

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи



**Морозова Марина Владимировна**

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
САПОНИТ-СОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

**Специальность:** 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат химических наук,  
доцент, М.А. Фролова

Архангельск – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	13
1.1 Состояние и перспективы развития производства строительных материалов в Архангельской области .....	13
1.2 Природно-климатические условия и минерально-сырьевые ресурсы Архангельской области .....	15
1.3 Особенности проектирования бетонов, применяемых в Северных и Арктических регионах России .....	28
1.4 Повышение эффективности бетонов .....	31
1.5 Особенности проектирования мелкозернистого бетона .....	34
1.6 Повышение эффективности мелкозернистых бетонов за счет использования минеральных высокодисперсных модификаторов .....	36
1.7 Отходы обогащения кимберлитовых руд.....	38
Выводы по первой главе.....	42
2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	44
2.1 Методы исследований .....	44
2.2 Характеристика исходных материалов.....	52
2.2.1 Характеристика вяжущего .....	52
2.2.2 Характеристика заполнителя .....	53
2.2.2.1 Исследование свойств песка .....	54
2.2.2.3 Характеристика сапонит-содержащего отхода.....	55
2.2.2.3.1 Выделение сапонит-содержащего материала .....	55
2.2.2.3.2 Характеристика сапонит-содержащего материала.....	56
2.2.2.3.3 Подготовка сапонит-содержащих отходов.....	58
2.2.2.3.3.1 Механическое диспергирование материала .....	58
2.2.2.3.4 Определение величины влагопоглощения ССМ .....	59
2.2.2.3.5 Методика измерения величины водопоглощения высокодисперсных систем .....	59
2.2.2.3.6 Устройство для измерения водопоглощения сыпучих материалов.....	60

2.3	Подбор состава мелкозернистого бетона и изготовление образцов .....	63
2.4	Методы испытания опытных образцов мелкозернистого бетона .....	64
	Выводы по второй главе .....	65
3	<b>ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЯ С ВЫСОКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО КОМПОНЕНТА БЕТОННОЙ СМЕСИ .....</b>	<b>66</b>
3.1	Поверхностная энергия и сорбционный гистерезис сапонит-содержащего материала .....	66
3.1.1	Понятие поверхностной энергии .....	66
3.1.2	Основные характеристики сапонит-содержащего материала .....	67
3.1.3	Сорбционно-десорбционный гистерезис ССМ .....	74
3.2	Изменение величины водопоглощения образцов ССМ в зависимости от площади удельной поверхности .....	77
3.2.1	Определение величины водопоглощения сыпучих материалов .....	84
3.3	Механизм действия минерального модификатора .....	85
3.4	Подбор оптимального состава мелкозернистого бетона .....	87
3.5	Эффективность использования сапонит-содержащего материала, в качестве высокодисперсного минерального компонента для получения высокоэффективных мелкозернистых бетонов .....	88
3.6	Характеристики опытных образцов мелкозернистого бетона .....	98
	Выводы по третьей главе .....	102
4	<b>РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С МОДИФИКАТОРОМ .....</b>	<b>104</b>
4.1	Проектирование состава мелкозернистого бетона .....	104
4.2	Изменение реологии бетонной смеси при введении высокодисперсного минерального ССМ .....	108
4.3	Оптимизация состава мелкозернистого бетона за счёт использования высокодисперсного минерального отхода алмазодобывающей промышленности .....	110
4.3.1	Морозостойкость бетона .....	111
4.3.2	Водопоглощение, водопроницаемость, истираемость и усадка бетона .....	114
4.4	Микроструктура бетонных образцов в зависимости от состава .....	115

4.5 Разработка составов мелкозернистых бетонов .....	117
Выводы по четвертой главе .....	121
5 ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....	123
5.1 Разработка нормативной документации .....	124
5.2 Внедрение результатов исследований .....	125
5.3 Технико-экономическое обоснование использования отходов алмазодобывающей промышленности Архангельской области .....	125
Выводы по пятой главе:.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	134
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	155
Приложение А. Перечень нормативных документов, на которые даны ссылки.....	155
Продолжение приложения А .....	156
Приложение Б. Патент на полезную модель №156792. Устройство для измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов .....	157
Приложение В. Протокол определения среднего размера частиц сапонит-содержащего материала на анализаторе субмикронных частиц Delsa Nano C (средний размер частиц $445 \pm 40$ нм.).....	159
Приложение Г. Протокол по определению удельной поверхности высокодисперсного сапонит-содержащего материала на анализаторе Autosorb-iQ-MP (средний размер частиц образца $445 \pm 40$ нм).....	160
Приложение Д. Протокол по определению величины водопоглощения высокодисперсного сапонит-содержащего материала на экспериментальной установке (средний размер частиц образца 445 нм).....	162
Приложение Е. Протокол по определению прочности бетонных образцов на сжатие .....	163
Приложение Ж. НОУ-ХАУ №КТ 2017-01 «Смесь для получения морозостойкого бетона высокого класса прочности» .....	164
Приложение З. СТО 10-27.1.5-2018 Минеральная добавка. Технические условия	166

Приложение И. СТО 11-27.1.5-2018 Мелкозернистый бетон с использованием минеральной добавки. Технические условия.....	167
Приложение К. Акт о внедрении результатов научной работы в производство.....	168
Приложение Л. Справка о внедрении результатов научной работы в учебный процесс .....	169

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Одним из наиболее востребованных строительных материалов является мелкозернистый бетон, производство которого, по экономическим соображениям должно базироваться на локально распространенной сырьевой базе. При этом, не менее важной задачей является получение композита с высокими эксплуатационными характеристиками. С этой целью используют различные химические добавки, в состав которых входят такие вредные вещества как: формальдегид, меламиноформальдегидные смолы, неорганические кислоты и др. Вследствие высокой стоимости и сложности получения суперпластификаторов, все чаще возникает необходимость разработки других более дешёвых добавок, улучшающих физико-механические, реологические и деформационные свойства бетона.

Одним из способов повышения эксплуатационных характеристик бетонов является использование высокоактивных добавок различного состава и генезиса, как микро-, так и нанодисперсного уровня, которые способствуют оптимизации процессов структурообразования за счет инициирования формирования гидратных соединений.

В настоящее время, с точки зрения экономической целесообразности, в качестве сырья стало выгодно использовать многотоннажные отходы производств.

Так, в 2002 году началась промышленная разработка трубки «Архангельская» месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова. В процессе обогащения кимберлитовых руд в хвостохранилище ежегодно складывается до 1 млн. тонн отходов (пустые песчано-глинистые породы). Особенностью данного месторождения является его масштабная сапонитизация (60 ... 70 %). Такое скопление отходов приводит к постоянному увеличению площади хвостохранилища и значительно усиливает антропогенную нагрузку на экосистему региона.

Данная проблема, связанная с утилизацией отходов алмазодобывающей промышленности, может быть решена за счёт использования сапонита в качестве компонента при получении мелкозернистых бетонов. Это позволит не только раскрыть потенциал уникальных свойств сапонит-содержащих материалов, но и будет способствовать развитию сырьевой базы строительной индустрии региона.

Ожидается, что введение сапонита в состав мелкозернистого бетона окажет комплексное воздействие на свойства смеси (регулирование подвижности, плотности, повышение прочности, морозостойкости), снизит стоимость конечной продукции, а также позволит применять разработанные составы в таких областях как: ремонтные работы (заделка трещин и соединительных швов), изготовление арочных конструкций, тонкостенных и густоармированных изделий и др.

Кроме того, использование сапонит-содержащего материала в качестве одного из компонентов бетонной смеси позволит выделить новое направление утилизации отходов обогащения кимберлитовых руд.

Работа выполнена при финансовой поддержке:

- 1) Федеральной Целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», соглашение 14.А18.21.1108 (2015-2016 гг.);
- 2) программы развития САФУ имени М.В. Ломоносова;
- 3) базовой части Госзадания (проект №3636).

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам повышения эксплуатационных характеристик бетонов посвящено большое количество работ как российских, так и зарубежных ученых (Баженов Ю.М., Калашников В.И., Лесовик В.С., Логанина В.И., Тараканов О.В., Тейлор Х., Чулкова И.Л. и др.) Для повышения этих характеристик используют пуццолановые и высокоактивные компоненты. Возможность применения сапонит-содержащих отходов в качестве компонента бетонной смеси не была изучена в полной мере. В ранее проведенных исследованиях предлагалось использование сапонит-содержащих отходов в качестве компонента органоминерального нанодисперсного модификатора (ОМ), получаемого комплексным помолом цемента, кварцевого песка, сапонит-содержащего материала (4 %) и гиперпластификатора. Введение 7,5 % ОМ позволило повысить физико-механические характеристики бетонной смеси. Для получения такого модификатора разработан способ выделения сапонит-содержащего материала (ССМ) из оборотной воды хвостохранилища методом электролитной коагуляции. Предложенные теоретические предпосылки по использованию ССМ (не более 1,6 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси) не

позволяют масштабнo решить проблему, связанную с утилизацией отходов и оценить технологические и потенциальные возможности использования ССМ.

**Цель исследования** заключается в разработке составов мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками путем использования сапонит-содержащих отходов алмазодобывающей промышленности.

**Задачи исследования:**

1) Обосновать эффективность использования сапонит-содержащих отходов алмазодобывающей промышленности в качестве минерального компонента при получении мелкозернистых бетонов;

2) Изучить механизм действия минерального компонента и оптимизировать условия его применения для получения мелкозернистого бетона с улучшенными физико-механическими характеристиками и морозостойкостью;

3) Разработать составы эффективного мелкозернистого бетона, изготовить опытные образцы, определить их физико-механические, деформационные характеристики, морозостойкость;

4) Разработать нормативно-техническую документацию, провести внедрение результатов исследования путём выпуска опытно-промышленной партии мелкозернистого бетона с использованием сапонит-содержащего отхода.

**Объект исследования** – мелкозернистый бетон с высокодисперсным минеральным компонентом на основе сапонит-содержащих отходов (ССО) алмазодобывающей промышленности.

**Предмет исследования** – свойства высокодисперсного сапонит-содержащего отхода и его влияние на структурообразование мелкозернистого бетона.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

1. Обоснована возможность создания модифицированных мелкозернистых бетонов с повышенными эксплуатационными показателями за счет проявления водносорбционных-десорбционных свойств высокодисперсным компонентом на основе сапонит-содержащего отхода обогащения кимберлитовых руд алмазодобывающей промышленности. Состав и объемно-поверхностные характеристики сапонит-содержащего компонента обеспечивают: снижение В/Ц отношения, пластифицирование бетонной смеси, образование гидросиликатов



дополнительной генерации, формирование рациональной поровой структуры композита и, как следствие, повышение эксплуатационных свойств мелкозернистого бетона.

2. Установлены зависимости влияния основных рецептурных и технологических факторов на параметры структуры и эксплуатационные свойства мелкозернистого бетона с высокодисперсным сапонит-содержащим компонентом, позволяющие установить рациональные границы варьирования рецептурно-технологических факторов. Полученные составы мелкозернистых бетонов обладают повышенными показателями прочности, морозостойкости, водонепроницаемости.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения сапонит-содержащего отхода обогащения кимберлитовых руд алмазодобывающей промышленности в качестве модифицирующего компонента при получении мелкозернистого бетона, позволяющего управлять процессами структурообразования на различных технологических этапах его производства, выступая в качестве сорбционно-десорбционного и пуццоланового компонента твердеющей системы.

2. Разработан способ определения величины водопоглощения сыпучих материалов, позволяющий изучить кинетику данного процесса для сапонит-содержащего материала и оптимизировать его характеристики как высокодисперсного компонента бетонной смеси.

3. Разработаны составы и технология производства мелкозернистого бетона с использованием минерального высокодисперсного сапонит-содержащего компонента, позволяющего получить изделия с: плотностью – 2000 – 2020 кг/м<sup>3</sup>, пределом прочности при сжатии – 41,30 – 73,70 МПа, модулем упругости – 27800 – 44170 МПа, общая пористость – 4,90 – 16,78 %, морозостойкость – F<sub>1</sub>100 – F<sub>1</sub>400, водопоглощение по массе – 3,65 – 4,35 %, водонепроницаемость – W6 – W10. При этом полученные изделия соответствуют требованиям ГОСТ 26633-2015: маркам по плотности D2000 – D2200, классу по прочности B30 – B55.

**Реализация результатов исследований.** Результаты экспериментальных исследований и теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, используются кафедрой «Композиционных материалов и

строительной экологии» ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям: 08.03.01 «Строительство» профили «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» и «Экологическая безопасность строительства»; 08.04.01 «Строительство» магистерская программа «Промышленное и гражданское строительство в холодном климате».

**Методология и методы исследования.** В исследованиях использовались труды ведущих ученых и специалистов Российской Федерации, а также других стран в области производства мелкозернистых бетонов. Для исследования структуры и свойств опытных образцов применялись современные наукоёмкие методы анализа: фотонно-корреляционная спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, рентгенофазный анализ, электронная микроскопия и пр. Физико-механические, деформационные характеристики и морозостойкость определялись в соответствии с действующими нормативными документами ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 29167-1991, ГОСТ 10060-2012.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) обоснование эффективности использования минерального компонента на основе отходов алмазодобывающей промышленности для получения высокоэффективных мелкозернистых бетонов;
- 2) результаты исследования кинетики процесса водопоглощения ССО и механизм его действия при формировании структуры композита;
- 3) результаты определения деформативных, прочностных характеристик и морозостойкости мелкозернистого бетона с использованием высокодисперсного ССМ;
- 4) составы высокоэффективных мелкозернистых бетонов и результаты их внедрения.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, п.7 «Разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности». Результаты исследований не противоречат известным теоретическим положениям.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследований определяется использованием в работе государственных стандартов, нормативных документов, широкого спектра методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования, применением современных методов исследования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований и воспроизводимостью результатов при большом объеме экспериментов.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждены и одобрены на следующих научных конференциях:

1) Ежегодной Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2014 – 2016 гг.);

2) Первой всероссийской конференции с международным участием «Инновационные материалы и технологии для строительства в экстремальных климатических условиях» (Архангельск, 2014 г.);

3) Пятнадцатой и шестнадцатой Международной многопрофильной научной конференции «Нано-, био- и зеленые технологии для устойчивого будущего» (Болгария, 2015 – 2016 гг.);

4) Научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова «Развитие северо-арктического региона: проблемы и решения» (Архангельск, 2015 – 2016 гг.);

5) Пятом Международном семинаре-конкурсе молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей «Алит Информ» (Москва, 2015 г.);

6) Международной конференции «Интеллектуальные композиты для зеленого строительства» (Белгород, 2016 г.);

7) Международной молодежной конференции «Физика.СПб/2016» (Санкт-Петербург, 2016 г.);

8) Международной молодежной конференции «Физика.СПб/2017» (Санкт-Петербург, 2017 г.);

9) Международном online конгрессе «Фундаментальные основы строительного материаловедения» (Белгород, 2017 г.);

10) Российской онлайн-конференции, посвященной дню Российской науки «Теоретические основы создания эффективных композитов» (Белгород, 2018 г.).

**Внедрение результатов исследований.** Разработаны нормативные документы: стандарт организации СТО 10-27.1.5-2018 «Минеральная добавка. Технические условия» и СТО 11-27.1.5-2018 «Мелкозернистые бетоны с использованием минеральной высокодисперсной добавки. Технические условия».

Изготовлена опытная партия бетонного раствора, использовавшегося для заделки внутренних стыков и соединительных швов при монтаже стеновых панелей зданий на предприятии ООО «Динамика». Проведённые натурные испытания показали высокую эффективность использования мелкозернистого бетона с модифицирующим компонентом из сапонит-содержащего отхода обогащения кимберлитовых руд.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 28 работ, в том числе шесть работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и систем цитирования Web of Science, Scopus, и семь работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Новизна исследований подтверждена патентом на полезную модель №156792 и ноу-хау № КТ 2017-01.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 169 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 52 таблицы, 11 приложений (изложены на 15 страницах) и списка литературы из 188 наименований.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1 Состояние и перспективы развития производства строительных материалов в Архангельской области

Архангельская область является крупнейшим субъектом Российской Федерации в европейской части России. Площадь Архангельской области составляет 590 тыс. км<sup>2</sup>, что больше площади многих европейских стран. Архангельская область богата такими природными ресурсами как строительный песок (кварцевый песок), гипс, известняки, глина, гравий, базальт, гранит и др.

В последние годы строительная индустрия региона переживала не лучшие времена. Замедление объемов работ в строительном секторе привело к резкому снижению спроса на продукцию предприятий, выпускающих стройматериалы. Сегодня ситуация изменилась в лучшую сторону. Объёмы выпуска кирпича по сравнению с 2015 г. выросли на 17%, а железобетонных изделий – на 5% [1, 2].

В то же время, несмотря на значительное увеличение площадей жилого и нежилого назначения, строительные организации несут потери, связанные с нехваткой в строительной отрасли материалов местного производства и внедрении новых технологий.

На основании статистических отчетов Федеральной службы государственной статистики по Архангельской области (ФСГСаО) следует, что в 2015 г. было введено в эксплуатацию 2 млн. м<sup>2</sup> площади жилых и нежилых зданий и сооружений, а к 2017 г. эта цифра возросла на 63% [3]. ФСГСаО так же приводит отчеты по производственной деятельности строительных организаций, из которых видно, что процент влияния факторов, ограничивающих их деятельность, с годами возрастает [4]. К началу 2017 г. процент фактора «нехватка материалов» вырос на 3 пункта по сравнению с 2016 г.

По итогам 2015 года наблюдается падение производства цемента, вызванное снижением спроса на этот строительный материал, которое характерно сразу для нескольких регионов Северо-Западного федерального округа. По прогнозам Савинского цементного завода, объёмы выпуска цемента в 2018 году будут такими же, как в 2016 – 2017 гг.

В настоящее время Архангельская область имеет двадцать одно предприятие производящее строительные материалы и изделия. Из них порядка десяти крупнейших предприятий имеют оборот более 3,6 млрд. рублей, что в 1,2 раза выше показателя 2015 г.

Сейчас в Архангельской области работают четыре крупных завода по производству кирпичной продукции: кирпич силикатный рядовой и лицевой, керамический одинарный и полуторный, камень керамический, блоки силикатные, а также известь, песок и строительный шлак.

Сборные железобетонные конструкции и детали любой сложности производят пять предприятий: фундаментные блоки, стеновые панели, плиты перекрытий, сваи любой длины, лестничные марши, площадки, ступени, перемычки, панели ограждений, балки, колонны, кольца и крышки колодцев, мостовые элементы, железобетонные конструкции для дорожного строительства и плиты покрытия.

В Плесецком районе Архангельской области расположен ЗАО «Савинский цементный завод» [5]. Савинский цементный завод из года в год подтверждает отличные показатели в области качества цемента. В арсенале завода тринадцать знаков качества. С 2010 г. предприятие распространяет свою продукцию на территории Вологодской, Московской, Ленинградской, Кировской, Новгородской, Ярославской области и многие др.

В регионе есть значительные мощности по производству нерудных строительных материалов и изделий для крупнопанельного домостроения (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Запасы сырьевых материалов Архангельской области

Сырьевые материалы	Объем запасов, млн. т
Известняки	57
Глины	31
Песок	53
Карбонатные породы	70
Базальт	121

При современных тенденциях развития гражданского и промышленного строительства увеличивается потребность в конструкциях и изделиях полученных на основе мелкозернистых бетонов. Существующие предприятия не имеют возможности наращивать свои мощности без модернизации оборудования [6].

Для решения возникающих проблем в области принимаются меры государственной поддержки промышленности строительных материалов [7]. С 2008 года успешно реализуется программа «Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г.», утвержденная Президентом РФ от 18.09.2008 г. №1969 [8]. В рамках программы предусмотрены такие приоритетные направления как: комплексное социально-экономическое развитие региона, развитие науки и технологий, создание современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры и др.

С 2011 года на основании распоряжения Правительства Российской Федерации (от 18 ноября 2011 г. № 2074-р) «стартовала» «Стратегия социально-экономического развития Северо-Западного федерального округа» на период до 2020 года [9]. На основе этого документа для реализации крупных инвестиционных проектов и развития инфраструктуры планируется использовать территориальные ресурсы именно Северо-Западного федерального округа (исключая г. Санкт-Петербург), а также повысить доступность и уровень обеспеченности населения жильем, решить проблемы ветхого и аварийного жилья, улучшить использование существующего жилищного фонда и стимулировать строительство недорогого социального жилья.

Поэтому для строительных организаций и промышленности, связанной с производством строительных материалов, создаются условия для получения мер государственной поддержки при реализации инвестиционных проектов и развития субъектов малого и среднего предпринимательства, что позволяет оказывать содействие реконструкции, модернизации действующих производств и созданию новых мощностей.

## **1.2 Природно-климатические условия и минерально-сырьевые ресурсы Архангельской области**

Почти 64% территории Российской Федерации охватывает зона Севера, пролегающая за Северным полярным кругом. Это земли, принадлежащие Арктическому и субарктическому поясам, так называемые зоны тундр и лесотундр [10 – 13].

Северный и Арктический регионы занимают более одной трети территории страны и составляют 1508,9 тыс. км<sup>2</sup>. В состав регионов входят: Республика Карелия, Республика Коми, Архангельская область (включая Ненецкий автономный округ) и Мурманская область [14].

Эти регионы представляют собой область сочленения структур Атлантического и Тихоокеанского секторов Земли. В строении арктической суши, прилегающего шельфа и островов участвуют сложные комплексы докембрийских, палеозойских и мезокайнозойских отложений и магматические образования разнообразного состава. Основными особенностями суши Арктики является широкое распространение многолетнемёрзлых горных пород, характеризующихся большой мощностью (до 500 м), низкой температурой (ниже – 10 °С) и небольшим слоем сезонного оттаивания (не более 60 – 70 см).

Приказом Президента России от 2 мая 2014 г. был утвержден Указ «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации». На основе его (редакция от 27.06.2017 г. №287) к Арктической зоне были приравнены: Мурманская область; округа: Ненецкий, Чукотский, Ямало-Ненецкий; республики: Карелия, Коми, Саха (Якутия); районы: Таймыра, Турухана, Мезени, Онеги; территории городского округа города Норильска; города: Архангельск, Новодвинск, Северодвинск; остров «Новая земля» (рисунок 1.1) [15].

Архангельская область занимает центральное положение на Европейском Севере. Абсолютный минимум температур, в зимнее время составляет -45 °С, а в летнее – 0 °С. Это отличает территорию суровыми природно-климатическими условиями [16 – 18].

В последнее время, тенденцией погоды Северных регионов стало резкое повышение температуры в зимнее время до 0 °С и резкое падение температуры до – 25 °С. В летнее время такие перепады так же встречаются (с +22 °С до 0 °С) [19 – 23].

Все это, в первую очередь, говорит о разнообразии климата на территории Архангельской области. Здесь в лесных зонах господствует умеренно-континентальный климат. Продолжительность периода со средними суточными отрицательными температурами составляет около 200 дней. Во многом на климат влияет расположение области вблизи с Северным ледовитым океаном и



незамерзающим Баренцевым морем. Это обуславливается и континентальностью климата и частой сменой воздушных масс. Именно из-за этого возникают резкие и неустойчивые изменения в погоде: осадки, пасмурная погода, облачность, резкое падение температур, туманы, морозы [24 – 26].



Рисунок 1.1 – Арктические территории Российской Федерации

1 – Мурманская область; 2 – Республика Карелия (Лоухский, Кемский, Беломорский муниципальные районы); 3 – Архангельская область (Онежский, Приморский, Мезенский муниципальные районы; города Архангельск, Северодвинск, Новодвинск; административно принадлежащий остров Новая Земля); 4 – Архангельская область (Ненецкий автономный округ); 5 – Ямало-Ненецкий автономный округ; 6 – Красноярский край (Таймырский муниципальный район, Норильск); 7 – Республика Саха (Якутия); 8 – Чукотский автономный округ; 9 – Республика Коми (Воркута)

Непредсказуемому климату Северных зон характерно большое количество осадков. За год сумма осадков достигает 470 мм. Преимущественно осадки выпадают в виде редких, но продолжительных снегопадов или длительных дождей, при этом скорость ветра может достигать 40 м/сек.

Мощный снеговой покров, образующийся с ноября месяца, на территории области достигает высоты 70 см и начинает таять лишь в конце апреля, годовая сумма снеговых осадков при этом изменяется от 230 мм на севере и до 380 мм на юге [27].

Территории Северных округов характеризуются значительной относительной влажностью воздуха: при переносе теплого воздуха влажность достигает 85-95%, а при испарении тающего снега, водоемов, болот в условиях продолжительных и невысоких температур составляет 70-90%. В арктическом регионе относительная влажность колеблется в пределах от 80 до 98% [27 – 29].

В сезон дождей, а это май – октябрь, годовая сумма осадков колеблется от 77 мм на севере и до 203 мм на юге области. Количество осадков на всей территории Арктического побережья существенно превышает испаряемость с поверхности.

После образования независимых государств (Украина, Белоруссия и др.) для России резко возросло значение Севера. Это связано, прежде всего, с открытым доступом к морям и с тем, что здесь сосредоточена большая часть природных ресурсов страны. Помимо этого, через Северные и Арктические широты пролегают торговые пути, связывающие западную часть мира (Европу) со странами Востока (Азии), создающие «мосты» для развития экономики России [23, 30 – 33].

**Инженерно-геологические условия.** Геология Арктического побережья России сформировалась в четвертичный период в эпоху Плейстоцена (во времена оледенений и потеплений), а также в эпоху Голоцена, когда в долинах рек и равнинных низменностей накапливались осадочные породы. Они представлены ледниковыми, межледниковыми и морскими отложениями. В низинных территориях с высоким уровнем грунтовых вод преобладают биогенные отложения (торфяники) [34 – 35].

Четвертичные отложения повсеместно нелитифицированы, так как не подвергались значительному давлению и воздействию высокой температуры. Они представлены разнообразными дисперсными осадками. На Русской платформе это породы преимущественно континентального генезиса, а именно: ледниковые, водно-ледниковые, озерные, озерно-болотные и аллювиальные [34 – 37].

На севере страны огромные площади заняты платформенными формациями, представленными мелкими и пылеватыми песками, пылевато-глинистыми грунтами. Им присуще закономерная смена грансостава от песчаных к глинистым. В песчано-глинистых комплексах отсутствуют органогенные остатки.

На больших площадях залегают также геосинклинальные формации морского генезиса. Их слагают преимущественно глинистые и карбонатные отложения [38].

Верхняя часть разреза Русской и Сибирской платформ представлена песчаными и глинистыми грунтами. Пески обладают высокой пористостью, глины пластичные, сжимаемые и сильносжимаемые, часто набухающие. Горизонтальное залегание пород, выдержанность фракций на больших площадях способствует

формированию горизонтов грунтовых вод, разделенных региональными водоупорами [36-37, 39 – 40]. При строительстве в таких районах возможен выпор пород в котлованах в результате набухания и разгрузки глин, суффозия и оплывание песчаных откосов и оползни. Высокая сжимаемость пород ограничивает допускаемые на них нагрузки [6, 12, 21, 37, 41].

В прибрежной зоне Северного ледовитого океана, в зоне тундры, которая является областью активного морозного выветривания, распространены щебенисто-глыбовые элювиальные образования с различным содержанием дресвы, песчаных и пылеватых частиц. В субполярных условиях протекают процессы гидратации и выщелачивания алюмосиликатов и происходит формирование небольшой мощности зон дезинтеграции и гидратации, представленных глинистыми минералами групп гидрослюды и гидрохлоридов. В составе продуктов выветривания присутствует также каолинит и свободные гидроокислы железа и алюминия. В понижениях формируются торфяники, но в связи с медленным накоплением биомассы мощность торфяного покрова не превышает 1-2 м [33 – 34, 37, 42 – 43].

В зоне лесотундры самый верхний слой – элювиальный горизонт. На севере лесной зоны преобладают кислые грунтовые воды, поэтому преобладают гидрослюды и каолинит. Грунт основания – глинистый (делювиальные, аллювиальные и озерные отложения) [33 – 34, 37, 44 – 56].

В зоне распространения вечной мерзлоты преобладают морские отложения, представленные в пределах Балтийского щита песками с большим количеством грубообломочного материала, а на остальной территории – супесями и суглинками, реже глинами с большим количеством крупнообломочного материала (таблица 1.2).

По минеральному составу глинистая фракция моренных отложений представлена гидрослюдами, реже в ней присутствуют каолинит и монтмориллонит. Песчаная и пылеватые фракции представлены преимущественно кварцем.

Таблица 1.2 – Среднее содержание частиц в подстилающих моренах

Вид частиц	Среднее содержание частиц в подстилающих моренах, %	
	ледниковая аккумуляция	ледниковая денудация
Грубообломочный материал	до 10	15-25
Глинистые	15-20	до 10
Песчаные и пылеватые	70-75	70-75

Суглинки и супеси (таблица 1.3), встречаются в толще песков в виде прослоек и линз. Их модули деформации 12-18 МПа (у супесей) и 8-12 МПа (у суглинков). В Архангельске модуль деформации суглинков составляет 8-20 МПа (при коэффициенте пористости 0,35-0,65) [46].

Таблица 1.3 – Характеристика глинистых отложений

Вид отложения	Число пластичности	Средняя плотность пород, г/см <sup>3</sup>	Плотность твердых частиц, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости
Глины	0,01 – 0,30	2,01 – 2,20	до 2,78	0,20 – 0,45
Суглинки	0,07 – 0,18	2,08 – 2,29	-	
Супесь	0,09 – 0,23	2,08 – 2,28	от 2,70	

Пески морских отложений севера Русской платформы водонасыщенные, обладают плавунными свойствами, связанными со значительным содержанием органики. Средняя плотность в рыхлом и уплотненном состояниях равна 1,33 и 1,56 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Водно-ледниковые отложения разделяют на флювиогляциальные и озерно-ледниковые. Первые представлены осадками водных потоков, сформировавшихся внутри тела ледника (пески с включениями грубообломочного материала мощность 15 - 20 м) или перед его фронтом (пески мощность отложений 10 - 20 м у границы таяния ледяного покрова).

Плоские низменные равнины покрыты озерно-ледниковыми отложениями мощностью 5 - 15 м. Они формировались в приледниковых озерах перед фронтом ледникового покрова. Неравномерное таяние льда и различный по интенсивности снос твердого материала в озерный бассейн привели к формированию ленточной слоистости. К примеру, тонкие (2 - 3 мм) глинистые слои чередуются с песчано-алевритовыми (4 - 6 мм) [33, 46].

Отложения приледниковых озер находятся в состоянии, близком к полному водонасыщению. Глины чаще находятся в текучем и текуче-пластичном состоянии, озерно-ледниковые мелко- и тонкозернистые пески и супеси часто представляют собой плавуну. Модуль деформации песков и супесей 7 - 10 МПа.

В состав озерных отложений, расположенных на Северо-Западе Русской платформы входят: песчано-глинистые, песчаные осадки, глинистые илы и сапропели с различным содержанием органики.

Болотные отложения распространены в низинах и долинах равнинных рек. Наиболее мощные торфяники приурочены к лесной зоне. Здесь заторфованность территории составляет 5-20 %. На Крайнем Севере не более 5 %. Средняя мощность торфа в лесной зоне 2-3 м. Торф представляет собой массу, состоящую из скоплений остатков растений (мхов) [37, 46].

Характерной особенностью территории Северо-Арктического региона России является распространение вечной мерзлоты [47 – 49]. Сплошная вечная мерзлота наблюдается от Печорской равнины на северо-западе (Ямало-Ненецкий АО) до Тихоокеанской геосинклинальной области (включая её) и в Чукотском АО. Островное расположение мерзлоты преобладает на северо-востоке Кольского полуострова и в Ненецком АО.

Почти на всем протяжении побережья Северного ледовитого океана (от устья реки Мезень до мыса Дежнева) вечная мерзлота имеет морской тип засоленности, что говорит о морском происхождении вмещающих лед горных пород [48 – 49].

Область максимального распространения покровного оледенения в раннем и среднем плейстоцене полностью захватывают Мурманскую и Архангельскую области, республику Карелия, Ненецкий и Ямало-Ненецкий АО, а также Красноярский край [50].

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод о сходстве ледниковых и морских отложений на различных территориях Севера и Арктики России. Для этих районов характерно горизонтальное залегание грунтов. При строительстве зданий и сооружений, а также разработке котлованов необходимо устраивать мероприятия по отведению воды из котлованов. Из-за обилия грунтовых вод возможен выпор пород и оплывание откосов. Помимо этого, большая усадка и пучинистость грунтов ограничивает нагрузки на основание [46, 50].

Преобладающее количество месторождений строительных материалов приурочено к четвертичным отложениям. Осадочные породы используются в качестве сырья для производства керамических и силикатных изделий, минеральных

вяжущих и красок, а также в качестве заполнителей при производстве бетонов и растворов.

Верхнечетвертичные морские, озерно-ледниковые и аллювиальные песчано-глинистые образования являются основной сырьевой базой суглинков и глин для производства кирпича, керамзита, цемента, песчано-гравийной смеси и песков для силикатного производства.

Современные отложения развиты, в основном, на побережьях морей и по долинам рек и представлены морскими, аллювиальными, озерными песками, песчано-гравийной смесью, супесями, суглинками и глинами. С современными отложениями связано значительное количество месторождений песчано-гравийной смеси, песков для силикатного производства, песков для бетона, суглинков и глин для производства кирпича [46, 51].

Архангельская область обладает большим набором полезных ископаемых – это алмазы, цветные и драгоценные металлы, а также большинство пород осадочного происхождения (месторождения гипса, известняка, ангидрида, залегают пласты каменной соли мощностью до 16 м). Помимо этого, область известна месторождениями строительных материалов, огнеупоров, глин и торфа (рисунок 1.2) [46, 52 – 53].

Многочисленные месторождения строительных материалов включают в себя: глины для производства кирпича, керамзита и цемента; пески для строительных работ, бетона и силикатного кирпича; известняки для целлюлозно-бумажной промышленности [32, 36, 38, 46, 52].

На территории области накапливаются осадочные отложения: ледниковые, озерно- и водноледниковые, аллювиальные, морские и элювиальные. Четвертичные отложения залегают в виде мелких и пылеватых песков, глинистых грунтов, торфов.

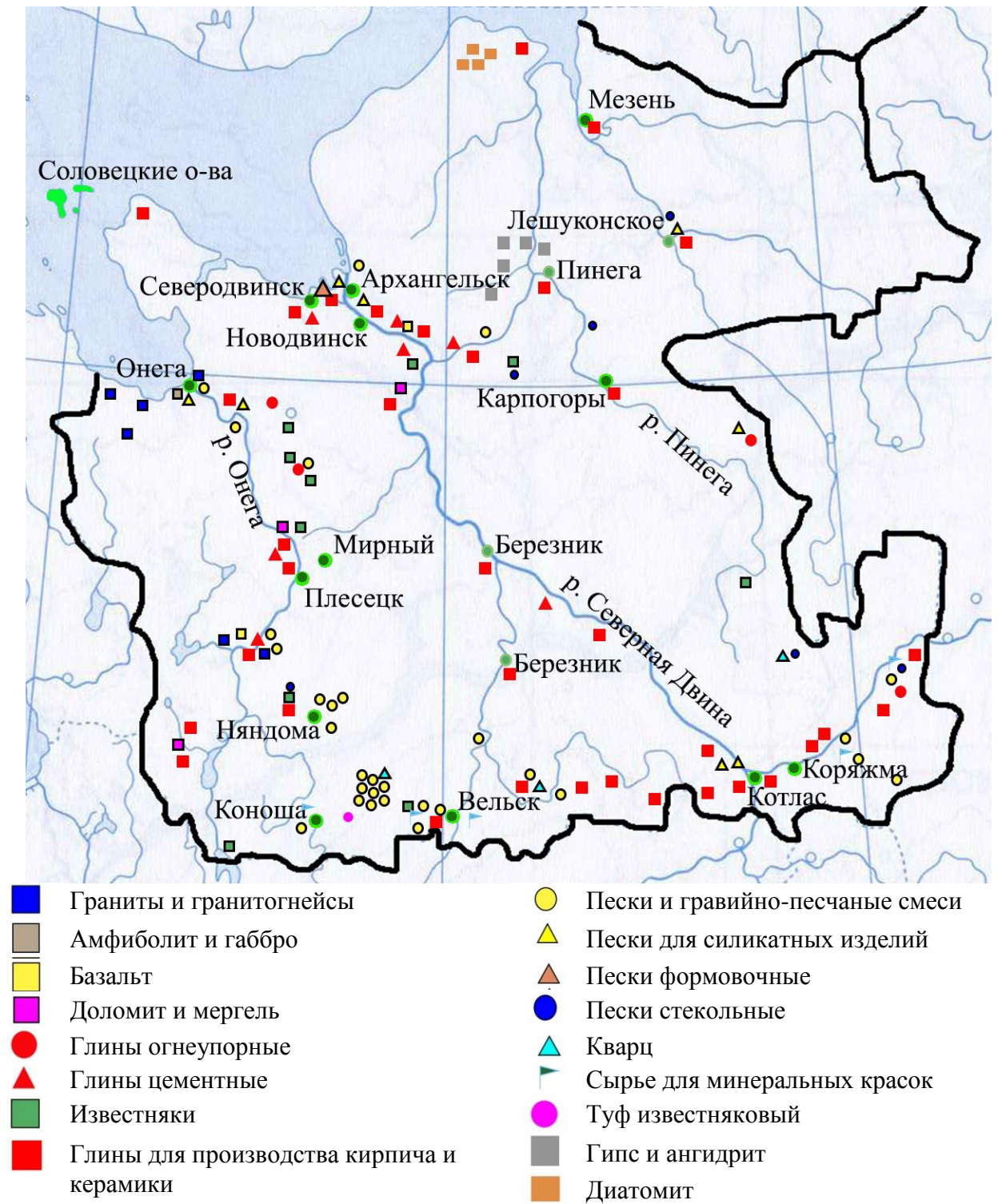


Рисунок 1.2 – Карта месторождений строительных материалов в Архангельской области

Пески Архангельской области характеризуются высокой пористостью и содержат пылеватые и глинистые частицы. Здесь характерно поочередное слоистое залегание песков, суглинков и илов.

В таблицах 1.4 и 1.5 представлена сырьевая база Архангельской области [46, 54].

Таблица 1.4 – Основные месторождения пород, составляющие сырьевую базу Архангельской области

Породы	Месторождение
Метаморфические, магматические	Поморский берег Белого моря, от озера Пулозера до реки Онеги
Осадочные горные	Балтийский кристаллический щит, Русская плита
Песчано-глинистые и карбонатные осадочные	Канино-Тиманская складчатая зона
Магматические образования основного, кислого и щелочного состава	Канино-Тиманская складчатая зона
Гнейсы, гранитогнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты	Онежский и Плесецкий районы
Кристаллические сланцы, метаморфизованные песчаники, диабазы, порфириты, базальт	Балтийский щит, от озера Пулозера до реки Онеги
Интрузивные магматические: габбро, перидотиты, серпентины	Балтийский щит
Тонкослоистые песчаники, глины, глинистые сланцы, кварциты, гранит	Зимний берег Белого моря, Западное Притиманье, полуостров Канин, Северный Тиман
Доломиты, глинистые сланцы	Хребет Пай-Хой, остров Вайгач

Таблица 1.5 – Месторождения полезных ископаемых, применяемых в качестве ресурсов для производства строительных материалов

Вид сырьевого материала	Месторождение	Направления использования
Нефтегазовые месторождения	Печорская впадина, Тимано-Печорское	Топливо, растворители, сырье для химической промышленности
Уголь	Хребет Пай-Хой, остров Вайгач, архипелаг Новая земля	Энергетическое топливо, сырье для металлургической и химической промышленности
Кристаллические сланцы, метаморфизованные песчаники, диабазы, порфириты	Балтийский щит (от озера Пулозера до реки Онеги), Мяндуха	Строительный материал, каменное литье, облицовочные камни
Базальт	Северный Тиман	Поделочные камни, строительный камень, каменное литье
Исландский шпат	Река Иевка	Строительный камень
Мергель	Югорский полуостров, остров Вайгач	Производство портландцемента
Бокситы (бокситовый рудник)	Северо-Онежский округ	Абразивная промышленность (электрокорунд), чёрная металлургия



Вид сырьевого материала	Месторождение	Направления использования
Карбонатное сырье	Обозерское, Орлецкое, Кямское	Производство строительной извести, бутовый камень, щебень, заполнитель бетона, строительство дорог
Известняк	Югорский полуостров, остров Вайгач, река Онега, река Северная Двина, река Пинега. Месторождения: Савинское, Орлецкое, Обозерское, Кямское, Плесецкое, Холмогорский район	Производство цемента, флюс, в целлюлозно-бумажной промышленности, строительная известь, камень, щебень, карбонатная мука, портландцемент высоких марок, воздушная строительная известь, бутовый камень
Доломит	Реки Пукса, Моша, Пинега, Сотки; месторождения: Полты, Плесецк, Березник	
Асбест	Хребет Пай-Хой, остров Вайгач	Теплоизоляция
Розовый гипс	Долины рек Северная Двина, Пинега, Кулой	Строительное, сельское и промышленное хозяйство, поделочный камень, декоративно-художественные изделия
Гипс	от реки Мехреньги до реки Кулой, реки Северная Двина, Пинега. Месторождения: Звонкое, Пинежское, Сийское, Кулойское	Вяжущие, строительный гипс, серная кислота, облицовочные и поделочные камни, удобрения, медицинские цели, добавка к портландцементу
Каменная соль	Сольвычегодск, Кулой	Различные промышленные процессы
Красноцветные песчаники, алевролиты	Реки Северная Двина, Пянда, Репаново, Пинега, Кулой	Внутренняя и наружная отделка зданий
Белый кварцевый песок	Реки Уфтюг, Яренги, Полта, Пинега, Печора	Стекло
Красная глина	Реки Мезень, Кодима, Верхняя Тойма	Производство цемента
Глины кирпичные	Кенецкое, Тесовка, Октябрьское, Андское, Холмогорское. Вельский район, Шенкурский район, Пинега	Кирпич, черепица, керамзитовый гравий
Глины керамзитовые	Котласский район, Приморский район, Онежский, Березник, Устьянский район	Мелкокусковой пористый материал, тепло- и звукоизоляция, заполнитель для бетона, керамзитовый гравий, кирпич, дренажные трубы

Вид сырьевого материала	Месторождение	Направления использования
Тугоплавкие глины	Река Полтома	Грубокерамические изделия, строительный глиняный кирпич, черепица, дренажные трубы, цемент
Цементные глины	Тимме, река Шелекса, Плесецкий район	Цемент
Строительные и облицовочные камни (габбро, гранито-гнейсы, амфиболиты, базальт, метапор-фириты)	Онежское, Плесецкое, Северный Тиман, месторождения Покровское, Золотуха, Мяндуха.	Щебень марок 600 – 1200, крупный заполнитель в бетон марок 200 – 500, гидротехнический бетон марок 350 – 500, дорожное строительство, каменное литье, облицовочные камни, речные укрепления
Строительный песок и гравий	Норменка, Обокозеро, Нименга, Малая речка, Няндома, Плесецк, Емецк, Каргопольский район	Дорожное, гражданское строительство, заполнители для бетона
Пески для силикатного производства	Котлас, Плесецкий район, Онежский, Березник, Емецк, Онежское, Лешуконское	Силикатные кирпичи, блоки, армосиликатные изделия,
Пески для бетона	Остречье	Производство бетона марок 200 – 400, строительные растворы, дорожные работы
Формовочные пески	Пенежский район, Красноборский район, река Пижма, п-ос Канин	Силикатное производство, формовочное производство, стекло
Песчано-гравийный материал	Вельск, Плесецк, Устьянский район, Онежский район	Щебень, песчано-гравийная смесь, производство бетона, железобетона, асфальтобетона, строительных работ
Минеральная краска (цветные глины, окисленные железные руды)	Коноша, Онежский район, река Кулой	Охра, художественные краски

Из данных, представленных в таблицах 1.4 и 1.5 можно сделать вывод, что Архангельская область богата месторождениями разнообразных строительных материалов, запасы которых достигают миллиардов тонн. На данный момент учтено 126 месторождений стройматериалов. Из них 70 находится вблизи г. Архангельска.

