-2. – С. 17-20.
117. Долговечность штукатурных фасадных систем гражданских зданий / Ю. В. Денисова, В. Н. Тарасенко, Р. В. Лесовик, А. А. Митрохин // Вестник

Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.
– 2016. – № 7. – С. 22-26.

118. Микульский В.Г., Козлов В.В. Склеивание бетона. М.: Стройиздат. 1975. 236 с.

119. Пименов, А. Т. Зависимость адгезии защитного (отделочного) покрытия от свойств материалов слоя и основания / А. Т. Пименов, О. А. Игнатова, П. А. Чикмарев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4(688). – С. 53-57.

120. Адгезия (клеи, цементы, припои) / под ред. Н. Дебройна, Р. Гувинка; пер. с англ. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1954 г. – 582 с

121. Башкирцев, В. И. Научные представления об адгезии / В. И. Башкирцев, Л. А. Юдицкий // Сервис в России и за рубежом. – 2012. – № 3(30). – С. 216-223.

122. Долгова, А. В. Морозостойкость, прочность сцепления и морозостойкость контактной зоны растворов из сухих строительных смесей на цементном вяжущем: специальность 21.50.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Долгова Анна Владимировна, 2022. – 189 с.

123. Конкина, И. В. Выбор материалов для монтажа газобетонных блоков / И. В. Конкина, Е. А. Арбузова, А. В. Пянзин // Вестник современных исследований. – 2019. – № 2.3(29). – С. 29-32.

124. Деформативные свойства мелкозернистого бетона / Е. С. Глаголев, Р. В. Лесовик, С. В. Клюев, В. А. Богусевич // Строительные материалы. – 2014. – № 1-2. – С. 113-115.

125. Сухие строительные смеси с модифицирующей добавкой на основе кремнезема / Л. А. Урханова, С. А. Лхасаранов, А. В. Битуев, Э. В. Бадмаева // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16, № 6. – С. 525-532. – DOI 10.15828/2075-8545-2024-16-6-525-532.

126. Завадская, Л. В. Многокомпонентные цементы с максимальным содержанием минеральных добавок / Л. В. Завадская // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). – 2023. – Т. 26, № 3(89). – С. 100-107. – DOI 10.32683/1815-5987-2023-26-89-3-100-107.

127. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю. В. Пухаренко, А. М. Харитонов, Н. Н. Шангина, Т. Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1(26). – С. 98-103.

128. Шангина, Н. Н. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры / Н. Н. Шангина, А. М. Харитонов // Сухие строительные смеси. – 2012. – № 3. – С. 35-38.

129. ГОСТ Р 58766-2019 Растворы строительные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020

130. ГОСТ 31358-2019 Смеси сухие строительные напольные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020

131. ГОСТ 33083-2014 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019

132. ГОСТ 30459-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. – М.: Стандартинформ, 2019

133. ГОСТ Р 56178-2014 Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015

134. Макушина, Ю. В. Пути оптимизации качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки / Ю. В. Макушина, Е. И. Шмитько, Н. А. Белькова // Химия, физика и механика материалов. – 2020. – № 4(27). – С. 50-65.

135. Механические характеристики геополимерных растворов на основе туниской кальцинированной глины, золы-уноса и метакеолина / В. Тахри, Б. Самет, С. Баклутти [и др.] // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2016. – № 6(45). – С. 60-67.

136. Влияние доменного гранулированного шлака на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона / М. О. Коровкин, А. А. Короткова, Н. А. Ерошкина, С. М. Саденко // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 8(80). – С. 486-494.

137. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок / Е. И. Шмитько, Ю. В. Макушина, Н.

А. Белькова, И. В. Милохин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2020. – № 1(42). – С. 128-135. – DOI 10.24866/2227-6858/2020-1-13.

138. Несветаев, Г. В. К вопросу нормирования усадки цементных бетонов / Г. В. Несветаев, Т. А. Щербинина // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 5(30). – С. 145. – DOI 10.15862/07TVN515.

139. Несветаев, Г. В. Влияние редиспергируемых полимерных порошков и условий выдерживания на усадку строительных растворов / Г. В. Несветаев, В. В. Осипов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 11(107). – С. 581-597.

140. Дворкин, Л. И. Кладочные растворы на основе сухих строительных смесей, содержащих цементную пыль / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин, И. В. Чорная // Сухие строительные смеси. – 2012. – № 5. – С. 21-25.

