

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



АЛЬ МАМУРИ СААД КХАЛИЛ ШАДИД

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ВЕРМИКУЛИТОВЫЙ РАСТВОР
НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ**

Специальность 2.1.5 – «Строительные материалы и изделия»

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Загороднюк Л. Х.**

Белгород – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1 Проблемы создания теплового комфорта зданий и сооружений в странах Ближнего Востока.....	11
1.2 Современные теплоизоляционные материалы	24
1.3 Теплоизоляционные растворы с использованием вермикулита.....	34
1.4 Выводы по 1 главе	43
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	46
2.1 Характеристика применяемых сырьевых материалов.....	46
2.2 Оборудование и методы исследований.....	52
3 КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА	56
3.1 Вяжущие композиции с использованием вермикулита	56
3.1.1 Разработка составов вяжущих композиций.....	56
3.1.2 Дисперсные характеристики вяжущей композиции.....	60
3.1.3 Исследование фазовых продуктов гидратации вяжущей композиции.....	62
3.1.4 Исследование микроструктуры вяжущих композиций	63
3.2 Зондовые исследования	71
3.3 Получение композиционного вяжущего.....	83
3.4 Изучение кинетики тепловыделения композиционного вяжущего	83
3.5 Выводы по главе 3	88
4 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАСТВОРОВ.....	92
4.1 Получение теплоизоляционного раствора с использованием метода математического планирования	93
4.1.1 Модель зависимости плотности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов.....	94
4.1.2 Модель зависимости прочности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов.....	108
4.2 Изучение микроструктуры теплоизоляционных растворов	120
4.3 Выводы по главе 4	122
5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ РАСТВОРЫ.....	124
5.1 Изучение процесса смешения и выбор оборудования.....	124
5.2 Модель зависимости плотности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов.....	131
5.2.1 Условия планирования эксперимента	131
5.2.2 Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости.....	131
5.2.3 Проверка адекватности уравнений регрессии.....	135
5.2.4 Анализ уравнений регрессии.....	136
5.2.5 Построение зависимостей выходных параметров от исследуемых факторов	138

5.3 Модель зависимости прочности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов	144
5.3.1 Условия планирования эксперимента	144
5.3.2 Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости	144
5.3.3 Проверка адекватности уравнений регрессии	148
5.3.4 Анализ уравнений регрессии	149
5.3.5 Построение зависимостей выходных параметров от исследуемых факторов	151
5.4 Технологическая схема производства теплоизоляционных растворов	157
5.5 Сравнительный анализ свойств и характеристик теплоизоляционных штукатурных растворов с использованием вермикулита	158
5.6 Разработка нормативно-технической документации и апробация	160
5.7 Экономическая эффективность принятого технического решения	161
5.8 Выводы по главе 5	168
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	173
ПРИЛОЖЕНИЯ	187
Приложение А. Патент на полезную модель №214199 «Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов»	187
Приложение Б. Акт о выпуске полупромышленной партии «Композиционных вяжущих для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита»	188
Приложение В. Акт о выпуске полупромышленной партии теплоизоляционной смеси «Теплоизоляционная смесь с использованием вермикулита»	189
Приложение Г. Технические условия «Композиционного вяжущего для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита»	190
Приложение Д. Технологический регламент производства композиционных вяжущих для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита	191
Приложение Е. Технические условия «Сухие теплоизоляционные смеси с использованием вермикулита»	192
Приложение Ж. Технологический регламент производства сухих теплоизоляционных смесей с использованием вермикулита	193
Приложение З. Акт о внедрении результатов научной работы «Композиционные вяжущие для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита» компании «Alaghar Company for General Contracting Ltd»	194
Приложение И. Акт о внедрении результатов научной работы губернатора город Кербела	195
Приложение К. Рекомендации по устройству теплозащитных покрытий	196