На площади в более 550 км<sup>2</sup> скрыты такие природные богатства как нефть, природный газ, бокситы, никелевые руды, агаты, минеральные краски, аметист, горный хрусталь, дымчатый кварц, базальт и др.

На данный момент разрабатывается крупнейший в Европе бассейн алмазного месторождения имени М.В. Ломоносова [55 – 56]. Это месторождение состоит из шести близко расположенных кимберлитовых трубок. Предварительно суммарный запас алмазов оценивается в 12 млрд. долларов. Предполагается, что месторождение будет использоваться в течение 50 лет. В Плесецком районе обнаружены четыре месторождения бокситов, разрабатываемых открытым способом [57].

Программа по стратегии развития Арктической зоны [8] предусматривает не только эффективное социально-экономическое развитие Северных и Арктических регионов России, но и освоение их ресурсов. Данная цель не может быть достигнута без строительства новых объектов инфраструктуры, способных переносить воздействие постоянных климатических изменений [8, 58].

Для строительства в условиях Севера имеется много крайне неблагоприятных воздействий. Огромная территория Северного ледовитого океана, воздействующая на климат, грунтовые воды, залегание в грунтах четвертичных отложений, плохие характеристики грунтов по прочности, преобладание такого свойства грунтов как термопросадка, а также разнообразие торфяных грунтов. Это и многое другое затрудняет строительство и освоение территорий Севера, удорожает процесс возведения зданий и сооружений. Кроме этого, сезонная смена воздушных потоков из-за изменчивости климата в зависимости от сезона года [32, 46] обуславливает неблагоприятные влажностно-температурные условия регионов.

Несмотря на суровые климатические условия и перечисленные выше затруднения при строительстве, численность населения в зоне Севера и Арктики составляет более 10 млн. человек. Здесь реализуется целый ряд крупнейших промышленных и инфраструктурных проектов, связанных, в том числе, с освоением Арктических территорий и их природных богатств [59]. Идёт интенсивная разработка новых месторождений газа, нефти, строятся крупные транспортные, энергетические объекты, возрождается Северный морской путь [60 – 62]. В связи с этим

инфраструктура городов Севера развивается большими темпами, а вместе с этим и растет такая отрасль производства как строительство.

### **1.3 Особенности проектирования бетонов, применяемых в Северных и Арктических регионах России**

В настоящее время особое внимание уделяется освоению Северного и Арктического пространства Российской Федерации. На этих территориях существует сезонная смена воздушных потоков из-за изменчивости климата в зависимости от сезона года [17 – 18, 61 – 63], что обуславливает неблагоприятные влажностно-температурные условия регионов севера.

Численность населения, в зоне Севера, составляет около 10 млн. человек. Здесь реализуется целый ряд крупнейших промышленных и инфраструктурных проектов, связанных, в том числе, с освоением Арктических территорий и их природных богатств [2, 6 – 9, 64 – 66]. Кроме этого, повышенное внимание к этим территориям обусловлено их уникальным геологическим и природно-ресурсным потенциалом.

Поэтому инфраструктура городов Севера развивается ускоренными темпами. Для комплексного социально-экономического развития данных территорий, требуется модернизация существующей инфраструктуры, связанная с внедрением новых инженерных и строительных технологий.

В настоящее время используют различные строительные материалы: древесину, керамику, железобетонные изделия и пр., но наиболее распространенным материалом является бетон.

Бетон – это точно подобранная и уплотненная смесь вяжущего вещества (в виде цемента), заполнителей (крупных и мелких), а также воды. В бетонную смесь, для улучшения ее свойств, включают различные добавки: ускорители твердения, повышающие морозостойкость и прочность, пластификаторы, гидрофобизаторы, и т. д.

Основным правилом при приготовлении бетонной смеси служит соблюдение водоцементного соотношения (В/Ц).

Для строительства в Северном и Арктическом регионах очень важно иметь материал стойкий к воздействию на него неблагоприятных влажностно-

температурных условий региона. Поэтому при строительстве в условиях холодного климата используют бетоны с высокой маркой по морозостойкости.

Основной причиной, вызывающей разрушение бетона при действии знакопеременной температуры, является давление на стенках макро- (более  $10^{-4}$  мм) и мезопор ( $10^{-7} \div 10^{-4}$  мм), создаваемое замерзающей водой. Микропоры (менее  $10^{-7}$  мм) не оказывают заметного влияния на морозостойкость бетона. Следовательно, важным технологическим параметром, определяющим получение бетона с высокой морозостойкостью, является водоцементное (В/Ц) отношение [81 – 83]. За счет снижения водоцементного отношения и повышения плотности смеси уменьшается объем макропор. Для хорошей гидратации бетонной смеси используют соотношение  $В/Ц = 0,3 - 0,5$  [67 – 69]. Но при использовании его в морозы бетонная смесь становится плохо удобоукладываемой (коэффициент уплотнения не менее 0,98) и неоднородной. Во избежание расслоения бетонной смеси на строительной площадке В/Ц соотношение увеличивают до 0,8 – 0,9, а это заведомо уменьшает марку по морозостойкости бетона, а также в несколько раз снижает его прочность [67, 70 – 71].

Данный факт объясняется тем, что водоцементное отношение оказывает решающее значение на структурообразование бетона и формирование порового пространства при гидратации минералов. Известно, что большая часть пор цементного камня при оптимальном содержании воды имеет размер менее 10 нм, что объясняет его низкую водопроницаемость, поскольку в этом случае вода в порах действует как герметик. При полной гидратации химически связанная вода и вода, находящаяся в гелеобразном состоянии, составляют около 38 % от массы цемента, что соответствует  $В/Ц = 0,38$  [67, 71 – 73]. Если эта величина больше, начинается образование капиллярных пор, с которыми борются при помощи химических добавок.

В настоящее время происходит быстрое разрушение построенных сооружений из-за возникновения в процессе их эксплуатации большого числа различных повреждений. В связи с этим, сооружения (особенно транспортные) ранее расчётного срока эксплуатации выходят из строя или работают с пониженной эффективностью. Это приводит к значительному увеличению материальных, энергетических и трудовых затрат на их ремонт и восстановление, а в ряде случаев на их замену,

снижает эффективность эксплуатации. Одной из важнейших причин появления всё возрастающего числа повреждений в построенных бетонных и железобетонных сооружениях является именно недостаточная морозостойкость этих сооружений, т.е. недостаточная способность выдерживать требуемое количество циклов попеременного замораживания и оттаивания в водонасыщенном состоянии без разрушения.

Поэтому решение вопросов, связанных со структурообразованием смеси путем регулирования величины водоцементного отношения в процессе получения и твердения бетона, является важной задачей, прежде всего, с практической точки зрения [67, 71 – 74].

Особое место среди строительных композиционных материалов занимают мелкозернистые бетоны, увеличение объемов потребления которых в мире возрастает с каждым годом [67, 72, 73, 75]. Для строительства городов и поселков в условиях крайнего Севера и Арктики требуется использовать мелкозернистые бетоны высокого класса по прочности и морозостойкости [75 – 82], так как сезонный температурный перепад окружающей среды в этих зонах может составлять от -30 до -50 °С.

Высокопрочные бетоны необходимы для возведения архитектурных ансамблей, с учетом различных стилевых характеристик зданий, при строительстве многоуровневых дорожных развязок, автомобильных и железнодорожных мостов с увеличенной протяженностью пролетов. Мелкозернистые бетоны широко применяются в строительной индустрии: при производстве литых и прессованных изделий; при создании строительных изделий, обладающих повышенной водонепроницаемостью и водостойкостью, высокой прочностью при изгибе; при создании эксклюзивных малых и больших архитектурных форм и пр. [72, 75, 83]. Поэтому понятен постоянный интерес исследователей, связанный с работами, направленными на формирование структуры композита, определяющей его эксплуатационные характеристики. Одним из перспективных направлений в этом плане является использование высокодисперсных модифицирующих добавок, позволяющих проектировать прочность и морозостойкость конечного продукта [75, 78 – 79, 84 - 86].

#### 1.4 Повышение эффективности бетонов

На территориях Севера и Арктики широкое распространение получило зимнее бетонирование [87 – 88]. Такой вид бетонирования применяется при отрицательных температурах и напрямую связан с условиями твердения бетона, которое при температурах ниже 5 – 10 °С значительно замедляется, а при температурах ниже нуля практически прекращается. При этом находящаяся в бетоне свободная вода, замерзая, увеличивается в объеме, что приводит к нарушению структуры еще не затвердевшего цементного камня, а это снижает конечную прочность бетона. Наиболее опасно замерзание бетона в период схватывания цемента [78, 88 – 90]. Поэтому основным условием ведения бетонных работ в зимнее время является обеспечение в уложенном бетоне определенной положительной температуры, исключающей замерзание бетона в раннем возрасте до достижения им к моменту замерзания 50% марочной прочности [91 – 93].

В настоящее время существуют следующие способы ведения бетонных работ в зимних условиях [87 – 88]:

1) метод «термоса». Данный метод основан на применении утепленной опалубки, оборудованной верхним защитным слоем, который покрывает все открытые поверхности уложенной бетонной смеси;

2) предварительный разогрев бетонной смеси перед укладкой в опалубку. Метод основан на укладывании предварительно разогретой бетонной смеси (температура смеси 60 – 80 °С) в опалубку, которая в дальнейшем укрывается теплоизоляцией с последующим термосным выдерживанием;

3) метод электронагрева. Суть метода заключается в закреплении на арматурном каркасе (перед укладкой бетонной смеси в опалубку) нагревательных проводов. Выделяемая при этом теплота, передается бетону;

4) применение «теплого» бетона основано на предварительном подогреве компонентов бетонной смеси, что стимулирует реакцию гидратации между водой и цементом;

5) термоопалубка – это многослойные щиты, которые оснащены нагревательными элементами и утеплены;

б) применение противоморозных добавок и ускорителей твердения.

Для строительства в Северном и Арктическом регионах очень важно иметь материал стойкий к воздействию на него неблагоприятных влажностно-температурных условий региона. Поэтому при строительстве в условиях холодного климата используют бетоны с высокой маркой по морозостойкости [73, 93 – 95].

Термин «морозостойкость» характеризует возможность бетона выносить попеременные циклы замораживания и оттаивания без разрушения, при которых потеря в массе образца менее 5%, а его прочность снижается не более чем на 25%.

Процесс разрушения бетона в условиях низких температур Севера связан с расширением замерзшей воды в порах композита, которая увеличивается в объеме более чем на 9%. При этом твердеющий материал разрушается изнутри, за счёт создания водой внутреннего давления на стенки пор.

Морозостойкость бетонов, главным образом, зависит: от структуры, от количества макропор, характера пористости, минерального и вещественного состава цементов, прочности бетона на растяжение. Чем больше относительного объема пор в материале, тем ниже морозостойкость изделия. Это аргументировано тем, что вода, входящая в состав композита, проникает во все элементы и связывает компоненты в единое тесто. Замерзшая вода, в свою очередь, уже не способствует твердению композита, а, следовательно, нарушается структура изделия и теряется прочность и однородность [68, 75, 97 – 98].

Уменьшение макропористости достигается за счет структурообразования бетонной смеси путем снижения водоцементного отношения, введением химических добавок, позволяющих уменьшить водопотребность смеси и снизить расход воды, применением незагрязненных заполнителей оптимального состава с минимальной водопотребностью. Повышение морозостойкости бетона достигается и за счёт изменения характера пористости, путем введения в смесь воздухововлекающих добавок [67, 99 - 101].

На основе вышеизложенного выделяют основные факторы, которые дополнительно влияют на морозостойкость бетонной смеси:

- 1) расчет оптимального состава песка;
- 2) использование минеральных добавок с повышенной водопотребностью;



- 3) снижение удельной поверхности цемента (менее 400 м<sup>2</sup>/кг);
- 4) условия хранения цемента;
- 5) морозостойкость самих заполнителей и их водопотребность;
- 6) пластифицирующие добавки.

Проведенные исследования показывают, что более 70% производимого бетона содержат различные добавки [73, 102 – 112].

Применение добавок увеличивает стоимость бетона и требует дополнительное оборудование для заводов. Полученные таким образом бетоны с добавками отличаются большой морозостойкостью, высокой прочностью и низкой водопроницаемостью.

Сегодня на рынке представлен широкий ассортимент добавок, которые отвечают современным требованиям для зимнего бетонирования. Наиболее распространённые добавки представлены в таблице 1.6 [93, 113 – 117, 119, 120 – 122, 124 - 125].

Таблица 1.6 – Добавки для повышения эксплуатационных свойств бетона

Вид добавки	Наименование добавки	Улучшения
Химические	Азотистокислый натрий, углекислый калий, хлористый натрий, хлористый натрий с хлористым кальцием	Снижение температуры замерзания жидкой среды, повышение прочности и морозостойкости
	Поверхностноактивные вещества (ПАВ)	Повышение удобоукладываемости, улучшается поровая структура
	Соли органических кислот	Снижение температуры замерзания жидкой среды
	SIKA RAPID 2	Ускоряет схватывание и твердение
Пластификаторы	Препараты «С-3», «СП-1», «СП-3», «П-1» и др.	Снижение водопотребности смеси на 9-12%
	T2/18	Увеличение подвижности смеси до П4
	Antifreeze LS, Antifreeze N9, Antifreeze N-18, Antifreeze P-100, Antifreeze P-1000	Ускоряет схватывание и твердение
Ускорители отвердения	Хлорид и нитрат кальция, сульфат натрия, нитрат натрия, хлорид натрия, тринатрийфосфат, «Реламикс» и др.	Ускорение твердения смеси
Замедлители твердения	«Линамикс П120», «Линамикс СП180», «Линамикс ПК», «Линамикс РС» и др.	Замедление твердения смеси

Вид добавки	Наименование добавки	Улучшения
Воздухововлекающие	Аэропласт, Полипласт Аэро, Полипласт Р, Полипласт ВВ, СДБ и др.	Повышение морозостойкости
Морозостойкие	МБ10-01, МБ10-30С, МБ10-50С, МБ10-100С и др.	Повышение морозостойкости, прочности, возможность проводить бетонирование в холодное время года
Модификаторы	ПФМ НЛК, БФ, ЗМБ, НТБ и др.	Повышение различных эксплуатационных свойств
Противоморозные	Крио-25, Криопласт 30, Криопласт СП15-1, 2, Криопласт Премиум, Полипласт Nord, Криопласт П25 и др.	Возможность проводить бетонирование в холодное время года
	РСТ, Antifreeze-20, Antifreeze 30, Antifreeze 35, Antifreeze 300, Antifreeze 301	Регулирует во времени процесс схватывания и твердения

Некоторые из добавок имеют комплексное действие, что значительно упрощает процесс приготовления, транспортирования и укладки бетонной смеси. Однако, при введении модификаторов, увеличивается стоимость бетона, конструкции и здания в целом. Кроме этого, применение добавок практически невозможно без использования специального современного оборудования.

На сегодняшний день рынок добавок представлен продукцией как отечественных, так и зарубежных производителей. Среди отечественных производителей примером служит «Полипласт», «Antifreeze», «РСТ», а среди зарубежных продукция компаний «Schomburg, Sika», «Terra Mapei», «Degussa» (Германия), «Isomat» (Греция) и др.

### 1.5 Особенности проектирования мелкозернистого бетона

Современное строительство на 75% связано с использованием бетона. Он позволяет создавать различные конструкции и изделия, имея при этом неограниченную сырьевую базу. Для получения бетона возможно использовать местное сырье и промышленные отходы.

Мелкозернистые бетоны отличаются от остальных своей структурой (размер зерна заполнителя не превышает 10 мм).

Основные направления использования мелкозернистого бетона:

- 1) тонкостенные железобетонные конструкции;
- 2) тонкие армоцементные конструкции;
- 3) армоцемент;
- 4) железобетонные конструкции;
- 5) создание литых, прессованных и штампованных изделий различной формы;
- 6) создание малых и больших архитектурных форм;
- 7) заделка швов и трещин;
- 8) изготовление предварительно-напряженных конструкций;
- 9) устройство основания дорог;
- 10) заделка швов между плитами на аэродромах;
- 11) изготовление тротуарных плиток, бордюров.

Мелкозернистая бетонная смесь обладает рядом преимуществ:

- 1) высокой степенью однородности из-за отсутствия крупных включений;
- 2) повышенной прочностью при изгибе, водонепроницаемостью и морозостойкостью;
- 3) простотой транспортировки и подачи раствора через бетононасосы;
- 4) возможностью применять различные механизированные способы нанесения и укладки;
- 5) высокой подвижностью;
- 6) возможностью трансформации бетонной смеси;
- 7) созданием конструкций любых конфигураций и степени армирования;
- 8) простой технологией приготовления.

При производстве мелкозернистых бетонов принято использовать заполнитель в виде кварцевого песка (модуль крупности до 2,5). При расчете количества цемента необходимо учитывать то, что в мелкозернистом бетоне он выступает не только как связующей, но и как несущий элемент. Стоит учесть и тот факт, что из-за использования мелкого заполнителя, количество цемента требуется больше. При уменьшении количества цемента снижается удобообрабатываемость смеси, что приводит к понижению прочности и плотности бетона. Рекомендуемая марка цемента М-400 или М-500 [67, 73, 111, 124 - 127].

В случае увеличения количества цемента возникает избыточное содержание воды в бетоне. Это приводит к увеличению пористости и понижению прочности. Поэтому для каждого состава бетона подбирают оптимальное значение В/Ц, при котором обеспечиваются наивысшие прочностные и плотностные показатели бетона.

При В/Ц = 0,3, прочность бетона напрямую зависит от расхода цемента, т.е. уменьшение расхода цемента приводит к понижению прочности бетона, так как при малом содержании цемента не достигается требуемого качества структурообразования смеси (снижается коэффициент уплотнения и уменьшается плотность).

Рассчитывая оптимальное соотношение между цементом и песком можно получить наибольшую прочность бетона (В/Ц=0,4 и выше) за счёт достижения максимальной плотности бетонной смеси [67, 73].

Следовательно, для производства мелкозернистого бетона лучше всего применять пески с оптимальным гранулометрическим составом, композиционные вяжущие на основе тонкомолотого цемента и качественное уплотнение смесей.

Для повышения эксплуатационных характеристик мелкозернистого бетона в работах [128 – 129] использовались различные модификаторы наноразмерной степени дисперсности. Введение таких компонентов позволяет снизить пористость и приводит к упрочнению контактных зон [73, 128 – 133].

### **1.6 Повышение эффективности мелкозернистых бетонов за счет использования минеральных высокодисперсных модификаторов**

Для повышения эксплуатационных характеристик мелкозернистого бетона используют различные модификаторы. В качестве модификаторов могут применяться природные сырьевые материалы и отходы различных отраслей промышленности [134 – 138].

В статье [139] рассмотрен способ повышения эксплуатационных характеристик мелкозернистых бетонов за счет использования суперпластификатора «Химком-Ф1» на основе сульфированного продукта альдольной конденсации формальдегида, которая сохраняет подвижность бетонной смеси. Для уплотнения микроструктуры предлагалось использовать высокоактивный метакаолин. Добавка на его основе

повышает прочность мелкозернистых бетонов, а также их морозостойкость и водонепроницаемость, кроме этого «Химком Ф-1» придаёт бетону большую динамику набора прочности.

Суперпластификатор «Химком Ф-1» по сравнению с популярными пластификаторами на основе лигносульфонатов или нафталина, например, С-3, «Софэксил 40» и «Софэксил 60–80», не подвержен расслоению и выпадению в осадок, а кроме того не вызывает коррозию стальной арматуры.

Данный пластификатор позволяет выдерживать бетону прочность на сжатие до 55 МПа, водонепроницаемость W20 и морозостойкость F300.

Еще одним из путей повышения физико-механических характеристик бетонов является использование ультра- и нанодисперсных минеральных добавок [84, 85, 106, 108, 140].

В работе [141] предложен вариант обработки шлама от установок переработки бетона с целью получения из него наноразмерного продукта. Обработку шлама для увеличения его дисперсности проводили в присутствии суперпластификаторов. Применение обработанного шлама в мелкозернистых бетонах позволило увеличить прочность, как в первые сутки твердения, так и в последующие [109, 141 – 145].

Для получения бетонов с высокой прочностью, коррозионной стойкостью и морозостойкостью были разработаны и изучены литые бетонные смеси с эффектом самоуплотнения [146], модифицируемые комплексной добавкой, состоящей из гиперпластификатора, активного (аморфного) тонкодисперсного и кристаллического кремнезема и регулятора скорости твердения бетона. Прочность на сжатие такого бетона составила 50 МПа.

В работах [147– 149] предложено применение полипропиленовой фибры как эффективной полифункциональной добавки, способствующей совершенствованию прочностных свойств бетонов.

Также применяют неорганические наполнители с высокой удельной поверхностью, которые увеличивают водоудерживающую способность смеси (белая сажа, молотый асбест, бентониты), повышают ее плотность, способствуют уменьшению капиллярной пористости, повышению прочности и морозостойкости.

В работе [150] установлена возможность применения глауконитового песка для производства мелкозернистого бетона при использовании нанодисперсного диоксида титана, который является эффективным модификатором его структуры, позволяющий достигать прочностных показателей бетона при сжатии 43 МПа.

Модификаторы серии МБ, получаемые на основе микрокремнезема, его смеси с золой-уноса или с другими добавками позволяют получать бетоны без признаков водоотделения с прочностью на сжатие 60 МПа, водонепроницаемостью W20 [151], а при комплексном использовании воздухововлекающих или газообразующих добавок с морозостойкостью F1000.

Эффективной добавкой в бетонную смесь является зола-унос, которая позволяет получать бетоны с повышенными прочностными характеристиками [152 – 153].

В последние годы учеными многих стран выполняются исследования по применению углеродных нанотрубок. Такие попытки были предприняты и в строительной индустрии [154]. Модифицирование матрицы бетона углеродными нанотрубками приводит к повышению предела прочности на сжатие, что, в свою очередь, позволяет сократить удельный расход цемента на единицу прочности рассматриваемого материала.

### **1.7 Отходы обогащения кимберлитовых руд**

Постоянный рост стоимости строительных материалов и увеличение нагрузки на природную среду при их производстве требует использование энергосберегающих (безотходных) производств и ресурсосберегающих технологий. Одним из путей решения этой задачи является применение ряда промышленных отходов для получения модификаторов.

В качестве одного из компонентов композиционного модификатора, позволяющего улучшать физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов, нами был выбран сапонит-содержащий материал, представляющий собой отход обогащения кимберлитовых руд алмазодобывающего предприятия ОАО «Североалмаз».

В начале 1980-х годов была открыта Архангельская алмазоносная провинция (ААП). В административном отношении провинция находится на территории Приморского района Архангельской области, в 100 км к северу от г. Архангельска и связана с ним автомобильной дорогой. В географическом плане район ААП расположен в пределах западной части Беломоро-Кулойского плато. Архангельская алмазоносная провинция является первой на территории Европы, а по своим запасам - второй сырьевой базой алмазов в России после месторождений Якутской алмазоносной провинции.

В 2002 году началась разработка месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова. Результаты минералогических исследований алмазов, их сортировки и оценки свидетельствуют о высоком качестве сырья, в котором на долю ювелирного ряда приходится более 60 %. Все это делает освоение алмазных месторождений Архангельской провинции важным и значимым.

Месторождение имени М.В. Ломоносова (рисунок 1.3) включает десять кимберлитовых трубок - Снегурочка, Архангельская, им. Карпинского-1, им. Карпинского-2, Пионерская, Поморская, им. Ломоносова, Кольцовская, Белая и Первомайская.



Рисунок 1.3 – Месторождение алмазов имени М.В. Ломоносова. Трубка «Архангельская»

Слагающие трубки породы имеют не совсем обычный состав и значительно отличаются от типичных кимберлитов. Характерной чертой таких пород является значительная изменчивость их минералогического состава. В результате многолетних исследований специалистами, прежде всего Н.Н. Зинчуком с коллегами (1980 – 2000 гг.), было показано, что на сложность и контрастность

минералогического облика кимберлитовых пород в значительной мере воздействует развитие комплекса вторичных минералов [56, 156], главными из которых являются серпентин и карбонаты, которыми в основном они и сложены.

Разработка месторождений ведется открытым способом без применения буровзрывных работ. Проектная глубина карьера первой очереди составляет 324 м. Добытая из карьеров вскрыша и руда транспортируются автосамосвалами в отвалы пустых пород и склады. Далее руда отправляется на обогатительную фабрику, где проходит стадии обработки. Большие куски руды направляются в мельницы мокрого самоизмельчения. Одновременно с рудой в мельницу подаётся оборотная вода, в результате чего, отходы (шламы) удаляются в специальные накопители (хвостохранилища) и образуют хвостовые отложения. Полученная суспензия отстаивается с целью разделения фаз «жидкость – твердое тело». Взвешенные вещества оседают на дно хвостохранилища, а вода снова вовлекается в процесс обогащения.

Уникальность месторождения имени М.В. Ломоносова обусловлена высоким качеством алмазного сырья, и тем, что породы трубок месторождения практически полностью замещены глинистыми минералами (преимущественно сапонитом 60...70%) [56, 155 – 157]. При промышленной разработке месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова сапонит-содержащий отход находится в водной среде в виде суспензии, затрудняя использование технологической воды в системе оборотного водоснабжения. Это связано с низкой скоростью осветления оборотной воды и приводит к быстрому заполнению хвостохранилища отходами. В процессе обогащения кимберлитовых руд песчано-глинистые породы в обводненном состоянии направляются в хвостохранилище, где ежегодно складировается до 1 млн. тонн отходов. Отходы, транспортируемые гидравлическим способом, аккумулируются в специальных накопителях-хвостохранилищах и образуют хвостовые отложения. Наиболее тонкодисперсная фракция формируется в прудковой зоне хвостохранилища. Основным компонентом отложений на месторождении имени М.В. Ломоносова является сапонит.

Наблюдения за процессом седиментации в полевых условиях показывают, что формирующиеся высокодисперсные отложения обладают низкой седиментационной



активностью, слабой водоотдачей, что требует выполнения специальных мероприятий по их принудительному осаждению [158 – 159].

Отходы обогащения кимберлитовых руд при добыче алмазов (месторождение имени М.В. Ломоносова) можно рассматривать как техногенные месторождения магнезиальных глин [157]. Утилизация таких глин приведет к повышению рентабельности разработки месторождения в целом [56, 156].

Крайне низкая плотность сапонитового осадка вынуждает периодически увеличивать объем и площадь хвостохранилища в процессе разработки месторождения [157], что негативно влияет на экологическую обстановку и увеличивает риск загрязнения окружающей среды.

На основе этих данных и научных исследований сапонит-содержащей суспензии вытекает, что сапонит – это отход производства и преобладает в большом количестве, загрязняя окружающую среду. Возможность его переработки с последующим применением в строительстве, поспособствовало бы улучшению экологии [160].

Сапонит – это модифицированная бентонитовая глина, поэтому обладает рядом ее свойств. Материал является уникальной разновидностью обширного понятия «бентонит», с высоким содержанием магния (до 12%) и представляет собой новый вид минерального сырья многоотраслевого использования, промышленные запасы которого впервые в мировой практике открыты на Украине в Хмельницкой области и составляют свыше 100 млн. тонн.

В настоящий момент сапонит, в основном, используют как природный сорбент, а также в кормах для животных, удобрениях, для детоксикации техногенно- и радиационно-загрязненных грунтов и др.

Отличительной особенностью сапонит-содержащего материала являются его адсорбирующие и гидроизоляционные свойства в композитах с песком. При добавлении цемента сапонит представляет собой хороший гидроизоляционный материал, который может быть использован при строительстве гидроэлектростанций (плотин ГЭС, каналов и др.), объектов промышленного и жилищного строительства (подземные части сооружений), при устройстве искусственных водоемов [160 – 161].

В своих исследованиях А.С. Тутыгин [158 – 159] разработал способ выделения сапонит-содержащего материала из оборотной воды процесса обогащения кимберлитовых руд. Кроме того, в своей диссертации автор показал возможность повышения эксплуатационных характеристик бетона за счет использования органоминерального нанодисперсного модификатора (ОНМ). Данный модификатор получается совместным помолом следующих компонентов: сапонит-содержащий отход (4%), пластифицирующая добавка «Реламикс» (1%), цемент (10%) и кварцевый песок (85%). Введение 7,5 % ОНМ в бетонную смесь позволило повысить физико-механические характеристики.

Предложенные автором пути использования сапонит-содержащего материала не позволяют масштабно решить проблему, связанную с утилизацией отходов и оценить технологические и потенциальные возможности их использования.

Рабочей гипотезой является следующее. Эффективность процесса твердения бетона определяется реакцией гидратации его клинкерных минералов с образованием новой коллоидно-дисперсной фазы (реакция конденсации) гидросиликатов кальция разной основности. Процесс конденсации, при котором получаются частицы коллоидных размеров, возможен только при определенных условиях. Чтобы в системе могла произойти конденсация данного вещества, она должна быть пересыщена этим веществом. Зародыши новой фазы возникают при определенной степени пересыщения раствора. Следовательно, образование коллоидных систем управляется скоростью образования зародышей и скоростью их роста. В свою очередь, скорость образования зародышей новой фазы (гидросиликаты кальция) пропорциональна степени пересыщения раствора. Таким образом, при регулировании в процессе твердения бетона В/Ц отношением, за счет физической сорбции воды, будет происходить стабилизация степени пересыщения системы относительно новообразований гидросиликатов, что приведет к равномерному распределению продуктов реакции гидратации клинкерных минералов по всему объему композита.

### **Выводы по первой главе**

1. Для развития инфраструктуры Архангельской области особое значение уделяется высококачественным бетонам, которые гарантируют параметры

эксплуатационной надежности зданий и сооружений при резком перепаде температур окружающей среды.

2. Мелкозернистые бетоны широко применяют в строительной индустрии при создании строительных изделий, обладающих повышенной водонепроницаемостью и водостойкостью, высокой прочностью при изгибе. Для получения высокоэффективных мелкозернистых бетонов для природно-климатических условий Архангельской области ключевым параметром является его морозостойкость, которая напрямую зависит от водоцементного отношения.

3. Доказано, что введение дисперсных минеральных наполнителей способствует упрочнению структуры продуктов гидратации цементных материалов. Это обеспечивает существенное увеличение прочности цементно-песчаного раствора, а также способствует повышению его морозостойкости.

4. Величина водоцементного отношения оказывает решающее значение на структурообразование бетона и формирование порового пространства при гидратации минералов.

5. В качестве минерального компонента, предложено использовать высокодисперсный сапонит-содержащий отход алмазодобывающей промышленности Архангельской области, введение которого в бетонную смесь позволит оптимизировать процессы структурообразования смеси путем регулирования содержания водной фазы в процессе приготовления и твердения бетона.

6. Высококачественный бетон обеспечит высокие гарантированные параметры эксплуатационной надежности зданий и сооружений в условиях сложных воздействий нагрузок и температуры окружающей среды, а также значительно сокращает сроки строительства. При этом возможность использования местного природного сырья для получения бетонов значительно снижает стоимость конечного продукта на 20 ... 25 %.

## 2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Методы исследований

Исследования, представленные в данной работе, выполняли на современном оборудовании:

1) уникальной научной установке «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем» (УНУ), созданной на кафедре композиционных материалов и строительной экологии (КМиСЭ) Высшей инженерной школы (ВИШ) САФУ имени М.В. Ломоносова;

2) в аккредитованной лаборатории «Экспертиза и контроль качества строительных материалов» (КМиСЭ, ВИШ);

3) на испытательном оборудовании кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов (ИГОиФ) ВИШ;

4) в Центре коллективного пользования «Арктика» САФУ имени М.В. Ломоносова (ЦКП «Арктика»), с использованием общепринятых и оригинальных методик исследований материалов.

Комплекс оборудования УНУ направлен на реализацию стандартных и разрабатываемых методик исследования материала, а также на решение следующих задач: получение сырья в измельченном состоянии, контроль степени дисперсности, формы и размера частиц, удельной поверхности, определение энергетических характеристик и наблюдение за процессом конгломерации в композиционных смесях. Кроме этого, установка может быть использована для решения отдельных экспертно-аналитических задач (<http://ckp-rf.ru/usu/200979/>).

**Рентгенофлуоресцентная спектроскопия.** Качественный анализ образцов

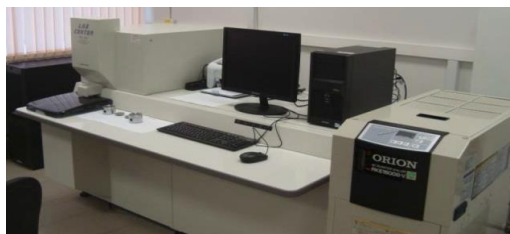


Рисунок 2.1 – Общий вид волнодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра Lab Center XRF-1800

выполнялся на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре Lab Center XRF-1800 (рисунок 2.1), который количественно определяет содержание элементов от С до U в количествах от 1 мг/кг до 100 мг/кг.

Для более точного определения содержания в образцах К, Ni, Co, Bi, Pb на спектрометре Lab Center XRF-1800 был выполнен полуколичественный анализ методом фундаментальных параметров.

**Анализ структуры образцов.** Рентгеновские дифрактограммы проб записаны на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 S (рисунок 2.2), в порошкообразном виде, в стандартных держателях, с вращением (30 об/мин).



Рисунок 2.2 – Рентгеновский дифрактометр XRD-7000 S

Для полученных дифрактограмм выполнен поиск соответствия в базе данных PDF-2 (Powder Diffraction File PDF-2 Release 2010, International Centre for Diffraction Data) с учетом элементного состава образцов.

Степень кристалличности рассчитывали исходя из рентгеновской дифрактограммы образца после сглаживания (подавления шума), но без вычитания фона, записанного на дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

При определении степени кристалличности «X» без использования программного обеспечения, расчет выполняли по формуле:

$$X = \frac{1}{1 + K \cdot \frac{I_a}{I_{cr}}} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

где  $X$  – степень кристалличности, %;

$K$  – отношение интенсивностей рассеяния одинаковым количеством аморфного и кристаллического материала;

$I_a, I_{cr}$  – интегральные интенсивности, обусловленные рассеянием аморфной и кристаллической частями пробы соответственно.



Рисунок 2.3 – Фурье-спектрометр Vertex-70v

**ИК-спектроскопию** применяли для определения гидросиликатов дополнительной генерации.

Для анализа использовали автоматизированный прибор Фурье-спектрометр Vertex-70v

(рисунок 2.3), имеющий характеристики, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики

Характеристика	Показатель
Спектральный диапазон измерений, $\text{см}^{-1}$	8000 - 350
Спектральный диапазон показаний, $\text{см}^{-1}$	28000-10
Спектральное разрешение измерений, не более, $\text{см}^{-1}$	0,4
Спектральное разрешение показаний, не более, $\text{см}^{-1}$	0,16
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений по шкале волновых чисел (по парам воды в атмосфере на длине волны $1554,353 \text{ см}^{-1}$ ), $\text{см}^{-1}$	$\pm 0,5$
Отношение сигнал/шум (от пика до пика), при регистрации спектров поглощения время накопления 5 с, (разрешение $4 \text{ см}^{-1}$ ), не менее	7000:1
Максимальная скорость сканирования, мм/с	100

**Дифференциально-термический анализ.** Анализ проводили на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСК-500 (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 - Дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСК-500

Данный прибор предназначен для исследования различных физико-химических процессов, сопровождающихся выделением или поглощением тепла. Применяется для измерения теплоемкости, термической эмиссии и чистоты образцов веществ, а также для получения основных термодинамических и кинетических параметров и построения

фазовых диаграмм многокомпонентных систем.

Сканирование осуществляется при нагреве образцов в диапазоне температур от комнатной до  $+500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0,1 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . При этом фиксируется разность температур между образцом и эталоном. Вырабатываемый при нагревании сигнал  $\Delta T$  является пропорциональным тепловому эффекту физического перехода или химической реакции в исследуемом образце.

Для определения теплового эффекта были подготовлены эталонный и с навеской сапонит-содержащего материала образцы. Данные пробы помещали на платформу дисковой термопары. Режимные параметры нагрева: скорость  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ., диапазон температур от  $22 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем по мере нагревания записывалась кривая ДСК, отображающая термограмму плавления пробы. Экспериментальная кривая представляет зависимость дифференциальной разности температур, связанной

по закону Фурье с дифференциальным тепловым потоком  $dQ/dT$ , от температуры (времени). При наличии в исследуемом образце каких-либо процессов (поглощение или выделение тепла, плавление, структурный фазовый переход, испарение и др.), на кривых ДСК проявляются характерные пики и аномалии, исследование которых дает информацию о процессах, протекающих в образце. Начало пика определяет температуру плавления вещества, а площадь пиков - энтальпию процесса плавления.

**Растровая электронная микроскопия.** Анализ структуры материалов с получением изображения высокого разрешения проводился на растровом электрон-



Рисунок 2.5 – Растровый электронный микроскоп Sigma VP

ном микроскопе Sigma VP (рисунок 2.5), с использованием методики энергодисперсионной спектроскопии (EDS) и волновой спектроскопии (WDS) (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики

Характеристика	Показатель
Пространственное разрешение	1,3 нм при 20 кВ
	1,5 нм при 15 кВ
	2,8 нм при 1 кВ
Диапазон ускоряющих напряжений	от 100 В до 30 кВ
Диапазон увеличения	12x – 1 000 000x
Детектор	SE2



Рисунок 2.6 – Анализатор размера субмикронных частиц Delsa Nano C

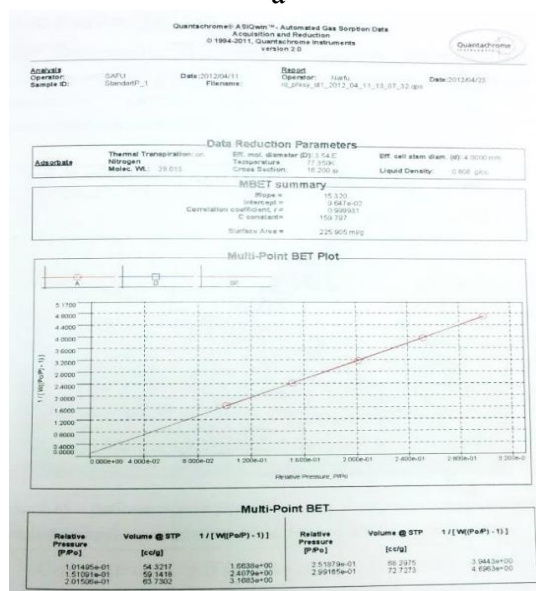
**Определение размерных характеристик материала.** Контроль степени измельчения исследуемой твердой фазы проводили на анализаторе размера субмикронных частиц Delsa Nano C (рисунок 2.6), использующий метод фотонно-корреляционной спектроскопии, основанный на принципе динамического рассеяния света.

**Определение удельной поверхности материала.** Определение удельной поверхности образцов в высокодисперсном состоянии проводили по теории БЕТ на анализаторе Autosorb-iQ-MP (рисунок 2.7). В этом случае использовали метод

сорбции паров газа, основанном на анализе сорбции газа твердым телом при постоянной криогенной температуре (80 К) и постепенном повышении давления.



а



б

Рисунок 2.7 – Анализатор удельной поверхности пор:

а) Autosorb-iQ-MP; б) протокол испытания стандартного образца  $Al_2O_3$

время предварительного периода измерений температуры системы колебалось от 10 до 15 минут. Изменение температурного режима реакционной смеси фиксировали с точностью до 0,1 °С.

**Определение поверхностного натяжения твердой фазы методом Г.А. Зисмана (метод «нейтральной капли»).** Метод основан на определении величины поверхностного натяжения по форме равновесной капли эталонного вещества,

На рисунке 2.7 показан анализатор и протокол испытания по определению удельной поверхности.

**Колориметрическое определение теплового эффекта.** Термохимические исследования, связанные с измерениями тепловых эффектов, проводили колориметрическим методом на установке «Эксперт 001К-2». В предварительных экспериментах устанавливали постоянную колориметрической системы ( $k$ ) путем введения в воду определенной навески (2,5040 г) соли хлорида калия с известным значением теплоты растворения соли ( $k = 580$  Дж/К). Для определения удельной теплоты гидратации опытных образцов использовали навески сухого образца массой 4-5 г, взятые на технических весах. Объем дистиллированной воды во внутренней камере калориметра равнялся 100 мл. Колориметрические измерения (заключительный период) проводили в течение двух часов, причем



которое расположено на поверхности изучаемого твердого тела под определенным краевым углом  $\theta$  (рисунок 2.8).

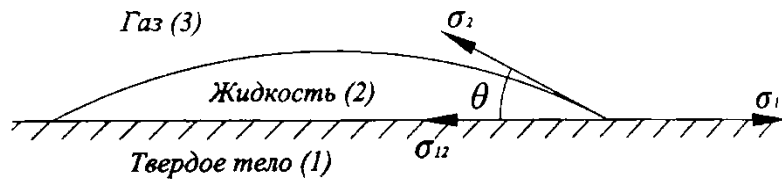


Рисунок 2.8 – Капля жидкости на поверхности твердого тела

Растекание капли по поверхности прекращается при достижении равновесия, которое описывается уравнением Юнга:

$$\sigma_1 = \sigma_{1,2} + \sigma_2 \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе фаз (работа образования единицы поверхности);

индексы 1 и 2 обозначают, соответственно, твердую и жидкую фазы.

Работа адгезии  $W_a$  (работа, которую надо затратить на преодоление сил сцепления между частицами в разных фазах) выражается уравнением Дюпре:

$$W_a = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{1,2} \quad (2.3)$$

или с учетом уравнения (2.2):

$$W_a = \sigma_2 \cdot (1 + \cos \theta) \quad (2.4)$$

Работа адгезии при  $\theta \rightarrow 0$  ( $\cos \theta = 1$ ), т.е. при полном смачивании становится максимальной и равна  $W_a = 2 \cdot \sigma_2$ . Если  $\theta \rightarrow 180^\circ$  ( $\cos \theta = -1$ ), то работа адгезии равна нулю и жидкость не будет смачивать твердую поверхность.

Из уравнения (2.3) вытекает, что межфазное натяжение равно:

$$\sigma_{1,2} = \sigma_1 + \sigma_2 - W_a \quad (2.5)$$

Из-за сложности расчета работы адгезии практическое применение уравнения (2.5) затруднено. Поэтому использовали уравнения для расчета межфазного натяжения, не включающие в себя работу адгезии. В случае, если две контактирующие фазы взаимно нерастворимы и их взаимодействие определяется только силами Ван-дер-Ваальса, то для межфазной свободной энергии и работы адгезии справедливы уравнения:

$$\sigma_{1,2} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2\Phi\sqrt{\sigma_1\sigma_2} \quad (2.6)$$

где  $\Phi$  – параметр взаимодействия контактирующих фаз.

$$\Phi = \frac{A_{1,2}}{\sqrt{A_{1,1}A_{2,2}}} \quad (2.7)$$

$A_{1,1}, A_{2,2}, A_{1,2}$  – постоянные межмолекулярных сил взаимодействия (Гамакера).