141. Несветаев, Г. В. Влияние редиспергируемых порошков и низкомодульных включений на морозостойкость растворов, полученных из сухих строительных смесей / Г. В. Несветаев, А. В. Долгова // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2020. – № 2(59). – С. 58-64.

142. Долгова, А. В. Зависимость морозостойкости модифицированных полимерами мелкозернистых бетонов от соотношения условно-закрытой и открытой капиллярной пористости / А. В. Долгова // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9(60). – С. 46.

143. Влияние модифицирования на морозо- и коррозиестойкость цементных материалов / Р. Ф. Серова, А. К. Кожас, Б. М. Тоимбаева, А. М. Рахимов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9-3. – С. 690-693.

144. Логанина, В. И. Оценка морозостойкости плиточного клея на цементной основе с применением в рецептуре добавки на основе аморфных алюмосиликатов / В. И. Логанина, К. В. Жегера // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2(31). – С. 32-36.

145. Белых, С. А. Оптимизация составов строительных растворов с пластифицирующе-воздухововлекающим комплексом и их свойства / С. А. Белых,

А. М. Даминова, Д. А. Данилов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 1. – С. 91-96.

146. Даминова, А. М. Управление структурой и морозостойкостью растворов из сухих монтажных смесей с гранулированной воздухововлекающей добавкой: специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Даминова Анастасия Михайловна. – Томск, 2009. – 23 с.

147. Аубакирова, Б. М. Влияние модифицирующих добавок на свойства сухих строительных смесей / Б. М. Аубакирова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2010. – № 2(63). – С. 163-167.

148. Несветаев, Г. В. Влияние некоторых минеральных добавок на деформации усадки строительных растворов / Г. В. Несветаев, Г. Н. Хаджишалапов, И. А. Животкова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 7(115). – С. 494-506.

149. Несветаев, Г. В. Влияние редиспергируемых полимерных порошков на некоторые свойства строительных растворов с комплексными минеральными добавками / Г. В. Несветаев, Г. Н. Хаджишалапов, И. А. Животкова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51, № 4. – С. 217-225. – DOI 10.21822/2073-6185-2024-51-4-217-225.

150. Несветаев, Г. В. Морозостойкость строительных растворов из сухих строительных смесей с модификаторами / Г. В. Несветаев, Г. Н. Хаджишалапов, И. А. Животкова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 10(118). – С. 503-517.

151. Животкова И. А. Влияние условий выдерживания на пористость и прочность строительных растворов из сухих строительных смесей // Инновации в науке: вызовы и перспективы будущего: сборник статей Международной научно-практической конференции, Саратов. – Саратов: НОП «Цифровая наука», 2024. – С. 40-46.

152. Животкова И. А. Влияние некоторых минеральных добавок на параметры пористости и критерий морозостойкости строительных растворов // Наука, технологии и общество: взаимодействие и перспективы. Сборник статей II

Международной научно-практической конференции. Москва: МНИЦ «Твоя наука», - 2024. - С. 27-31.

153. Несветаев, Г. В. Анализ критериев стойкости модифицированных строительных растворов при различных воздействиях / Г. В. Несветаев, Г. Н. Хаджишалапов, И. А. Животкова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – – 2025. – Т.52, №1. – С.210-218.

154. Несветаев, Г. В. Сравнительный анализ оценки морозостойкости модифицированных строительных растворов по различным критериям / Г. В. Несветаев, Г. Н. Хаджишалапов, И. А. Животкова // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 2(122). – С. 605-618.

155. Зиновьев, А. А. Кладочные растворы повышенной высоло- и морозостойкости с добавками микрокремнезема и омыленного таллового пека / А. А. Зиновьев, А. И. Кудяков, Н. В. Дворянинова ; А. А. Зиновьев, А. И. Кудяков, Н. В. Дворянинова ; М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО "Братский гос. ун-т", ГОУ ВПО "Томский гос. архитектурно-строит. ун-т". – Братск: Изд-во Братского гос. ун-та, 2011. – 158 с. – ISBN 978-5-8166-0294-5.

156. Кудяков, А. И. Морозостойкие кладочные растворы пониженной плотности с добавками микрокремнезема и омыленного таллового пека / А. И. Кудяков, А. А. Зиновьев, Н. В. Дворянинова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. – № 4(21). – С. 99-105.