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Анализ энергопотребления в жилых и гражданских зданиях жителями стран Ближнего Востока указывает на то, что большая часть электроэнергии потребляется для целей охлаждения, что связано с характерным жарким и сухим климатом. Теплоизоляция оказывает значительное влияние на сокращение теплопередачи с внешней части здания во внутренние помещения и, тем самым, снижает энергопотребление, используемое для создания комфортных условий для жизнедеятельности людей. Поскольку проблема энергопотребления и стоимость электроэнергии в странах Ближнего Востока весьма высока, вопросы теплоизоляции зданий и сооружений представляют серьезную задачу, требующую своего решения. Для реализации поставленной цели необходимо разработать эффективный теплоизоляционный раствор на композиционном вяжущем с использованием вермикулита. Разработка технологии теплоизоляционных штукатурных растворов позволит решить задачу теплоизоляции зданий и значительного снижения энергозатрат на создание комфортных условий для жизнедеятельности людей.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова № А 2/16, с использованием оборудования ЦКП БГТУ им. В.Г. Шухова при содействии сотрудников Центра высоких технологий (государственное задание № 11.9329.2017/БЧ), за счет гранта РНФ № 22-19-20115.

Степень разработанности темы. Задачами разработки рецептурно-технологических решений, изучением возможности влияния на изменение плотности теплоизоляционных растворов за счет регулирования зернового состава вермикулита, а также изменением плотности цементно-вермикулитовой растворной части при неизменной пористости зерен заполнителей, исследованиями формирования пористости теплоизоляционного раствора на начальных и последующих этапах структурообразования занимались многие научные школы и ученые. Несмотря на определенные успехи в технологии получения легких растворов и бетонов на пористых заполнителях имеется весьма существенный резерв, который заключается в снижении толщины обмазки зерен вермикулита и снижении плот-

ности за счет разработки и использования композиционных вяжущих. Однако, исследований, посвященных получению и применению композиционных вяжущих, позволяющих существенно изменить структуру и прочность обмазочного слоя вермикулитового заполнителя, в научной технической литературе не имеется. Также не изучены вопросы, касающиеся исследований влияния пластифицирующих добавок на формирование структуры композиционных вяжущих с использованием вермикулита для теплоизоляционных растворов пониженной плотности.

Цель и задачи работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение теплоизоляционного вермикулитового раствора на основе композиционного вяжущего и комплекса добавок, обладающего пониженной плотностью.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- изучение вариативности физико-химических, структурных и физико-механических особенностей вяжущих композиций с вермикулитом, механоактивированных в вибрационной мельнице, с целью использования в качестве компонента композиционного вяжущего;
- исследование влияния суперпластификатора на свойства композиционного вяжущего, процессы фазо- и структурообразования цементного камня;
- разработка составов и технологии производства сухих штукатурных смесей с использованием композиционного вяжущего и комплекса добавок; изучение свойств теплоизоляционного вермикулитового раствора;
- подготовка нормативной документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Промышленная апробация.

Научная новизна. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение сухих штукатурных смесей на основе: композиционного вяжущего, полученного совместной механоактивацией портландцемента, вспученного вермикулита и суперпластификатора; легкого заполнителя – вспученного вермикулита; комплекса функциональных добавок – пенообразователя и редиспергирующего порошка. Для гомогенизации смеси с легким заполнителем обоснована эффективность применения разработанного пневматиче-

ского смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Предложенное технологическое решение, в совокупности с реализацией структурно-механического и адсорбционно-сольватного факторов взаимодействия компонентов смеси, обеспечивает получение теплоизоляционных вермикулитовых растворов с рациональной поровой структурой, стабильными показателями по плотности, достаточными показателями по прочности при снижении расхода цемента на 10 %.