При взаимодействии фазы с близкими значениями постоянных межмолекулярных сил взаимодействия или взаимодействие между контактирующими фазами осуществляющихся за счет дисперсионных сил,  $\Phi = 1$  и уравнение (2.6) примет вид:

$$\sigma_{1,2} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2\sqrt{\sigma_1\sigma_2} \quad (2.8)$$

Подставив (2.8) в уравнение (2.2), получим следующее выражение:

$$\cos \theta = \frac{2\sqrt{\sigma_1\sigma_2}}{\sigma_2} - 1 \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) использовали для определения поверхностного натяжения твердых тел. В случае равенства поверхностных натяжений на границе «твердое тело – газ» и «жидкость – газ»,  $\cos \theta = 1$ . Таким образом, на основе экспериментально найденной функциональной зависимости  $\cos \theta = f(\sigma_{\text{ж}})$  для твердой поверхности ( $\sigma_{\text{ж}}$  – поверхностное натяжение жидкости) и экстраполируя эту зависимость на  $\cos \theta = 1$ , получили характеристику поверхностного натяжения (энергии) твердой поверхности или критическое значение поверхностного натяжения ( $\sigma_{\text{к}}$ ).

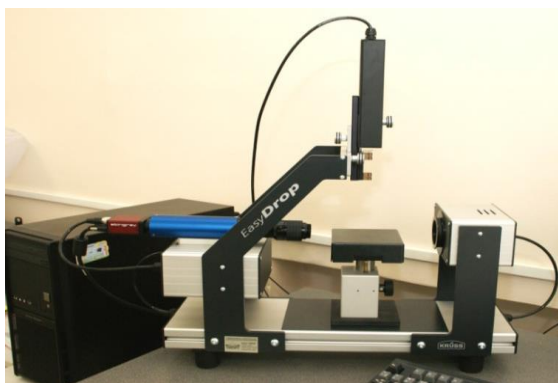


Рисунок 2.9 – Лабораторная установка для измерения краевого угла и межфазного поверхностного натяжения KRUSS Easy Drop

Для определения поверхностного натяжения использовали метод Зисмана и растворы эталона с различным содержанием водной фракции (концентрация не более 50 %). Поверхностное натяжение водных растворов спирта (спирт технический гидролизный) и угол смачивания поверхности дисперсных систем

определили на установке Easy Drop (рисунок 2.9) при температуре  $20 \pm 1$  °С.

В таблице 2.3 представлены полученные значения поверхностных натяжений используемых водно-спиртовых растворов ( $\sigma_k$ ).

Таблица 2.3 – Значение поверхностного натяжения водно-спиртовых растворов

№ п/п	Содержание воды, %	$(\sigma_{ж} \pm 0,02) \cdot 10^3, \text{н/м}$
1	4	24,74
2	10	26,61
3	20	27,34
4	30	28,11
5	40	28,42
6	50	31,31

Для определения угла смачивания исследуемого материала изготавливали образцы путем запрессовки сапонит-содержащего материала при нагрузке 1,5 кПа в металлическую форму диаметром 10 мм.

**Определение основных характеристик используемых материалов.** Истинную плотность определяли пикнометрическим методом по методике, описанной в ГОСТ 5180 (Приложение А). Плотность частиц грунта определяли отношением массы частиц грунта к их объему. Зерновой состав песка, влажность и насыпную плотность определяли по ГОСТ 8735 с использованием стандартной воронки в виде усеченного конуса, опирающейся на подставку. Испытания провели на трех параллельных пробах.

## 2.2 Характеристика исходных материалов

В данной работе для приготовления мелкозернистого бетона использовали следующие материалы:

- 1) вяжущее – цемент марки М400 и выше с целью получения высокопрочных бетонов;
- 2) заполнитель – мелкозернистый песок с крупностью зерен не более 2,5 мм для обеспечения более однородной структуры бетонной смеси;
- 3) затворитель – вода с градусом жесткости не более 10 °Ж (не больше 7 мг-экв/л) и с pH > 4 (ГОСТ 23732-2011);
- 4) сапонит-содержащие отходы алмазодобывающей промышленности.

### 2.2.1 Характеристика вяжущего

В качестве вяжущего был выбран портландцемент ЦЕМ II/A-III компании «Мордовцемент». Класс прочности 32,5 Н, марка М400. Данный цемент применяется при строительстве высокопрочных сборных конструкций с повышенным сроком службы, а также используется для приготовления высококачественных строительных смесей. Цемент соответствует ГОСТ 31108-2016 и ГОСТ 30515-13. Характеристика вяжущего и его химико-минералогический состав приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Характеристика цемента

Наименование	Показатель
Минеральная добавка, %	шлак до 20%
Содержание специальных добавок, %	нет
Равномерность изменения объема (расширение), мм	менее 10
Средняя активность цемента в возрасте 7 суток, МПа	23,0
Содержание оксида магния в клинкере, %	3,09 ± 0,4
Содержание хлор – иона (при норме – не более 0,1 %)	менее 0,1
Массовая доля щелочных оксидов, %	1,18 ± 0,2
Нормальная плотность цементного теста, %	27,0 ± 1,0
Сроки схватывания цементного теста нормальной густоты, мин	начало 160 ± 20
	конец 230 ± 20

Таблица 2.5 – Химико-минералогический состав цемента

Параметр	Показатель, %	Параметр	Показатель, %
MgO	1,5±0,15	C <sub>2</sub> S	14±1
Cl	0,07±0,02	C <sub>3</sub> A	6,5±1
SO <sub>3</sub>	0,70±0,2	C <sub>4</sub> AF	12±1
R <sub>2</sub> O	0,75±0,25	C <sub>3</sub> A+ C <sub>2</sub> S	76±3
CaO	0,2±0,1	CaO/SiO <sub>2</sub>	2,9±0,2
C <sub>3</sub> S	62±3		

Согласно ГОСТ 30459 выбранный портландцемент, как вяжущее, удовлетворяет требованиям к материалам, применяемым для приготовления образцов контрольного и основного составов.

Вода для затворения – дистиллированная, со значением основных показателей согласно ГОСТ 23732-2011.

### 2.2.2 Характеристика заполнителя

В качестве мелкозернистого заполнителя был взят строительный песок, месторождения «Кеницы». Содержание гравия в песке 0,76%. Химический состав песка охарактеризован методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии в ЦКП «Арктика» (п. 2.1). Результат качественного анализа с указанием элементов, содержащихся в песке, представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Состав исследуемого образца в пересчете на оксиды

Определяемый компонент	Показатель, %	Определяемый компонент	Показатель, %
SiO <sub>2</sub>	90,56	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,77	SO <sub>3</sub>	0,04
Na <sub>2</sub> O	1,62	TiO <sub>2</sub>	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,80	MnO	0,02
MgO	0,48	ZnO	0,005
K <sub>2</sub> O	0,28	ZrO <sub>2</sub>	0,002
CaO	0,25	NiO	0,001
SrO	0,08		

### 2.2.2.1 Исследование свойств песка

Для проведения испытаний песок предварительно отмучивали по ГОСТ 8735 с целью удаления пылевидных и глинистых включений, высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре  $105 \pm 1$  °С.

Определение зернового состава песка, истинной и насыпной плотностей осуществляли по ГОСТ 5180 и ГОСТ 8735 (таблицы 2.7 – 2.10, рисунок 2.10).

Таблица 2.7 – Содержание в песке крупных и мелких зерен

Масса пробы, г	Масса остатка на сите, г		Содержание в песке зерен (%) крупностью, мм		
	сито № 10	сито №5	5...10	выше 10	менее 0,15
2000	1,8	12,5	0,093	0,057	1,578

Таблица 2.8 – Истинная плотность песка ( $\rho_u$ )

№ пробы	Масса пикнометра пустого $m_1$ , г	Масса пикнометра с пробой материала $m$ , г	Масса пикнометра с пробой и жидкостью $m_3$ , г	Масса пикнометра с жидкостью $m_2$ , Г	$\rho_u$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_u^{cp}$ г/см <sup>3</sup>
1	39,47	56,05	149,32	139,03	2,64	2,64
2	32,53	40,69	137,15	132,09	2,63	

Таблица 2.9 – Насыпная плотность песка

№ пробы	Масса цилиндра с материалом, г	Объем цилиндра, см <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>
1	1668	1000	1,668	
2	1671	1000	1,671	
3	1661	1000	1,661	1,67

Согласно классификации, приведенной в ГОСТ 8736, исследуемый песок относится к I классу.

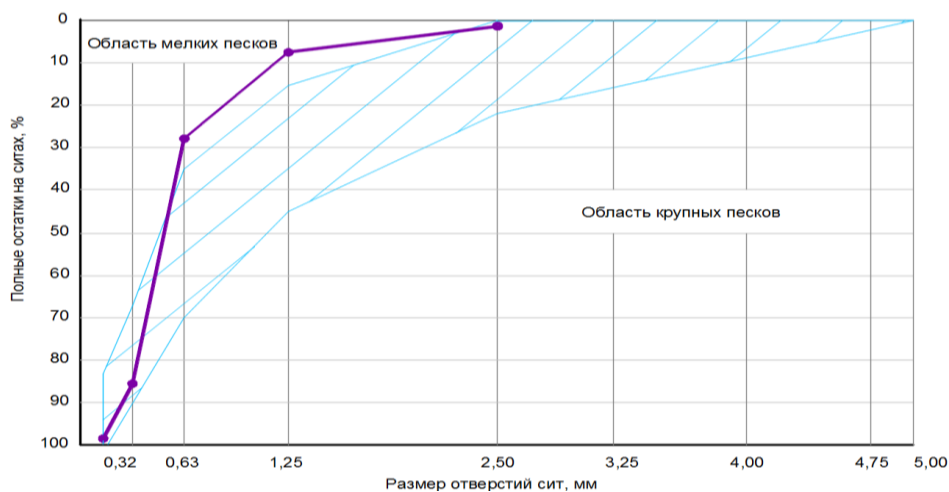


Рисунок 2.10 – Классификация зернового состава песка

Таблица 2.10 – Зерновой состав песка

Вид остатка	Остатки на ситах с размерами отверстий, мм					Прошло через сито №0,14
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Частный, г	28	140,6	482,6	966,2	334,4	31,30
Частный, %	1,34	6,45	22,34	47,72	16,86	1,58
Полный, %	1,34	7,5	27,84	85,56	98,42	100,00

Модуль крупности песка на основе данных таблицы 2.10 составил  $M_k = 2,21$ . При этом полный остаток на сите 0,63 – 27,84 %. В зависимости от модуля крупности и полного остатка на сите 0,63 исследуемый песок относится к группе средних (ГОСТ 8736).

Выбранный нами песок может использоваться как заполнитель для приготовления контрольного и основного состава бетона, так как удовлетворяет требования к материалам, предъявляемым по ГОСТ 30459.

## 2.2.3 Характеристика сапонит-содержащего отхода

### 2.2.3.1 Выделение сапонит-содержащего материала

Способы выделения сапонит-содержащих отходов были рассмотрены в работах Коршунова А.А. [162], Шпилевой Д.В. [156] и других ученых.

В работах А.С. Тутыгина [158 – 159] предложен способ очистки оборотной воды, накапливающейся при обогащении кимберлитовых руд, методом электролитной коагуляции (введение электролита  $MgCl_2$ ). Данный метод основан на переводе высокодисперсных частиц в состояние, близкое к изоэлектрическому, что ведет к нарушению агрегативной устойчивости системы и быстрой седиментации сапонит-содержащего материала.

Исследование динамики образования твердой фазы суспензии методом фотонно-корреляционной спектроскопии показало, что при введении данного электролита происходит перестройка двойного электрического слоя частиц твердой фазы. Это вызывает резкое снижение величины дзета-потенциала поверхности, переход частиц твердой фазы в состояние близкое к изоэлектрическому ( $\xi$  – потенциал стремиться к нулю). Затем происходит снижение электростатического барьера взаимодействия частиц – усиление Ван-дер-Ваальсовых сил взаимного

притяжения. В результате нарушается агрегативная устойчивость системы и происходит ускорение образования осадка сапонит-содержащего материала. Таким образом, проведенные эксперименты позволили рассчитать истинную скорость образования осадка – 10,9 см/час (самопроизвольная скорость выпадения осадка – 2,1...2,9 см/час). При этом степень очистки оборотной воды достигает 80 %.

### 2.2.3.2 Характеристика сапонит-содержащего материала

В таблице 2.11 приведены основные характеристики сапонит-содержащего материала (ССМ), определенные в соответствии с ГОСТ 5180.

Таблица 2.11 – Основные характеристики ССМ

Параметр	Сапонит-содержащий материал
Истинная плотность, $g_u$ г/см <sup>3</sup>	2,63
Влажность, %	6,41
Сорбционная влажность, %	13,22

Химический состав ССМ [155, 158 – 159] определен в ЦКП «Арктика» методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (п. 2.1). Полученные данные показали возможность изменения гидрофильности материала путем его модификации в пиропластическое состояние.

Выполненный химический анализ образцов сапонита с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра Shimadzu EDX-800 HS, показал, что основными элементами исследуемого образца сырья (в пересчете на оксиды) являются: SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO и K<sub>2</sub>O. Содержание вышеперечисленных элементов – 97,4 % (п.п.п. – 2,6 %).

Результаты качественного анализа приведены в таблице 2.12, где указано содержание обнаруженных элементов, рассчитанное методом фундаментальных параметров.



Таблица 2.12 – Состав образцов сапонит-содержащего материала в пересчете на оксиды

Определяемый компонент	Показатель, %	Определяемый компонент	Показатель, %
SiO <sub>2</sub>	51,746	SO <sub>3</sub>	0,318
MgO	19,405	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,660
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,971	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,112
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,406	ZnO	0,031
CaO	4,199	BaO	0,197
TiO <sub>2</sub>	1,017	MnO	0,156
K <sub>2</sub> O	1,693	SrO	0,044
CuO	0,045		

Для получения представлений о минеральном составе сапонитовых вскрышных пород Архангельской алмазоносной провинции в аспекте их использования в качестве компонентов минеральных вяжущих композиций рентгенографически было исследовано три параллельных образца этих пород.

Дифракционные спектры получены на рентгеновской рабочей станции ARL9900 WorkStation (ЦКП «Центр высоких технологий», БГТУ им. В.Г. Шухова) на кобальтовом излучении в интервале углов  $2\theta = 8 - 80^\circ$  с шагом сканирования  $0,02^\circ$ .

В результате этого установлено, что минеральный состав сапонит-содержащего материала представлен высокомагниевого слюдой – флогопитом, низкотемпературным тригональным кварцем, доломитом, монтмориллонитом, палыгорскитом, тальком, клинохлором и коллинситом. Ввиду отсутствия структурных данных для сапонита в расчетах использовали данные изоструктурного монтмориллонита [163].

Результаты определения минерального состава образца сапонит-содержащего материала представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Количественный минеральный состав образца сапонитовых глин

Минералы	Показатель, % по массе
Флогопит	4,09±1,94
Кварц	7,62±0,46
Доломит	1,91±0,43
Монтмориллонит	7,34±1,96
Палыгорскит	6,83±3,35
Тальк	2,99±1,14
Клинохлор	3,69±1,13
Коллинсит	2,69±0,80
Сапонит	62,84±2,09

Известно, что высокодисперсное состояние сапонита характеризуется значительной величиной удельной поверхности и следовательно, огромным запасом свободной поверхностной энергии, который можно использовать для формирования покрытий материалов или в роли вяжущего компонента [160 – 161].

Данные исследования не только позволят рационально утилизировать отходы алмазодобывающей промышленности, но и использовать сапонит-содержащий материал в качестве сырья для индустрии стройматериалов.

За счёт этого повышается эффективность разработки месторождения и безопасность эксплуатации накопителей, минимизируется антропогенное воздействие на природную среду региона.

### **2.2.3.3 Подготовка сапонит-содержащих отходов**

Опытные пробы пульпы отбирали в десяти случайно выбранных точках на разной глубине хвостохранилища и усредняли.

Затем из полученной оборотной воды был выделен сапонит-содержащий материал путем электролитной коагуляции (п. 2.2.3.1). Полученный таким образом материал высушивали и доводили до постоянной массы при температуре  $105 \pm 1$  °С и хранили в эксикаторе над слоем безводного хлорида кальция.

#### **2.2.3.3.1 Механическое диспергирование материала**

Одним из основных способов доведения твердого тела до нанодисперсного состояния является метод диспергирования [164]. Наиболее распространённым методом синтеза наночастиц является механическое диспергирование [165 – 166]. Данный способ широко применяется на заводах и промышленных предприятиях с целью получить лучшую однородность наполнителя и повысить его удельную поверхность, что не только может улучшить его взаимодействие с матрицей композита, но и изменить свойства в целом.

В качестве основного способа получения материала в нанодисперсном состоянии выбран метод сухого диспергирования сырья на планетарной шаровой

мельнице Retsch PM100 (рисунок 2.11). Принцип работы мельницы основан на трении частиц и ударе о них стальных размольных тел.



Рисунок 2.11 – Планетарная шаровая мельница Retsch PM100

Опытным путем были подобраны оптимальные режимные параметры диспергирования, позволяющие получать минимальный размер частиц и высокую воспроизводимость результатов (не менее трех параллельных испытаний).

Скорость вращения ротора составила 420 об/мин. Для диспергирования использовали карбидвольфрамовые размольные тела (20 шт.).

#### 2.2.3.4 Определение величины влагопоглощения ССМ

Процесс сорбции изучали путем помещения навески (100 г) сапонит-содержащего материала, взятой на технических весах, в эксикатор над слоем дистиллированной воды при постоянной температуре окружающей среды  $25 \pm 1$  °С. Влагопоглощение характеризовалось изменением массы образца, определяемое через заданные промежутки времени. Результаты измерений основывались на трех параллельных экспериментах.

Для проведения процесса десорбции влагонасыщенный опытный образец помещали в эксикатор над слоем оксида кальция. Температура оставалась постоянной ( $25 \pm 1$  °С).

После проведения экспериментов по десорбции образца, ССМ помещали в сушильный шкаф и доводили до постоянной массы при температуре  $105 \pm 1$  °С, затем записывали ИК-спектры образцов. Для записи использовали ИК-Фурье-спектрометр Vertex 70v (диапазон  $4000-600$  см<sup>-1</sup>, разрешение  $4$  см<sup>-1</sup>) (п. 2.1).

#### 2.2.3.5 Методика измерения величины водопоглощения высокодисперсных систем

Определение водопоглощения ССМ с учетом временного фактора, проводили на трех независимых пробах (три параллельных эксперимента), подготовленных по методике, описанной в пункте 2.2.3.3, и хранящихся в эксикаторе над слоем

безводного хлорида кальция.

Для определения величины водопоглощения твердой фазой сапонит-содержащего материала мной разработана оригинальная методика, заключающаяся в определении изменения объема жидкой фазы при контакте с анализируемой пробой, путем оптической фиксации изменения границ раздела жидкой и твердой фаз во времени.

Было подготовлено пять проб ССМ отличающихся величиной активной удельной поверхности. Для характеристики величины водопоглощения опытных проб использовали удельное массовое значение изменения объемов реакционной смеси ( $q$ ), которое рассчитывали как отношение изменения объема системы ( $\Delta V$ ) после фиксированного времени выдержки (10, 20, 30, 40 и 50 мин) к массе опытной пробы ( $m$ ), выражение (2.10). Точность измерения временного интервала составила  $\pm 1$  мин.

$$q = \frac{\Delta V}{m}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.10)$$

Изменение объемов параллельных измерений не превышало  $0,1 \text{ см}^3$ . Для последующих расчетов использовали среднее значение опытных данных для каждой серии экспериментов.

Для проверки корректности получаемых результатов в качестве опытного образца был взят силикагель с известной величиной водопоглощения (ГОСТ 3956-76).

Так, для марки силикагеля КСМГ установлено, что величина влагоемкости составляет 25%. В пересчете на величину удельного водопоглощения навески (масса  $0,1 \text{ кг}$ ) она составит  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Полученные экспериментальные значения для силикагеля показали, что удельное водопоглощение равно  $q = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Хорошее совпадение литературных и экспериментальных данных позволяет говорить о корректности получаемых значений.

### **2.2.3.6 Устройство для измерения водопоглощения сыпучих материалов**

Устройство предназначено для полуавтоматизированного измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов (патент №156792; Приложение Б).

Благодаря тому, что устройство снабжено персональным компьютером с программным обеспечением, автоматическим дозатором воды, перильстатическим насосом для подачи воды, а образец помещается в прозрачную стеклянную колбу, установка дает возможность наблюдения за динамикой процессов и одновременно осуществлять расчет требуемых показателей на компьютере.

На рисунке 2.12 изображена схема устройства для измерения водопоглощения.

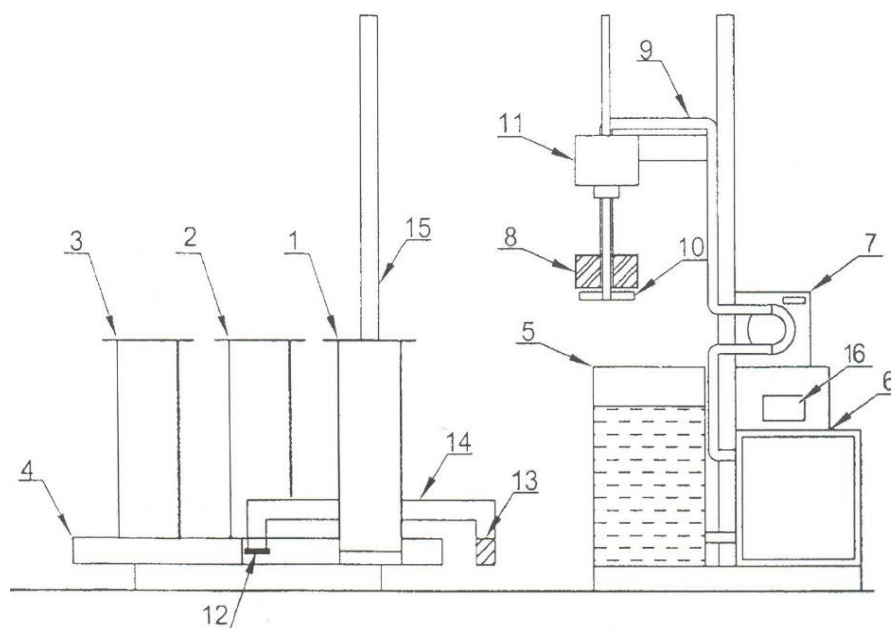


Рисунок 2.12 – Установка для измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов

Устройство для измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов содержит мерные цилиндры 1, 2 и 3 емкостью по  $15 \text{ см}^3$  каждый, закрепленные на барабане 4, бак для хранения дистиллированной воды 5, автоматический дозатор воды 6, перильстатический насос 7, пробка 8 для мерного цилиндра с отверстиями под трубку для подачи воды 9 и мешалку 10, электродвигатель 11, пара из лазера (источник света) 12 и фотодиода (приемник света) 13 закрепленных на металлическом коромысле 14 на уровне дна мерных цилиндров, устройство подъема металлического коромысла 15, персональный компьютер (ПК) 16 с программным обеспечением (ПО).

Работа данного устройства заключается в следующем.

Бак 5 наполняют дистиллированной водой, в ячейки на барабане 4 вставляют мерные цилиндры 1, 2, 3 и засыпают в них через воронку предварительно

высушенные и доведенные до постоянной массы взвешенные образцы исследуемого рыхлого или сыпучего материала.

Затем специализированное ПО, установленное на ПК 16, подает сигнал на устройство подъема 15 металлического коромысла 14 и на закрепленные на его концах лазер 12 и фотодиод 13.

Лазер 12 включается, фотодиод 13 принимает излучение и посылает сигнал на ПК 16, на основании интенсивности сигнала ПО строит график. Устройство подъема начинает с постоянной скоростью поднимать коромысло 14 одновременно с включением лазера 12. Когда луч лазера 12 пересекает раздел фаз «твердое тело (навеска) – газ (воздух)», сигнал усиливается, на графике появляется перепад, ПО выключает лазер 12 и фотодиод 13, а устройство подъема возвращает их в исходное положение – на уровне дна цилиндра.

ПО запрашивает данные по массе навесок в мерных цилиндрах и на основании известных значений диаметра цилиндра и скорости подъема, а также измеренного времени подъема рассчитывает объем навески и количество воды, которое необходимо добавить в мерный цилиндр. Зная объемы навески, мерного цилиндра и количество воды ПО рассчитывает и задает время перемешивания, после чего подает сигнал на устройство перемешивания и подачи воды – мерный цилиндр закрывает пробка 8, включается перильстатический насос 7, электродвигатель 11 и работающая от него мешалка 10. Мешалка 10 равномерно опускается, насос 7 закачивает под давлением воду в трубку для подачи воды 9. Автоматический дозатор воды 6 следит за расходом жидкости на основании ранее рассчитанных данных. Мешалка 10 перемешивает образующуюся суспензию, вода, которая подается под давлением из трубки 9, смывает частички навески со стенок цилиндра.

После перемешивания мешалка 10 поднимается, а остатки воды под давлением смывает с нее частички навески. По окончании ранее рассчитанного времени перемешивания ПО подает сигнал на устройство перемешивания и подачи воды, мешалка 10, электродвигатель 11, перильстатический насос 7 выключаются, пробка 8 поднимается и открывает мерный цилиндр.

Затем ПО подает сигнал на барабан 4, который поворачивается на одну ячейку. Цикл повторяется с оставшимися цилиндрами 2, 3 с образцами.

После перемешивания во всех цилиндрах начинается процесс оседания частиц (седиментация). Таймер ПО засекает время и каждые 5 минут включает устройство подъема и лазер 12 с фотодиодом 13, до тех пор, пока на графике «сила сигнала - время» не образуются два четко выраженных перепада на границе фаз «твердое тело – жидкость» и «жидкость – газ». По графику ПО рассчитывает новые значения объемов навески и воды. По изменению объемов для навески вычисляется набухание, а для воды – водопоглощение.

### 2.3 Подбор состава мелкозернистого бетона и изготовление образцов

Подбор состава мелкозернистого бетона осуществляли по ГОСТ 27006-86, рекомендациям по подбору состава мелкозернистых бетонов к ГОСТ 27006-86 и методике Баженова Ю. М. [67].

Осадку конуса полученной смеси проверяли по ГОСТ 10181.

В качестве вяжущих материалов для приготовления бетонов был взят портландцемент, отвечающий требованиям ГОСТ 10178-85. В качестве мелкого заполнителя использовали песок, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 10268. Вода затворения бетонной смеси соответствовала требованиям ГОСТ 23732-2011.

Соотношение компонентов бетонной смеси рассчитывали по методике [67]. Навеска материалов бралась на лабораторных весах с точностью до 0,01 г.

Для получения композиционной смеси **контрольного** состава перемешивали в сухом виде вяжущее (портландцемент) и заполнитель (песок средней крупности) до получения однородной массы. Далее в центре смеси делали лунку и добавляли воду (В/Ц = 0,38).

Для получения композиционной смеси **опытного** состава перемешивали в сухом виде вяжущее (портландцемент), заполнитель (песок средней крупности) и подготовленный по методике п. 2.2.3.3 сапонит-содержащий материал до получения однородной массы. Далее в центре смеси делали лунку и добавляли воду (В/Ц = 0,50). При таком водоцементном отношении смесь получалась более однородной и подвижной. Затем, за счёт сорбционных свойств минерального компонента, В/Ц уменьшалось до 0,38.

Количество компонента рассчитывали на основе определенного по п. 2.2.3.4 водопоглощения ССМ.

Удобоукладываемость оценивали подвижностью/жесткостью смеси по ГОСТ 10181.1.

Подготовку образцов бетонных кубиков осуществляли по ГОСТ 22685-89 с последующим уплотнением смеси на виброплощадке. После изготовления образцы в формах покрывали влажной тканью и хранили в течение суток в помещении при температуре  $(20\pm 2)$  °С. Затем их извлекали из форм и помещали в камеру нормального твердения. Твердение бетона осуществляли в естественных условиях по ВСН-05-64.

## **2.4 Методы испытания опытных образцов мелкозернистого бетона**

Класс бетона определяли согласно ГОСТ 10180 и соответствующему пределу прочности при сжатии образцов-кубов размером 150x150x150 мм, изготовленных из бетонной смеси и испытанных после твердения в течение 28 суток при нормальных условиях. Во время испытания образец устанавливали в центре нижней плиты прессы и прикладывали нагрузку со скоростью 0,4...0,8 МПа/с [167].

Испытание по определению марки морозостойкости бетонных образцов проводили по методике, описанной в ГОСТ 10060 (ускоренный метод, третий). Образцы для испытания не должны иметь внешних дефектов. Массу образцов определяли с погрешностью не более 0,1%.

Для замораживания и оттаивания использовали камеру тепла и холода «ТХВ-64». Началом замораживания считали момент установления в камере температуры  $(-50\pm 2)$  °С.

Водопроницаемость бетонных образцов определяли по ГОСТ 12730.5-84 ускоренным методом с использованием фильтратометра «Агама 3М» ВМ-8.7 (разрежение до 0,6 атмосфер избыточного давления) и образцов бетона размером 150x150x150 мм.

Водопоглощение бетонных образцов определяли по ГОСТ 12730.3-78.

Истираемость бетонных образцов определяли по ГОСТ 13087. Для истирания использовали лабораторный круг истирания ЛКИ-3 со съемными вращающимися в



горизонтальной плоскости кругами (истирающие диски), изготовленными из серого чугуна твердостью по Шере 185-215 кН/см.

Усадку (при высыхании) бетонных образцов определяли по ГОСТ 25485-89 путем испытания серии из трех образцов-призм размерами 40x40x160 мм.

### **Выводы по второй главе**

1. В соответствии с целью и задачами исследования определены методы и методики изготовления опытных образцов и изучения их водно-физических и физико-механических характеристик.

2. Разработано устройство для изучения процесса водопоглощения опытных проб сапонит-содержащего материала (патент №156792).

3. Представлены используемые стандартные методы исследования полученных образцов мелкозернистого бетона.

### **3 ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЯ С ВЫСОКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО КОМПОНЕНТА БЕТОННОЙ СМЕСИ**

#### **3.1 Поверхностная энергия и сорбционный гистерезис сапонит-содержащего материала**

##### **3.1.1 Понятие поверхностной энергии**

На основании ранее проведенных исследований установлено, что создание новых композиционных материалов возможно с использованием современных нанотехнологий и нанодисперсных модифицированных добавок. Данный подход позволяет в значительной степени повысить качество строительных материалов: прочность, износостойкость, термическую и химическую стойкость, вязкость разрушения, т.е. увеличить эксплуатационный период и жизненный цикл конструкции [168 – 170].

Известно, что изменение размерных параметров материала значительно сказывается на его свойствах (материал может стать гидрофобным или гидрофильным, изменить цвет и т.д.). Такой эффект проявляется только при диспергировании материала до наноразмерного уровня. Это обусловлено тем, что значительная доля атомов (или молекул), составляющих частицы материала, находятся в поверхностном слое и имеют свободные (не скомпенсированные) связи, обуславливающие величину свободной поверхностной энергии. Поэтому свойства наносистем изменяются в зависимости от степени дисперсности.

Когда размеры частиц достигают нанометровых, то площадь поверхности и поверхностная энергия увеличиваются в несколько раз. Благодаря этому наносистемы имеют огромный запас поверхностной энергии или избыточной энергии молекул поверхностного слоя.

Наиболее распространенным методом формирования новой поверхности твердого тела является механическое диспергирование. В этом случае образуется поверхность, идентичная по своей природе первоначальной [179 – 180], но с большей удельной поверхностью ( $S_{y\partial}$ ). Повышение  $S_{y\partial}$  материала улучшает взаимодействие его с матрицей композита (достигается более однородное распределение наночастиц в материале). Поэтому определение удельной поверхности является одним из самых

распространенных методов исследования энергетических показателей ультра- и наноматериалов.

### **3.1.2 Основные характеристики сапонит-содержащего материала**

Удельная поверхность является мерой силы взаимодействия твердого тела с окружающей средой. Она определяет такие характеристики материалов, как каталитическая активность, способность к агломерации, а главное способность удерживать влагу.

Используемый в работе сапонит-содержащий материал – это модифицированная бентонитовая глина, поэтому обладает рядом ее свойств (набухание при гидратации, образование плотного геля, препятствующего проникновению влаги, нетоксичность, химическая стойкость). Материал обладает высоким содержанием магния (до 12%) и представляет собой новый вид минерального сырья многоотраслевого использования.

Проведенные исследования показали, что отличительной особенностью сапонит-содержащего материала являются его адсорбирующие и гидроизоляционные свойства в композитах с песком. При добавлении цемента, сапонит представляет собой хороший гидроизоляционный материал, который может быть использован при строительстве гидроэлектростанций (плотин ГЭС, каналов и др.), объектов промышленного и жилищного строительства (подземные части сооружений), при устройстве искусственных водоемов [160 – 161] и пр.

Для определения основных характеристик сапонит-содержащего отхода проводили предварительную подготовку сырья по схеме, представленной на рисунке 3.1. Конечным результатом было получение активного материала за счет механического диспергирования (п. 2.2.3.3.1).

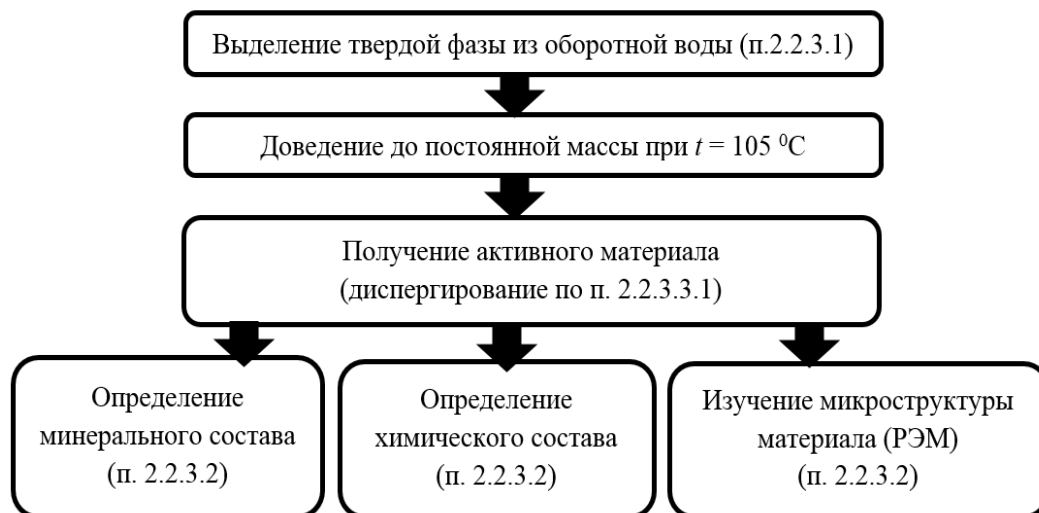


Рисунок 3.1 – Смеха подготовки сапонит-содержащего материала

На рисунке 3.2 представлены экспериментальные данные, полученные на анализаторе размера субмикронных частиц после механического диспергирования ССМ. Пример протокола определения среднего размера частиц проб данного материала приведен в приложении В.

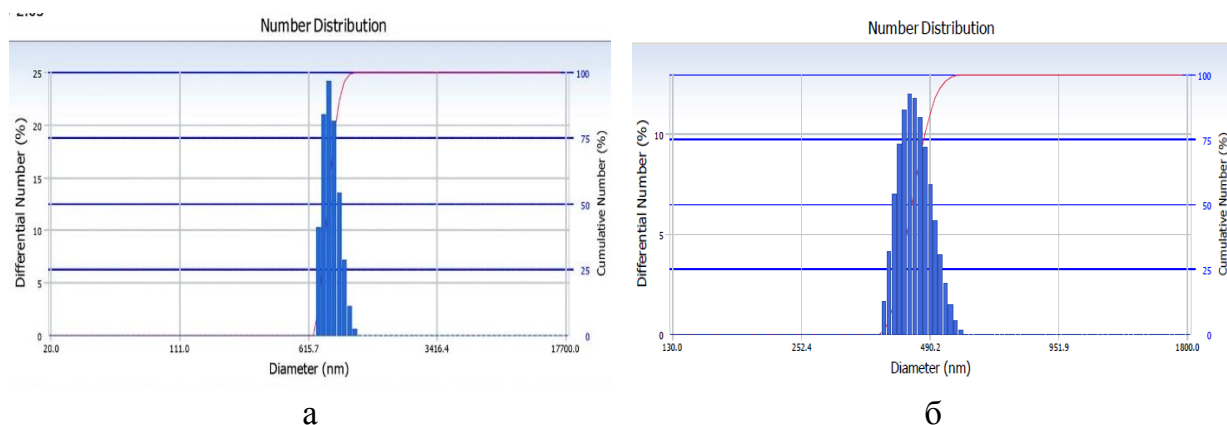


Рисунок 3.2 – Размерное распределение частиц в опытных образцах ССМ, полученное на анализаторе Delsa Nano C с размером фракции: а)  $827 \pm 52$  нм; б)  $445 \pm 40$  нм

Основываясь на данных размерного распределения частиц построена зависимость (рисунок 3.3), связывающая средний размер частиц ( $D$ ) и время диспергирования ( $\tau$ ).

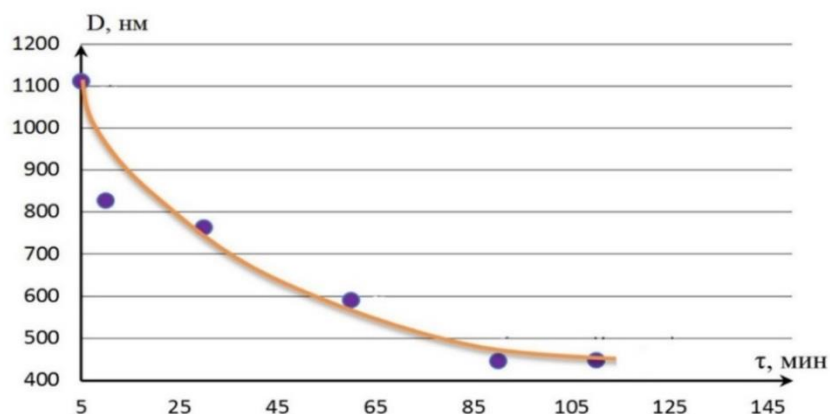


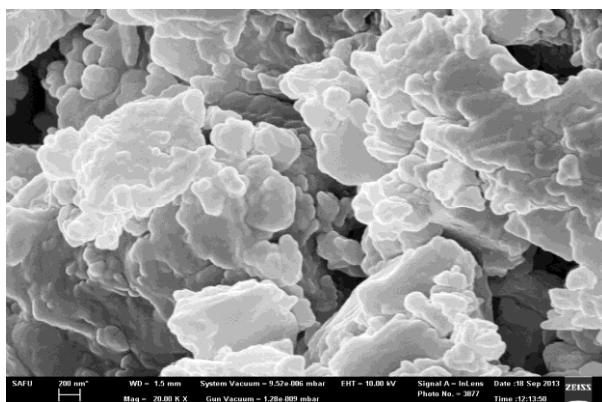
Рисунок 3.3 – Зависимость вида среднего размера частиц ССМ от времени диспергирования

Анализ данных, представленных на рисунке 3.3, показывает, что диспергирование более 1,5 часа не приводит к уменьшению размерных параметров частиц.

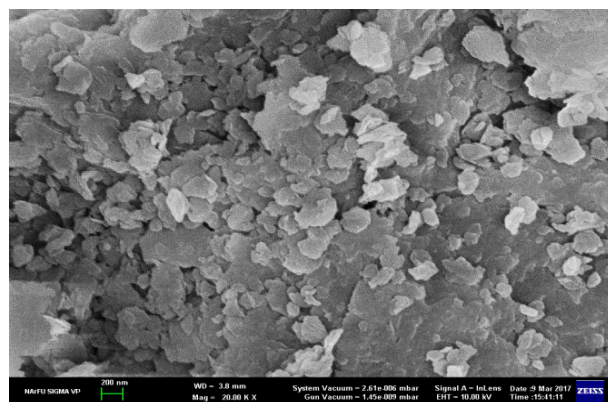
Данный факт связан с тем, что при механическом диспергировании материала высвобождается большое количество энергии, которая приводит к укрупнению частиц за счет конгломерации.

Для подтверждения корректности полученных размерных характеристик сапонит-содержащего материала, в ЦКП «Арктика» на электронном растровом микроскопе (п. 2.1) были сделаны фотографии высокодисперсного ССМ, увеличенные до 20 000 раз с разрешением до 1,3 нм.

Электронная микроскопия показала, что сапонит-содержащий материал обладает слоистой структурой (рисунок 3.4) с многочисленными пустотами, которые способны заполняться водой.



а



б

Рисунок 3.4 – Микроструктура образцов ССМ, полученная на растровом электронном микроскопе Zeiss Sigma VP: а) исходного; б) после диспергирования

Поскольку механоактивированный ССМ обладает слоистой структурой с развитой поверхностью, то для его характеристики корректнее использовать не размерные параметры частиц, а величину удельной поверхности.

Данный параметр является критерием, который характеризует способность конденсированной системы к трансформационным превращениям, протекающим как самопроизвольно, так и в различных технологических процессах производства строительных нанокomпозиционных материалов.

Поэтому высокодисперсный образец сапонит-содержащего материала был охарактеризован по величине удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) (п. 2.1). Пример протокола по определению удельной поверхности на анализаторе представлен в приложении Г.

В процессе механического диспергирования были получены образцы сапонит-содержащего материала с размерным диапазоном частиц от 1 мкм до 400 нм и удельной поверхностью от  $18610 \pm 10$  м<sup>2</sup>/кг до  $50670 \pm 10$  м<sup>2</sup>/кг соответственно (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Время диспергирования и характеристики образцов ССМ

№ образца	Время диспергирования образцов, мин.	Средний размер частиц $D$ , нм.	Удельная поверхность $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	Объем пор (пористость), $V_{пор} \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> /кг
1	5	1113±23	18 610	0,081
2	10	827±52	19 810	0,034
3	30	764±43	21 210	0,019
4	60	591±28	35 280	0,011
5	90	445±40	50 670	0,001
6	110	447±34	50 672	0,001
7	120	517±22	30 359	0,002

При анализе данных таблицы отмечен факт резкого возрастания величины активной удельной поверхности материала с приближением размерных характеристик его частиц к диапазону, характерному для наносистем.

Зависимость между удельной поверхностью ССМ и временем диспергирования ( $\tau$ ), показала, что увеличение времени измельчения не приводит к возрастанию  $S_{уд}$ , а при механообработке более 100 мин наблюдается конгломерация частиц в системе.

Основой создания нового наноструктурированного вяжущего гидратационного типа твердения является процесс механоактивации кремнеземсодержащего сырья при достижении последним микро- и наноразмерного состояния. При помолe, согласно

закону сохранения энергии, за счет механического воздействия часть подводимой к сырью энергии расходуется на его нагрев. Это вызывает изменение ориентации структурных элементов в кристалле в приповерхностном слое с образованием новой аморфной фазы вещества. Рентгенофазовый анализ ультра- и нанодисперсных материалов различных горных пород показал, что активная аморфная составляющая твердой фазы может достигать значительной величины.