157. Тацки Л. Н. Современные физико-химические методы исследования строительных материалов: учеб. пособие / Л. Н. Тацки, Э. А. Кучерова; Новосиб. гос. архитектур. - строит. ун-т. – Новосибирск: НГАСУ, 2005. – 80 с.

158. Кудяков, А. И. Смеси сухие растворные цементные с микрогранулированной воздухововлекающей добавкой / А. И. Кудяков, С. А. Белых, А. М. Даминова // Строительные материалы. – 2010. – № 1. – С. 52-53.

159. Влияние комплексного минерального модификатора МетаМикс-1 на свойства плиточного клея / С. А. Захаров, С. П. Сивков, Е. Н. Потапова, О. Н. Матюхина // Сухие строительные смеси. – 2013. – № 6. – С. 16-19.

160. Модификаторы "МетаМикс" в плиточных клеях // Сухие строительные смеси. – 2012. – № 1. – С. 10-11.

161. Несветаев Г. В. Бетоны учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 270100 "Строительство" / Г. В. Несветаев. — Изд. 2-е, доп. и перераб.. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. — 381, [1] с. ил., табл., граф.; 21.

162. ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости. — М.: Стандартинформ, 2018

163. Животкова И. А., Омарова Л.А. Прогноз морозостойкости строительных растворов с минеральными добавками по критериям морозостойкости //Современные строительные технологии и материалы: Сборник научных трудов. — Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2024. — С. 42-47.

164. Животкова И. А. Влияние полимеров на параметры пористости, прочность и критерий морозостойкости строительных растворов с минеральными добавками//Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Саратов, 20 ноября 2024 года. — Саратов: Научно-образовательная платформа «Цифровая наука», 2024. — С. 12-17.

165. Несветаев, Г. В. Прочность цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении / Г. В. Несветаев, Г. С. Кардумян // Бетон и железобетон. – 2013. – № 5. – С. 6-8. – EDN WLJEAN.

166. Несветаев, Г. В. Самоуплотняющиеся бетоны (SCC): усадка / Г. В. Несветаев, А. Н. Давидюк // Строительные материалы. – 2009. – № 8. – С. 52-54.

167. Несветаев, Г. В. Об оценке качества бетона монолитных конструкций по показателю морозостойкости / Г. В. Несветаев, Ю. И. Корянова, А. В. Коллеганов // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2021. – № 4. – С. 1-11.

168. Несветаев, Г. В. Некоторые методические аспекты определения морозостойкости бетона по ГОСТ 10060-2012 / Г. В. Несветаев, Ю. И. Корянова, Е.

В. Иванчук // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2021. – № 5. – С. 1-14.

169. Абрамова, А. Ю. Повышение эффективности смесей сухих строительных клеевых на цементном вяжущем: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абрамова Анастасия Юрьевна, 2024. – 195 с.

Список сокращений и условных обозначений

ССС	– сухие строительные смеси
КМД	– комплексная минеральная добавка
МД	– минеральная добавка
МЗБ	– мелкозернистый бетон
РПП	– редиспергируемый полимерный порошок
ВУД	– водоудерживающая добавка
С _{МК}	– гранулированные воздухововлекающие добавки
АМД	– активные минеральные добавки
ПЦ	– портландцемент
Ш	– шлам химводоочистки
З	– зола-уноса
О	– опока
ГП	– горелая порода
П	– песок
НУ	– нормальные условия
СР	– строительный раствор
В/Ц	– водоцементное отношение

Приложение 1. Внедрение результатов диссертационной работы

ООО «ПК «ЮгСтройСмесь»
 Юридический адрес: 347900, Россия, Ростовская обл.,
 г. Таганрог, ул. Чехова, д. 26Л-9, офис 310
 Фактический адрес: 347927, Россия, Ростовская обл.,
 г. Таганрог, Поляковское шоссе, 19/1, офис 229
 ОГРН 1056154065373, ИНН 6154097427, КПП 615401001, ОКПО 79211444
 Р/сч. 40702810952090004436 в Юго-Западный банк ПАО «Сбербанк России»
 г. Ростов-на-Дону, К/сч. 30101810600000000602, БИК 046015602
 Тел./Факс: (8634) 431-305 E-mail: usts1@mail.ru