Установлен характер влияния механоактивации при получении композиционного вяжущего на процессы структурообразования цементной матрицы с учетом химических и структурно-морфологических особенностей вермикулитового наполнителя и пластифицирующей добавки, заключающийся в: аморфизации верхних слоев вермикулитового наполнителя, что обеспечивает вовлечение высокодисперсных частиц в процесс структурообразования цементной матрицы в качестве центров кристаллизации гидратных фаз; увеличении общей удельной поверхности вяжущего и, как следствие, ускорении физико-химических процессов гидратации; возрастании количества гидратных фаз. В совокупности это способствует получению композиционного вяжущего KB-90 с активностью, соответствующей исходному цементу.

Определены закономерности влияния количественного соотношения компонентов в составе штукатурной смеси, а также режимов работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой, позволяющие определить рациональные границы варьирования и рецептурно-технологические факторы при проектировании сухих смесей для производства теплоизоляционных растворов с улучшенными физико-механическими свойствами и сниженной теплопроводностью.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о: процессах структурообразования композиционных вяжущих при использовании механоактивированного вспученного вермикулитового наполнителя и суперпластификатора; влиянии комплекса добавок на поровую структуру штукатурных растворов; влиянии смесительного оборудования и технологических режимов его работы на формирование структуры и физико-механические свойства штукатурных растворов на пористых заполнителях.

Разработаны составы композиционных вяжущих на основе портландцемента, вспученного вермикулитового наполнителя и пластифицирующей добавки, получаемых при механоактивации в вибрационной мельнице, с активностью 70,1 МПа.

Разработаны составы теплоизоляционных вермикулитовых растворов на основе композиционного вяжущего, порообразователя ESAPON 1214, редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 Н и вспученного вермикулита в качестве легкого заполнителя, с показателями прочности 2,9-3,1 МПа, плотности 430-440 кг/м³, теплопроводности 0,064-0,070 Вт/(м•К).

Предложена технология производства сухих штукатурных смесей на легких заполнителях для получения теплоизоляционных растворов, включающая применение разработанного пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Установлены рациональные режимы работы пневмосмесителя: давление сжатого воздуха 144-150 кПа, коэффициент загрузки материала в смеситель 48 %, время смешения 40-51 с.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы явилось проведение комплексных исследований, основанных на принципах системного подхода при разработке композиционных вяжущих с целью создания теплоизоляционных растворов, обеспечивающих получение достоверных результатов. Для определения физико-механических показателей сырьевых и полученных материалов применяли стандартные методы исследований, а также комплекс современных физико-химических методов анализа: лазерная гранулометрия, РФА, оптическая и растровая электронная микроскопия с микроанализом элементного состава.

Положения, выносимые на защиту:

— обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего производство сухой штукатурной смеси на основе композиционного вяжущего, легкого заполнителя и комплекса добавок в условиях разработанного пневмосмесителя, позволяющей получить теплоизоляционный вермикулитовый раствор, обладающий пониженной теплопроводностью;

- характер влияния механоактивации при получении композиционного вяжущего на процессы структурообразования цементной матрицы с учетом химических и структурно-морфологических особенностей вермикулитового наполнителя и пластифицирующей добавки;
- закономерности влияния рецептурных факторов и режимов работы пневмосмесителя на физико-механические свойства теплоизоляционных растворов;
- рациональные составы и свойства композиционных вяжущих теплоизоляционных растворов на их основе;
- технология производства сухих штукатурных смесей на легких заполнителях для получения теплоизоляционных вермикулитовых растворов. Результаты апробации.

Степень достоверности результатов работы обеспечена системой методов проведенных исследований с применением стандартных средств измерений, аттестованного современного оборудования и методов научных исследований с учетом требований нормативной документации. Полученные результаты подкреплены значительным объемом теоретических и экспериментальных исследований и не противоречат общепризнанным фактам и работам других авторов. Проведенный комплекс экспериментальных исследований апробирован в промышленных условиях.