Образование аморфной фазы горных пород в процессе их диспергирования до ультра- и наноразмерного состояния является важной составляющей повышения реакционной способности высокодисперсного материала [171]. Для таких систем эта способность определяется поверхностной активностью [174]. Данный критерий количественно характеризует переход потенциальной энергии, накопленной горной породой в процессе генезиса, в свободную поверхностную энергию за счет активации поверхности сырья [179].

Оптимизация состава композиционного вяжущего может быть достигнута за счёт использования наиболее активного кремнеземсодержащего компонента в качестве модифицирующего компонента с содержанием приповерхностной аморфной активной фазы, образующейся в процессе механоактивации сырья.

Поэтому необходимо выявить функциональную взаимосвязь между поверхностной активностью высокодисперсных кремнеземсодержащих систем природного и техногенного происхождения и количеством активной аморфной фазы, образованной в этих системах после проведения процесса механоактивации.

Расчет величины активности поверхности ( $k_s$ ) высокодисперсной системы горной породы осуществляется с учетом значений удельной массовой энергии атомизации химических соединений, входящих в состав минералов ( $E_m$ ) и свободной поверхностной энергии ( $E_s$ ) по формуле [179]:

$$k_s = E_s / E_m \quad (3.1)$$

В свою очередь

$$E_s = \sigma_k \cdot S_{y\partial} \quad (3.2)$$

где  $\sigma_k$  – критическое поверхностное натяжение твердой фазы, Дж/м<sup>2</sup>;

$S_{y\partial}$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/кг.

В исследованиях [181] представлены экспериментальные приемы определения  $\sigma_k$  для высокодисперсных систем осадочных горных пород по краевому углу смачивания с использованием метода Г.А. Зисмана (п.2.1).

Значения удельной массовой величины энергии атомизации горной породы рассчитываются по стандартным энтальпиям образования химических элементов составляющих минералов [182].

Результаты определения критического значения поверхностного натяжения ( $\sigma_k$ ) высокодисперсных систем на основе ССМ, а также рассчитанные по экспериментальным данным  $E_m$  (по химическому составу, таблица 2.12) и энергетические характеристики поверхности (свободная поверхностная энергия)  $E_S$  и поверхностное натяжение ( $\sigma_k$ ), приведены в таблице 3.2. Кроме того в данную таблицу включены энергетические характеристики исследуемых ранее песков [174].

Данные таблицы 3.2 позволяют рассчитать активность поверхности высокодисперсных систем на основе техногенного сырья.

Таблица 3.2 – Характеристика исследуемых высокодисперсных образцов

Образец	$E_m$ , кДж/кг	$E_S$ , Дж/кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_k$ , мДж/м <sup>2</sup>	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	Содержание аморфной фазы С, %	$k_S \cdot 10^{-3}$
Песок «Краснофлотский Запад»	28,1	89	2594	11,82	7532	9	3,2
Песок «Кеницы»	30,4	146	2577	16,56	8810	18	4,9
ССМ	38,0	1064	2130	20,70	50672	40	28,0

По результатам определения фазового состава высокодисперсного образца установлено содержание в нем аморфной фазы.

Подтверждение связующих свойств сапонит-содержащего материала осуществляли за счёт определения величины теплового эффекта путем калориметрии.

Для определения удельной теплоты гидратации были изготовлены образцы контрольного (не измельченного ССМ) и опытного (механоактивированного ССМ). Результаты калориметрического определения удельной теплоты гидратации ( $\Delta H$ ) образцов представлены в таблице 3.3.



Таблица 3.3 – Результаты калориметрического определения удельной теплоты гидратации образцов

Состав	m, г	K, кДж	Температура, °С		$\Delta t$ , °С	- $\Delta H$ , кДж/кг
			начальная	через 2 часа от начала эксперимента		
Контрольный	5,40	0,58	23,5	24,1	0,6	66±4
Опытный	5,09			24,8	1,6	185±12

Сравнивая полученные значения удельной теплоты гидратации для контрольного и опытного образцов, можно сделать вывод о том, что механоактивация приводит к интенсификации процессов взаимодействия ССМ с водой.

Исследования фазово-структурной гетерогенности (п. 2.1) образцов сапонит-содержащего материала, до и после механоактивации (рисунок 3.5), подтвердили, что содержание аморфной фазы после механического диспергирования увеличилось в 2 раза по сравнению с исходным (с 20 до 40%).

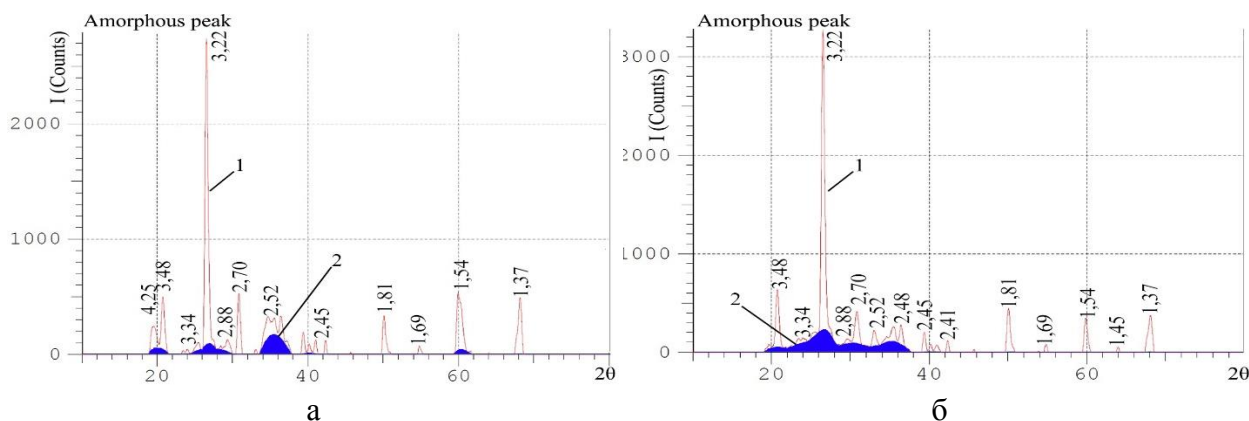


Рисунок 3.5 – Дифрактограмма образца ССМ: а) исходный ССМ; б) образец ССМ после механоактивации (фракция с размером частиц  $445\pm 40$  нм); 1 – кристаллическая часть; 2 – аморфная часть;

Представленные данные показывают, что увеличение количества аморфной фазовой составляющей в механоактивированном кремнеземсодержащем материале приводит к возрастанию на несколько порядков активности поверхности высокодисперсной системы.

Несмотря на близкие значения удельной массовой энергии атомизации у исследуемых образцов горных пород, имеется значительное отличие в способности материалов образовывать аморфную фазу при механоактивации сырья. Данный факт отражается в величине коэффициента поверхностной активности, физическая

природа которого определяется структурными и текстурными особенностями анализируемых объектов.

В работах [171 – 174] показана необходимость диспергирования сырья, связанная с синтезом приповерхностной аморфной фазы, способствующей активации поверхности образцов для возможной химической трансформации соединений, входящих в состав минералов исследуемой горной породы.

Высокие значения концентраций аморфной фазы в проанализированных образцах ССМ позволяют рассматривать его как потенциально активный минеральный компонент в вяжущих композициях.

В подтверждении предложенной гипотезы о возможности использования сапонит-содержащего материала в качестве компонента смеси, способного управлять структурообразованием мелкозернистого бетона за счет регулирования водоцементного отношения, были изучены сорбционные свойства материала.

### **3.1.3 Сорбционно-десорбционный гистерезис ССМ**

Основным процессом, позволяющим управлять структурообразованием смеси, является физическая сорбция воды минеральным компонентом (ССМ), который регулирует В/Ц отношение при твердении бетона. Поэтому важно изучить сорбционно-десорбционные свойства сапонит-содержащего материала по отношению к воде.

С этой целью сапонит-содержащий материал был подготовлен по методике, описанной в пункте 2.2.3.3. Изучение влагопоглощения материала проводили по методике, описанной в пункте 2.2.3.4.

На рисунке 3.6 приведены результаты исследований сорбционных свойств сапонит-содержащего материала, которые показывают, что процесс самонасыщения твердой фазы водяными парами имеет продолжительный характер. Полное насыщение поверхности навески испытуемого материала происходит спустя 12 суток от начала эксперимента. При этом масса образца увеличивается на 8% (насыщение поверхностного слоя образца).

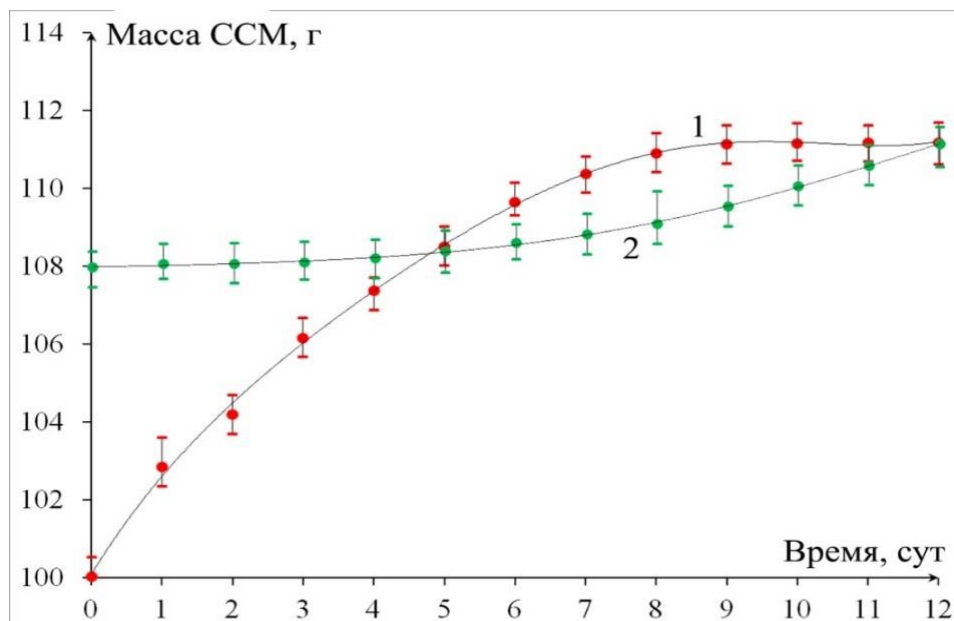


Рисунок 3.6 – Зависимость влагопоглощения сапонит-содержащего материала ( $S_{уд} = 50\ 670 \pm 20\ \text{м}^2/\text{кг}$ ) от времени: 1 – процесс адсорбции; 2 – процесс десорбции

Процесс десорбции влаги анализируемой пробы имеет отличный от изотермы адсорбции характер (рисунок 3.6, кривая 2).

Таким образом, проведенный эксперимент показал наличие в системе «ССМ–водяной пар» адсорбционно-десорбционного гистерезиса.

Отмеченный при этом дисбаланс в массе исходного материала и образца после десорбции связан с увеличением содержания связанной воды после механоактивации кремнезема.

Данный факт был подтвержден наличием соответствующих колебаний, отмеченных ИК-спектром анализируемых образцов после процесса десорбции.

Результаты ИК-спектроскопии (рисунок 3.7), полученные для исходных образцов и образцов после проведения процесса десорбции и удаления из них остаточной влаги, показали наличие в материалах новообразований в виде аморфных (связанных с водой) силикатных групп ( $975\ \text{см}^{-1}$ ) [175 – 176].

Однако, для исходного ССМ интенсивность колебаний при тех же волновых числах в несколько раз ниже, чем у образцов после десорбции.

Кроме того, в ИК-спектрах отмечены характеристические полосы, соответствующие колебаниям следующих функциональных групп (связей): валентные колебания Si-O ( $900 - 1000\ \text{см}^{-1}$ ); OH-группы ( $3500 - 3700\ \text{см}^{-1}$ ),

подтверждающие наличие структурно-связанной воды; валентные колебания Si-O и связи Si-O-Me(Al, Fe) в области 670 – 1100  $\text{см}^{-1}$  характерных для образца после десорбции; OH-группы адсорбированной воды (1400-1600  $\text{см}^{-1}$ ).

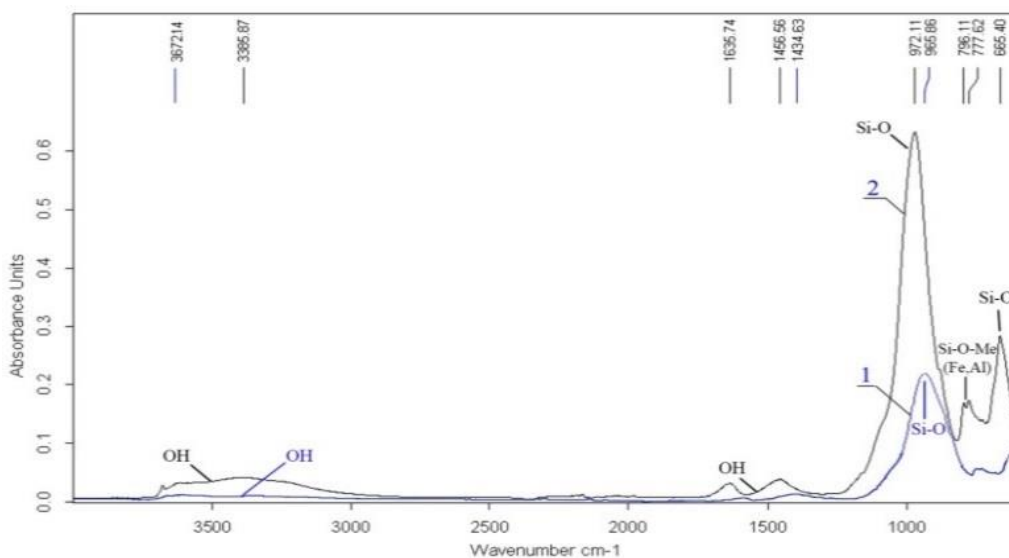


Рисунок 3.7 – ИК-спектр образца ССМ: 1 – исходного; 2 – после десорбции

Анализируя полученные экспериментальные результаты, можно сделать вывод о том, что управляя в процессе твердения бетона структурообразованием смеси за счет регулирования В/Ц отношения путем физической сорбции воды ССМ, можно стабилизировать степень пересыщения системы относительно новообразований гидросиликатов. Это приведет к равномерному распределению продуктов реакции гидратации клинкерных минералов по всему объему образца.

Твердая фаза сапонит-содержащего материала после ее механоактивации способна выступать в качестве дополнительного связующего за счет частичной аморфизации поверхности. Этот эффект проявляется только на обезвоженном высокодисперсном образце ССМ.

На основе полученных экспериментальных данных сделан вывод о возможности использования сапонит-содержащего материала в качестве компонента смеси, позволяющего управлять процессом структурообразования при твердении бетона за счёт регулирования степени насыщения системы водной фазой.

При гидратации клинкерных минералов образуются коллоидно-дисперсные фазы (реакция конденсации) гидросиликатов кальция разной основности. Процесс конденсации, при котором получают частицы коллоидных размеров, возможен

только при определенных условиях. Чтобы в системе могла произойти конденсация данного вещества, она должна быть пересыщена этим веществом. Зародыши новой фазы возникают при определенной степени пересыщения раствора. Следовательно, получение коллоидных систем управляется скоростью образования зародышей и скоростью их роста. В свою очередь, скорость образования зародышей новой фазы (гидросиликаты кальция) пропорциональна степени пересыщения раствора. Используя данный подход можно стабилизировать степень пересыщения системы относительно новообразований гидросиликатов. Это приводит к равномерному распределению продуктов реакции гидратации клинкерных минералов по всему объему образца.

Исходя из вышеизложенного, на первом этапе исследований необходимо решить задачу, связанную с экспериментальным определением величины водопоглощения твердой фазой сапонит-содержащего материала разной степени дисперсности.

### 3.2 Изменение величины водопоглощения образцов ССМ в зависимости от площади удельной поверхности

Водопоглощение проб сапонит-содержащего материала определяли по методике, описанной в пункте 2.2.3.6. Результаты по определению величины водопоглощения представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Режимные параметры образцов сапонит-содержащего материала для определения величины водопоглощения (плотность ССМ  $\rho_{\text{ССМ}} = 2,63 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{кг}$ )

$S_{\text{уд}}$ образца, $\text{м}^2/\text{кг}$ ( $D$ , нм)	№ пробы	Время выдержки, мин	Среднее значение массы $m \cdot 10^{-3}$ , кг			Общая масса реакционной смеси $m \cdot 10^{-3}$ , кг
			мерный цилиндр	ССМ	вода	
18 610 (1113±23)	1	10	54,372	110,588	359,413	470,002
	2	20		126,769	308,212	434,982
	3	30		129,221	337,723	466,944
	4	40		107,607	342,481	450,088
	5	50		112,331	368,216	480,548
19 810 (827±52)	1	10	54,372	151,858	488,910	640,769
	2	20		112,797	300,610	413,408
	3	30		131,202	368,587	499,790
	4	40		108,850	318,664	427,515
	5	50		108,227	330,897	439,125

$S_{y\partial}$ образца, $\text{м}^2/\text{кг}$ ( $D$ , нм)	№ пробы	Время выдержки, мин	Среднее значение массы $m \cdot 10^{-3}$ , кг			Общая масса реакционной смеси $m \cdot 10^{-3}$ , кг
			мерный цилиндр	ССМ	вода	
21 210 (764±43)	1	10	54,372	102,777	306,439	409,216
	2	20		113,139	289,988	403,127
	3	30		119,141	327,638	446,779
	4	40		115,336	346,008	461,345
	5	50		121,593	388,295	509,888
35 280 (591±28)	1	10	54,372	111,145	348,048	459,194
	2	20		117,296	316,261	433,557
	3	30		118,226	306,703	424,930
	4	40		107,314	300,481	407,796
	5	50		103,567	260,872	364,439
50 670 (445±40)	1	10	54,372	140,696	414,242	554,938
	2	20		127,724	380,096	507,821
	3	30		147,839	479,396	627,235
	4	40		123,552	352,516	476,068
	5	50		134,704	423,747	558,452

В таблице 3.5 представлены данные по изменению объемов реакционной смеси «ССМ-вода».

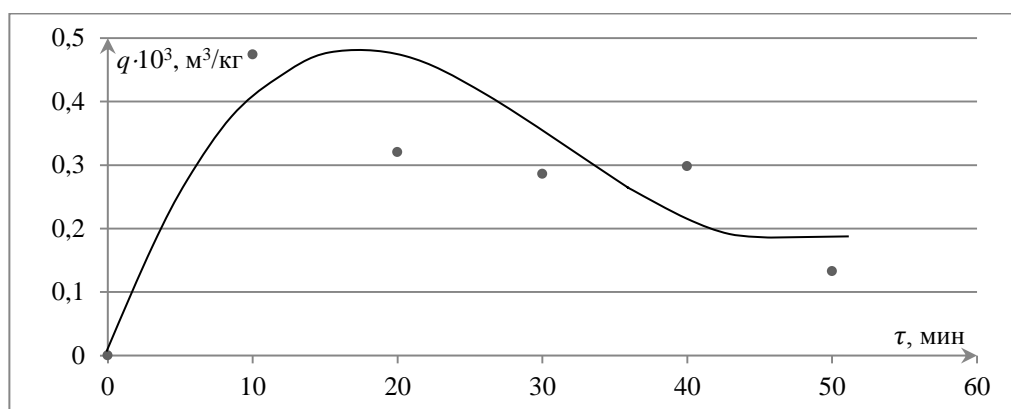
Таблица 3.5 – Изменение объемов смеси «ССМ-вода»

№ пробы	Изменение объема реакционной смеси $V_{p.c.} \cdot 10^{-6}$ , $\text{м}^3$				Суммарное изменение объема реакционной смеси $V_{\text{сум.р.с.}} \cdot 10^{-6}$ , $\text{м}^3$		$\Delta V \cdot 10^{-6}$ , $\text{м}^3$	$\frac{\Delta V}{m} \cdot 10^3$ , $\text{м}^3/\text{кг}^*$
	исходный		после процесса набухания		до набухания	после набухания		
	вода	ССМ	вода	ССМ				
$S_{y\partial} = 18\,610 \text{ м}^2/\text{кг}$ (1113±23 нм)								
1	60	21	45	26	81	71	10	5,1
2	50	20	37	27	71	64	7	3,3
3	50	20	42	23	70	64	6	3,2
4	65	19	51	26	83	77	6	3,6
5	57	19	44	28	75	72	3	1,4
$S_{y\partial} = 19\,810 \text{ м}^2/\text{кг}$ (827±52 нм)								
1	47	16	35	23	63	59	5	2,3
2	51	23	35	32	74	67	7	3,3
3	52	24	41	29	76	69	7	3,3
4	55	24	45	27	79	72	7	3,2
5	63	24	46	33	87	80	8	3,6

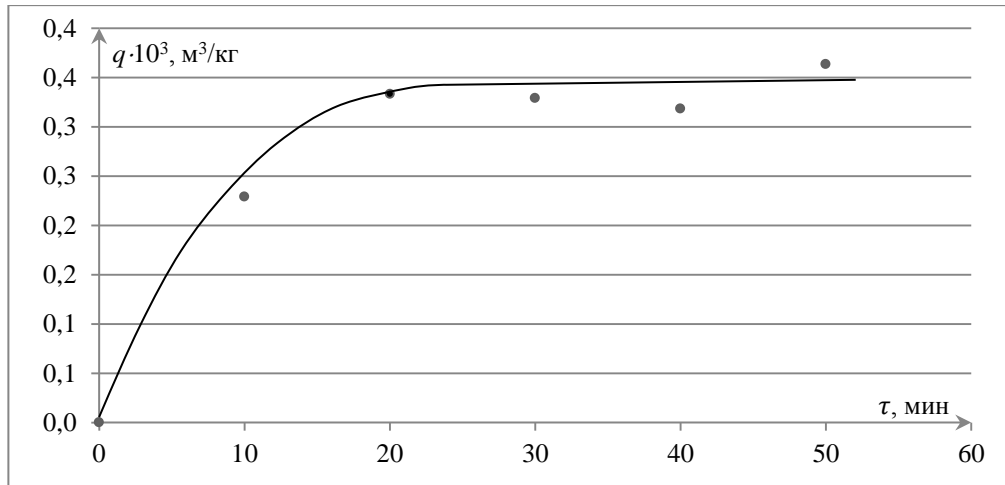
№ пробы	Изменение объема реакционной смеси $V_{p.c.} \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3$				Суммарное изменение объема реакционной смеси $V_{\text{сум.р.с.}} \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3$		$\Delta V \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3$	$\frac{\Delta V}{m} \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}^*$
	исходный		после процесса набухания		до набухания	после набухания		
	вода	ССМ	вода	ССМ				
$S_{y\partial} = 21\,210 \text{ м}^2/\text{кг} (764 \pm 43 \text{ нм})$								
1	63	24	54	2,6	8,7	80	7	3,4
2	48	18	31	2,9	6,6	59	7	3,4
3	61	23	47	2,9	8,4	76	8	3,9
4	58	31	51	2,9	8,8	80	9	3,9
5	49	14	39	1,5	6,3	55	8	4,0
$S_{y\partial} = 35\,280 \text{ м}^2/\text{кг} (591 \pm 28 \text{ нм})$								
1	57	30	45	34	87	80	7	3,5
2	51	25	22	44	76	66	10	4,6
3	52	31	42	31	83	73	10	4,6
4	58	28	41	35	86	76	11	5,1
5	50	33	27	44	82	72	11	5,1
$S_{y\partial} = 50\,670 \text{ м}^2/\text{кг} (445 \pm 40 \text{ нм})$								
1	70	26	55	28	96	83	12	5,1
2	72	27	56	31	100	87	12	5,3
3	57	15	42	19	73	61	12	5,4
4	83	32	61	37	115	98	16	6,6
5	79	28	60	30	107	90	17	7,0

\* $\Delta V$  – изменение объема реакционной смеси «ССМ-вода» до и после процесса набухания,  $\text{м}^3$ ;  $m$  – масса сапонит-содержащего материала, кг.

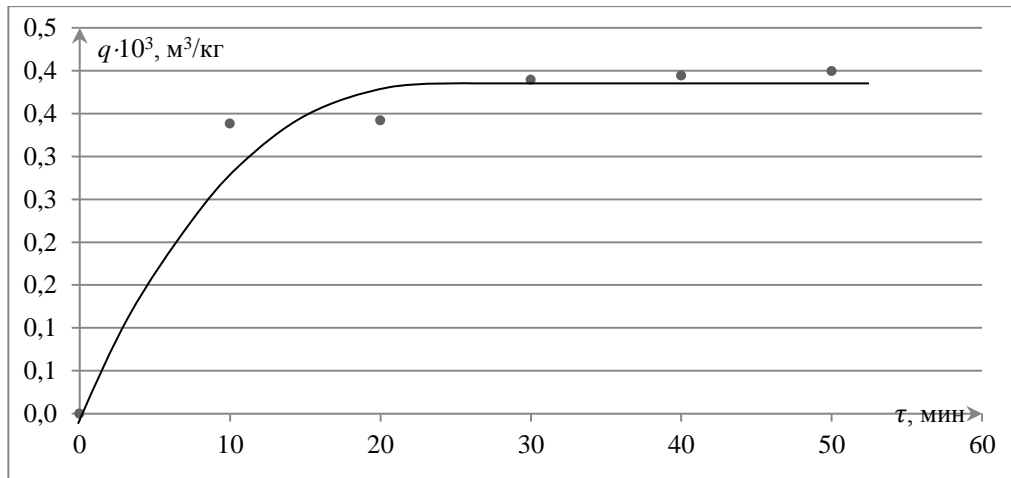
На основе данных, приведенных в таблице 3.5, построены графики функциональной зависимости величины водопоглощения ( $q = \Delta V/m, \text{ м}^3/\text{кг}$ ) от времени ( $\tau$ ) для образцов с разной величиной удельной поверхности (рисунок 3.8).



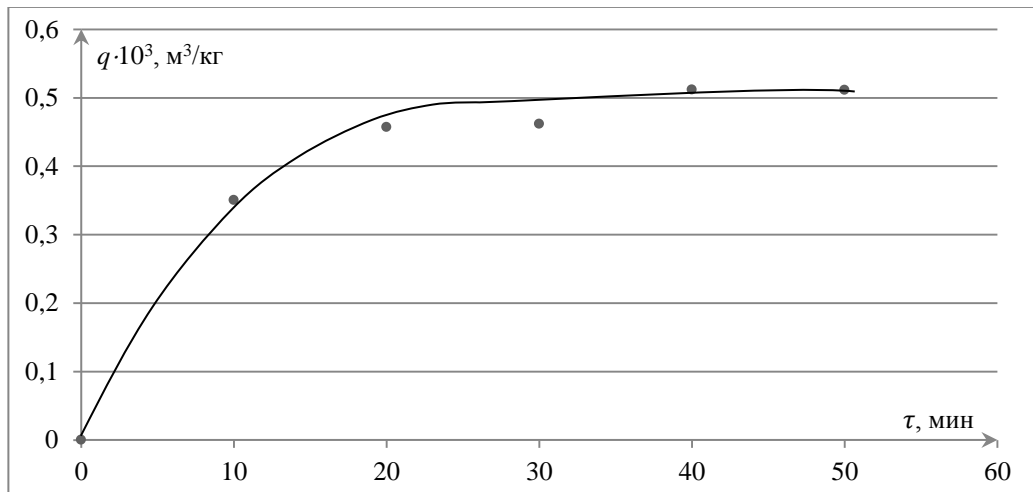
а



б

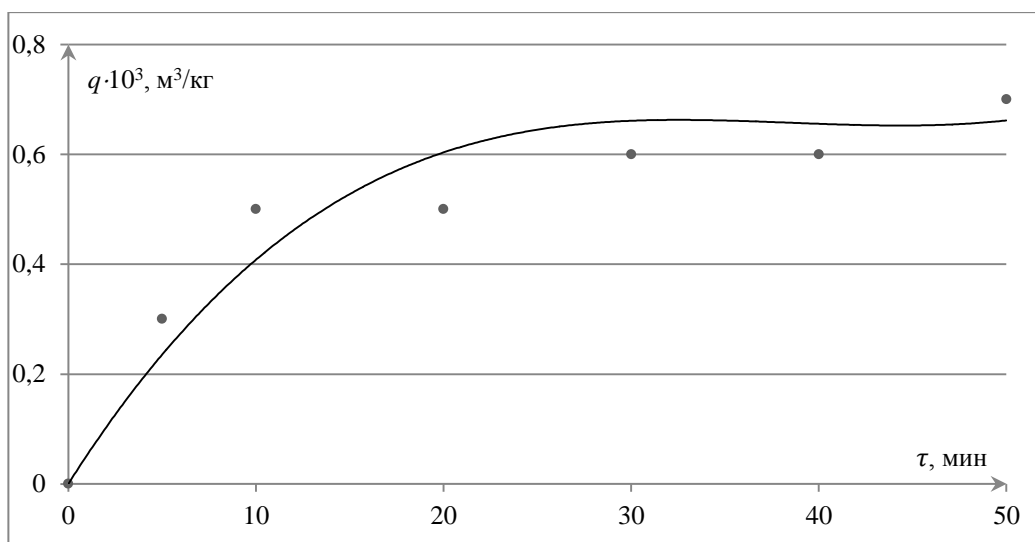


в



г





Д

Рисунок 3.8 – Функциональные зависимости величины водопоглощения от времени для образцов с величиной удельной поверхности: а) 18 610 м<sup>2</sup>/кг; б) 19 810 м<sup>2</sup>/кг; в) 21 210 м<sup>2</sup>/кг; г) 35 280 м<sup>2</sup>/кг; д) 50 670 м<sup>2</sup>/кг

Из графиков (рисунок 3.8) следует, что в течение первых 10...15 минут зависимость характеризуется наличием активного, практически прямолинейного участка водопоглощения. После 30 минут от начала эксперимента реакционные смеси перестают проявлять водопоглощающие свойства, так как полностью насыщаются водой.

Исключение составляет функциональная зависимость вида  $q = f(\tau)$  для образца с удельной поверхностью 18610 м<sup>2</sup>/кг. Такой график характеризуется прямым участком до 15 минут, а после чего идет резкий спад массового изменения реакционной смеси в объеме. Это поведение объясняется тем, что средний размер частиц пробы (более 100 нм) слишком велик для равномерного распределения молекул воды в порах материала. Следовательно, однородность смеси существенно нарушается, в результате чего не все поры ССМ заполняются необходимым объемом воды.

Аппроксимация полученных функциональных зависимостей полиномами разной степени показала, что наиболее высокие значения коэффициента достоверности аппроксимации ( $R^2$ ), во временном интервале от 0 до 30 мин, имеет полином третьей степени (3.3 – 3.7) соответственно:

- для образца с удельной поверхностью 18610 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 3.8,а)

$$q_a = 2 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 2,2 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 5,3 \cdot 10^{-2} \tau, \quad R^2 = 0,73 \quad (3.3)$$

- для образца с удельной поверхностью 19 810 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 3.8,б)

$$q_6 = 1 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 1,1 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 3,3 \cdot 10^{-2} \tau, \quad R^2 = 0,96 \quad (3.4)$$

- для образца с удельной поверхностью 21 210 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 3.8,в)

$$q_b = 1 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 1,3 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 4,1 \cdot 10^{-2} \tau, \quad R^2 = 0,95 \quad (3.5)$$

- для образца с удельной поверхностью 35 280 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 3.8,г)

$$q_r = 1 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 1,4 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 4,5 \cdot 10^{-2} \tau, \quad R^2 = 0,98 \quad (3.6)$$

- для образца с удельной поверхностью 50 670 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 3.8,д)

$$q_d = 2 \cdot 10^{-5} \tau^3 - 2 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 6,58 \cdot 10^{-2} \tau, \quad R^2 = 0,99 \quad (3.7)$$

Дифференцирование выражений (3.3 – 3.7) по времени позволило получить математические выражения для расчета скорости процесса водопоглощения опытных образцов высокодисперсного ССМ:

$$\dot{q}_a = 6 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 4,4 \cdot 10^{-3} \tau + 5,3 \cdot 10^{-2}, \quad (3.8)$$

$$\dot{q}_6 = 3 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 1,1 \cdot 10^{-3} \tau + 3,3 \cdot 10^{-2}, \quad (3.9)$$

$$\dot{q}_b = 3 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 2,6 \cdot 10^{-3} \tau + 4,1 \cdot 10^{-2}, \quad (3.10)$$

$$\dot{q}_r = 3 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 2,8 \cdot 10^{-3} \tau + 4,5 \cdot 10^{-2}, \quad (3.11)$$

$$\dot{q}_d = 6 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 4 \cdot 10^{-3} \tau + 6,58 \cdot 10^{-2}. \quad (3.12)$$

На рисунке 3.9 представлена зависимость величины водопоглощения материала от времени (кривая №1). Кривая №2 на этом рисунке отображает зависимость скорости процесса водопоглощения образца ССМ от времени. Максимальная скорость процесса наблюдается при  $\tau \rightarrow 0$ . При этом, следует отметить, что физический смысл данной величины связан с удельной поверхностью опытного образца и характеризует ее активность в сорбционных процессах.

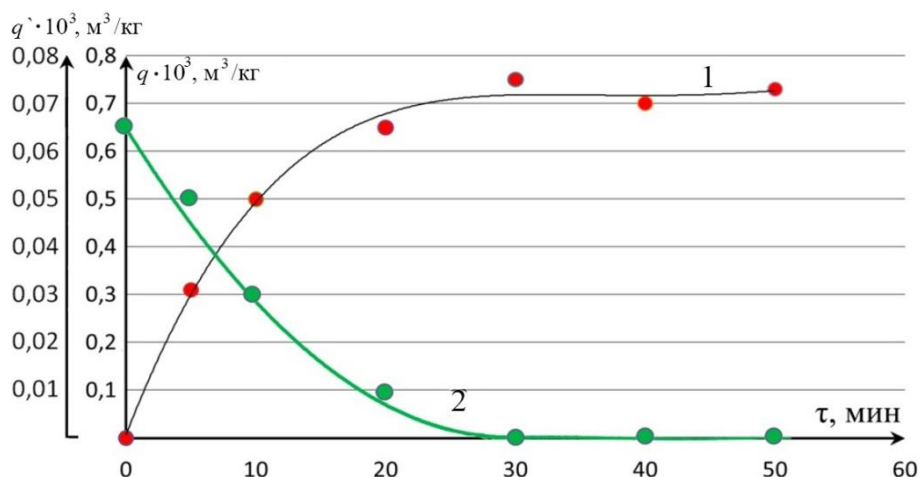


Рисунок 3.9 – Функциональные зависимости для образца ССМ ( $S_{уд} = 50670 \text{ м}^2/\text{кг}$ ):  
1 – величины водопоглощения материала от времени; 2 – зависимость скорости процесса водопоглощения от времени

Полученные данные показали, что после 30 минут от начала эксперимента частицы сапонит-содержащего материала практически полностью насыщаются водой, процесс сорбции достигает своего максимума, а скорость водопоглощения становится равной нулю.

Аналогичные результаты были получены и для других исследуемых высокодисперсных образцов (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Характеристики образцов ССМ

№ образца	Время диспергирования проб, мин.	Удельная поверхность $S_{уд}$ , $\text{м}^2/\text{кг}$	$q \cdot 10^3$ , $\text{м}^3/\text{кг}$
1	5	18 610	0,25
2	10	19 810	0,31
3	30	21 210	0,48
4	60	35 280	0,70
5	90	50 670	0,75

Данные таблицы позволили установить функциональную зависимость водопоглощения от обратной величины удельной поверхности (рисунок 3.10).

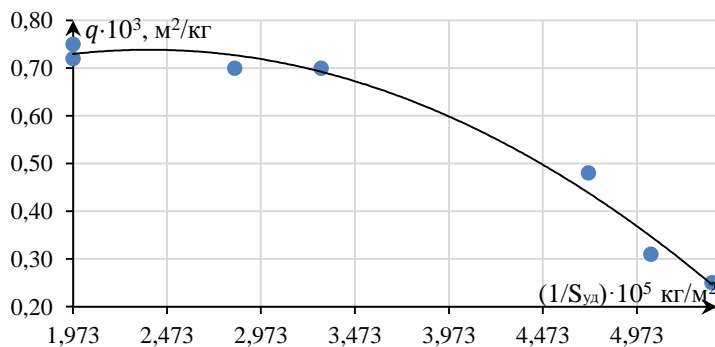


Рисунок 3.10 – Зависимость вида  $q = f(1/S_{уд})$

Аппроксимация полученной зависимости полиномами разной степени показала, что наибольшее значение коэффициента достоверности аппроксимации имеет полином третьей степени:

$$q = -0.0124 \cdot \left(\frac{1}{S_{уд}} \cdot 10^5\right)^3 + 0,0793 \cdot \left(\frac{1}{S_{уд}} \cdot 10^5\right)^2 - 0,1974 \cdot \left(\frac{1}{S_{уд}} \cdot 10^5\right) + 0,9188, \quad R^2 = 0,99 \quad (3.13)$$

Полученное выражение (3.13) позволило по известной величине удельной поверхности материала рассчитать его водопоглощение.

Зависимость величины водопоглощения от удельной поверхности проб показала, что оптимальным водопоглощением обладают образцы с величиной  $S_{уд}$  более 35000 м<sup>2</sup>/кг.

В дальнейших исследованиях в качестве высокодисперсного компонента бетонной смеси использовалась фракция сапонит-содержащего материала с  $S_{уд} = 50670$  м<sup>2</sup>/кг (время диспергирования 90 мин,  $q = 0,75 \cdot 10^3$ , м<sup>3</sup>/кг).

### 3.2.1 Определение величины водопоглощения сыпучих материалов

Определение величины водопоглощения сапонит-содержащего материала осуществляли по методике (п. 2.2.3.6), на уникальной установке (патент №156792; заявка № 2014142701/15; опубл. 20.11.2015, бюл. № 32, приложение Б).

Уникальная установка (рисунок 2.11) предназначена для полуавтоматизированного измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов. Пример протокола определения величины водопоглощения сапонит-содержащего материала на установке приведен в приложении Д.

Экспериментальная установка позволяет измерять с требуемой точностью водопоглощение и набухание образцов рыхлых и сыпучих материалов, наблюдать за динамикой процессов водопоглощения и набухания, проводить до трех параллельных испытаний, автоматизировать: процессы дозирования, подачи воды, перемешивания суспензии, измерения изменения объемов реакционной смеси и вычисления показателей водопоглощения.

### 3.3 Механизм действия минерального модификатора

Процесс структурообразования является определяющим показателем при формировании прочности, плотности (водонепроницаемости) и долговечности отвердевшего цементного камня. Управлять этим процессом можно за счет регулирования водоцементного отношения, которое оказывает решающее значение на формирование объема порового пространства при гидратации минералов. Известно, что большая часть пор цементного камня при оптимальном содержании воды имеет размер менее 10 нм, что объясняет его низкую водопроницаемость, поскольку в этом случае вода в порах действует как герметик. При полной гидратации химически связанная вода и вода, находящаяся в гелеобразном состоянии, составляют около 38 % от массы цемента, что соответствует В/Ц = 0,38 [67, 68, 73]. Если эта величина больше, начинается образование капиллярных пор, предотвращение образования которых достигается за счет использования химических добавок. Таким образом, увеличение В/Ц отношения резко снижает прочность на сжатие цементного камня и отрицательно сказывается на показателях морозостойкости бетона [67]. Однако оптимальное или достаточное В/Ц, с точки зрения формирования структуры бетона, вызывает значительные проблемы при практическом использовании бетонной смеси, связанные, прежде всего, с его малой подвижностью.

В исследованиях [177] на основании изучения тепловых эффектов реакции гидратации установлено, что сапонит-содержащий материал в высокодисперсном состоянии проявляет свойства связующего. Данный факт объясняется следующими причинами: во-первых, при механоактивации образца происходит частичная аморфизация поверхности [171], во-вторых, анализ минерального состава ССМ [178] показал наличие компонентов, которые в активном состоянии при взаимодействии с водой способны проявлять свойства связующего агента.

Для достижения максимального положительного эффекта при создании мелкозернистого бетона в качестве активного наполнителя используется речной полиминеральный песок месторождения «Кеницы» Архангельской области, который, судя по результатам исследований [174, 179], обладает высокой поверхностной активностью.

Однако, для оптимального технологического использования компонента на основе высокодисперсного ССМ, необходимо установить принцип его введения при получении бетона.

Перемешивание компонентов бетонной смеси (цемент, песок) с высокодисперсным материалом в обезвоженном состоянии позволяет получить однородную готовую смесь, которую нужно только затворить необходимым количеством воды. Это значительно упрощает процесс приготовления бетонной смеси. Кроме этого, предполагается, что такой процесс приготовления смеси с высокодисперсным сапонит-содержащим материалом позволит получить структуру композита с равномерным распределением микропор.

Увеличение предельной нагрузки бетона по сравнению с контрольными образцами достигается за счет синтезируемых новообразований (гидросиликатов кальция) кристаллической структуры коллоидной степени дисперсности и их равномерного распределения по всему объему композита.

Следовательно, эффективность процесса твердения бетона определяется реакцией гидратации его клинкерных минералов с образованием новой коллоидно-дисперсной фазы (реакция конденсации) гидросиликатов кальция разной основности. Однако процесс конденсации, при котором получаются частицы коллоидных размеров, возможен только при определенных условиях.

Чтобы в системе могла произойти конденсация данного вещества, она должна быть пересыщена этим веществом. Зародыши новой фазы возникают при определенной степени пересыщения раствора. Таким образом, образование коллоидных систем управляется скоростью образования зародышей и скоростью их роста. В свою очередь, скорость образования зародышей новой фазы (гидросиликаты кальция) пропорциональна степени пересыщения раствора.

При регулировании в процессе твердения бетона структурообразования смеси за счет физической сорбции воды ССМ происходит стабилизация степени пересыщения системы относительно новообразований гидросиликатов, что приводит к равномерному распределению продуктов реакции гидратации клинкерных минералов по всему объему бетонного образца. В то же время использование

водонасыщенной сапонит-содержащей суспензии не позволяет поддерживать степень пересыщения реакционной системы в стабильно-оптимальном состоянии.

Необходимо учитывать и тот факт, что твердая фаза ССМ после ее механоактивации способна выступать в качестве дополнительного связующего за счет частичной аморфизации поверхности. Этот эффект проявляется только на обезвоженном высокодисперсном образце ССМ.

На основании выше изложенного, следует, что сапонит-содержащие отходы процесса обогащения кимберлитовых руд можно использовать в качестве высокодисперсного компонента, управляющего структурообразованием смеси за счет регулирования величины водоцементного отношения при твердении бетона. Минеральный высокодисперсный компонент необходимо вводить в цементную смесь в сухом состоянии.

### **3.4 Подбор оптимального состава мелкозернистого бетона**

Для подбора оптимального количества компонента на основе ССМ для бетонной смеси были использованы результаты кинетических характеристик процесса водопоглощения.

На основании полученных ранее данных следует, что оптимальным водопоглощением обладает проба высокодисперсного минерального компонента с удельной поверхностью  $S_{уд} = 50670 \text{ м}^2/\text{кг}$  и средним размером частиц  $445 \pm 40 \text{ нм}$ . Время механического диспергирования составляет 90 минут так как при этом достигается максимальная степень дисперсности и однородности материала.