Акт внедрения результатов научно-технических исследований по кандидатской диссертации Животковой Ирина Александровны

Комиссия в составе:

1. Директор Общества с ограниченной ответственностью «ЮгСтройСмесь» Боев Вячеслав Вячеславович;
2. Гл. технолог Общества с ограниченной ответственностью «ЮгСтройСмесь», ООО «Полимерстрой» Кузьмин Александр Степанович;
3. Директор Общества с ограниченной ответственностью «Ростовская Строительная Лаборатория» Козлов Григорий Александрович;
4. Аспирантка ФГБОУ ВО ДГТУ Животкова Ирина Александровна.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что с мая по июль 2025 г. на технологической линии ООО «ЮгСтройСмесь» выпущено три опытных партии кладочных, штукатурных и напольных сухих строительных смесей по рецептурам разработанным аспиранткой Животковой И.А. в кандидатской диссертации «Сухие строительные смеси с модифицирующими добавками на основе природного и техногенного сырья».

Апробированные в производственных условиях составы прошли лабораторные испытания в ООО «Ростовская Строительная Лаборатория» и подтвердили соответствие их качества требованиям ГОСТ Р 58272-2018 «Смеси сухие строительные кладочные. Технические условия», ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия» и ГОСТ 31358-2019 «Смеси сухие строительные напольные. Технические условия».

Разработанные аспиранткой Животковой И.А. составы приняты в качестве базовых для отработки производственных рецептур в условиях ООО «ЮгСтройСмесь» с целью организации массового производства.

Настоящим актом подтверждается, что разработанные рекомендации по результатам диссертационной работы Животковой И.А. имеют практическое значение для организации производства кладочных, штукатурных и напольных составов по ГОСТ Р 58272, ГОСТ 33083, ГОСТ 31358.

Директор ООО «ЮгСтройСмесь» _____ Боев В.В.

М.П.

Гл. Технолог ООО ПК «ЮгСтройСмесь», ООО «Полимерстрой» _____ Кузьмин А.С.

Директор ООО «РСЛ» _____ Козлов Г.А.

М.П.

Аспирантка ФГБОУ ВО ДГТУ _____ Животкова И. А.





ООО «ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ»

ПРОИЗВОДСТВО И ПРОДАЖА СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

346887, Ростовская область, г. Батайск, ул. Энгельса, 345 "Б", тел.: (86354) 7-17-90, 7-17-97 e-mail: t-m@yandex.ru
ИНН 6141022992 КПП 614101001 ОГРН 1046167013200

Акт
внедрения результатов
научно-технических исследований
по кандидатской диссертации Животковой Ирина Александровны

Мы, нижеподписавшиеся, Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью "Технология и Материалы" Цуров Амирхан Израилович, заведующая испытательной лаборатории Общества с ограниченной ответственностью "Технология и Материалы" Острожная Екатерина Михайловна, аспирантка ФГБОУ ВО ДГТУ Животкова Ирина Александровна,

составили настоящий акт о том, что результаты научно-технических исследований и рекомендации аспирантки Животковой И.А., полученные в рамках кандидатской диссертации «Сухие строительные смеси с модифицирующими добавками на основе природного и техногенного сырья» прошли промышленную апробацию на технологической линии ООО "Технология и Материалы" в период с марта по апрель 2025 г. Разработанные аспиранткой Животковой И.А. составы приняты в качестве базовых для отработки производственных рецептур в условиях ООО "Технология и Материалы" с целью организации производства сухих строительных смесей напольных, а именно штукатурных по ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия», клеевых по ГОСТ Р 56387-2018 «Смеси сухие строительные клеевые на цементном вяжущем. Технические условия» и ремонтных по ГОСТ Р 56378-2015 «Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и адгезионным соединениям контактной зоны при восстановлении конструкций».

Настоящим актом подтверждается, что разработанные рекомендации по результатам диссертационной работы Животковой И.А. имеют практическое значение для организации производства штукатурных, клеевых и ремонтных составов по ГОСТ 33083, ГОСТ Р 56387, ГОСТ Р 56378.

Генеральный директор ООО "ТИМ" _____ Цуров А. И.
М.П.

Заведующая ИЛ ООО "ТИМ" _____ Острожная Е. М.

Аспирантка ФГБОУ ВО ДГТУ _____ Животкова И. А.