Использование минерального компонента способствует структурообразованию смеси в процессе твердения бетона за счет регулирования В/Ц отношения. Для получения качественных высокоэффективных бетонов В/Ц должно быть не более 0,38. Поэтому в контрольных образцах мелкозернистого бетона использовали В/Ц = 0,38, а в опытных – В/Ц отношение повышали до 0,5 с целью получения более пластичной, однородной и удобоукладываемой смеси.

Предполагается, что в процессе приготовления и твердения композита сапонит-содержащий материал будет сорбировать излишки воды, образующиеся при В/Ц = 0,5. Затем ССМ постепенно отдаст запасенную им воду в количестве,

необходимом для равномерной гидратации продуктов цементного теста. Оставшаяся влага в минеральном компоненте способствует образованию гидросиликатов, дополнительно упрочняя структуру композита.

Учитывая размерность вводимого ССМ можно предположить, что компонент будет заполнять собой образующиеся в процессе приготовления и твердения свободные пространства, создавая тем самым плотную упаковку частиц внутри бетона.

На основе кинетических зависимостей величины водопоглощения от времени (п. 3.2), было установлено, что сапонит-содержащий материал способен достигать своего максимального водонасыщения спустя 30 минут после контакта с водой. Из полученных ранее кинетических зависимостей следует, что 1 кг ССМ способен поглотить около 0,75 л воды.

На основании этих данных были подобраны следующие возможные составы для получения мелкозернистых бетонов (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Составы для получения мелкозернистого бетона с ССМ (цемент марки М400, песок средней крупности, требуемый класс бетона В15)

№ п/п	В/Ц		Количество материала на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг				Процент ССМ от суммарной массы материалов
	Заданное	Полученное	цемент	песок	вода	ССМ	
1	0,70	0,50	156	583	109	41	4,6
2	0,60		156	608	94	16	1,8
3	0,50	0,38	156	599	78	25	2,9
4	0,40		156	620	62	4	0,5
5	0,38	0,20	156	587	59	37	4,4

По данным таблицы 3.7 (по составам бетонных смесей) наименьшее количество сапонит-содержащего материала требуется вводить при снижении В/Ц отношения на величину 0,02 (состав №4).

### **3.5 Эффективность использования сапонит-содержащего материала, в качестве высокодисперсного минерального компонента для получения высокоэффективных мелкозернистых бетонов**

Для подтверждения гипотезы о способности высокодисперсного ССМ при контакте с водой проявлять свойства дополнительного связующего агента были



изготовлены образцы состава «песок-ССМ-вода» (таблица 3.8) с исходным сапонит-содержащим материалом (контрольный) и механоактивированным (опытный).

Таблица 3.8 – Расход материалов на получение 1 м<sup>3</sup> состава

Образец вяжущего	В/Ц	Расход материалов, кг		
		песок	вода	ССМ
Контрольный	0,38	1190	452	548
Опытный		1190	452	548

После 28 суточной выдержки были записаны электронные микрофотографии анализируемых объектов (рисунок 3.11).

Результаты РЭМ показали, что микроструктура в образцах представлена в виде губчатых кристаллов. В контрольных пробах преобладают многочисленные пустоты (рисунок 3.11,а), а в опытных с активированным ССМ поверхность более плотная и равномерная (рисунок 3.11,б).

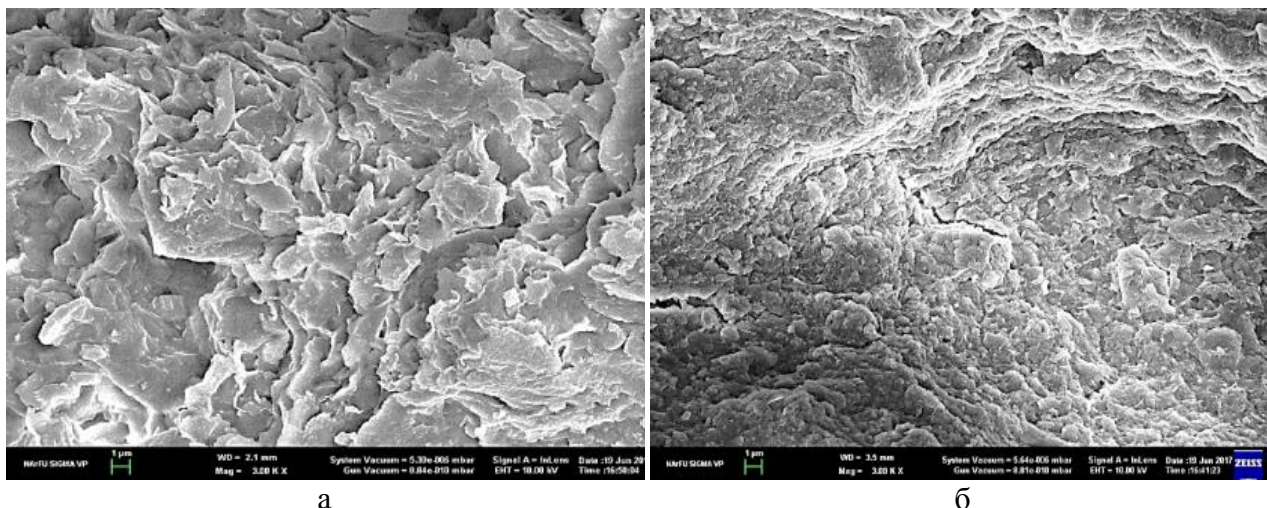


Рисунок 3.11 – Микроструктура образцов: а) контрольного (средний размер частиц ССМ – 1 мкм); б) опытного (средний размер частиц ССМ – 445 нм)

Данный факт подтверждается увеличением средней плотности ( $\rho_{cp} = 2100 \text{ кг/м}^3$ ) опытных образцов по сравнению с контрольными ( $\rho_{cp} = 1820 \text{ кг/м}^3$ ). Данные по прочностным характеристикам показали увеличение прочности на сжатие опытных образцов (0,85 МПа) по сравнению с контрольными (0,34 МПа) в 2,5 раза уже после 7 суточной выдержки (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Зависимость прочности образцов от времени выдержки

Образец	Прочность на сжатие (МПа) в возрасте				
	3 сут	7 сут	14 сут	21 сут	28 сут
Контрольный	0,11	0,23	0,34	0,34	0,34
Опытный	0,73	0,85	0,85	0,85	0,85

В подтверждении факта, что дополнительные гидросиликаты способны образовываться только за счет химических соединений и реакции гидратации минерального компонента с цементом, были изготовлены образцы вяжущего на основе портландцемента (контрольные) и с добавлением сапонит-содержащего материала (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Расход материалов для получения 1 м<sup>3</sup> смеси

Образец вяжущего	В/Ц	Расход материалов, кг		
		цемент	вода	ССМ
Контрольный	0,38	472	180	-
Опытный		472	180	109

Для приготовления образцов опытного состава вяжущее в безводном состоянии смешивалось с минеральным компонентом и затворялось водой. После затворения и выдержки в течение 28 суток записаны ИК-спектры исследуемых композиций (рисунок 3.12).

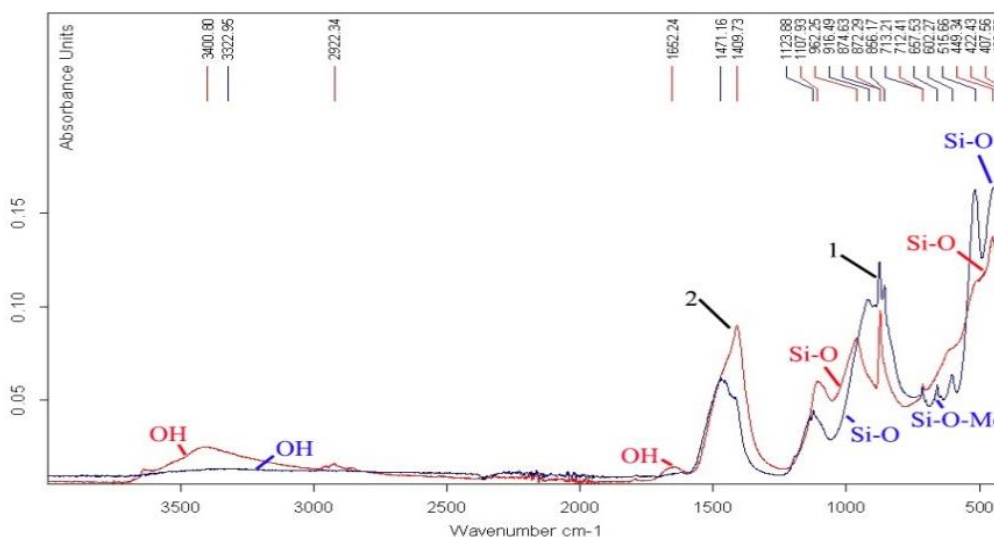


Рисунок 3.12 – ИК-спектры цементных образцов: 1 – с ССМ; 2 – без ССМ

Анализ полученных данных (рисунок 3.12) показал, что широкий пик 980-920 см<sup>-1</sup> указывает на наличие колебаний связей Si-O-Si и Si-O. В области 3600-3200 см<sup>-1</sup> и 1600 см<sup>-1</sup> в образцах присутствуют полосы O-H групп, что также может говорить о наличии гидросиликатов. В образце с минеральным компонентом отмечены C-H группы, что подтверждает органическую природу веществ, использовавшихся при обработке образца. Кроме этого, в опытном образце наблюдается высокая интенсивность пиков, свидетельствующих об образовании O-H групп. Сложная структура пика 916 см<sup>-1</sup> может указывать на присутствие различных

форм силикатов. В то же время, в образце без ССМ, гидросиликатных групп меньше и они имеют более однородный состав.

Электронные микрофотографии образцов подтвердили изменения в структуре цемента при введении минерального компонента. Согласно данным растровой электронной микроскопии (РЕМ), образовавшиеся гидросиликаты представляют собой конгломераты частиц, размер зерен которых колеблется от 2 до 20 мкм. Частицы имеют различную форму, но в основном можно выделить два типа частиц: губчатые (рисунок 3.13, 3.14) с развитой микропористой поверхностью, имеющие размеры от 5 до 10 мкм и игольчатые (рисунок 3.14) с длиной от 0,5 до 5 мкм (диаметр иголок примерно 0,5 мкм).

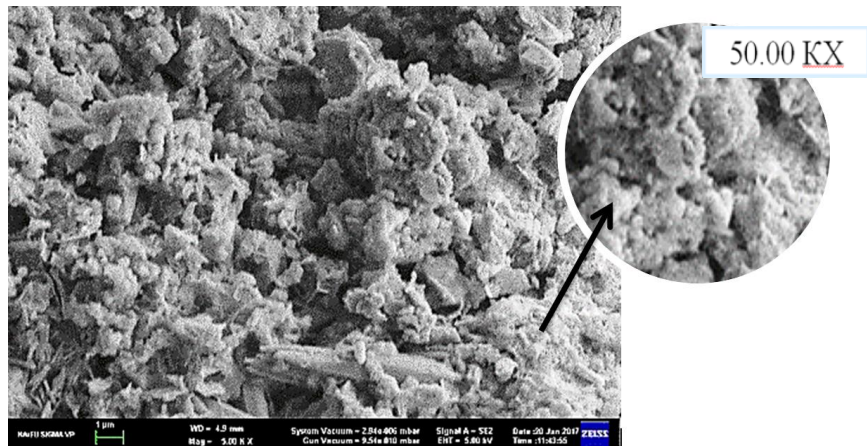


Рисунок 3.13 – Микроструктура цементного образца контрольного состава

В контрольном образце присутствуют частицы только первого типа (губчатые), а в опытном с сапонит-содержащим материалом наблюдается образование двух типов частиц (губчатые и игольчатые).

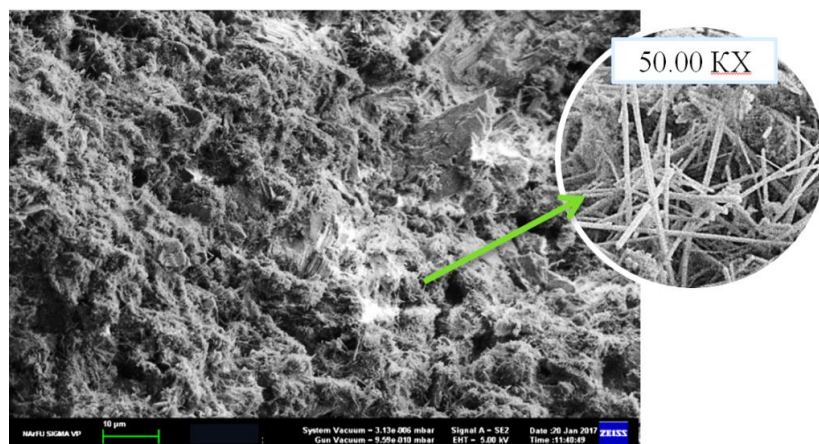


Рисунок 3.14 – Микроструктура цементного образца с высокодисперсным ССМ

Сопоставляя результаты РЭМ и ИК-спектроскопии образцов цемента (рисунки 3.12 – 3.14) можно сделать следующее заключение: наличие максимумов поглощения в ИК-области при  $1400-1600\text{ см}^{-1}$  и широкой полосы при  $3300-3500\text{ см}^{-1}$ , а также образование в образце с ССМ кристаллов игольчатой формы указывают на присутствие субмикрочастиц гидросиликатов группы тоберморита. Последние способствуют дополнительному уплотнению структуры в процессе твердения цемента.

Полученные данные по формам, размерам частиц и спектральным характеристикам гидросиликатов хорошо согласуются с литературными источниками [171 – 172, 180].

Известно, что свойства глинистых минералов определяются их высокодисперсным составом, строением кристаллической решетки и адсорбционной способностью. При этом структура частиц минерала оказывает влияние на физико-механические и физико-химические свойства глин.

Сапонит имеет трехслойную структуру с разбухающей кристаллической решеткой. Слоистость минерала представлена двумя слоями кремнекислородных тетраэдров с расположенными между ними алюмокислородными октаэдрическими слоями (рисунок 3.15).

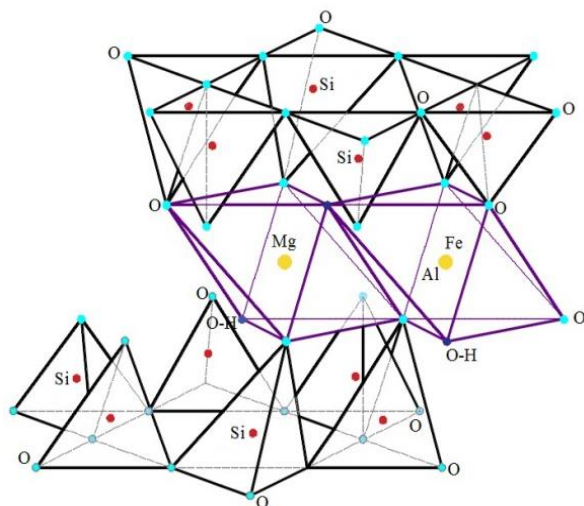


Рисунок 3.15 – Кристаллическая решётка сапонита

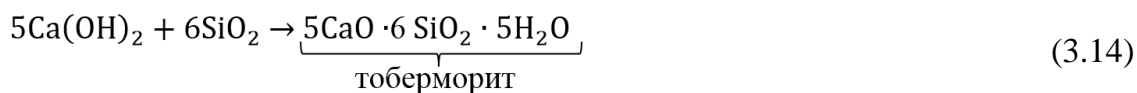
В структуре минерала выделим три слоя: в первом слое – расположены атомы кислорода, во втором – кремния, а в третьем слое, в области вершин тетраэдров, образуются гидроксильные группы. Присутствие в элементарном химическом составе ССМ оксидов кремния и алюминия позволяет при контакте с водой образовывать гидросиликатные группы за счёт особенностей ионной решетки минерала.

Помимо этого, ионная решетка гидросиликатных минералов, каким является сапонит-содержащий материал, включает две структурные единицы. Первая состоит

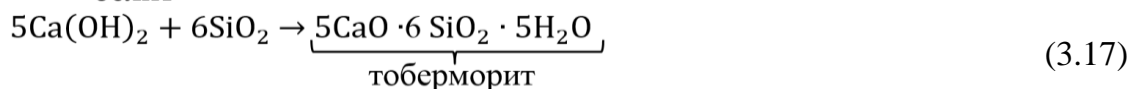
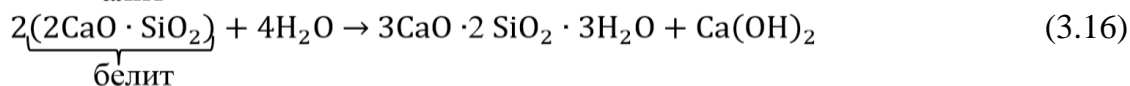
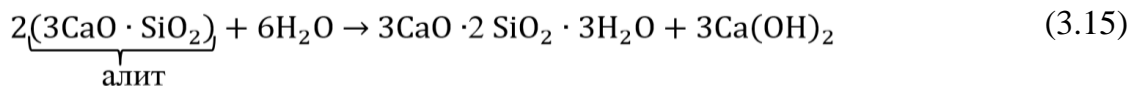
из двух пластов атомов кислорода либо гидроксидов. Между ними включены атомы алюминия (в октаэдрической координации), которые находятся на равном расстоянии от кислорода и гидроксидов. Вторая – гидрат кремнезёма, состоит из тетраэдрических групп ( $\text{SiO}_4$ ).

Такие особенности строения оказывают определяющее влияние на свойства сапонита после механического диспергирования.

В процессе механоактивации минерала происходит разрушение его слоистой структуры. Выделяющийся при этом диоксид кремния в аморфной форме способен взаимодействовать с гидроксидом кальция, образующимся в процессе гидратации клинкерных минералов с выделением гидросиликатов кальция дополнительной генерации (тоберморита) по схеме:



Сам же процесс синтеза тоберморита [183 – 184] за счет химических реакций взаимодействия продуктов гидратации цементного клинкера (кальций, силикаты и негашёная известь) с минералами сапонит-содержащего материала можно представить в виде следующих схем:



Для подтверждения данных реакций (3.15 – 3.17) изготовлены образцы состава «известь-ССМ», соответственно (в процентном соотношении по массе): №1 (95:5); №2 (90:10); №3 (80:10); №4 (100:0).

После затворения исследуемых композиций водой определены прочностные характеристики, показавшие, что минеральный компонент способен увеличивать прочность образцов на сжатие (рисунок 3.16).

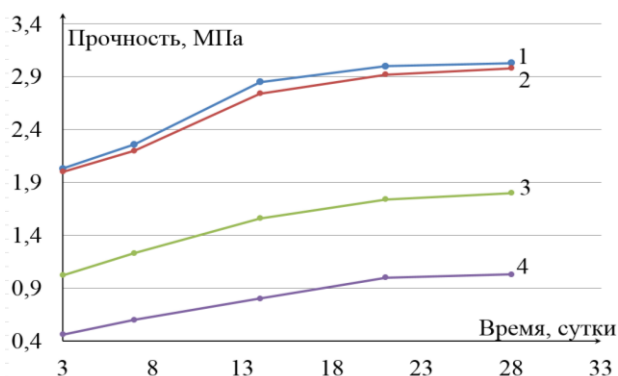


Рисунок 3.16 – Прочностные характеристики образцов «известь-ССМ» с процентным соотношением компонентов: №1 – 95:5; №2 – 90:10; №3 – 80:20; №4 – известь

Однако введение в состав более 10% высокодисперсного ССМ приводит к снижению показателя прочности. Данный факт связан с активными сорбционными свойствами минерала, за счет которых в системе возникает недостаток воды для полного гашения извести.

В продолжение исследований проведены рентгенофазовый и дифференциально-термический анализы (ДТА) образцов состава «известь-ССМ».

Анализ образцов извести показал, что минералогический состав представлен следующими гидратными образованиями: портландит ( $d, (\text{Å}) = 4.93, 2.62, 2.28$ ), кальцит  $\text{CaCO}_3$  ( $d, (\text{Å}) = 3.87, 2.75, 2.42, 2.18, 2.08, 1.86$ ) (рисунок 3.17).

Минералогический состав образцов извести с ССМ представлен такими минералами, как портландит ( $d, (\text{Å}) = 4.93, 4.63, 2.62, 2.28$ ), тоберморит ( $d, (\text{Å}) = 6.00, 3.27, 3.03, 2.96, 2.76, 2.43, 2.40, 2.39, 2.38, 2.14, 2.05, 1.89, 1.80, 1.60, 1.52, 1.49$ ), кальцит  $\text{CaCO}_3$  ( $d, (\text{Å}) = 3.88, 2.75, 2.42, 2.18, 2.08, 1.86$ ) (рисунок 3.18).

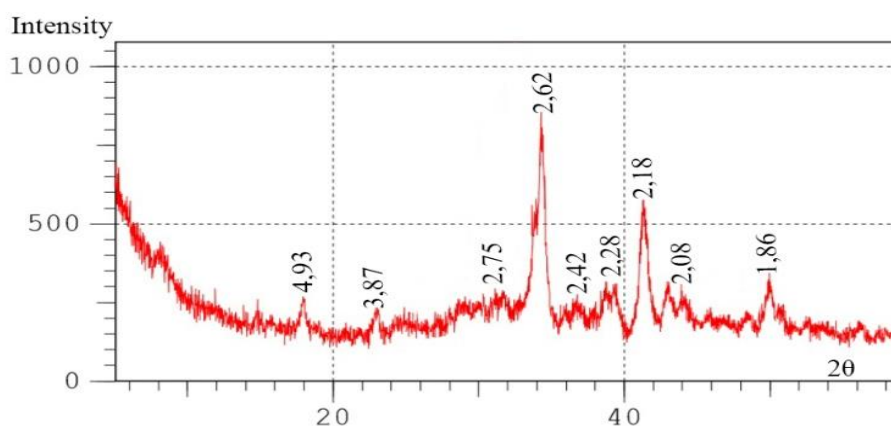


Рисунок 3.17 – Рентгенограмма  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (гашеная известь)

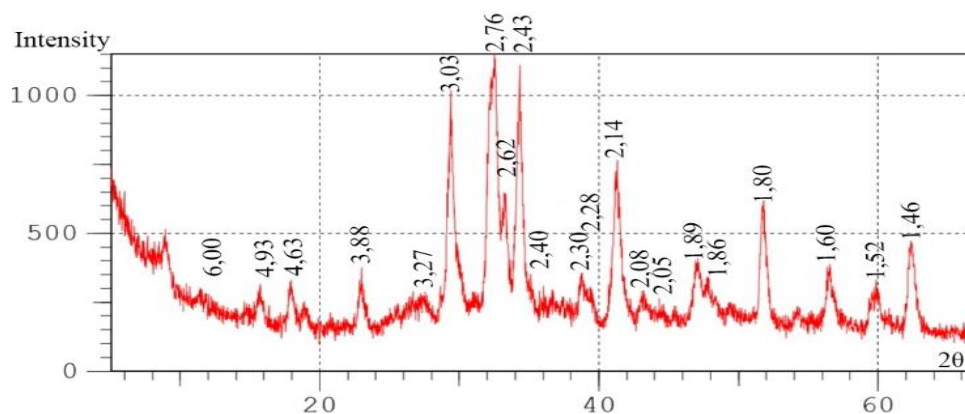


Рисунок 3.18 – Рентгенограмма образцов состава «известь-ССМ»

Проведенный дифференциально-термический анализ (ДТА) (рисунок 3.19) подтвердил результаты, полученные при анализе данных РФА. Так, наличие эндоэффекта в области температур 205... 220 °С, свидетельствует об образовании, при контакте механоактивированного ССМ с известью, кристаллов тоберморита (эндоэффекты в интервале температур 60 – 140 °С связаны с удалением свободной гигроскопичной воды).

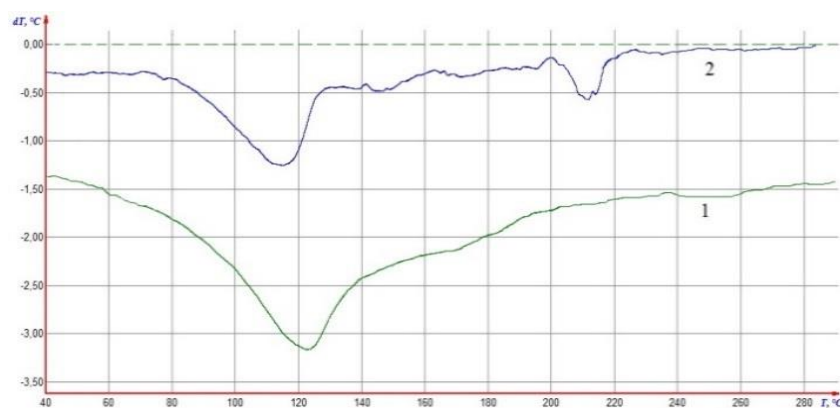
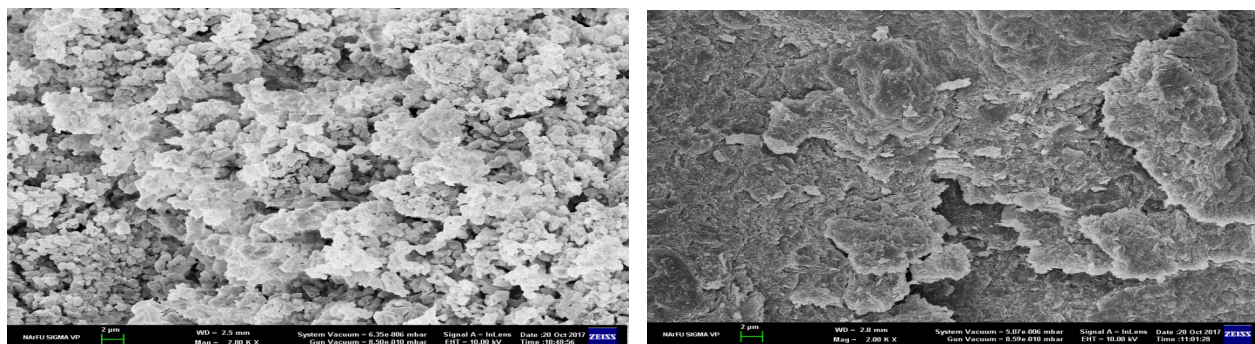


Рисунок 3.19 – ДТА образцов: 1 – извести; 2 – состава «известь-ССМ»

Сделанные электронные фотографии микроструктуры опытных образцов подтвердили образование гидросиликатов группы тоберморита (рисунки 3.20, 3.21).



а

б

Рисунок 3.20 - Микроструктура образцов: а) извести; б) сапонит-содержащего материала

Данные РЭМ показали отсутствие в исходных образцах извести и сапонит-содержащего материала кристаллов игольчатой формы (рисунок 3.20). Поверхность извести характеризуется рыхлой структурой, а ССМ слоистой.

Введение в известь сапонит-содержащего материала, по данным растровой микроскопии, способствует росту кристаллов тоберморита (рисунок 3.21).

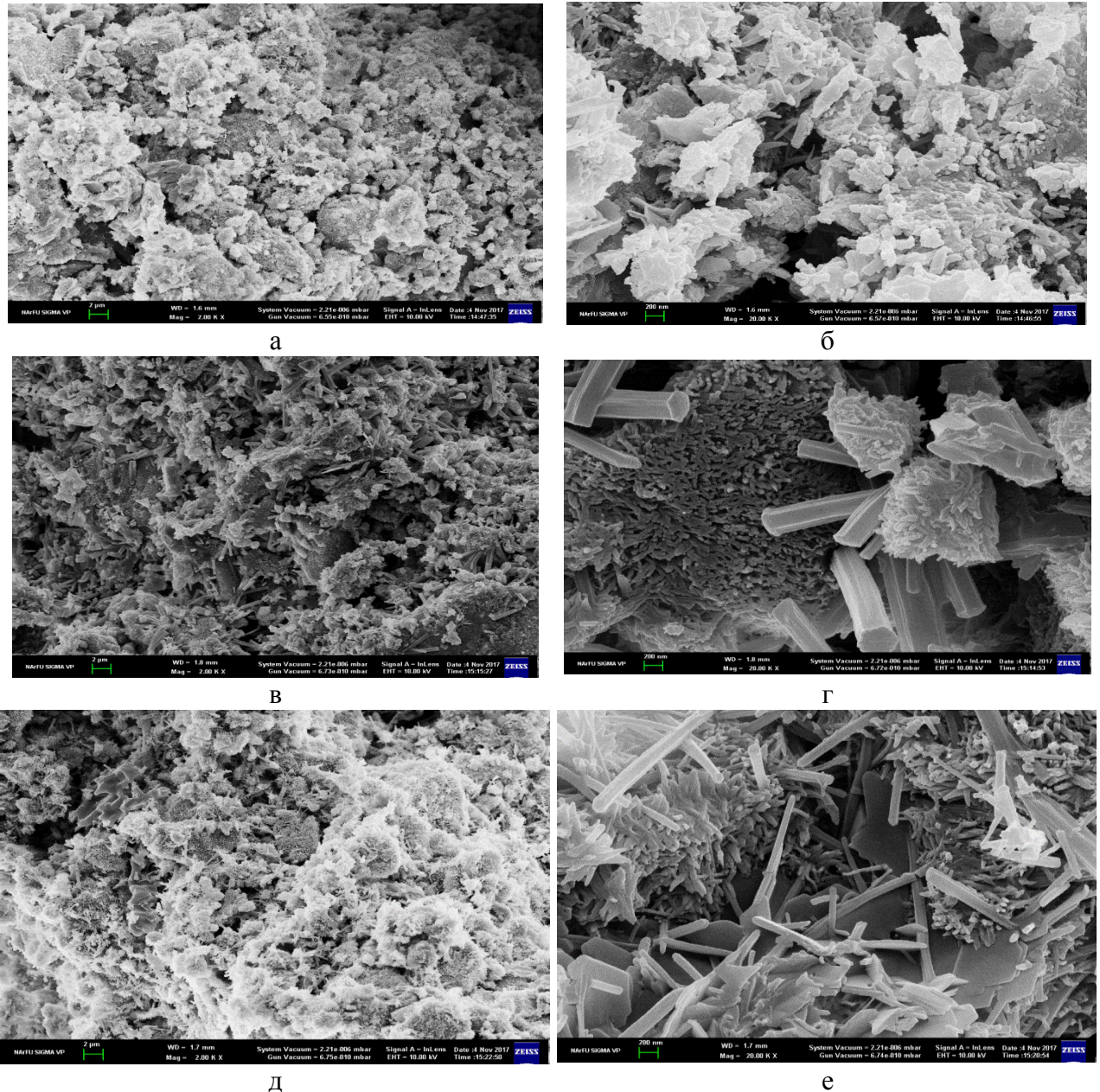


Рисунок 3.21 – Микроструктура образца состава: а,б) №3; в,г) №2; д,е) №1 (слева фотографии с увеличением в 2 тыс. раз; справа – в 20 тыс. раз)

Оптимальное содержание ССМ в составе образцов позволяет образовывать не только большее количество кристаллов, но и приводит к увеличению их размерных



параметров. Так, в образце с 10% содержанием ССМ (рисунок 3.21 в,г) микроструктура представлена двумя типами кристаллов: губчатыми, длиной 100...200 нм; игольчатыми, длиной 1,2...1,4 мкм в виде многогранников с 5 – 6 гранями в поперечном сечении.

В образце с 5% содержанием ССМ (рисунок 3.21 д,е) микроструктура также имеет два типа кристаллов: губчатые, длиной 100...220 нм; игольчатые, длиной 1,2...1,5 мкм и поперечным сечением 100...200 нм.

Однако, введение избыточного количества сапонит-содержащего материала (рисунок 3.21 а,б) приводит к обратному эффекту, а именно снижению эффективности роста кристаллов тоберморита. Поверхность таких образцов имеет большее количество губчатых кристаллов с длиной 200...300 нм и меньшее количество игольчатых (длина 330...700 нм, поперечное сечение 100...200 нм).

Минералы группы тоберморита представляют собой ряд кристаллогидратов с убывающим содержанием воды: пломбиерит, клинотоберморит, тоберморит, риверсайдит. В природе тоберморит встречается редко и в основном располагается в полостях основных и средних пород и обычно ассоциируется с гидросиликатами кальция и цеолита. Микроструктура тоберморита состоит из белых микроскопических агрегатов, представленных в виде беспорядочно сросшихся волосовидно-тонких досковидных и игольчатых кристаллов, длиной от 500 мкм до 2...5 мм, которые имеют стекловидный блеск. Такая форма кристаллов обеспечивает вязкость и прочность минерала.

Большое содержание оксидов алюминия ( $Al_2O_3$ ) говорит об «аномальности» тоберморитов [185]. Такие образцы имеют наибольший сдвиг пиков в коротковолновой области ИК-спектров. Это свидетельствует о дополнительных кремнекислородных сшивках образований Si-O-Si. При этом ИК-спектроскопия образцов тоберморита показывает перекрещивающиеся полосы  $OH^-$  в области  $3500 - 3600\text{ см}^{-1}$ , молекулярную воду в области  $3400 - 3500\text{ см}^{-1}$  и гидроксильные группы ( $3000 - 3300\text{ см}^{-1}$ ).

Наличие дополнительных сшивок в аномальных тоберморитах говорит о повышении их устойчивости к нагреву и кислотному взаимодействию (частицы

тоберморита частично аморфизируются и полностью сохраняют кремнеземный скелет) [186].

Кроме этого установлено, что тоберморит является главным компонентом связующего вещества в большинстве автоклавных цементно-кремнеземистых и известково-кремнеземистых продуктов [186 – 187]. При нагревании до 300 °С материал превращается в риверсайдит ( $\text{Ca}_5[\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2]$ ) (рисунок 3.22).

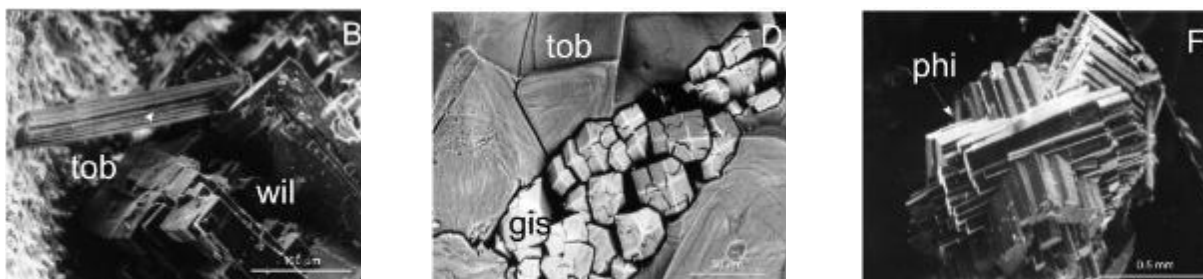


Рисунок 3.22 – Структура гидросиликатов кальция: tob – тоберморит; gis – жисмондин; wil – уиллхендерсонит; phi – филлипсит [186]

Следовательно, введение высокодисперсного компонента в цемент способствует повышению прочности структуры за счёт новообразований субмикрористаллов гидросиликатов группы тоберморит, которые способствуют дополнительному уплотнению структуры композита в процессе его твердения.

Полученные данные позволяют рассматривать сапонит-содержащий материал не только как сорбент, регулирующий путем сорбции водной фазы структурообразование, но и как активный минеральный компонент в вяжущих композициях гидратационного типа твердения.

### 3.6 Характеристики опытных образцов мелкозернистого бетона

В продолжение исследований были изготовлены по стандартным методикам контрольные и опытные образцы мелкозернистого бетона (п. 2.3).

Опытный состав готовили с введением в смесь компонента на основе сапонит-содержащего материала. На основании полученных ранее расчетов (п. 3.2) следует, что 1 г сапонита поглощает 0,75 мл воды. Поэтому количество вводимого в смесь минерального компонента составило 7% от массы цемента и песка. Данное значение было получено по результатам кинетических исследований процесса водопоглощения из условия, что ССМ за 30 минут изменит В/Ц отношение смеси с 0,5 до 0,38.

Предварительный замес для получение 1 м<sup>3</sup> бетона включал в себя: песок средней крупности – 943 кг и портландцемент М400 – 368 кг. Осадка конуса при В/Ц = 0,38 составила 4 см (расчет компонентов бетонной смеси осуществлялся в п. 2.3).

Параллельно были изготовлены опытные образцы с использованием высокодисперсного сапонит-содержащего материала (п. 2.3). Замес, сделанный на 1 м<sup>3</sup> бетона, включал в себя: песок средней крупности – 852 кг, портландцемент М400 – 368 кг и ССМ. Осадка конуса при В/Ц = 0,5 составила 8 см.

По истечении 28 суток бетонные кубики взвешивали для определения плотности образцов в воздушно-сухом состоянии.

В таблице 3.11 приведены результаты определения прочности бетонных образцов и их геометрические размеры.

Таблица 3.11 – Характеристики бетонных образцов

№ образца	Геометрические параметры (L × B) · 10 <sup>-2</sup> , м	Масса m · 10 <sup>-3</sup> , кг	Плотность ρ · 10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>
опытные образцы			
1	7,2×7,1×7,0	717,49	1,95
2	7,4×6,9×6,8	733,11	1,94
3	7,0×7,1×6,8	738,91	2,12
4	7,1×6,8×6,9	729,24	2,13
5	6,8×7,3×7,2	737,40	2,18
6	7,0×6,9×7,3	706,97	2,09
7	7,2×7,0×7,2	748,06	2,06
8	6,8×7,1×6,9	719,15	2,19
9	7,0×7,1×6,8	726,70	2,09
контрольные образцы (с ССМ)			
10	7,1×7,0×6,8	708,91	2,01
11	7,0×6,9×7,3	723,55	2,14
12	7,0×6,9×7,1	734,72	2,17
13	7,2×7,0×7,0	728,90	2,01
14	6,8×7,1×6,8	712,18	2,17
15	7,1×7,1×7,0	724,26	2,02
16	7,0×6,9×7,2	704,26	2,08
17	6,8×7,3×7,1	721,32	2,14
18	7,0×6,9×6,8	716,05	2,12

**Прочность бетонных образцов на сжатие.** Испытания по определению предела прочности при сжатии проводили согласно методике, описанной в

ГОСТ 10180. Прочностные характеристики определяли через 28 суток с момента изготовления образцов (п. 2.4.1).

В таблице 3.12 приведены пределы прочности испытанных на сжатие образцов контрольного и опытного составов.

Таблица 3.12 – Определение предела прочности на сжатие бетонных образцов

№ образца	Контрольные		№ образца	Опытные	
	предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ МПа		предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ МПа
1	22,645	16,18	4	44,398	23,74
2	23,380	16,46	5	44,118	25,21
3	22,856	16,44	6	44,558	25,32

Из полученных данных следует, что при добавлении в бетонную смесь сапонит-содержащего материала в высокодисперсном состоянии, прочность конечного композита повышается примерно в два раза.

На рисунке 3.23 показаны бетонные кубики после определения предела прочности на сжатие.



а



б

Рисунок 3.23 – Характер разрушения бетонных образцов после определения прочности на сжатие: а) основного состава; б) контрольного с ССМ

**Морозостойкость бетонных образцов.** Марку по морозостойкости определяли по ГОСТ 10060 (п. 2.4.2). Для проверки эффективности использования сапонит-содержащих отходов было запланировано получить среднюю марку по морозостойкости  $F_{150}$ .

В таблице 3.13 приведены промежуточные результаты определения марки по морозостойкости бетонных образцов мелкозернистого бетона и их прочности на сжатие.

Таблица 3.13 – Прочностные характеристики и марка по морозостойкости образцов мелкозернистого бетона

Количество циклов (марка)	Контрольный состав (В/Ц = 0,38)				Опытный состав с ССМ (В/Ц = 0,50)			
	предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ МПа	среднее значение, МПа		предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ МПа	среднее значение, МПа	
			прочность на сжатие	модуль упругости, $E_b \cdot 10^3$			прочность на сжатие	модуль упругости, $E_b \cdot 10^3$
0 (F <sub>10</sub> )	22,645	16,175	23,020	16,424	44,398	23,742	44,994	26,149
	23,380	16,465			45,002	25,716		
	22,856	16,443			44,558	25,317		
	22,765	16,145			45,148	32,020		
	23,500	16,786			45,652	24,413		
	22,976	16,530			45,208	25,686		
75 (F <sub>175</sub> )	22,200	15,745	22,913	16,232	44,848	23,855	44,883	25,923
	23,020	16,098			45,452	25,825		
	22,896	16,354			44,108	24,920		
	22,805	16,060			44,698	31,478		
	23,540	16,695			45,202	24,044		
	23,016	16,440			44,987	25,416		
100 (F <sub>100</sub> )	18,030	12,697	17,940	12,619	45,548	24,100	45,184	25,968
	17,570	12,201			46,152	26,075		
	17,915	12,706			44,808	25,173		
	18,650	13,042			45,808	32,034		
	18,126	12,765			44,502	23,546		
	17,350	12,305			44,287	24,880		
150 (F <sub>150</sub> )	7,005	3,648	7,380	3,840	45,148	24,015	45,298	26,077
	7,740	3,990			45,752	25,996		
	7,216	3,778			46,408	26,219		
	7,125	3,692			45,408	31,978		
	7,860	4,094			44,102	23,459		
	7,336	3,841			43,887	24,795		

Приведенные результаты, показывают, что:

1) бетонные образцы с высокодисперсным сапонит-содержащим материалом способны выдержать больше циклов попеременного замораживания и оттаивания, чем контрольный;

2) при испытании на морозостойкость опытные кубики увеличили свою прочность почти в два раза, по сравнению с контрольными. Повышение марки по морозостойкости объясняется тем, что ССМ, находящийся в бетоне, способствует оптимизации процессов структурообразования в процессе твердения композита за счет инициирования формирования дополнительных гидратных соединений;

3) высокодисперсный компонент наглядно показал возможность влиять на процесс структурообразования при твердении бетона за счёт регулирования степени насыщения системы водной фазой.

Полученные экспериментальные данные доказывают, что добавление высокодисперсных материалов в композиционную смесь не только повышает прочность конечного продукта, но и позволяет бетону выдерживать марку по морозостойкости не менее  $F_1150$ . В то время как, контрольные образцы бетона дают марку только  $F_175$ , и в последующем резко теряют свою прочность разрушаясь после образования многочисленных трещин.

### **Выводы по третьей главе**

1. Разработан способ измерения величины водопоглощения сыпучих материалов. В качестве критерия предложено использовать удельно-массовое изменение объемов реакционной смеси за фиксированное время, которое рассчитывается исходя из экспериментально определённых изменений объема системы и массы опытной пробы.

2. Изучен процесс сорбции-десорбции влаги образцами сапонит-содержащего материала, результаты которого показали наличие в системе «ССМ–водяной пар» адсорбционно-десорбционного гистерезиса и увеличение количества связанной воды в системе после механоактивации материала.

3. Установлена функциональная взаимосвязь между степенью измельчения модификатора, величиной изменения свободной поверхностной энергии и значением

удельной поверхности частиц, позволяющая прогнозировать условия механоактивации ССМ.

4. Доказано, что для достижения максимального водонасыщения образцов сапонит-содержащего материала, необходимо измельчать опытную пробу до удельной поверхности не менее  $35000 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

5. Установлено, что сапонит-содержащий материал можно использовать в качестве высокодисперсного компонента, управляющего структурообразованием смеси за счет регулирования величины водоцементного отношения при твердении бетона. Минеральный высокодисперсный компонент необходимо вводить в цементную смесь в обезвоженном состоянии.

6. Определен оптимальный состав опытных образцов мелкозернистого бетона, характеризующийся следующим содержанием компонентов: 79% составляет смесь песка и цемента, 14% - затворитель (вода) и 7% - сапонит-содержащий материал.

7. Полученные показатели по прочности и морозостойкости бетона показали, что введение высокодисперсного компонента в смесь способствует повышению прочности опытных образцов по сравнению с контрольными в 2 раза, а марка по морозостойкости достигает F<sub>1300</sub> (контрольные – F<sub>1100</sub>).

## **4 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С МОДИФИКАТОРОМ**

Наиболее точно и в тоже время просто состав мелкозернистого бетона определяется стандартным расчетно-экспериментальным путем [67 – 68]. В первую очередь рассчитывают предварительный состав бетона, который должен обеспечивать заданную подвижность цементно-песчаной смеси и конечную прочность. В дальнейшем полученный состав проверяют методами пробных затворений и, при необходимости, корректируют количество компонентов.

Для повышения экономической привлекательности мелкозернистых бетонов и оптимизации их составов вводят высокодисперсные наполнители, такие как молотый песок, известь, золу и др. При этом состав определяют стандартным методом, рассматривая цемент и микронаполнитель как единое целое. Активность вяжущего и его влияние на водопотребность бетонной смеси во многом зависят от физико-химических свойств наполнителя. Влияние вяжущего на водопотребность определяется опытным путем. После подбора состава бетона и проведения пробных замесов, окончательный расход устанавливается с учетом действительной плотности.

Одним из основных параметров повышения прочностных характеристик мелкозернистых бетонов, как уже описывалось в первой главе, может быть увеличение цементной составляющей в бетонной смеси. В свою очередь, такое увеличение не может быть безграничным, так как возрастает водопотребность и пористость бетонной смеси, а, следовательно, ухудшаются и эксплуатационные свойства бетона. Для получения высокопрочных мелкозернистых бетонов с пониженным расходом цементной составляющей применяют пластифицирующие добавки, суперпластификаторы и различные модифицирующие наполнители.

### **4.1 Проектирование состава мелкозернистого бетона**

Для получения высококачественного мелкозернистого бетона был разработан состав композиции, полученный на основе нижеуказанных компонентов.

Портландцемент ЦЕМ II/A-III компании «Мордовцемент». Класс прочности 32,5 Н, марка М400. Данный цемент применяется при строительстве высокопрочных



сборных конструкций с повышенным сроком службы, а также используется для приготовления высококачественных строительных смесей. Цемент соответствует ГОСТ 31108-2016 и ГОСТ 30515-13.

В качестве мелкозернистого заполнителя взят строительный песок месторождения «Кеницы» Архангельской области. Модуль крупности песка  $M_k = 2,21$ . Содержание гравия – 0,76%. При этом полный остаток на сите 0,63 составил 27,84%. Исследуемый песок относится к группе средних (ГОСТ 8736) (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Физико-механические характеристики заполнителя

Наименование показателя	Обозначение	Песок средней крупности
Модуль крупности	$M_k$	2,21
Насыпная плотность в неуплотненном состоянии	$\rho_{\text{нас}}$	1670 кг/см <sup>3</sup>
Насыпная плотность в уплотненном состоянии	$\rho_{\text{нас упл}}$	1786 кг/см <sup>3</sup>
Истинная плотность	$\rho_{\text{ист}}$	2640 кг/см <sup>3</sup>
Пустотность	$V_{\text{мп}}$	34,5 %
Водопотребность	$V_{\text{отс}}$	5,1 %
Цементопотребность	$C_{\text{потр}}$	0,530

Вода для затворения применялась со значением основных показателей согласно ГОСТ 23732-2011.

В виде минерального высокодисперсного компонента взят крупнотоннажный отход алмазодобывающей промышленности – сапонит-содержащий материал (ССМ). Предварительно материал был высушен до постоянной массы и механически диспергирован до величины удельной поверхности  $S_{y\partial} = 50670 \text{ м}^2/\text{кг}$  (средний размер частиц  $445 \pm 40 \text{ нм}$ ).

По методике Ю.М. Баженова подобран состав мелкозернистого бетона контрольных и опытных образцов с высокодисперсным минеральным компонентом в количестве 7% от массы смеси.

По методике [67] состав мелкозернистого бетона рассчитывался в следующем порядке:

- 1) Изначально задается В/Ц отношение и вычисляется прочность бетона:

$$В/Ц = \frac{А \cdot R_{ц}}{(R_{Б} + 0,8 \cdot А \cdot R_{ц})} \quad (4.1)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент (для используемого цемента  $A = 0,65$ );  
 $R_{Б}$  – прочность бетона, МПа;

$R_{ц}$  – марка (активность) цемента, МПа.

Отсюда прочность бетона ( $R_B$ ) составит:

$$R_B = \frac{A \cdot R_{ц}}{B/Ц} - (0,8 \cdot A \cdot R_{ц}) \quad (4.2)$$

$$R_B = \frac{0,65 \cdot 400 \cdot 0,1}{0,38} - (0,8 \cdot 0,65 \cdot 400 \cdot 0,1) = \frac{26}{0,38} - 20,8 = 47,62 \text{ МПа}$$

2) Объем вовлеченного воздуха (ВВ) в процессе уплотнения смеси с использованием виброустановок находили по формуле:

$$ВВ = 81,8 - 16,6 \cdot M_k + 0,7 \cdot M_k^2 \quad (4.3)$$

где  $M_k$  – модуль крупности песка.

Подставив числовые значения, определим объем вовлеченного воздуха:

$$ВВ = 81,8 - 16,6 \cdot 2,21 + 0,7 \cdot 2,21^2 = 81,8 - 36,69 + 3,42 = 41,69, \text{ л}$$

3) Находим расход вяжущего (Ц) по формуле:

$$Ц = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{B}{Ц} + \frac{n}{\rho_{п}}} \quad (4.4)$$

где  $\rho_{ц}$  и  $\rho_{п}$  – плотности вяжущего и песка, соответственно, г/см<sup>3</sup>;

$n$  – отношение между песком и цементом, определяемое по рисункам 4.1, а и 4.1,б, с учетом крупности песка ( $M_k$ ) и корректируемое по графику на рисунке 4.2.

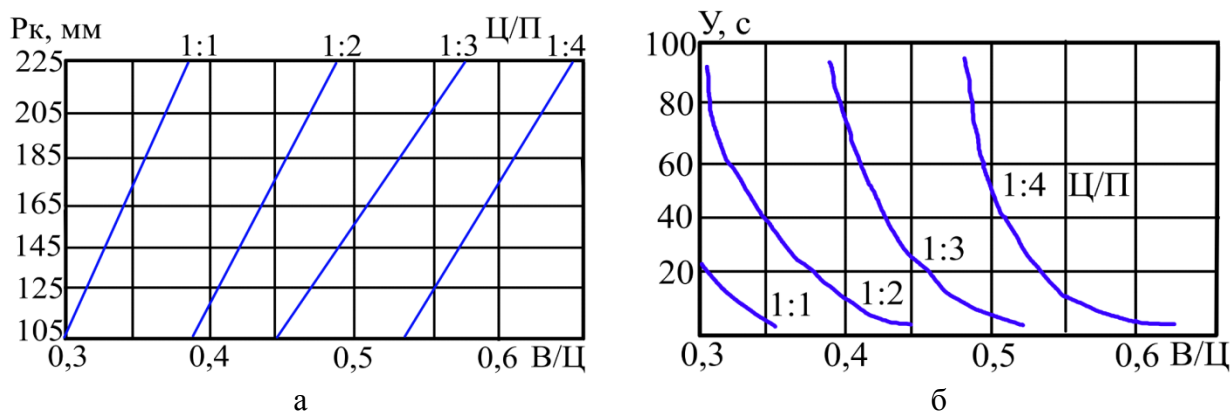


Рисунок 4.1 – Графики определения отношений между песком и цементом при которых обеспечивается заданная подвижность: а) зависимость распыла конуса ( $P_k$ ) от водоцементного отношения; б) зависимость удобоукладываемости ( $У$ ) от водоцементного отношения [67]

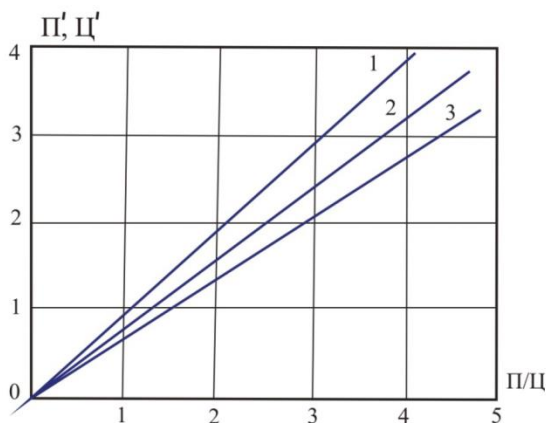


Рисунок 4.2 – График для корректировки значения  $n$ , в зависимости от крупности песка: 1)  $M_k=2,5$ ; 2)  $M_k=1,5$ ; 3)  $M_k=0,75$  [67].

Из графиков следует, что для песка средней крупности и  $V/C = 0,38$ , соотношение  $C/P$  составит 1:2,5. Тогда необходимое количество цемента:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{2,3} + 0,38 + \frac{2,50}{2,61}} = \frac{1000}{0,435 + 0,38 + 0,958} = \frac{1000}{1,77} = 564,97 \text{ кг/м}^3$$

4) Общий расход воды определяли по формуле:

$$V = C \cdot V/C \quad (4.5)$$

$$V = 564,97 \cdot 0,38 = 214,69 \text{ кг/м}^3$$

5) Расход песка ( $\text{кг/м}^3$ ) определяли по формуле:

$$P = n \cdot C \quad (4.5)$$

$$P = 2,50 \cdot 564,97 = 1412,12 \text{ кг/м}^3$$

6) Средняя плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) мелкозернистого бетона с микрозаполнителем рассчитывали по формуле:

$$\rho_6 = C + V + P \quad (4.6)$$

$$\rho_6 = 564,97 + 214,69 + 1412,12 = 2191,78 \text{ кг/м}^3$$

7) С учетом пробного замеса и коэффициента уплотнения в состав были внесены корректировки. На основе этого получен следующий расход компонентов на  $1 \text{ м}^3$  бетона контрольного состава ( $V/C = 0,38$ ): цемент – 560 кг, песок – 1400 кг, вода – 213 кг.

Для расчета опытного состава мелкозернистого бетона внесены некоторые корректировки с учетом водопоглощения. Расчет производился для В/Ц = 0,38, но при замесе эта величина была увеличена до 0,5.

В результате получен опытный состав мелкозернистого бетона из расчета на 1 м<sup>3</sup>: цемент – 560 кг, песок – 1310 кг, вода – 280 кг (В/Ц = 0,50).

Оптимальное количественное отношение компонентов бетонной смеси составило:

1) контрольный: 25,8% - цемент ЦЕМ II/A-III и 64,4 % - мелкозернистый песок месторождения «Кеницы»;

2) опытный: 25% - цемент ЦЕМ II/A-III; 58,5 % - мелкозернистый песок месторождения «Кеницы»; 4% - отход алмазодобывающей промышленности (сапонит-содержащий материал).

Основываясь на полученных результатах выполненного расчета составов контрольного мелкозернистого бетона и опытного с высокодисперсным минеральным компонентом (89,6 кг) были изготовлены образцы композита в виде кубиков (150x150x150 мм).

#### 4.2 Изменение реологии бетонной смеси при введении высокодисперсного минерального ССМ

Изготовление опытных образцов бетонных кубиков проводили по ГОСТ 7473. Подбор состава мелкозернистого бетона осуществляли по ГОСТ 27006-86 и рекомендациям по подбору состава мелкозернистых бетонов. Осадку конуса полученной смеси проверяли по ГОСТ 10181-2000. Сроки схватывания бетонной смеси определяли по ГОСТ Р 56587-2015.

Для изучения реологических свойств смеси было выбрано соотношение компонентов, представленное в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расход материалов для получения бетонной смеси

Образец	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг				В/Ц
	цемент	песок	ССМ	вода	
Контрольный	560	1400	0	213	0,38
Опытный	560	1310	89,6	280	0,50

Полученные данные по срокам схватывания бетонной смеси, показали, что начало и конец схватывания для контрольного образца составляет 195 и 378 минут, соответственно. Опытный образец бетонной смеси, за счет оптимизации количества водной фазы ССМ, терял свою подвижность на 182 минуте, а конец схватывания происходил на 320 минуте.

Реологические свойства бетонной смеси улучшаются при введении высокодисперсного компонента: осадка конуса (ОК) для контрольной смеси с  $V/C=0,38$  составляет 4 см, что характеризует ее как малоподвижную (П1) (рисунок 4.3).

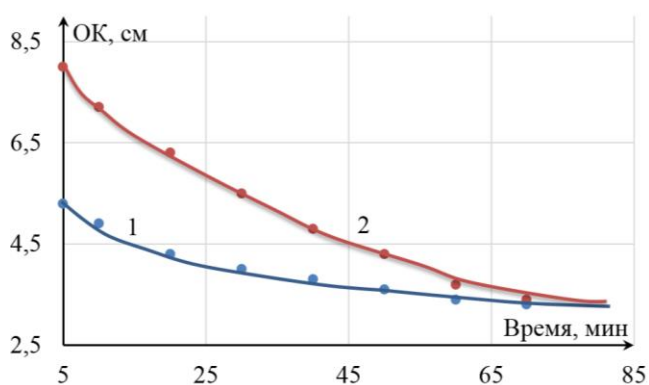


Рисунок 4.3 – Сохраняемость бетонной смеси:  
1 – контрольного состава; 2 – опытного состава

При изучении реологии опытной бетонной смеси с  $V/C=0,5$  наблюдается изменение во времени ОК от 8 см (в начальный момент времени) до 3,5 см (спустя 50 минут после затворения смеси водой). Данные изменения отражают непосредственное действие высокодис-

персного компонента, который после полного водонасыщения изменяет подвижность смеси с П2 на П1. Оценка сроков схватывания (СХ) бетонной смеси контрольного состава и опытного показала, что системы имеют нормальные сроки схватываемости (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Изменение реологии бетонной смеси при введении высокодисперсного минерального ССМ

Образец	Подвижность (осадка конуса), см	Сроки схватывания бетонной смеси, мин		Усадка, $\varepsilon$ , мм/м	Коэффициент уплотнения смеси, $K_y$ %
		начало	конец		
Контрольный	П1 (4,0)	195	378	1,2	0,97
Опытный	П2 (8,0)	182	320	0,5	0,98
	П1 (3,5*)				

\* данное значение получено спустя 30 мин. после затворения смеси водой

### 4.3 Оптимизация состава мелкозернистого бетона за счёт использования высокодисперсного минерального отхода алмазодобывающей промышленности

Твердение бетона осуществляли в естественных условиях в течение 28 суток. После чего образцы подвергали испытаниям на прочность.

Класс бетона определяли согласно ГОСТ 24452-80, ГОСТ 10180 по результатам испытаний образцов размером 150x150x150 мм разрушающей нагрузкой.

На основе реологических свойств были разработаны составы мелкозернистого бетона, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расход материалов для получения мелкозернистого бетона

№ п/п	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг				Подвижность (осадка конуса), см
	цемент	песок	ССМ	вода	
1	560	1400	-	213	4,0
2	560	1310	90	280	3,5

После укладки и уплотнения бетонной смеси в формы, каждый образец маркировали. Процесс твердения образцов проводили в нормальных температурно-влажностных условиях. Суточную прочность определяли по методике, изложенной выше, соответствующей требованиям ГОСТ 24452-80, ГОСТ 10180.

Результаты определения прочности образцов при сжатии представлены в таблице 4.5. Пример протокола по определению прочности на сжатие бетонных

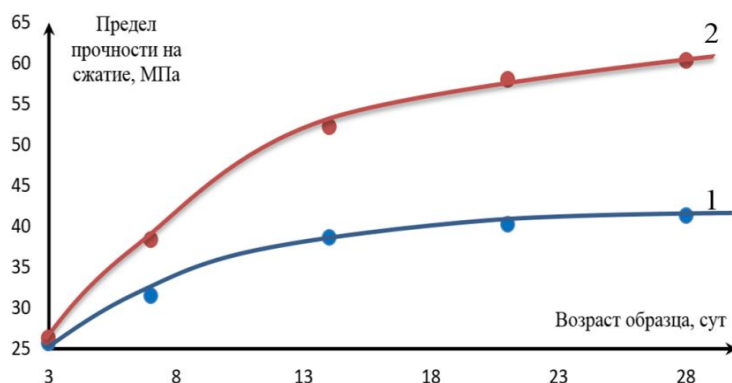


Рисунок 4.4 – Функциональная зависимость средней прочности от возраста образцов мелкозернистого бетона: 1 – контрольного состава; 2 – опытного состава

образцов показан в приложении Е. Графики сравнения соответствующих параметров образцов бетона основного и контрольного составов приведены на рисунке 4.4.

Ещё одним параметром, характеризующим свойства бетона, является модуль упругости ( $E_b$ ). Согласно ГОСТ 24452-80, для определения модуля упругости испытывали призмы в возрасте 28 суток.

Таблица 4.5 – Зависимость предела прочности бетона на сжатие от состава (1-3 – образцы контрольного состава; 4-6 – образцы опытного состава с ССМ)

№ образца	Предел прочности, МПа	Модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	Среднее значение $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Среднее значение, МПа	
				предел прочности	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$
1	41,65	28,14	2010	41,33	27,83
2	39,38	25,91			
3	42,96	28,83			
4	60,01	40,50	2018	60,03	40,36
5	60,29	40,03			
6	59,90	40,55			

По полученным прочностным характеристикам мелкозернистого бетона (таблица 4.5) следует, что при введении высокодисперсного минерального компонента на основе сапонит-содержащего материала, в количестве 7% от массы цемента и песка, прочность композита повышается в 1,70 раза (с  $41,3 \cdot 10^3$  МПа до  $60,03 \cdot 10^3$  МПа).

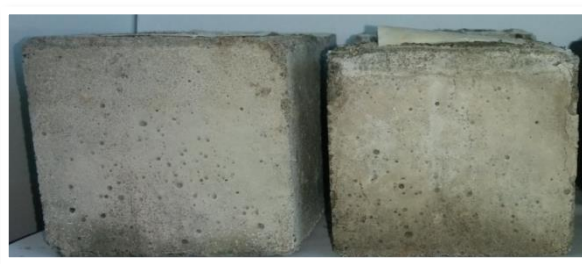
#### 4.3.1 Морозостойкость бетона

Одним из важных параметров получения высококачественного бетона, предназначенного для эксплуатации в суровых климатических условиях Севера является морозостойкость, влияющая на долговечность бетона.

Марку по морозостойкости определяли ускоренным методом (№3) по ГОСТ 10060 (п. 2.4.2). Результаты приведённых исследований занесены в таблицы 4.6 - 4.7 и представлены на рисунке 4.5.



а



б

Рисунок 4.5 – Бетонные образцы после испытания на морозостойкость: а) образцы контрольного состава; б) образцы опытного состава

Таблица 4.6 – Прочностные характеристики и морозостойкость образцов мелкозернистого бетона

Количество циклов (марка)	Контрольный состав (В/Ц = 0,35)				Опытный состав с ССМ (В/Ц = 0,50)			
	предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	среднее значение, МПа		предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	среднее значение, МПа	
			прочность на сжатие	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$			прочность на сжатие	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$
0 (F <sub>10</sub> )	39,900	26,250	41,327	27,791	66,300	35,178	66,310	40,548
	40,300	26,867			65,310	36,103		
	42,150	28,289			66,450	35,265		
	41,800	29,646			66,300	36,204		
	41,750	27,467			67,520	39,250		
	42,060	28,228			65,980	39,445		
75 (F <sub>175</sub> )	48,000	26,230	49,427	28,501	66,200	35,364	66,408	40,417
	48,400	26,740			66,030	36,286		
	50,250	28,917			65,650	35,452		
	49,900	29,012			67,020	36,391		
	49,850	27,241			66,850	39,431		
	50,160	27,867			66,700	39,215		
100 (F <sub>100</sub> )	43,760	25,741	45,187	27,003	65,650	39,052	66,483	40,498
	44,160	24,574			66,400	39,463		
	46,010	25,747			66,850	40,272		
	45,660	26,009			67,020	43,071		
	45,610	25,915			66,130	42,216		
	45,920	25,697			66,850	38,994		
150 (F <sub>150</sub> )	34,350	15,614	35,777	15,859	65,600	39,249	66,430	39,798
	34,750	15,128			65,650	38,885		
	36,600	16,004			66,800	40,466		
	36,250	16,425			66,400	42,494		
	36,200	16,018			67,000	42,411		
	36,510	15,964			67,130	39,227		



Количество циклов (марка)	Контрольный состав (В/Ц = 0,35)				Опытный состав с ССМ (В/Ц = 0,50)			
	предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	среднее значение, МПа		предел прочности, МПа	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	среднее значение, МПа	
			прочность на сжатие	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$			прочность на сжатие	модуль упругости $E_b \cdot 10^3$
200 (F <sub>1</sub> 200)	9,970	3,693	11,397	4,134	65,580	39,964	66,362	39,677
	10,370	3,708			66,330	39,323		
	12,220	4,385			69,300	40,286		
	11,870	4,385			65,500	41,895		
	11,820	4,283			66,060	42,291		
	12,130	4,352			65,400	38,860		
300 (F <sub>1</sub> 300)	-	-	-	-	66,580	39,227	66,328	39,730
					66,500	40,172		
					65,580	39,095		
					66,590	41,973		
					66,590	39,464		
					66,130	40,076		

Таблица 4.7 – Средние значения прочностных характеристик и морозостойкость образцов мелкозернистого бетона

Количество циклов попеременного замораживания и оттаивания	Контрольный образец (В/Ц = 0,38)	Опытный образец (В/Ц = 0,50)
	предел прочности на сжатие, МПа	
0	41,33	65,31
75	49,43	65,41
100	45,19	66,48
150	35,78	66,43
200	11,40	66,36
300	-	66,33

Полученные данные показали, что композиты на основе портландцемента опытного состава выдерживают не менее 300 циклов попеременного замораживания и оттаивания, в то время как контрольный не более 100 циклов.

При сравнении свойств образцов установлено, что прочность опытных образцов мелкозернистого бетона почти в 2 раза выше, по сравнению с контрольными.

Такой эффект повышения прочности и марки бетона по морозостойкости связан с особенностями структурообразования: более плотной структуры композита, за счет оптимизации в процессе приготовления и твердения бетона В/Ц отношения и дополнительных связующих свойств компонента на основе отхода алмазодобывающей промышленности Архангельской области.

#### 4.3.2 Водопоглощение, водопроницаемость, истираемость и усадка бетона

Водопоглощение бетонных образцов определяли по ГОСТ 12730.3-78 методом кипячения их в ванне с водой.

Водопроницаемость бетонных образцов определяли по 12730.5-84.

Истираемость бетонных образцов определяли по ГОСТ 13087. При этом влажность образцов составляла 5...7%.

Усадку при высыхании бетонных образцов-призм определяли по ГОСТ 25485-89

Результаты по определению вышеперечисленных показателей образцов мелкозернистого бетона представлены в таблицах 4.8, 4.9.

Таблица 4.8 – Водопоглощение, истираемость и усадка бетонных образцов (1 – 3 образцы контрольного состава; 4 – 5 образцы опытного состава с ССМ)

№ п/п	Прочность на сжатие $R$ , МПа	Призменная прочность $R^n$ , МПа	Водопоглощение по массе $W$ , %	Истираемость $G$ , г/см <sup>2</sup>	Усадка $\varepsilon$ , мм/м
1	41,65	27,99	4,35	0,53	1,19
2	39,38	27,35	4,30	0,52	1,21
3	42,96	27,93	4,38	0,49	1,20
4	60,01	49,68	3,68	0,39	0,50
5	60,29	49,89	3,72	0,41	0,48
6	59,90	49,59	3,70	0,41	0,51

Таблица 4.9 – Средние значения показателей по водопоглощению, водопроницаемости, истираемости и усадки бетонных образцов (1 – 3 образцы контрольного состава; 4 – 5 образцы опытного состава с ССМ)

№ п/п	Марка по водопроницаемости	Средние значения показателей				
		$R$ , МПа	$R^n$ , МПа	$W$ , %	$G$ , г/см <sup>2</sup>	$\varepsilon$ , мм/м
1 – 3	W6	41,33	27,76	4,34	0,52	1,2
4 – 6	W10	60,30	49,72	3,70	0,40	0,5

Следует отметить, что введение высокодисперсного сапонит-содержащего материала не только способствует повышению прочности композита, но и значительно улучшает реологию смеси, способность сопротивления бетона к внешним механическим воздействиям (истираемость). Также повышается марка по водопоглощению и водопроницаемости.

Таким образом, доказана возможность получения высокопрочных мелкозернистых бетонов за счет влияния на структурообразование смеси путем введения в смесь высокодисперсного минерального сапонит-содержащего отхода.

#### 4.4 Микроструктура бетонных образцов в зависимости от состава

Исследование микроструктуры полученных в пункте 4.3 образцов бетона на растровом электронном микроскопе показало, что в основном структура образцов представляет собой развитую микропористую поверхность с раскристаллизованными рентгеноаморфными новообразованиями (рисунок 4.6).

Согласно данным РЭМ, образовавшиеся гидросиликаты представляют собой конгломераты частиц, размер зерен которых колеблется от 2 до 20 мкм. Частицы имеют различную форму, но в основном можно выделить два типа частиц: губчатые

(рисунок 4.6) с развитой микропористой поверхностью имеющие размеры от 5 до 10 мкм; игольчатые (рисунок 4.7) с длиной от 0,5 до 5 мкм (диаметр иголок примерно 0,5 мкм). Причем в контрольном образце присутствуют только частицы первого типа, а в опытном, с сапонит-содержащим материалом, наблюдается образование двух типов частиц.

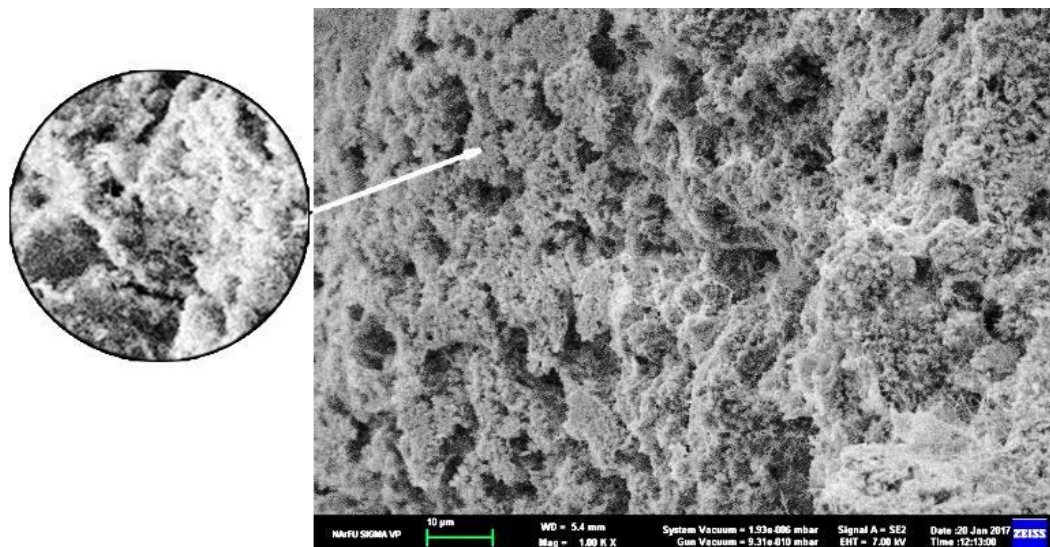


Рисунок 4.6 – Микроструктура бетонных образцов контрольного состава

При введении высокодисперсного компонента, в структуре композита помимо губчатых кристаллов образуются гидросиликаты дополнительной генерации, которые представляют собой кристаллы игольчатой формы длиной от 5 до 10 нм (рисунок 4.7). Присутствие в образце различных форм кристаллов позволяет заполнить анизометричные и изометричные поры.

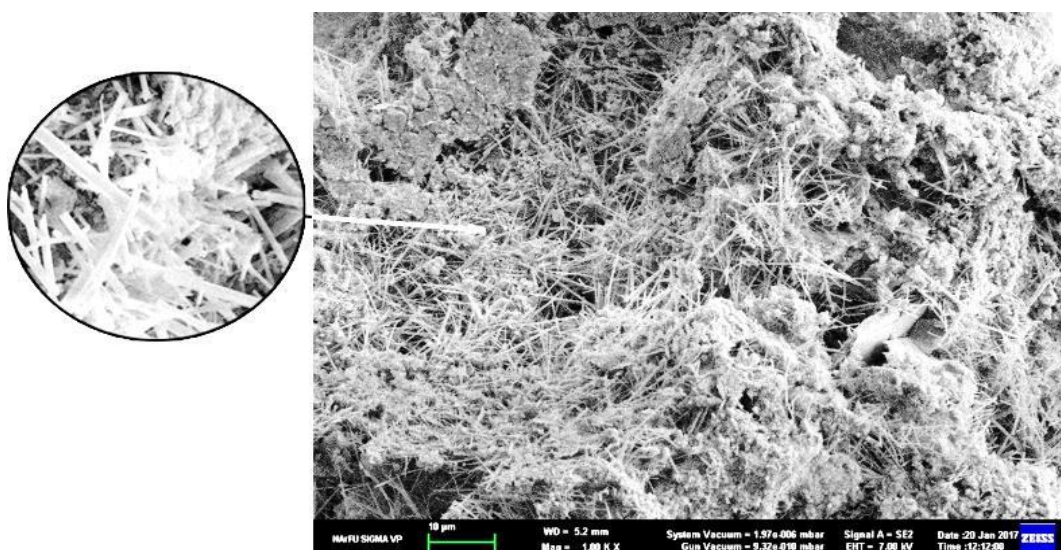


Рисунок 4.7 – Микроструктура бетонных образцов с высокодисперсным ССМ

Отметим, что наличие скрытокристаллических гидросиликатов кальция и тоберморита, растущих во всех направлениях, способствует уплотнению цементной матрицы, снижению ее пористости, омоноличиванию структуры.

#### **4.5 Разработка составов мелкозернистых бетонов**

Полученные результаты по испытанию образцов мелкозернистого бетона показали, что введение высокодисперсного сапонит-содержащего материала позволяет повысить прочность на сжатие и марку по морозостойкости. Кроме того, определенные деформационные характеристики композита показали значительное улучшение данных параметров по сравнению с контрольными образцами, что, несомненно, говорит о повышении качества бетона.

Проведенные исследования показали: сапонит-содержащий материал, выделенный из суспензии оборотной воды алмазодобывающего производства, проявляет свойства сорбента, оптимизирующего содержание водной фазы в системе и является активным минеральным компонентом в вяжущих композициях. Для наилучшего эффекта структурообразования бетона и технологии его производства необходимо увеличить удельную поверхность сапонит-содержащего материала посредством механоактивации сырья до удельной поверхности не ниже 35000 м<sup>2</sup>/кг.

С учетом полученных экспериментальных данных были разработаны составы мелкозернистого бетона с высокодисперсным ССМ, предназначенные для эксплуатации в условиях Севера и Архангельской области (таблица 4.10).

Кроме того, были разработаны составы высокопрочных морозостойких мелкозернистых бетонов класса В75 и В80, защищенные как объект интеллектуальной собственности (ноу-хау №КТ 2017-01, приложение Ж).

Таблица 4.10 – Эксплуатационные характеристики морозостойкого мелкозернистого бетона\*

№ п/п	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг				Подвижность (ОК), см	Пористость, %	Предел прочности на сжатие, МПа	Призменная прочность, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа	Модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	Истираемость $G$ , г/см <sup>2</sup>	Класс бетона
	цемент	песок	ССМ	вода								
1	560	1400	-	213	П1(4,0)	12,04	41,3	30,10	9,68	27,80	0,49	В30
2	560	1310	90	280	П1 (3,5**)	11,76	66,3	46,66	17,40	40,54	0,39	В50
3	460	1428	74	230		6,26	50,3	36,20	13,20	32,38		В35
4	490	1299	78	245		13,89	54,8	39,19	14,39	34,68		В40
5	573	1318	92	287		11,75	72,9	50,82	19,14	43,91		В55

\* марка по морозостойкости для составов: 1 - F1100; 2 - 5 – F1300; марка по водонепроницаемости для составов: 1 - W6; 2 - 5 – W10

\*\*данное значение получено спустя 30 мин. после затворения смеси водой, так как это необходимое время для процесса сорбции воды минеральным компонентом с целью снижения В/Ц

Наблюдаемый эффект повышения прочности и морозостойкости прежде всего связан с образованием плотной и равномерной структуры, которая достигается за счет оптимизации в процессе приготовления и твердения бетона В/Ц отношения и дополнительных связующих свойств модификатора на основе сапонит-содержащего материала.

С учетом полученных результатов для промышленного внедрения была разработана широкая номенклатура мелкозернистых бетонов, необходимых для развития инфраструктуры региона (таблицы 4.11, 4.12).

Таблица 4.11 - Составы мелкозернистого бетона

№	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>				В/Ц	В/Ц*	Удобоукладываемость	Предел прочности, МПа	Класс бетона
	цемент	песок	вода	ССМ					
1	560	1400	213	-	0,38	-	П1	41,30	В30
2	420	1463	210	123	0,50	0,28	СЖ1	43,50	В30
3	460	1428	230	123	0,50	0,30	Ж4	50,30	В35
4	420	1320	336	235	0,80	0,60	П3	51,73	В35
5	460	1254	322	123	0,70	0,50	П1	54,80	В40
6	460	1254	322	196	0,70	0,55	П2	56,19	В40
7	506	1377	253	130	0,50	0,30	Ж3	57,20	В40
8	560	1310	230	90	0,50	0,38	Ж4	67,20	В50
9	560	1340	252	112	0,45	0,30	П1	70,40	В50
10	576	1391	230	61	0,40	0,32	Ж4	73,40	В55

\* водоцементное отношение спустя 30 минут (расчётное)

Таблица 4.12 - Физико-механические и деформационные характеристики мелкозернистого бетона разработанных составов\*

№ П/П	Класс бетона	Предел прочности, МПа	Модуль упругости $E_b \cdot 10^3$ , МПа	Призменная прочность, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа	Относительная деформация, $\epsilon_0$	Пористость общая, %	Марка по морозостойкости	Водопоглощение по массе W, %	Истираемость $G$ , г/см <sup>2</sup>
1	B30	41,30	27,80	35,30	9,68	0,0025	12,04	F <sub>1</sub> 100	4,35	0,49
2	B30	43,50	28,91	37,02	10,03	0,0024	4,90	F <sub>1</sub> 300	3,70	0,41
3	B35	50,30	32,38	42,30	13,20	0,0022	6,26	F <sub>1</sub> 300	3,68	0,40
4	B35	51,73	33,42	43,56	13,48	0,0022	16,78	F <sub>1</sub> 300	3,66	0,40
5	B40	54,80	34,68	45,74	13,81	0,0021	14,90	F <sub>1</sub> 300	3,65	0,39
6	B40	56,19	34,87	46,09	13,98	0,0020	16,20	F <sub>1</sub> 400	3,65	0,39
7	B40	57,20	35,90	47,56	14,25	0,0020	6,86	F <sub>1</sub> 300	3,66	0,40
8	B50	67,20	41,01	55,02	17,87	0,0018	11,76	F <sub>1</sub> 300	3,65	0,39
9	B50	70,40	42,64	57,36	18,49	0,0018	7,56	F <sub>1</sub> 400	3,65	0,39
10	B55	73,40	44,17	59,54	19,23	0,0017	8,92	F <sub>1</sub> 300	3,65	0,39

\*марка по водонепроницаемости для составов: №1 – W6; №2-10 – W10

В таблицах 4.11 и 4.12 представлены физико-механические и деформационные характеристики разработанных составов, на основе которых были предложены области их применения (рисунок 4.8). Разработанные составы можно применять как для получения массивных большепролетных конструкций, так и для густоармированных изделий.

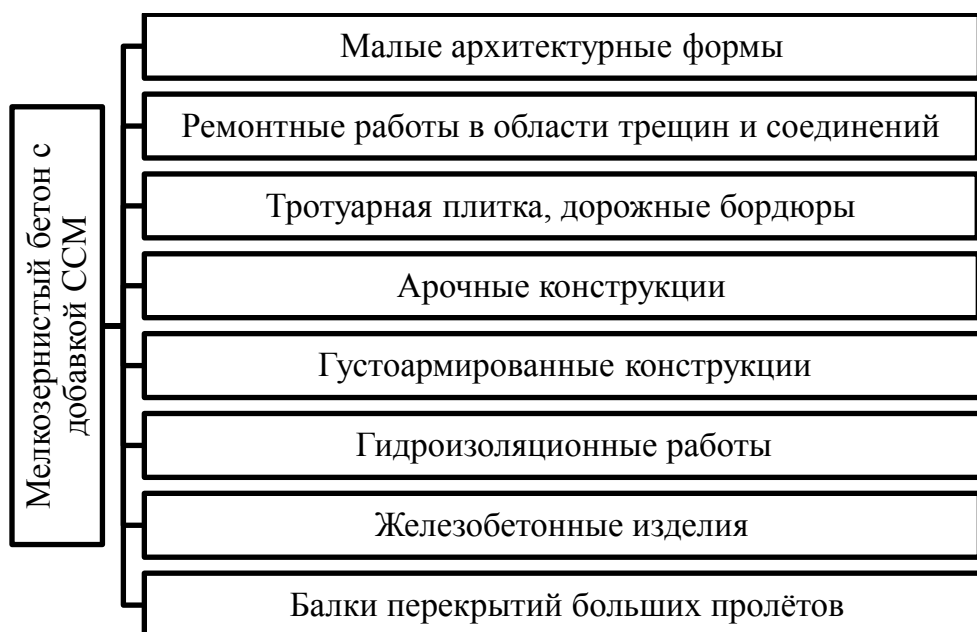


Рисунок 4.8 – Область применения разработанных составов

Одним из способов украшения зданий и придания им индивидуальности служит использование малых и больших архитектурных форм: лепнина, барельефы и пр. В связи с необходимостью благоустройства дворовых, парковых зон и аллей широкое распространение получили такие бетонные изделия как клумбы, декоративные заборы, небольшие статуи, фонтаны и т.д. Для подобных элементов архитектуры, не испытывающих существенных нагрузок, хорошо подходят мелкозернистые бетоны. Благодаря своей структуре такие бетоны хорошо поддаются обработке, а использование высокодисперсного компонента, позволило улучшить водонепроницаемость, морозостойкость и прочность композита (составы №2, 3, 8). Полученные эксплуатационные характеристики смесей позволят создавать высокохудожественные формы, способные долгое время выдерживать неблагоприятные климатические перепады.

Для устройства и декорирования тротуаров актуальным является применение тротуарной плитки и дорожных бордюров. Простота изготовления и укладки, практичность, разнообразие форм и цветов делает тротуарную плитку незаменимой в обустройстве городов и поселков. Для условий Севера используют плитку, получаемую из мелкозернистого бетона, классом не ниже В30 и жесткостью смеси не ниже Ж4 (составы №2, 3).

Мелкозернистый бетон нашел свое применение и в области ремонтных работ, при заделке трещин и соединительных швов. В этом случае используют смеси с высокой удобоукладываемостью, маркой по водонепроницаемости не меньше W6 и классом прочности не ниже В30 (составы №1, 4, 5, 6, 9).

В последнее время все большей популярностью стали пользоваться железобетонные изделия для строительства арочных конструкций, которые очень востребованы при устройстве выставочных комплексов, торговых центров и офисных зданий. Такие сооружения должны выдерживать постоянные нагрузки, иметь хорошую несущую способность, быть легкими и недорогими. Этим требованиям отвечают разработанные составы №7, 8, 10 мелкозернистого бетона, из которых можно получить такие изделия и конструкции как резервуары, купола, потолочные своды и другие изогнутые участки.



Также важными является работы, связанные с бетонированием густоармированных и тонкостенных конструкций. С целью исключения образования пустот данный вид работ осуществляется с использованием мелкозернистого бетона, размеры фракций которого позволяют осуществлять армирование труднодоступных мест и участков, где невозможно использовать бетоны с более крупным заполнителем. При получении густоармированных конструкций (водоводы, туннели, конструкции стен и перегородок, балки и плиты) на практике предпочтение отдают смесям с большой подвижностью и хорошей удобоукладываемостью (составы №1, 4, 5, 6, 9). В этом случае подача и укладка бетона в конструкции осуществляется с помощью автобетононасосов, что позволяет экономить не только деньги, но и время. Кроме того, использование подвижных смесей без увеличения вяжущего, а также отсутствие большого водоотделения и расслоения смеси (достигается за счёт сорбционных свойств используемого минерального ССМ) позволяет обеспечить соблюдение проектных требований к бетону по водонепроницаемости и морозостойкости.

В условиях постоянных перепадов температур для обеспечения долговечности конструкций большое внимание уделяется гидроизоляционным работам (устройство проникающей и обмазочной гидроизоляции, штукатурка). В этом случае бетонная смесь должна быть не только подвижной, но обладать хорошей морозостойкостью (не ниже F300) и водонепроницаемостью (не ниже W8). Таким требованиям отвечают разработанные составы №4, 5, 6, 9.

За счет комплексного действия компонента на основе сапонит-содержащего материала были получены составы мелкозернистых бетонов с повышенными эксплуатационными характеристиками №7, 8, 10, которые можно использовать для строительства большепролетных зданий и сооружений (бетонные резервуары, сооружения бункерного типа, силосные ямы и т.д.).

### **Выводы по четвертой главе**

1) Установлено, что при введении высокодисперсного сапонит-содержащего материала в смесь на основе портландцемента образуются гидросиликаты

дополнительной генерации группы тоберморита. Микроструктура образцов представлена наличием губчатых и игольчатых кристаллов (5...10 нм).

2) Присутствие различных форм кристаллов позволяет заполнить анизометричные и изометричные поры. Наличие скрытокристаллических гидросиликатов кальция, выявленное в структуре бетона с модификатором, способствует уплотнению цементной матрицы, снижению ее пористости и омоноличиванию структуры.

3) Предложены и разработаны составы мелкозернистых бетонов с использованием высокодисперсного минерального компонента на основе сапонит-содержащих отходов алмазодобывающей промышленности, повышающих эксплуатационные характеристики композита. Данные составы позволяют получить бетон с пределом прочности при сжатии не менее 73 МПа, морозостойкостью не ниже F<sub>1</sub>300 и водонепроницаемостью W10.

4) Установлено, что при введении оптимального количества высокодисперсного ССМ в смесь наблюдается улучшение деформационных характеристик бетона (истираемость, усадка, модуль Юнга, водопроницаемость).

5) Получено свидетельство о регистрации ноу-хау №КТ 2017-01. «Смесь для получения морозостойкого бетона высокого класса прочности».

## 5 ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Основная проблема, затрагивающая жилищный комплекс – это аварийное и ветхое жилье. В настоящее время данная проблема наблюдается во многих городах России и почти приобрела глобальный характер.

Поэтому в 2002 – 2010 годах была разработана целевая федеральная программа «Жилье», в рамках которой местные власти должны обеспечить переселение граждан из домов, признанных аварийными и ветхими.

В 2010 году указом президента РФ действие этой программы было продлено до 2018 года. Основываясь на данных, предоставленных «Фондом содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства» РФ с января 2012 г. только по территории г. Архангельска выявлено 305 аварийных домов. Большая часть таких домов была построена в период с 1900 по 1967 гг.

На данный момент общая площадь ветхого и аварийного жилья составляет более 66 тыс. м<sup>2</sup>. В период с 2012 по 2015 гг. было возведено 8 домов, общей площадью 34 тыс. м<sup>2</sup> для расселения людей из аварийного жилья.

На период 2016 – 2018 гг. в г. Архангельске в рамках программы расселения ведется строительство 5 домов. При этом по 4 из них строительство отстает от графика более чем на 3 месяца.

Выполнить указ Президента РФ можно путем возведения многоэтажных панельных домов. Такое строительство значительно упрощает процесс возведения и сокращает сроки строительства (рисунок 5.1).

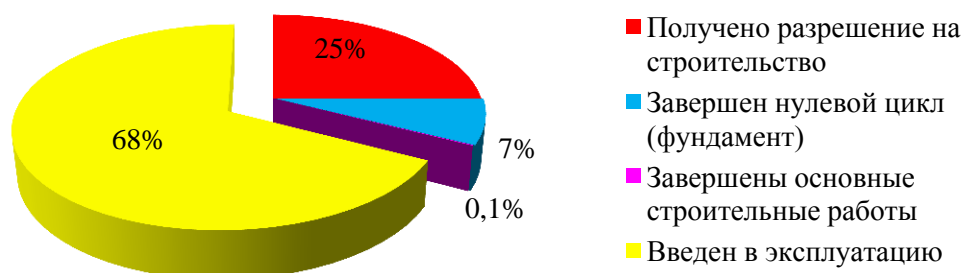


Рисунок 5.1 – Строительство домов по программе переселения граждан из аварийного жилья

Главными преимуществами панельных домов являются:

- 1) низкая стоимость жилья;
- 2) скорость возведения (9-этажный дом можно построить за 6 месяцев);
- 3) сокращение сроков возведения дома за счет поставки на объект уже готовых железобетонных конструкции;
- 4) большинство стеновых панелей поставляются с оконными блоками и готовыми каналами для электрической проводки;
- 5) усадка таких домов после строительства не дает перекосов конструкций.

Современное строительство панельных домов постоянно совершенствуется и модернизируется. В эксплуатацию вводят усовершенствованные серии панелей, выполненных по новым требованиям. Кроме этого, проектные организации уходят от строительства «домов-близнецов» к проектам панельных новостроек со свободной планировкой и разнообразными фасадами.

Одним из основных решений таких задач является внедрение новых, современных, энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий в жилищном строительстве и производство новых строительных материалов, применяемых в жилищном строительстве [188].

Поэтому использование природных сырьевых и экологически безопасных техногенных материалов при создании строительных композитов является приоритетным направлением.

### **5.1 Разработка нормативной документации**

Результатом проделанной работы стала разработка следующих нормативных документов:

- 1) Стандарт организации СТО 10-27.1.5-2018 «Минеральная добавка. Технические условия» (Приложение З);
- 2) Стандарт организации СТО 11-27.1.5-2018 «Мелкозернистые бетоны с использованием минеральной высокодисперсной добавки. Технические условия». (Приложение И).

## 5.2 Внедрение результатов исследований

Результаты исследования были внедрены в 2016 году на объекте гражданского домостроения, входящего в программу расселения людей из ветхого аварийного жилья. Разработанные составы мелкозернистого бетона с высокодисперсным компонентом использованы при монтаже железобетонных стеновых панелей здания 93 улучшенной серии для заделки внутренних стыков и соединительных швов (приложение К).

В дальнейшем планируется использование разработанных составов мелкозернистого бетона для возведения зданий и сооружений различного назначения в городах расположенных за Северным полярным кругом и на приарктических и Арктических территориях России.

Результаты экспериментальных исследований и теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, используются кафедрой «Композиционных материалов и строительной экологии» ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям: 08.03.01 «Строительство» профили «Промышленное и гражданское строительство», «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» и «Экологическая безопасность строительства»; 08.04.01 «Строительство» магистерская программа «Промышленное и гражданское строительство в холодном климате». (Приложение Л).

## 5.3 Технико-экономическое обоснование использования отходов алмазодобывающей промышленности Архангельской области

Произведем расчет экономической эффективности приготовления 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси с высокодисперсным минеральным сапонит-содержащим материалом. Для этого сравним расход материалов на замес 1 м<sup>3</sup> смеси контрольного и опытного составов.

На основе полученных ранее кинетических зависимостей процесса водопоглощения минерального компонента выявлено, что 1 кг ССМ способен

поглотить  $0,75 \text{ кг/м}^3$  водной фазы. Следовательно, для снижения В/Ц отношения с 0,5 до 0,38 необходимо около 7 % сапонит-содержащего материала от массы смеси (вяжущее, заполнитель).

Для получения мелкозернистого бетона взяты компоненты, наиболее часто используемые на ОАО «Кузнечевский КСКМ» (Кузнечевский комбинат строительных конструкций и материалов), г. Архангельск:

1) вяжущее – портландцемент ЦЕМ II/A-III компании «Мордовцемент». Класс прочности 32,5 Н, марка М400. Данный цемент применяется при строительстве высокопрочных сборных конструкций с повышенным сроком службы, а также используется для приготовления высококачественных строительных смесей. Цемент соответствует ГОСТ 31108-2016 и ГОСТ 30515-13;

2) заполнитель - строительный песок средней крупности, месторождения «Кеницы», Архангельской области. Данный песок может использоваться как заполнитель для приготовления контрольного и основного состава бетона, так как удовлетворяет требования к материалам, предъявляемым по ГОСТ 30459.

3) в качестве затворителя взята водопроводная вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Расчет стоимости сапонит-содержащего материала производили с учетом стоимости его погрузки-разгрузки, транспортировки и подготовки (диспергирования).

Для получения бетонов на производстве используют различные химические добавки комплексного действия, которые также были учтены при расчете стоимости  $1 \text{ м}^3$  смеси.

Таким образом, можно проанализировать, насколько изменится стоимость смеси при переходе завода с вредных химических добавок на экологически чистый минеральный отход добывающего производства.

Для расчета расходов по найму оборудования, погрузочно-разгрузочных работ и транспортировки отходов до места складирования приняты следующие параметры:

- 1) перевозка грузов I класса;
- 2) тип автомобиля – автомобиль-самосвал;
- 3) грузоподъемность – 10 т;
- 4) вид работы – вне карьера;

5) расстояние – 113 км.

На основе этого, сметная стоимость на транспортировку в текущих (прогнозных) ценах составила – 6449,30 руб.

Добавим поправку на пробег автомобиля до места выполнения работ и возвращение по окончании работ, которая составляет – 4892,90 руб.

Также в стоимость входят:

1) надбавки к сметной цене на перевозку грузов специализированным транспортом – 3402,66 руб.;

2) НДС 18% – 2654,07 руб.

Таким образом, общая стоимость транспортировки 10 т сапонит-содержащих отходов составит 17398,93 руб.

Для помола сапонит-содержащего материала в промышленных масштабах использована шаровая мельница сухого помола непрерывного действия МШН-1. Мельница проточного действия МШН-1 предназначена для сухого тонкого и сверхтонкого помола сырьевых и строительных материалов малой и средней твердости с помощью мелющих тел. Характеристики и стоимость мельницы, предоставленные группой предприятий «ПромстройМаш», приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристика шаровой мельницы непрерывного действия

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	Значение
1	Масса загрузки	кг	1 000
2	Внутренний диаметр размольного барабана	м	1,3
3	Длина размольного барабана	м	3,0
4	Рабочий объем размольного барабана	м <sup>3</sup>	3,8
5	Угловая скорость вращения размольного барабана	об/мин	28
6	Производительность	т/ч	1 000
7	Мощность электродвигателя	кВт	45
8	Напряжение	В	380
9	Длина	м	4,8
10	Ширина	м	1,8
11	Высота	м	1,65
12	Масса шаровой мельницы без мелющих тел	кг	9 000
13	Масса мелющих тел, применяемых в шаровой мельнице	кг	5 200
14	Цена мельницы МШН-1 с НДС без комплекта мелющих тел.	руб.	2 444 000
	Цена комплекта мелющих тел с НДС	руб.	220 000

Соответственно стоимость помола 1000 кг сапонит-содержащего материала составит:

$$C_{\text{пом.ссм}} = M \cdot \mathcal{E} \cdot t \quad (5.1)$$

где  $M$  - мощность электродвигателя, кВт;

$\mathcal{E}$  - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб. (на IV квартал 2016 г. – 4,59 руб);

$t$  – время помола, мин

$$C_{\text{пом.ссм}} = 45 \cdot 4,59 \cdot 1,5 = 309,83 \text{ руб.}$$

На основе приведённых данных произведем расчет стоимости 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси для составов, представленных в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Составы мелкозернистых бетонов

№ п/п	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> , кг				В/Ц	Проектируемый класс бетона	Марка по морозостойкости
	цемент	песок	ССМ	вода			
1	560	1400	-	213	0,38	B30	F <sub>1</sub> 100
2	560	1310	90	280	0,50	B50	F <sub>1</sub> 300

Цены на компоненты бетонной смеси для расчета стоимости 1 м<sup>3</sup> взяты на III квартал 2017 года (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Стоимость материалов в Архангельской области

№ п/п	Наименование материала	Единица измерения	Стоимость, руб
1	Портландцемент ЦЕМ II/A-III компании «Мордовцемент»	1000 кг	4200,00
2	Строительный песок месторождения «Кеницы»	50 кг	75,00
3	Вода затворения	1 м <sup>3</sup>	31,95
4	Модификатор «АКМ-30Ультра»	1000 л	120,00
5	Сапонит-содержащий материал	1 т	0,00

Зная стоимость транспортировки, помола ССМ, а также стоимость материалов, используемых в производстве мелкозернистого бетона произведем расчет стоимости для получения 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси класса В30 составов: контрольного (с модификатором, применяемым на производстве) и опытного (с высокодисперсным минеральным компонентом на основе сапонит-содержащего материала) (таблица 5.4, 5.5).



Таблица 5.4 – Расчет стоимости компонентов на приготовление 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Стоимость, руб	Требуемое количество	Стоимость, руб
1	Портландцемент	кг	4,20	560	2352,00
2	Строительный песок:	кг	1,50		
	контрольного состава			1400	2100,00
	опытного состава			1310	1965,00
3	Вода затворения для:	л	0,03195		
	контрольного состава			213	6,81
	опытного состава			280	8,95
4	Модификатор «АКМ-30Ультра»	л	120	6,5	780
5	Сапонит-содержащий материал	кг	0,00	90	0,00
6	Использование мельницы	-	-	-	309,83
7	Транспортировка ССМ	кг	1,7399	146	254,04

Таблица 5.5 – Расчет стоимости 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

№ п/п	Наименование	Стоимость составов, руб	
		контрольный	опытный
1	Портландцемент	2352,00	2352,00
2	Строительный песок	2100,00	1965,00
3	Вода затворения	6,81	8,95
4	Модификатор «АКМ-30Ультра»	780	-
5	Сапонит-содержащий материал	-	0,00
6	Использование мельницы	-	309,83
7	Транспортировка ССМ	-	254,04
ИТОГО:		5238,81	4889,86

Следовательно, разница в цене между бетонной смесью с ССМ и без, составит всего 214,02 руб.

Однако, исходя из полученных прочностных характеристик, известно, что сапонит-содержащий материал в высокодисперсном состоянии способен повышать прочность композита в 2 раза. Тогда, приведенный расчет стоимости мелкозернистого бетона с высокодисперсным компонентом (таблица 5.5) будет соответствовать стоимости приготовления 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси на получение композита класса В50. Поэтому, произведем расчет стоимости компонентов на получение 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси данного класса (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Стоимость 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси на получение бетона класса В50

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Требуемое количество	Стоимость, руб
1	Портландцемент	1 кг	659	2767,80
2	Строительный песок	1 кг	1719	2578,50
3	Вода затворения	1 л	244	7,80
4	Модификатор «АКМ-30Ультра»	1 л	8	960
ИТОГО:				6314,10

Сравнивая стоимость получения 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси с высокодисперсным ССМ класса В50 и стоимость того же класса, но с использованием модификатора, получаем разницу в цене – 1410,13 руб.

В таблице 5.7 представлено ценовое сравнение бетонных смесей разных классов.

Таблица 5.7 – Стоимость 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси мелкозернистого бетона

№ п/п	Класс бетона	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг					Стоимость, руб
		цемент	песок	вода	АКМ-30Ультра	ССМ	
1	В10	156	583	60	1,9	-	1759,62
2	В12,5	201	697	76	2,4	-	2180,13
3	В15	234	875	89	2,0	-	2538,14
4	В15	156	583	78	-	67	1958,64
5	В20	344	998	131	4,1	-	3437,99
6	В20	201	697	101	-	86	2352,44
7	В25	446	1173	169	5,4	-	4286,10
8	В25	234	875	117	-	89	2763,77
9	В30	542	1370	206	6,5	-	5117,98
10	В30	344	998	172	-	102	3434,65
11	В35	446	1173	223	-	115	4149,79
12	В40	542	1370	271	-	126	4869,17

Для сравнения приведем некоторые стоимости бетона различных компаний (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Стоимость 1 м<sup>3</sup> бетона различных марок с маркой по морозостойкости F<sub>1300</sub> и подвижностью П2, водопроницаемость W6

№ п/п	Класс бетона	Стоимость, руб			
		ОАО «КСКМ»	ООО «Бетон-Архангельск»	ЗАО «Монолит»	Средняя
1	В15	4430	4270	4270	4323,33
2	В20	4865	5270	4880	5005,00
3	В25	5167	5649	5250	5355,33
4	В30	5370	5982	5420	5590,67
5	В35	-	6480	5600	6040,00

Сравнение данных таблиц 5.7 и 5.8 показывает, что введение в бетонную смесь высокодисперсного компонента приводит к снижению стоимости производства 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси по сравнению с аналогами.

Экономический эффект при получении 1 м<sup>3</sup> смеси класса В50 составит 26%.

#### **Выводы по пятой главе:**

1. Для широкомасштабного внедрения результатов научных исследований разработаны следующие нормативные документы: СТО 10-27.1.5-2018 «Минеральная добавка. Технические условия» и СТО 11-27.1.5-2018 «Мелкозернистые бетоны с использованием минеральной высокодисперсной добавки. Технические условия», в которых рассмотрены способы подготовки ССМ и приготовления мелкозернистого бетона с данным компонентом (Приложения З, И);

2. Разработанные составы морозостойкого мелкозернистого бетона с использованием высокодисперсного минерального компонента на основе отхода алмазодобывающей промышленности Архангельской области внедрены в качестве растворов для заделки внутренних стыков и соединительных швов при монтаже железобетонных стеновых панелей многоэтажного жилого дома 93 улучшенной серии на предприятии ООО «Динамика» (Приложение К);

3. Экономический эффект от использования в составе бетонной смеси сапонит-содержащего материала составил 1410,13 рублей на 1 м<sup>3</sup> композита класса В50.

4. Результаты экспериментальных исследований и теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям: 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» (Приложение Л).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

1. Разработан способ определения величины водопоглощения твердой фазой сапонит-содержащего материала с разной степенью дисперсности, заключающийся в определении изменения объема жидкости при контакте с анализируемой пробой, путем оптической фиксации изменения границ раздела жидкой и твердой фаз во времени. Изучена кинетика этого процесса. Показано, что для достижения максимальной величины водопоглощения ССМ, необходимо увеличить его удельную поверхность посредством механоактивации до значения не ниже  $35000 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

2. Установлена функциональная взаимосвязь между степенью измельчения модификатора, величиной изменения свободной поверхностной энергии и значением удельной поверхности частиц, позволяющая прогнозировать условия механоактивации сапонит-содержащего материала.

3. Показано, что ССМ, выделенный из суспензии оборотной воды алмазодобывающего производства, проявляет свойства сорбента, оптимизирующего содержание водной фазы в системе, причем данный процесс характеризуется адсорбционно-десорбционным гистерезисом. Отмеченный при этом дисбаланс в массе исходного материала и образца после десорбции связан с увеличением содержания связанной воды после механоактивации материала.

4. Доказано, что в процессе твердения бетона с высокодисперсным сапонит-содержащим материалом образуются субмикрорекристаллы гидросиликатов группы тоберморита, которые способствуют дополнительному уплотнению структуры бетона. Это позволяет рассматривать ССМ не только как компонент бетонной смеси, регулирующий путем сорбции водной фазы структурообразование, но и как активный минеральный компонент в вяжущих композициях гидратационного типа твердения.

5. Выявлено, что введение высокодисперсного материала в рецептуру цементного теста приводит к изменениям его реологических свойств: изменение сроков схватывания, подвижности смеси и удобоукладываемости.

6. Разработан состав мелкозернистых бетонов со структурообразующим компонентом на основе отходов алмазодобывающей промышленности. Состав

характеризуется повышенными физико-механическими, деформационными и реологическими характеристиками: прочность бетона на сжатие – 73 МПа, морозостойкость не ниже F<sub>1300</sub>, водонепроницаемость – W10, модуль упругости 44·10<sup>3</sup> МПа. Эффект повышения эксплуатационных характеристик композита достигается путем стабилизации в системе степени пересыщения водной фазой, снижения пористости, получения более плотной упаковки частиц и проявления пуццолановых свойств высокодисперсным минеральным компонентом.

7. Проведено внедрение разработанных составов мелкозернистого бетона с использованием минерального компонента на предприятии ООО «Динамика». Опытная партия бетонной смеси использовалась для заделки внутренних стыков и соединительных швов при монтаже стеновых панелей зданий. Экономический эффект от использования ССМ при производстве 1 м<sup>3</sup> мелкозернистого бетона с повышенными эксплуатационными характеристиками показал снижение стоимости на 26%

**Рекомендации.** Для широкомасштабного внедрения результатов научных исследований разработаны следующие нормативные документы: СТО 10-27.1.5-2018 «Минеральная добавка. Технические условия» и СТО 11-27.1.5-2018 «Мелкозернистые бетоны с использованием минеральной высокодисперсной добавки. Технические условия».

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований рекомендуются для использования в учебном процессе для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

**Перспективы дальнейшей разработки темы:**

- изучить перспективность использования компонента на основе сапонит-содержащего отхода алмазодобывающей промышленности для получения высокоэффективных бетонов специального назначения
- проверить возможность использования компонента на основе ССМ в бетонах с использованием сырья различного генезиса;
- проанализировать дальнейшее изменение физико-механических характеристик, а также фазово-структурных преобразований бетонных изделий с минеральным компонентом в процессе их эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка текущего состояния и прогноз объемов производства, потребления и производственных мощностей основных строительных материалов на территории Архангельской области. / Отчет Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства архангельской области, 2015 г;
2. Иванов, В.А. Устойчивое развитие Арктического сектора зоны Севера: состояние, факторы, направления / В.А. Иванов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2012. – №1 (19). – С. 51-67.
3. Ввод в действие зданий жилого и нежилого назначения в Архангельской области. Отчет Федеральной службы государственной статистики по Архангельской области.
4. Факторы, ограничивающие производственную деятельность строительных организаций. Отчет Федеральной службы государственной статистики по Архангельской области за 2013-2015 г.
5. Простотина, Н.В. Юбилей ЗАО «Савинский цементный завод». Предприятие в цифрах / Н.В. Простотина // Цемент и его применение. – 2011. – № 3. – С. 82-84.
6. Лапочкина, Л.В., Сценарные условия и пути развития промышленного сектора Архангельской области / Л.В. Лапочкина, Н.В. Никулина // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. – 2015. – №4. – С. 108-114.
7. Цукерман, В.А. На пути к высокотехнологическому развитию экономики Севера и Арктической зоны РФ / В.А. Цукерман // Кондратьевские волны. – 2014. – № 3. – С. 331-342.
8. «Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г», утвержденная Президентом РФ от 18.09.2008 г. №1969 (электронный документ, режим доступа [www.government.ru](http://www.government.ru)).
9. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 18 ноября 2011 г. № 2074-р. «Стратегия социально-экономического развития Северо-Западного федерального округа на период до 2020 года» С. 233.

10. Калинин, В.Т. Север и Арктика – зона стратегических интересов России / В.Т. Калинин // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2010. – № 32. – С. 3.
11. Замятина, Н.Ю. «Севера» как зона роста для Российской провинции / Н.Ю. Замятина, А.Д. Яшунский // Отечественные записки. – 2012. – № 5 (50). – С. 227-239.
12. Селин, В.С. Прогноз инновационной индустриализации Севера и Арктической зоны России / В.С. Селин // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2013. – Т. 4. – № 35. – С. 121-128.
13. Соболева, И.А. Актуальность сохранения городской среды городов крайнего севера для дальнейшего освоения и развития Арктической зоны РФ / И.А. Соболева // В сборнике: Проблемы освоения и сохранения Арктики материалы Всероссийской научно-практической конференции. – 2015. – С. 258-263.
14. Асоскова, Н.И. География Архангельской области: Учебное пособие / Н.И. Асоскова, Н.М. Бызова, Б.В. Емолин, Л.Р. Лукин, Я.К. Преминина, А.Ф. Станковский, И.В. Туровник, Е.В. Шаврина. – Под ред. Бызовой Н.М., Премининой Я.К. – М.: СпортАкадемПресс, 2001. – 184 с.
15. Скуфьина, Т.П. Новая региональная политика в контексте проблемы сбалансированного развития Северных территорий России / Т.П. Скуфьина // Региональная экономика: теория и практика. – 2015. – № 29 (404). – С. 25-34.
16. Лукин, Ю.Ф. Великий предел Арктики. Монография / Ю.Ф. Лукин. – Архангельск: САФУ имени М.В. Ломоносова. – 2010. – 400 с.
17. Грищенко, И.В. Тенденции в изменении климата и опасных явлений погоды на территории Архангельского округа / И.В. Грищенко, Т.Е. Водовозова // Экология человека. – 2011. – № 6. – С. 22-26.
18. Грищенко, И.В. Опасные явления погоды в условиях изменения климата на территории Архангельской области и Ненецкого Автономного округа: дис. ... канд. геог. наук: 25.00.30 / Грищенко Ирина Васильевна. – Санкт-Петербург, 2011. – 192 с.
19. Грищенко, И.В. Очень сильные морозы на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа / И.В. Грищенко // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2010. – № 561. – С. 276-284.

20. Чулков, А. В. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2010 год / А. В. Чулков. — Архангельск: КИРА. — 2011. — 256 с.
21. Попов, А.А. Арктика – сфера глобальных интересов государств Арктической зоны / А.А. Попов, А.Н. Мыреев, В.В. Сергеева, С.В. Федорова // Экономика и предпринимательство. – 2015. – № 10-2 (63-2). – С. 372-376.
22. Васильев, В.В. Тенденции изменения климата на Севере и в Российской Арктики / В.В. Васильев, В.С. Селин // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2015. – Т. 1. – № 1 (44). – С. 5-13.
23. Комарова, Н.Г. Крайний Север России: геоэкологические факторы риска / Н.Г. Комарова // Климат и природа. – 2014. – № 3 (12). – С. 35-48.
24. Титкова, Т.Б. Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зимний период / Т.Б. Титкова, В.В. Виноградова, А.Ю. Михайлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 3. – С. 117-125.
25. Филатов, Н.Н. Изменения и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты / Н.Н. Филатов, Л.Е. Назарова, А.П. Георгиев, А.В. Семенов, А.Р. Анциферова, В.Н. Ожигина, М.И. Богдан // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 2 (6). – С. 80-93.
26. Кокорин, А.О. Изменение климата / А.О. Кокорин, Е.В. Смирнова, Д.Г. Замолотчиков. – Книга для учителей старших классов образовательных учреждений. Том Выпуск 1 Регионы севера европейской части России и Западной Сибири. – Москва, –2013. – 274 с.
27. Семенов, В.А. Изменения Арктического ледяного покрова в прошлом и будущем: важность синтеза данных наблюдений и климатических моделей / В.А. Семенов // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата. – ИД САФУ. – 2014. – С. 18-19.
28. Катцов, В.М. Климат Арктики: оценки будущих изменений / В.М. Катцов // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата. – ИД САФУ. – 2014. – С. 14.
29. Алексеев, Г.В. Изменение климата Арктики при глобальном потоплении / Г.В. Алексеев // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата. – ИД САФУ. – 2014. – С. 16-17.



30. Комарова, Н.Г. Геополитические интересы и факторы риска в стратегии развития Севера России / Н.Г. Комарова // Вестник Московского университета. Серия 27: Глобалистика и геополитика. – 2014. – № 3-4. – С. 60-73;

31. Васильев, В.В. Влияние климатической динамики на пространственную дискомфортность и развитие Арктических территорий / В.В. Васильев, В.С. Селин, Ю.В. Вышинская // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2015. – № 2 (45). – С. 5-14.

32. Макарова, Ю.С. Изменение климата Арктики: адаптация энергетической базы региона (на примере Архангельской области) / Ю.С. Макарова, Л.И. Зеленина // Инноватика. – 2014. – № 2. – С. 40-46.

33. Ашик, И.М. Ожидаемые изменения гидрогеологических условий в Арктических морях и их последствия / И.М. Ашик, Л.А. Тимохов // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата. – ИД САФУ. – 2014. – С. 25-26.

34. Степаненко, К.Ю. К юбилею Н.Н. Урванцева – исследователя геологии Таймыра, Северной земли и Севера Сибирской платформы / К.Ю. Степаненко, А.А. Маськов, Л.Г. Ананьева // В сборнике: Проблемы геологии и освоения недр Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2013. – С. 170-171.

35. Балугев, А.С. Континентальный рифтогенез Севера и Восточно-европейской платформы в неогее: геология, история развития, сравнительный анализ: дис. ... док. геолого-минер. наук: 25.00.01/ Балугев Александр Сергеевич. – Москва, 2013. – 320 с.

36. Чистяков, А.А. Четвертичная геология. Учебник / А.А. Чистяков. – М.: ГЕОС, 2000. – 303 с.

37. Сергеева, Е.М. Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Том 2. Западная Сибирь / Е.М. Сергеева. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 496 с.

38. Похиленко, Н.П. Минерально-сырьевые ресурсы Арктической зоны республики Саха (Якутия) / Н.П. Похиленко // Экономика Востока России. – 2015. – № 2 (4). – С. 12-20.
39. Лысенко, М.П. Глинистые породы Русской платформы / М.П. Лысенко. – М.: Недра, 1986. – 254 с.
40. Березовский, В.З. Глубинное строение севера Русской плиты по результатам комплексной интерпретации / В.З. Березовский, М.Г. Губайдуллин, Л.И. Койфман // Интерпретация гравитационных и магнитных полей. Киев: Наукова думка. – 1992. – С. 92-98.
41. Аксеновский Ф.А. Полезные ископаемые, как основа валового регионального продукта Архангельской области / Ф.А. Аксеновский // Вестник международного Института управления. – 2015. – № 1-2 (131-132). – С. 118-126.
42. Зоричева А.И. Геология СССР. Том 2. Геологическое описание. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР. Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр / А.И. Зоричева. – Москва, 1963. – 548 с.
43. Невзоров, А.Л. Геоэкологическая среда Архангельска и особенности ее взаимодействия с инженерными сооружениями / А.Л. Невзоров, В.Н. Кубасов // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2001. – № 2. – С. 116.
44. Баринов, А.В. Геоэкологические условия Архангельской области / А.В. Баринов, М.Г. Губайдуллин, В.Б. Коробов // Проблемы и основные направления научных исследований в ОАО «Архангельскгеолдобыча». – 2001. – С. 99-108.
45. Бахтеев, М.К. Геоэкология. Учебное пособие / М.К. Бахтеев. – М.: Изд-во института общего среднего образования РАО, 2001. – 336 с.
46. Тутыгин, А.С. Природные сырьевые материалы строительного назначения в Северо-арктическом регионе. Минерально-сырьевая база архангельской области / А.С. Тутыгин, М.А. Фролова, С.Е. Аксенов, Т.А. Махова, И.Ю. Заручевных, А.М. Айзенштадт, А.Л. Невзоров, В.С. Лесовик. – М-во образования и науки Российской Федерации. САФУ, Архангельск, 2011. – 148 с.

47. Шполянская, Н.А. Мерзлотно-экологическая характеристика западного сектора Российского Арктического шельфа / Н.А. Шполянская // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2014. – № 3. – С. 105-111.
48. Алексеев, Г.В. Арктическое измерение глобального потепления / Г.В. Алексеев // Лед и снег. – 2014. – № 2 (126). – С. 53-68.
49. Смирнов, И.П. Динамика прибрежных ландшафтов на Северо-Востоке острова Северный архипелага Новая Земля / И.П. Смирнов // Известия Русского географического общества. – 2015. – Т. 147. – № 3. – С. 30-41.
50. Саенко, Ю.В. Исследование деформационных свойств ледниковых суглинков / Ю.В. Саенко, А.Л. Невзоров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 119-128.
51. Данилов, М.А. Богатства северных недр / М.А. Данилов. – Архангельск: Сев.-Зап. книжное издание, 1977. – 119 с.
52. Сырьевая база России в XXI веке: материалы научно-практической конференции. – Архангельск: ОАО «Архангельскгеолдобыча», 2001. С. 194.
53. Архангельская область: минералы и месторождения [Электронный ресурс] / Геологическая библиотека. – Режим доступа: <http://www.geokniga.org/labels/1398> (дата обращения 16.04.2016).
54. Лесовик, В.С. Природные сырьевые материалы строительного назначения в Северо-арктическом регионе. Минерально-сырьевая база архангельской области. Монография / В.С. Лесовик, А.С. Тутьгин. – САФУ, Архангельск, 2013. –143 с.
55. Юзмухаметов, Р.Н. Из истории открытия месторождения алмазов имени Ломоносова / Р.Н. Юзмухаметов // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. – 2010. – № 3. – С. 32-37.
56. Шпилевая (Вержак), Д.В., Гаранин К.В. Алмазные месторождения Архангельской области и экологические проблемы их освоения / Д.В. Шпилевая (Вержак), К.В. Гаранин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2005. – № 6. – С. 18-26.
57. Коршунов, А.А. Перспективы и направления утилизации отходов обогащения кимберлитовых руд на месторождении имени М.В. Ломоносова / А.А.

Коршунов, А.Л. Невзоров // Проблемы региональной экологии. – 2009. – № 2. – С. 213-216.

58. Балеева, С.В. Инвестиционный потенциал Северо-Арктического региона России (монография) / С.В. Балеева, Е.Ю. Вещагина, Л.В. Воронина, Я.А. Дернова, Н.В. Евменов, Е.В. Евменова, С.В. Ершов, Е.Д. Исаева, В.В. Крицкая, И.В. Лаврова, Н.П. Львов, С.В. Лупачева, А.Ю. Маркова, М.Ю. Пахтусова, О.А. Петренко, А.В. Пластинин, Е.Н. Пономарева, М.А. Самойлова, Н.Я. Синицкая, В.И. Синицкий // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 5. – С. 109-110.

59. Долгощёлова, М.И. Эколого-географическая оценка влияния транспортной инфраструктуры на окружающую среду Архангельской области: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Долгощёлова Мария Ивановна. – Архангельск, 2013. – 266 с.

60. 06.11-19Л.1 Геоэкологические и регионально-экономические факторы формирования новых минерально-сырьевых потоков на Европейском Севере. РЖ 19Л. Технология неорганических веществ и материалов. 2006. № 11.

61. Заболотник, С.И. Суровость климатических условий на территории России / С.И. Заболотник // География и природные ресурсы. – 2010. – № 3. – С. 69-74.

62. Матишов Г.Г. Климат и океанографические исследования Северных и Южных морей / Г.Г. Матишов // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 2 (21). – С. 11-19.

63. Глобальные климатические процессы и их влияние на экосистемы Арктических и Субарктических регионов. Тезисы докладов Международной научной конференции, 2011, С. 219.

64. Селин, В.С. О приоритетах государственной политики в Северных регионах / В.С. Селин, Е.И. Зайцева, А.В. Истомина // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2012. – № 2 (20). – С. 38-49.

65. Козлов, А.В. Программа развития Арктической зоны Российской Федерации на основе комплекса региональных индикаторов / А.В. Козлов, С.С. Гутман, И.М. Зайченко // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2014. – № 11. – С. 110-120.

66. Андреева, Ю.В. Перспективы влияния Северного морского пути на развитие товарооборота между Китаем и Европой / Ю.В. Андреева, М.М. Гибадулина, В.А. Фролова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 8-3. – С. 495-498.

67. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – Москва, издательство АСВ, 2002. – 500 с.

68. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций. Учебник / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, У.Х. Магдеев. – Издательство АСВ, Москва, 2004. – 256 с.

69. Downie, Brian. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete / Brian Downie // West Virginia University Kurdowski, Wieslaw Cement and Concrete Chemistry. – 2014. – XII. – 699 p.

70. Трофимов, Б.Я. Деформации и стойкость бетона при циклическом замораживании / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Строительные материалы. – 2014. – № 8. – С. 46-51.

71. Макридин, Н.И. Сравнительная оценка физико-механических свойств горных пород при выборе заполнителей бетона / Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2018. – № 21. – С. 215-218.

72. Данилов, А.М. Строительное материаловедение: комплексные исследования, системный анализ / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1 (30). – С. 42-46.

73. Баженов, Ю.М. Бетон: технологии будущего / Ю.М. Баженов // Экономика строительства. – 2007. – №11. – С. 41.

74. Michael, N. Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction / N. Michael. – ACES Workshop. – 2012. – XV. – 379 p.

75. Баженов, Ю.М. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман, Б.И. Булгаков // Вестник МГСУ. – 2012. – №12. – С. 125-133.

76. Макарова, Ю.С. Изменение климата Арктики: адаптация энергетической базы регионов (на примере Архангельской области) / Ю.С. Макарова, Л.И. Зеленина // Инноватика. – 2014. – № 2. – С. 40-46.

77. Andrade, Carmen. Advances in Modeling Concrete Service Life / Carmen Andrade, Joost Gulikers // Proceedings of 4th International RILEM PhD Workshop held in Madrid, Spain. – November 19, 2010. – RILEM Bookseries. – Vol. 3. – 2012. – VI. – p. 166.

78. Смирнов, В.А. Размерные эффекты и топологические особенности наномодифицированных композитов / В.А. Смирнов, В.Е. Королев, А.И. Альбакасов // Нанотехнологии в строительстве: науч. интернет-журнал. – 2011. – №4 (14). – С. 17-26.

79. Маркова, К.И. Бетон в архитектуре: технологии прошлого и будущего / К.И. Маркова // Молодёжь и наука: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского [Электронный ресурс]. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. – 2012. (Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section02.html>).

80. Логанина, В.И.. Управление качеством в технологии строительных материалов / В.И. Логанина // Учеб. пособие по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство». – 2016. – С. 180

81. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4 (688) . – С. 30-37.

82. Береговой, В.А. Пути повышения механических показателей неавтоклавного газобетона / В.А. Береговой, М.А. Басова, Д.А. Егунов // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – № 5 (12). – С. 172-179.

83. Логанина, В.И. Обеспечение качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2018. – № 1 (6). – С. 21-25.

84. Пухаренко, Ю.В. Влияние наноструктурного модифицирования на прочностные характеристики бетонов из малоподвижных бетонных смесей / Ю.В. Пухаренко, Д.И. Рыжов // В сборнике: Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 13 частях. – 2013. – С. 87-90.

85. Максимова, И.Н. О кинетических зависимостях процессов структурообразования и твердения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 29-35.

86. Андрианов, А.Ю. Механохимическая активация компонентов строительных композитов / А.Ю. Андрианов, И.С. Семина, И.Л. Чулкова // В сборнике: Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации Материалы Международной научно-практической конференции: Электронный ресурс. – 2016. – С. 238-242.

87. Голубева, Д.Н. Оттаивание и прогрев грунтового основания к зимнему бетонированию монолитных конструкций фундаментов / Д.Н. Голубева // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). – 2012. – Т. 15. – № 54-2. – С. 77-85.

88. Вытчиков, Ю.С. Исследование теплового режима обогрева бетонных конструкций при зимнем бетонировании / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, Е.Н. Нохрина // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность Сборник статей по материалам 72-й Всероссийской научно-технической конференции. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – 2015. – С. 171-177.

89. Yu, Xiangmei. Research on early concrete crack control of shijiazhuang subway construction in winter / Xiangmei Yu, Lijun Cao, Dongyang Geng // 4<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials, Haikou. – 2014. – pp 1134-1137.

90. Guo, Jinbao. Application self-regulating heating cable curing of concrete in winter / Jinbao Guo, Lin Liu, Qiang Wang // 3rd International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering, Hangzhou. – 2014. – pp 1531-1535.

91. Liu, Yan-jie. Analysis of temperature control mode of concrete construction in winter / Yan-jie Liu, Lin Ding, Yong-jiang Zhao // 3rd International Conference on Green Building, Materials and Civil Engineering, Taiwan. – 2013. – pp 847-850.

92. Zhang, Tong. Development of concrete construction technology in winter / Tong Zhang, Shuai Tian, Hong-yan Chen // 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials, Jinan. – 2013. – pp 2843-2846.

93. Семина И.С., Андрианов А.Ю., Чулкова И.Л. Влияние пластифицирующих добавок на морозостойкость бетона / И.С. Семина, А.Ю. Андрианов, И.Л. Чулкова // В сборнике: Архитектура, строительство, транспорт материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»). – 2015. – С. 555-560.

94. Иохан, Штарк. Долговечность бетона / Штарк Иохан, Вихт Бернд. – Издательство Оранта, г. Киев. – 2004. – С. 295.

95. Lin, Xiaolu. Effect of early age carbonation on strength and pH of concrete / Xiaolu Lin // Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University. – 2007. – pp 109-115.

96. Karagol, Fatma. Behavior of fresh and hardened concretes with antifreeze admixtures in deep-freeze low temperatures and exterior winter conditions / Fatma Karagol, Ramazan Demirboga, Waleed H. Khushefati // Construction and building materials. – volume 76. – 2014. – pp. 388-395.

97. Garcia-Monzon, Hector. Strength durability index (SDI) for improved concrete strength and durability assessment / Hector Garcia-Monzon // 2006. – Texas Tech University.

98. Соболев, Г.М. Математическое моделирование и планирование эксперимента в технологии бетона / Г.М. Соболев, Е.Ф. Кузнецова, А.Ф. Комарова // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. статей 65-й междунар. науч.-практ. конф. в 3 т. Караваево: Костромская ГСХА. – 2014. – Т. 2. – С. 224.

99. Hughes, B.P. Stress-strain curves for fiber reinforced concrete in compression / B.P. Hughes, N.I. Fattuhi // Cement and Concrete Research. – 1977. – № 7. – pp. 173-183.



100. Kelly, A. Interface Effects and the Work of Fracture of a Fibrous Composite / A. Kelly // Proceedings of the Royal Society of London. – Series. – pp. 95-116.
101. Jin, Shanshan. Fractal analysis of effect of air void on freeze-thaw resistance of concrete / Shanshan Jin, Jinxi Zhang, Baoshan Huang // Construction and building materials. – volume 47. – 2013. – pp. 126-130.
102. Reinhardt, Aaron. Macro and nanocreep of self-consolidating concrete / Aaron Reinhardt // University of New Mexico Khayat Kamal De Schutter. – Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. – Vol. 14. – 2014. – XIX. – 271 p.
103. Mechtcherine, Viktor. Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction / Viktor Mechtcherine, Hans-Wolf Reinhardt // State of the Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP, RILEM State-of-the-Art Reports. – Vol. 2. – 2012. – X. – 166 p.
104. Харитонов, А.М. Развитие методов оптимизации составов многокомпонентных строительных композитов / А.М. Харитонов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11 (3). – С. 520-523.
105. Харитонов, А.М. Повышение эффективности оптимизации состава сухих строительных смесей на основе применения методов численного моделирования / А.М. Харитонов, М.И. Харитонов // В сборнике: Архитектура – Строительство – Транспорт. Материалы 71-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. – Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – 2015. – С. 143-147.
106. Тараканов, О.В. Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 60-69.
107. Лесовик, В.С. Средство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, И.Л. Чулкова, А.Д. Толстой, А.А. Володченко // Строительные материалы. – 2015. – № 9. – С. 18-22.
108. Войтович, Е.В. Повышение эффективности цементных вяжущих с активным минеральным нанодисперсным компонентом / Е.В. Войтович, И.Л.

Чулкова, Е.В. Фомина, А.В. Череватова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. – № 5 (45). – С. 56-62.

109. Чулкова, И.Л. Строительные композиты на основе местного техногенного сырья / И.Л. Чулкова, И.В. Пастушенко, А.С. Парфёнов // Технологии бетонов. – 2014. – № 3 (92). – С. 12-13.

110. Тютюнов, В.А. Использование техногенных продуктов в качестве химических добавок, ускоряющих твердение вяжущих / В.А. Тютюнов, Д.С. Партута, И.Л. Чулкова // В сборнике: Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». – 2013. – С. 96-98.

111. Siddique, Rafat. Waste Materials and By-Products in Concrete / Rafat Siddique // Engineering Materials. – 2008. – pp. 87-91.

112. Прудков, Е.Н. Многокомпонентный наномодифицированный мелкозернистый бетон / Е.Н. Прудков // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сборник научных трудов 9-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. – Минск: БНТУ. – 2013. – С. 405 – 411.

113. Bogas, J.A. Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates / J.A. Bogas, J. de Brito, D. Ramos // Source of the Document Journal of Cleaner Production. – 2013. – pp. 159-163.

114. Han, Li The study on the control of the early-stage crack of the concrete poured in winter in Shenyang subway / Li Han, Wen Zhao, Yu Zhao // International Conference on Structures and Building Materials (ICSBM 2013). – Guizhou. – 2013. – pp. 1135-1139.

115. Mehra, Priyansha. Properties of concrete containing jarosite as a partial substitute for fine aggregate / Priyansha Mehra, Ramesh Chandra Gupta // Journal of cleaner production. – 2016. – pp. 241-248.

116. Alexandre, B.J. Freeze-thaw resistance of concrete produced with finerecycled concrete aggregates / B.J. Alexandre, J. de Brito, Duarte Ramos // Journal of cleaner production. – 2016. – pp. 249-306.

117. Fan, Yingfang. Effects of nano-kaolinite clay on the freeze-thaw resistance of concrete / Yingfang Fan, Shiyi Zhang, Qi Wang // *Cement and composites*. – volume 62. – 2015. – pp. 1-12.
118. Yildirim, S.T. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates / S.T. Yildirim, C. Meyer, S. Herfellner // *Construction and building materials*. – volume 91. – 2015. – pp. 288-296.
119. Karakurt, Cenk. Freeze-thaw resistance of normal and high strength concretes produced with fly ash and silica fume / Cenk Karakurt, Yildirim Bayazit // *Advances in materials science and engineering*. – 2015. – pp. 456-500.
120. Tikkanen, Johanna. Freeze-thaw resistance of normal strength powder concretes / Johanna Tikkanen, Andrzej Cwirzen, Vesa Penttala // *Magazine of concrete research*. – volume 2. – 2015. – pp. 71-81.
121. Gesoglu, Mehmet. Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers / Mehmet Gesoglu, Erhan Guneyisi, Ganjeena Khoshnaw // *Construction and building materials*. – volume 73. – 2014. – pp. 19-24.
122. Kolio, A. Freeze – thaw resistance testing of concrete railway sleepers / A. Kolio, T. Rantala, J. Lahdensivu // *5th International Conference on Concrete Repair*. – Belfast. – 2014. – pp. 533-539.
123. Mardani-Aghabaglou, Ali. Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method / Ali Mardani-Aghabaglou, Ozge Andic-Cakir, Kambiz Ramyar // *Cement and concrete composites*. – volume 37. – 2013. – pp. 259-266.
124. Рамачандран, В.С. Добавки в бетон. Справочное пособие / В.С. Рамачандран. – М.: Стройиздат, 1988. – 291 с.
125. Won Min, Sik Yi. Characteristics of pore structure and chloride penetration resistance of concrete exposed to freezing-thawing / Sik Yi Won Min, Eunik Yang // *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. – volume 6. – 2012. – pp. 73-81.
126. Skripkiunas, Gintautas. The cement type effect on freeze - thaw and deicing aalt resistance of concrete / Gintautas Skripkiunas, Dzigita Nagrockiene, Giedrius Girskas //

11th International Scientific Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques. – Vilnius. – 2013. – pp. 1045-1051.

127. Fan, Xiaochun. Experimental research on the freeze-thaw resistance of basalt fiber reinforced concrete / Xiaochun Fan, Di Wu, Hu Chen // 4th International Conference on Structures and Building Materials. – Guangzhou. – 2014. – pp. 919-921.

128. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М.: Технопроект, 1998. – 560 с.

129. Пименов, А.И. Физико-механические свойства цементных композитов, модифицированных нанодобавкой / А.И. Пименов, Р.А. Ибрагимов, В.С. Изотов // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 1. – С. 128-130.

130. Хозин, В.Г. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов / В.Г. Хозин, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов // Строительные материалы. – 2015. – № 2. – С. 25-33.

131. Huo, Junfang. Experimental study on freeze-thaw resistance durability of high performance concrete / Junfang Huo, Xiaoxia Ji, Hui Yang // International Conference on Structures and Building Materials. – Guangzhou. – 2011. – pp. 393-397.

132. Pospichal, O. Freeze-thaw resistance of concrete with porous aggregate / O. Pospichal, B. Kucharczykova, P. Misak // 10th International Fatigue Conference. – Prague. – 2010. – pp. 521-529.

133. Войтович, Е. В. Проектирование состава композиционного гипсового вяжущего с применением наноструктурированного кремнеземного компонента (термодинамический аспект) / Е. В. Войтович, А. М. Айзенштадт // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 5. – С. 16-20.

134. Дегтев, Ю.В. Строительные материалы для архитектурной геоники / Ю.В. Дегтев, М.А. Фролова, А.А. Левченко, М.А. Попов // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 35. – С. 63-73.

135. Tuyan, Murat. Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate / Murat Tuyan, Ali Mardani-Aghabaglou, Kambiz Ramyar // Materials and design. – volume 53. – 2014. – pp. 983-991.

136. Su, Xiaoning. Research on frost-resistant durability of recycled concrete / Su Xiaoning // International Conference on Materials, Transportation and Environmental Engineering. – Taichung. – 2013. – pp. 315-318.

137. Алексашин, С.В. Повышение эксплуатационных свойств пластифицированных гидротехнических мелкозернистых бетонов. Подбор оптимального состава / С.В. Алексашин, Б.И. Булгаков, М.Н. Попова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1 (150) . – С. 195-201.

138. Пименов, А.И. Физико-механические свойства цементных композитов, модифицированных нанодобавкой / А.И. Пименов, Р.А. Ибрагимов, В.С. Изотов // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 1. – С. 128-130.

139. Сватовская, Л.Б. Повышение качества неавтоклавного пенобетона добавками наноразмера / Л.Б. Сватовская, А.М. Сычева, Н.Н. Елисеева // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2011. – № 1. – С. 50-62.

140. Баженов, Ю. М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: МГСУ, 2013. – 204 с.

141. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов. // Строительные материалы. – 2017. – № 1-2. – С. 62-67.

142. Rakhimova, N.R. Characterisation of ground hydrated portland cement based mortar as an additive to alkali-activated slag cement / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov // Cement and Concrete Composites. – 2015. – №57 (3) . – pp. 55-63.

143. Кальгин, А.А. Опыт использования отходов дробленого бетона в производстве бетонных и железобетонных изделий / А.А. Кальгин, М.А. Фахратов, В.И. Сохряков // Строительные материалы. – 2010. – № 6. – С. 32-33.

144. Хохряков, О.В. Изучение дисперсного состава минеральных компонентов цементов низкой водопотребности после их получения / О.В. Хохряков, Д.И. Баишев, В.Г. Хозин // Известия КГАСУ. – 2013. – № 4 (26) . – С. 252-256.

145. Cai, Liangcai. Freeze-thaw resistance of alkali-slag concrete based on response surface methodology / Liangcai Cai, Haifu Wang, Yawei Fu // *Construction and building materials*. – volume 49. – 2013. – pp. 70-76.

146. Чан, Т.М. Самоуплотняющиеся бетонные смеси для дорожного строительства / Т.М. Чан, В.Ф. Коровяков // *Вестник МГСУ*. – 2012. – № 3. – С. 131-137.

147. Зотов, А.Н. Исследование прочностных свойств мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй для дорожного строительства / А.Н. Зотов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2015. – № 8. – С. 42-46.

148. Зотов, А.Н. Прочностные свойства мелкозернистых бетонов с модифицированной полипропиленовой фиброй / А.Н. Зотов // *Техника и технологии: роль в развитии современного общества: сб. тр. IV междунар. науч.-практ. конф.* – Краснодар. – 2015. – С. 132.

149. Halvaei, Mana. Investigation on pullout behavior of different polymeric fibers from fine aggregates concrete / Mana Halvaei, Masoud Jamshidi, Masoud Latifi // *Journal of industrial textiles*. – 2016. – pp. 995-1008.

150. Постникова, О.А. Техничко-экологическое обоснование использования техногенного сырья для производства мелкозернистого бетона, модифицированного нанодисперсным диоксидом титана / О.А. Постникова, Н.П. Лукутцова, А.А. Мацаенко, Д.А. Кириенков // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. – 2013. – № 3. – С. 43-47.

151. Красиникова, Н.М. Исследование размолоспособности сухих смесей для пенобетона / Н.М. Красиникова, Е.В. Хозина, В.Г. Хозин, Н.М. Морозов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2015. – Т. 18. – № 8. – С. 187-190.

152. Шабанова, Н.А. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема / Н.А. Шабанова, П.Д. Саркисов. – М.: Академкнига. – 2004. – 208 с.

153. Киски, С.С. Исследование возможности модификации карбосиликатных пластификаторов в составе модифицированных мелкозернистых бетонных смесей / С.С. Киски, И.В. Агеев, А.Н. Пономарев // *Инженерно-строительный журнал*. – 2012. – №8. – С. 42-46.

154. Габидуллин, М.Г. Влияние добавки наномодификатора на основе углеродных нанотрубок на прочность цементного камня / М.Г. Габидуллин, А.Ф. Хузин, Н.М. Сулейманов, П.Н. Тогулев // Известия КГАСУ. – 2011. – № 2 (16). – С. 185-189.
155. Посухова, Т.В. Отходы алмазодобывающей промышленности: минеральный состав и способы утилизации / Т.В. Посухова, С.А. Дорофеев, К.В. Гаранин, С. Гао // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2013. – № 2. – С. 38-48.
156. Шпилевая, Д. В. Геологическое строение, минеральный состав и эколого-экономические аспекты освоения трубки Архангельская: месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова: дис. ... канд. геолого-минер. наук: 25.00.11 / Шпилевая Дарья Сергеевна. – Москва. – 2008. – 150 с.
157. Карпенко, Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова: дис. ... канд. геолого-минер. наук: 25.00.08 / Карпенко Федор Сергеевич. – Москва. – 2009. – 155 с.
158. Тутыгин, А.С. Влияние природы электролита на процесс коагуляции сапонит-содержащей суспензии / А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, Т.А. Махова // Геоэкология. – №5. – 2012. – С. 379-383.
159. Тутыгин, А.С. Осветление сапонит-содержащей суспензии методом электронной коагуляции / А.С. Тутыгин, А.А. Шинкарук, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, Т.А. Махова // Вода: химия и экология. – 2013. – № 5. – С. 93-99.
160. Lesovik, V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development / V. Lesovik, A. Ayzenshtadt, M. Frolova, R. Lesovik, V. Stroikova // The Open Ecology Journal. – 2014. – № 7. – p. 32-36.
161. Вешнякова, Л.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов / Л.А. Вешнякова, М.А. Фролова, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, Т.А. Махова // Строительные материалы. – 2012. – №10. – С. 21-23.
162. Коршунов, А.А. Исследование седиментации тонкодисперсных отходов обогащения кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова / А.А.

Коршунов // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. – 2009. – Вып. 16 (35). – С. 177-182.

163. Viani, A. The nature of disorder in montmorillonite by simulation of X-ray powder patterns / A. Viani, A. Gualtieri, G. Artioli // American Mineralogist. – 2002. – vol.87. – pp. 966-975.

164. Зимон, А.Д. Коллоидная химия: Учебник для вузов / А.Д. Зимон. – 3-е изд., доп. и исправл. – М.:Агар, 2003. – 320 с.

165. Строкова, В.В. Наночастицы в строительном материаловедении / Строкова В.В., Жерновский И.В., Череватова А.В. – Санкт-Петербург. – 2017. – 125 С.

166. Строкова, В.В. Свойства композиционного вяжущего на основе наноструктурированной суспензии / В.В. Строкова, Д.Д. Нецвет, В.В. Нелюбова, И.В. Серенков // Строительные материалы. – 2017. – № 1-2. – С. 50-54.

167. Аксенов, С.Е. Строительные материалы. Лабораторный практикум / С.Е. Аксенов, И.Ю. Заручевных. – Архангельск: изд-во АГТУ, 2003. – 92 с.

168. Рыжонков, Д.И. Наноматериалы / Д.И. Рыжонков. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 365 с.

169. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский. – М.: Издательский центр «Академия». – 2005. – 192 с.

170. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.

171. Глезер, А.М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходство, различия, взаимные переходы / А.М. Глезер // Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2002. – т. XLVI. – №5. – С. 57-63.

172. Строкова, В.В. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем / В.В. Строкова, А.В. Череватова, И.В. Жерновский, Е.В. Войтович // Строительные материалы. – 2012. – № 7. – С. 9–12.

173. Вешнякова, Л.А. Оптимизация гранулометрического состава смесей для получения мелкозернистых бетонов / Л.А. Вешнякова, А.М. Айзенштадт // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 10. – С. 19–22.

174. Вешнякова, Л.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов / Л.А. Вешнякова, А.М.



Айзенштадт, М.А. Фролова // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 2. – С. 68-72.

175. Савченко, М.О. Инфракрасные спектры поглощения нанодисперсного кремнезема с органическими добавками / М.О. Савченко, О.П. Мысов, И.М. Черненко, В.Г. Олейников // Химия. Химическая технология. – 2014. – выпуск 2 (44). – С. 185-190.

176. Чукин Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма / Г.Д. Чукин. – М.: Паладин, 2008. – 172 с.

177. Дроздюк, Т.А. Неорганическое связующее для минеральной теплоизоляции / Т.А. Дроздюк, А.М. Айзенштадт, А.С. Тутыгин, М.А. Фролова // Строительные материалы. – 2015. – № 5. – С. 86-89.

178. Lesovik, V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development / V. Lesovik, A. Ayzenshtadt, M. Frolova, R. Lesovik, V. Strokovva // The Open Ecology Journal. – 2014. – № 7. – pp. 32-36.

179. Лесовик, В.С. Поверхностная активность горных пород / В.С. Лесовик, М.А. Фролова, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2013. – № 11. – С. 71-74.

180. Ушеров-Маршак, А.В. Бетонovedение: лексикон / А.В. Ушеров- Маршак. – М.: РИФ Стройматериалы, 2009. – 112 с.

181. Фролова, М.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности / М.А. Фролова, А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, Т.А. Махова, Т.А. Поспелова // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – № 2 (4) . – С. 120 – 125.

182. Абрамовская, И.Р. Расчет энергоемкости горных пород — как сырья для производства строительных материалов / И.Р. Абрамовская, А.М. Айзенштадт, В.С. Лесовик, Л.А. Вешнякова, М.А. Фролова, С.А. Казлитин // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 10. – С. 23 – 25.

183. Кафтаева, М.В. Термодинамический анализ реакции образования тоберморита в известково-песчаных материалах автоклавного твердения / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев // Технологии бетонов. – 2016. – № 3-4. – С. 48-51.

184. Садрашева А.О. Гидросиликаты кальция (C-S-H) как основная фаза твердения портландцемента / А.О. Садрашева // Ползуновский альманах. – 2016. – № 3. – С. 193-196.
185. Задов, А.Е. Новые находки и исследования минералов группы тоберморита / А.Е. Задов, Н.В. Чуканов // Записки всероссийского минералогического общества. Часть 124. – выпуск 2. – 1995. – С. 36-54.
186. Stoppa, F. Calcium-aluminum-silicate-hydrate cement phases and rare Ca-zeolite association at Colle Fabbri, Central Italy / F. Stoppa, F. Scordari, E. Mesto, V.V. Sharygin, G. Bortolozzi // Central Europe-an Journal of Geosciences. – 2010. – № 2(2). – С. 175-180.
187. Садрашева, О.А. Гидросиликаты кальция как основная фаза твердения портландцемента / О.А. Садрашева // Ползуновский Альманах.– 2016. – №3. – С. 193-196.
188. Государственная программа РФ «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации».

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А. Перечень нормативных документов, на которые даны ссылки

Тип и номер документа	Наименование	Пункт употребления
ГОСТ 5180-2015	Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик	п.2.1; п.2.2.2.1; п.2.2.3.2
ГОСТ 8735-88	Песок для строительных работ. Методы испытаний	п.2.1; п.2.2.2.1
ГОСТ 23732-2011	Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия	п.2.2
ГОСТ 31108-2016	Цементы общестроительные. Технические условия	п.2.2.1; п.4.1; п.5.3
ГОСТ 30515-13	Цементы. Общие технические условия	п.2.2.1; п.4.1; п.5.3
ГОСТ 30459-2008	Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности	п.2.2.1; п.2.2.2.1; п.5.3
ГОСТ 23732-2011	Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия	п.2.2.1; п.2.3.1; п.4.1; п.5.3
ГОСТ 8736-2014	Песок для строительных работ. Технические условия	п.2.2.2.1; п.4.1
ГОСТ 3956-76	Силикагель технический. Технические условия	п.2.2.3.5
ГОСТ 27006-86	Бетоны. Правила подбора состава	п.2.3.1; п.4.2
ГОСТ 10181-2014	Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости	п.2.3.1; п.2.3.2; п.4.2
ГОСТ 10178-85	Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия	п.2.3.1
ГОСТ 10268-80	Бетон тяжелый. Технические требования к заполнителям	п.2.3.1
ГОСТ 310.4-81	Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии	п.2.3.1
ГОСТ 7473-2010	Смеси бетонные. Технические условия	п.2.3.3; п.4.2
ГОСТ 22685-89	Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия	п.2.3.3
ВСН-05-64	Рекомендации по учету влияния возраста бетона на его технические свойства	п.2.3.3
ГОСТ 10180-2012	Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам	п.2.4.1; п.3.7; п.4.3
ГОСТ 10060-2012	Бетоны. Методы определения морозостойкости	п.2.4.2; п.3.8; п.4.3.1
ГОСТ 12730.3-78	Бетоны. Методы определения водопоглощения	п.2.4.3; п.4.3.2
ГОСТ 12730.5-84	Бетоны. Методы определения водонепроницаемости	п.2.4.3; п.4.3.2

<b>Тип и номер документа</b>	<b>Наименование</b>	<b>Пункт употребления</b>
ГОСТ 13087-81	Бетоны. Методы определения истираемости	п.2.4.3; п.4.3.2
ГОСТ 25485-89	Бетоны ячеистые. Технические условия	п.2.4.3; п.4.3.2
ГОСТ Р 56587-2015	Смеси бетонные. Метод определения сроков схватывания	п.4.2
ГОСТ 24452-80	Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона	п.4.3

**Приложение Б. Патент на полезную модель №156792. Устройство для измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 156792

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И  
НАБУХАНИЯ ОБРАЗЦОВ РЫХЛЫХ И СЫПУЧИХ  
МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова" (САФУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014142701

Приоритет полезной модели 22 октября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 22 октября 2015 г.

Срок действия патента истекает 22 октября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **156 792** <sup>(13)</sup> **U1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(51) МПК  
[G01N 33/00 \(2006.01\)](#)  
[G01N 15/08 \(2006.01\)](#)

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

<p>(21)(22) Заявка: <a href="#">2014142701/15</a>, 22.10.2014</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 22.10.2014</p> <p>Приоритет(ы):</p> <p>(22) Дата подачи заявки: 22.10.2014</p> <p>(45) Опубликовано: <a href="#">20.11.2015</a> Бюл. № <a href="#">32</a></p> <p>Адрес для переписки: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, N 04.1.2, инженер по патентной и изобретательской работе, САФУ</p>	<p>(72) Автор(ы): Данилов Виктор Евгеньевич (RU), Морозова Марина Владимировна (RU), Тутыгин Александр Сергеевич (RU), Айзенштадт Аркадий Михайлович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова" (САФУ) (RU)</p>
---	--

## (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И НАБУХАНИЯ ОБРАЗЦОВ РЫХЛЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

## (57) Реферат:

Полезная модель относится к измерительному оборудованию, а именно, к устройствам для полуавтоматизированного измерения водопоглощения и набухания образцов рыхлых и сыпучих материалов. Устройство содержит корпус в виде барабана, на котором закреплены емкости для испытуемого материала в виде мерных прозрачных цилиндров, измерительный узел, включающий источник и приемник света, персональный компьютер с программным обеспечением, узлы подъема, узел перемешивания образцов и подачи воды. Предлагаемое устройство позволяет измерять с требуемой точностью водопоглощение и набухаемость образцов рыхлых и сыпучих материалов, наблюдать за динамикой процессов водопоглощения и набухания, проводить до трех параллельных испытаний, автоматизировать процессы дозирования, подачи воды, перемешивания суспензии, измерения изменения объемов реакционной смеси и вычисления показателей. 1 с.п. ф-лы, 2 илл.

## Приложение В. Протокол определения среднего размера частиц сапонит-содержащего материала на анализаторе субмикронных частиц Delsa Nano C (средний размер частиц 445±40 нм.)



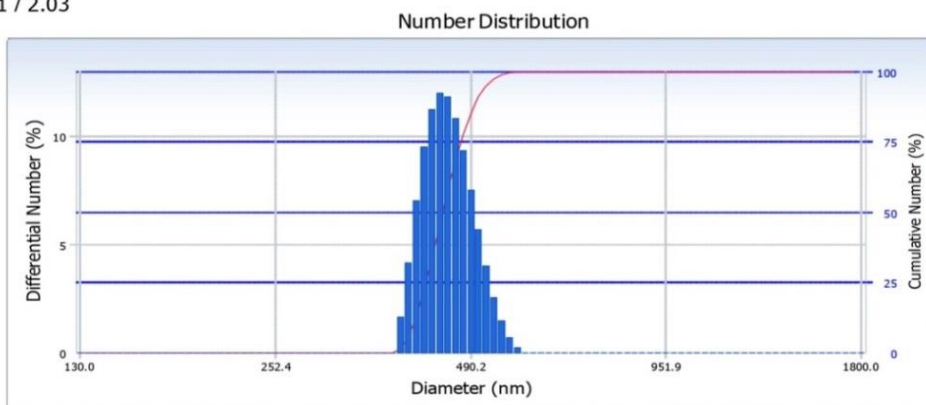
**Delsa™ Nano**  
Common

Number Distribution

S/N : 130510

User : Common	Group :	Repetition : 1/1
Date : 02/22/2014	File Name : 90saponit	
Time : 09:38:50	Sample Information :	
SOP Name : SOP(1)	Security : No Security	

Version 2.31 / 2.03



**Distribution Results (Contin)**

Peak	Diameter (nm)	Std. Dev.
1	445.0	40.0
2	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
Average	445.0	40.0

Residual : 9.647e-003 (O.K)

**Cumulants Results**

Diameter (d)	: 766.6	(nm)
Polydispersity Index (P.I.)	: -3.548	
Diffusion Const. (D)	: 6.433e-009	(cm <sup>2</sup> /sec)
<b>Measurement Condition</b>		
Temperature	: 25.1	(°C)
Diluent Name	: WATER	
Refractive Index	: 1.3328	
Viscosity	: 0.8858	(cP)
Scattering Intensity	: 8848	(cps)

**Number Distribution Table**

d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)
130.0	0.0	0.0	252.4	0.0	0.0	490.2	7.5	85.3	951.9	0.0	100.0
133.5	0.0	0.0	259.2	0.0	0.0	503.4	5.7	91.0	977.5	0.0	100.0
137.1	0.0	0.0	266.2	0.0	0.0	516.9	4.0	95.0	1003.8	0.0	100.0
140.8	0.0	0.0	273.4	0.0	0.0	530.8	2.6	97.5	1030.8	0.0	100.0
144.6	0.0	0.0	280.7	0.0	0.0	545.1	1.5	99.0	1058.5	0.0	100.0
148.5	0.0	0.0	288.3	0.0	0.0	559.8	0.7	99.7	1087.0	0.0	100.0
152.4	0.0	0.0	296.0	0.0	0.0	574.8	0.3	100.0	1116.2	0.0	100.0
156.5	0.0	0.0	304.0	0.0	0.0	590.3	0.0	100.0	1146.3	0.0	100.0
160.8	0.0	0.0	312.2	0.0	0.0	606.2	0.0	100.0	1177.1	0.0	100.0
165.1	0.0	0.0	320.6	0.0	0.0	622.5	0.0	100.0	1208.8	0.0	100.0
169.5	0.0	0.0	329.2	0.0	0.0	639.2	0.0	100.0	1241.3	0.0	100.0
174.1	0.0	0.0	338.0	0.0	0.0	656.4	0.0	100.0	1274.7	0.0	100.0
178.8	0.0	0.0	347.1	0.0	0.0	674.1	0.0	100.0	1309.0	0.0	100.0
183.6	0.0	0.0	356.5	0.0	0.0	692.2	0.0	100.0	1344.2	0.0	100.0
188.5	0.0	0.0	366.1	0.0	0.0	710.8	0.0	100.0	1380.3	0.0	100.0
193.6	0.0	0.0	375.9	0.0	0.0	730.0	0.0	100.0	1417.5	0.0	100.0
198.8	0.0	0.0	386.0	1.7	1.7	749.6	0.0	100.0	1455.6	0.0	100.0
204.1	0.0	0.0	396.4	4.2	5.8	769.8	0.0	100.0	1494.8	0.0	100.0
209.6	0.0	0.0	407.1	7.0	12.9	790.5	0.0	100.0	1535.0	0.0	100.0
215.3	0.0	0.0	418.0	9.5	22.4	811.7	0.0	100.0	1576.3	0.0	100.0

D (10%) : 402.7 (nm)    D (50%) : 445.1 (nm)    D (90%) : 501.1 (nm)

## Приложение Г. Протокол по определению удельной поверхности высокодисперсного сапонит-содержащего материала на анализаторе Autosorb-iQ-MP (средний размер частиц образца $445 \pm 40$ нм)

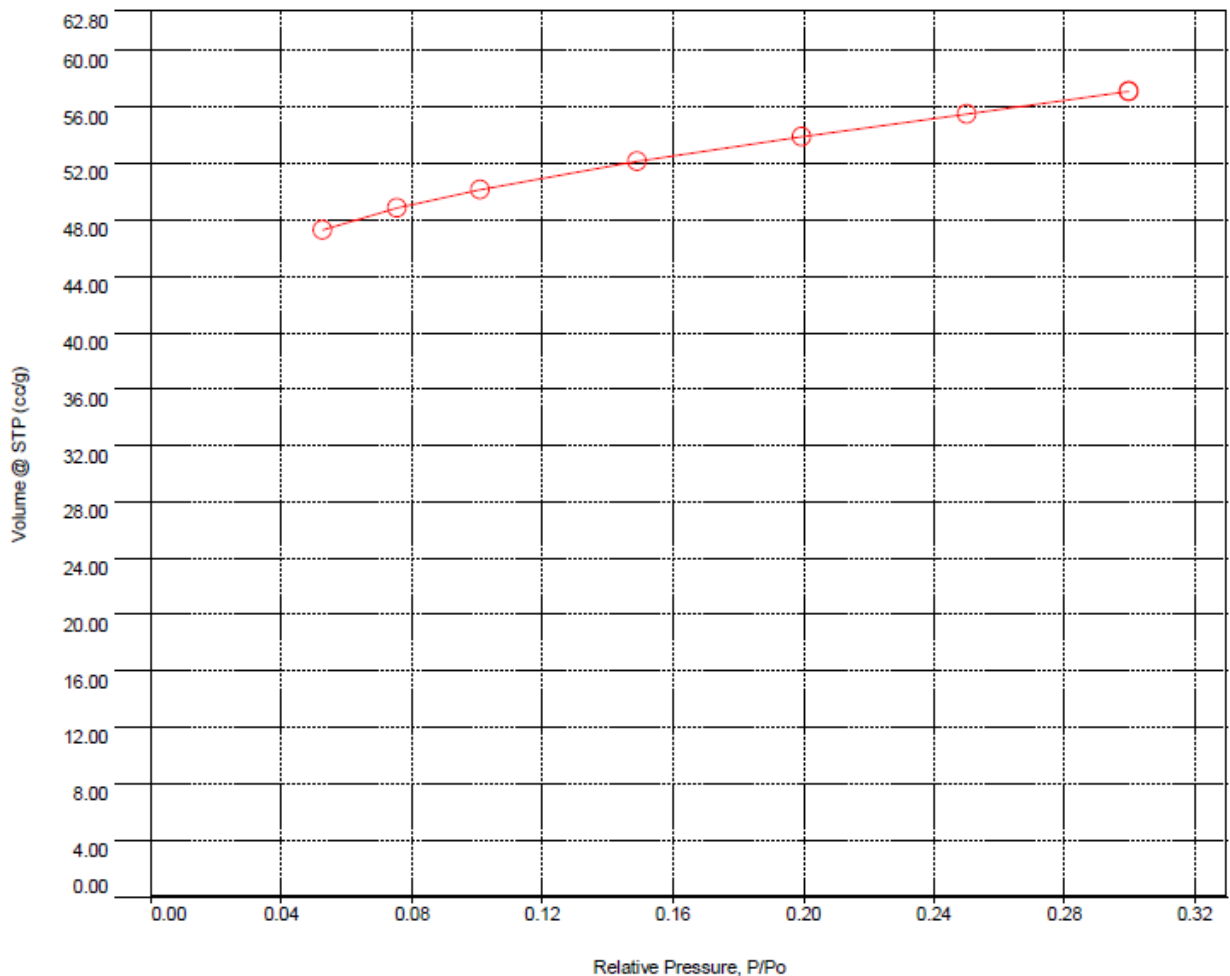
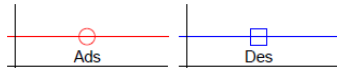
Quantachrome® ASiQwin™- Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2011, Quantachrome Instruments  
version 2.0



<b>Analysis</b>		<b>Report</b>					
Operator:	SAFU	Date:	2012/11/12	Operator:	SAFU	Date:	2014/06/10
Sample ID:	SSM_700_12_11_12	Filename:	SSM_800_12_11_12.qps				
Sample Desc:		Comment:	STANDART				
Sample Weight:	0.0654 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1				
Approx. Outgas Time:	6.4 hrs	Final Outgas Temp.:	250 °C	Extended info:	Available		
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/mmHg	CellType:	9mm		
Analysis Time:	0:22 hr:min	Bath temp.:	77.35 K	VoidVol Remeasure:	off		
Analysis Mode:	Standard			Warm Zone V:	7.83272 cc		
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	1.39328 cc				

### Isotherm : Linear

Adsorbate	Data Reduction Parameters			
Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 E	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
Nitrogen	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 EI		





Quantachrome® ASiQwin™ - Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2011, Quantachrome Instruments  
version 2.0

**Analysis**

Operator: SAFU  
Sample ID: SSM\_700\_12\_11\_12  
Sample Desc:  
Sample Weight: 0.0654 g  
Approx. Outgas Time: 6.4 hrs  
Analysis gas: Nitrogen  
Analysis Time: 0:22 hr:min  
Analysis Mode: Standard  
VoidVol. Mode: He Measure

Date: 2012/11/12

Filename:

Comment:

Instrument:

Final Outgas Temp.: 250 °C

Non-ideality: 6.58e-05 1/mmHg

Bath temp.: 77.35 K

Cold Zone V: 1.39328 cc

**Report**

Operator: SAFU  
Sample ID: SSM\_800\_12\_11\_12.qps  
Sample Desc: STANDART  
Instrument: Autosorb iQ Station 1  
Final Outgas Temp.: 250 °C  
Non-ideality: 6.58e-05 1/mmHg  
Bath temp.: 77.35 K

Date: 2014/06/10

Extended info: Available

CellType: 9mm

VoidVol Remeasure: off

Warm Zone V: 7.83272 cc

**Multi-Point BET****Data Reduction Parameters Data**

<b>Adsorbate</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 E	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
	Nitrogen	Temperature 77.350K	Liquid Density: 0.808 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 EI	

**Multi-Point BET Data**

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [ W((Po/P) - 1) ]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
5.27151e-02	47.2819	9.4171e-01	1.99547e-01	53.9064	3.7002e+00
7.55452e-02	48.8209	1.3393e+00	2.50122e-01	55.5146	4.8074e+00
1.01019e-01	50.1460	1.7930e+00	2.99707e-01	57.0811	5.9990e+00
1.49189e-01	52.1396	2.6909e+00			

**BET summary**

Slope = 20.315  
Intercept = -2.344e-01  
Correlation coefficient, r = 0.998564  
C constant = -85.673  
Surface Area = 50.670 ml/g

**Приложение Д. Протокол по определению величины водопоглощения высокодисперсного сапонит-содержащего материала на экспериментальной установке (средний размер частиц образца 445 нм)**

БЕТА версия

САФУ  
имени М.В. Ломоносова

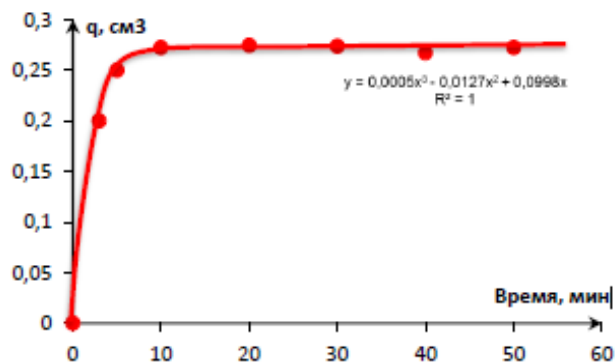
**ПРОТОКОЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ**

Параметры измерений		Характеристика образца и жидкости			
Пользователь:	m.morozova	№ пробы	Масса, г	Объём пробы, см <sup>3</sup>	Объём воды, см <sup>3</sup>
Дата:	23.04.2015	1	102.03	39.8555	80
Время:	09:43	2	100.19	39.1367	78
Имя образца:	silikagel	3	103.45	40.4102	81
Используемая жидкость:	water				

**Изменение объёмов реакционной смеси**

№ пробы	Время выдержки реакционной смеси, мин	Суммарное изменение объёма, см <sup>3</sup>		$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$q$ , см <sup>3</sup> /г	$q_{cp}$ , см <sup>3</sup> /г
		до	после			
1	10	119.8555	92.0155	27.8	0.2729	0.2724
2		117.1367	89.4167	27.7	0.2767	
3		121.4102	93.7202	27.7	0.2677	
1	20	119.8555	94.5455	25.3	0.2481	0.2452
2		117.1367	92.9467	24.2	0.2414	
3		121.4102	95.9602	25.5	0.2460	
1	30	119.8555	98.7655	21.1	0.2067	0.2094
2		117.1367	96.5067	20.6	0.2059	
3		121.4102	99.1102	22.3	0.2156	
1	40	119.8555	102.7655	17.1	0.1675	0.1733
2		117.1367	98.7167	18.4	0.1839	
3		121.4102	103.9702	17.4	0.1686	
1	50	119.8555	109.4755	10.4	0.1017	0.1058
2		117.1367	106.2467	10.9	0.1087	
3		121.4102	110.3502	11.1	0.1069	

**Функциональная зависимость удельного массового изменения объёмов реакционной системы ( $q$ ) от времени выдержки ( $t$ )**



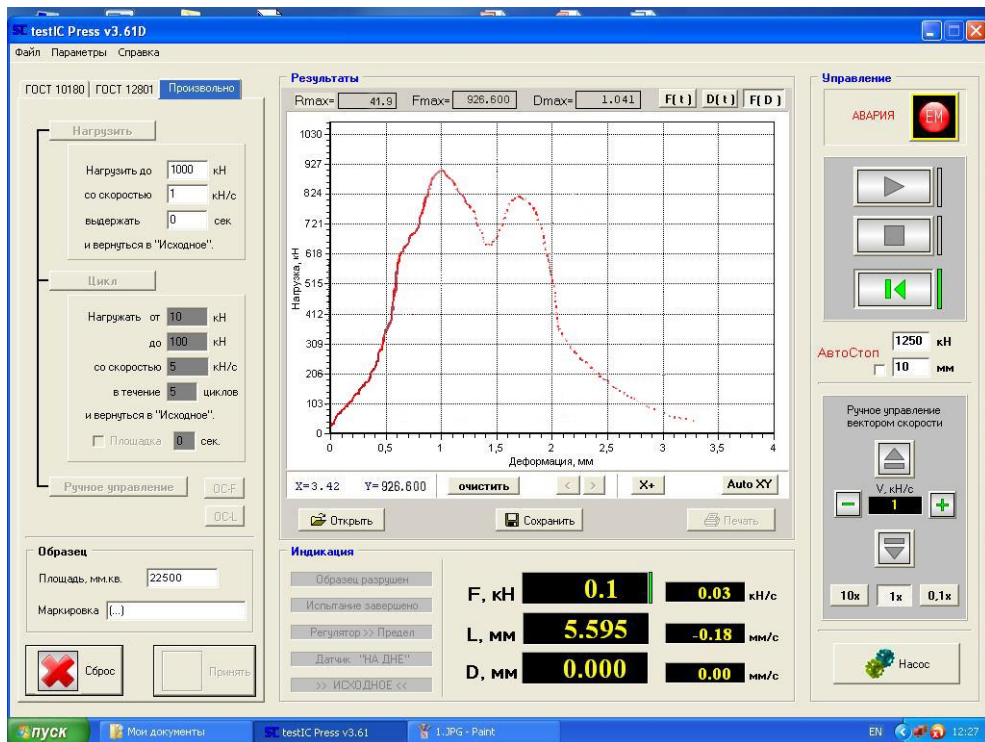
Уравнение скорости процесса водопоглощения опытных образцов:

$$y' = 0.0015x^2 - 0.0254x + 0.0998$$

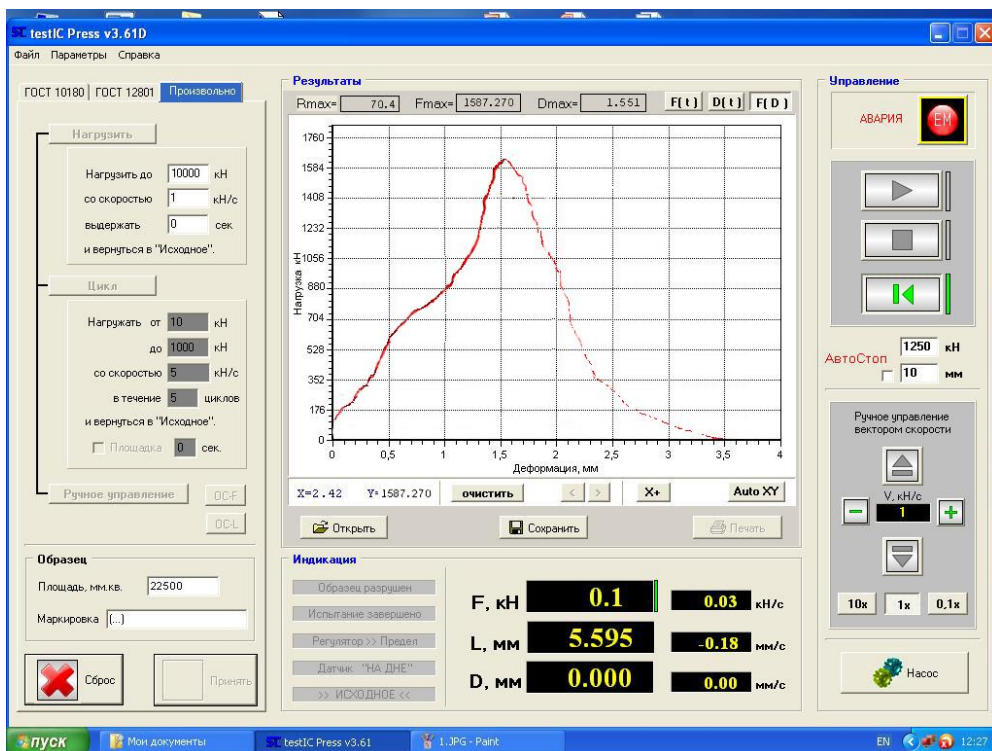
Максимальное водопоглощение: 0.2724 см<sup>3</sup>/г

Время, прошедшее до максимального водонасыщения: 10 мин.

## Приложение Е. Протокол по определению прочности бетонных образцов на сжатие



а



б

Рисунок Е.1 – Отчет испытания образца разрушающей нагрузкой на сжатие, в возрасте 28 сут: а) график прочности бетона контрольного состава; б) график прочности бетона опытного состава

**Приложение Ж. НОУ-ХАУ №КТ 2017-01 «Смесь для получения морозостойкого бетона высокого класса прочности»**

КТ ФГАОУ ВО САФУ  
имени М.В. Ломоносова

Экз. № \_\_

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**УТВЕРЖДЕНО**  
распоряжением ректора  
университета  
от 22.03.2017 № 1

**Смесь для получения морозостойкого бетона  
высокого класса прочности.**

КТ 2017- 01

Для служебного пользования  
Экз. единственный

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

## РАСПОРЯЖЕНИЕ

«11» марта 2017 года

№ 1

г. Архангельск

### Об отнесении сведений к категории коммерческой тайны университета

Во исполнение Федерального закона от 29 июля 2004 года № 98-ФЗ «О коммерческой тайне», на основании требований приказа ректора от 22 октября 2013 года № 981 «Об утверждении Положения о коммерческой тайне ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет» имени М.В. Ломоносова и режиме ее обеспечения», **предписываю:**

1. Отнести к категории коммерческой тайны Университета сведения, касающиеся документа № КТ 2017-01 (УН-32) «Смесь для получения морозостойкого бетона высокого класса прочности».

2. Установить срок охраны указанных сведений - 5 лет с даты издания настоящего распоряжения.

3. Назначить заведующего кафедрой композиционных материалов и строительной экологии, д.х.н., профессора А.М. Айзенштадта ответственным за проведение мероприятий по охране указанных сведений, в том числе за взаимодействие с отделом по комплексной защите информации управления информационно-коммуникационных технологий.

4. Назначить заведующего кафедрой композиционных материалов и строительной экологии, д.х.н., профессора А.М. Айзенштадта лицом, осуществляющим хранение и выдачу носителей защищаемой информации.

5. Место хранения документов, составляющих коммерческую тайну, определить по адресу: 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 22, аудитория 2407, шкаф металлический М0600041242.

6. Контроль за исполнением распоряжения возложить на проректора по научной работе Филиппова Б.Ю.

Ректор



Е.В.Кудряшова

**Приложение 3. СТО 10-27.1.5-2018 Минеральная добавка. Технические условия**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова»

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ****УТВЕРЖДАЮ**

Ректор

д-р филос. наук, проф.

Е.В. Кудряшова

2018 г.

**СОГЛАСОВАННО**

Проректор по научной работе

д-р биолог. наук, доцент

Б.Ю. Филиппов

« 02 » февраля 2018 г.

**МИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА**

Технические условия

СТО 10-27.1.5-2018

Архангельск 2018

**Приложение И. СТО 11-27.1.5-2018 Мелкозернистый бетон с использованием минеральной добавки. Технические условия**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова»**

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**

УТВЕРЖДАЮ

Ректор

д-р филос. наук, проф.

Е.В. Кудряшова

« 02 » *февраль* 2018 г.



СОГЛАСОВАННО

Проректор по научной работе

д-р биолог. наук, доцент

Б.Ю. Филиппов

« 02 » *февраль* 2018 г.

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ**

Технические условия

СТО 11-27.1.5-2018

Архангельск 2018

## Приложение К. Акт о внедрении результатов научной работы в производство

Общество с ограниченной ответственностью «Динамика»



УТВЕРЖДАЮ

Директор  
Кожуков А.А.

### АКТ

#### О внедрении результатов научной работы «Повышение эксплуатационных характеристик мелкозернистых бетонов с использованием отходов алмазодобывающей промышленности»

г. Архангельск

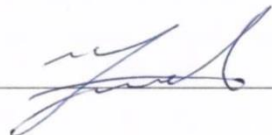
« 17 » февраля 2016 г.

Мы, нижеподписавшиеся, директор ООО «Динамика» Кожуков А.А., сотрудники САФУ имени М.В. Ломоносова канд. хим. наук, доцент Фролова М.А., д-р. хим. наук, проф. Айзенштадт А.М., ассистент кафедры композиционных материалов и строительной экологии Морозова М.В. составили настоящий акт о внедрении результатов научной работы «Повышение эксплуатационных характеристик мелкозернистых бетонов с использованием отходов алмазодобывающей промышленности»

ООО «Динамика» приняло к внедрению разработанные составы для получения мелкозернистого бетона с использованием отходов алмазодобывающей промышленности для получения стеновых панелей



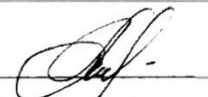
«От ООО «Динамика»  
Ген. директор

 Кожуков А.А.

От САФУ имени М.В. Ломоносова  
Доцент, канд. хим. наук

 Фролова М.А.

Профессор, д-р. хим. наук

 Айзенштадт А.М.

Ассистент

 Морозова М.В.



## Приложение Л. Справка о внедрении результатов научной работы в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Директор  
Высшей инженерной школы  
С.Е. Аксенов  
«01» сентября 2017 г.

### СПРАВКА

О внедрении результатов научной работы  
в учебный процесс

Теоретические положения диссертационной работы Морозовой М.В. на тему: «Повышение эффективности мелкозернистый бетон за счёт использования сапонит-содержащего отхода», используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» профили «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» и «Экологическая безопасность строительства» и магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» магистерские программы «Строительство в северных климатических условиях», «Промышленное и гражданское строительство в холодном климате», что отражено в учебных программах дисциплин «Наносистемы и нанотехнологии в строительстве», «Наноматериалы в строительстве», «Материаловедение наноструктурированных материалов» и «Наноконпозиционные строительные материалы».

Зав. кафедрой композиционных  
материалов и строительной экологии  
д-р. хим. наук, профессор

Айзенштадт А.М.