Апробация результатов работы. Результаты работы были представлены на Международной научно-технической конференции молодых ученых (Белгород, 2020–2024); Международной научной конференции «Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология» (Алушта, 2021, 2023); VI Всероссийской научно-практической конференции «Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2022); 4-я Международная конференция Университетского колледжа (Багдад, 2023); 2-я Международная конференция инженерных наук (Багдад, 2024); VII Международном студенческом строительном форуме (Белгород, 2022); XIV Международном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2022).

Внедрение результатов исследований. Выпуск опытной партии композиционного вяжущего и теплоизоляционного раствора на основе композиционного вяжущего был осуществлен на предприятии ООО «Стройтехнология». С целью внедрения результатов работы разработаны ТУ «Композиционные вяжущие для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита» и «Сухие теплоизоляционные смеси с использованием вермикулита», ТР на производство композиционных вяжущих для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита и ТР на производство сухих теплоизоляционных смесей с использованием вермикулита. Разработаны рекомендации по устройству теплозащитных покрытий. Получены акты об испытаниях разработанных теплоизоляционных составов в лаборатории компании «Alaghar Company for General Contracting Ltd» и внедрении результатов научной работы при отделке фасадов продовольственных складов и аптек для защиты от высоких летних температур, а также при выполнении теплоизоляционных работ для обеспечения теплозащиты жилых комплексов в городе Кембела.

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации используются в учебном процессе по направлению подготовки бакалавров 08.03.01 «Строительство» и магистров 08.04.01 «Строительство».

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 10 научных публикациях, в том числе в 4 статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 5 статьях в сборниках трудов конференций, на пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов получен патент на изобретение.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения по использованию композиционного вяжущего, вермикулита и химических добавок, обеспечивающих получение теплоизоляционных растворов. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Проведена апробация результатов работы.

Объем и структура работы. Диссертационная работа включает введение, 5 глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 196 страницах машинописного текста, включающего 32 таблиц, 82 рисунка, список литературы 136 источников, 10 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Проблемы создания теплового комфорта зданий и сооружений в странах Ближнего Востока

Анализ потребления электроэнергии в странах Ближнего Востока в жилых и гражданских зданиях указывает на то, что большая часть электроэнергии потребляется для целей охлаждения, что связано с характерным жарким и сухим климатом этих стран. К примеру, Ирак расположен между 29-37 °С северной широты и входит в регион Ближнего Востока (рисунок 1.1), климат этой страны типичен для всего Ближнего Востока и классифицируется: жарким сухим летом и холодным, и влажным - зимой.

Исследования показали, что количество тепла, передаваемого от стен и потолков зданий внутрь помещений, эксплуатирующихся в условиях сухого пустынного климата Ближнего Востока, составляет около 60-70 %. Остальное тепло проникает через оконные и дверные проемы, полы (рисунок 1.2). Передача наружного тепла через стены и потолки составляет наибольшую часть, что требует наличия кондиционирования воздуха для создания комфортных условий для проживания людей.

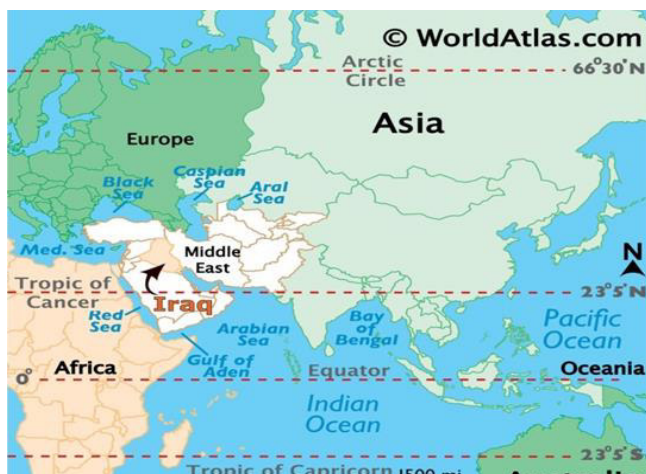


Рисунок 1.1— Географическое положение стран Ближнего Востока

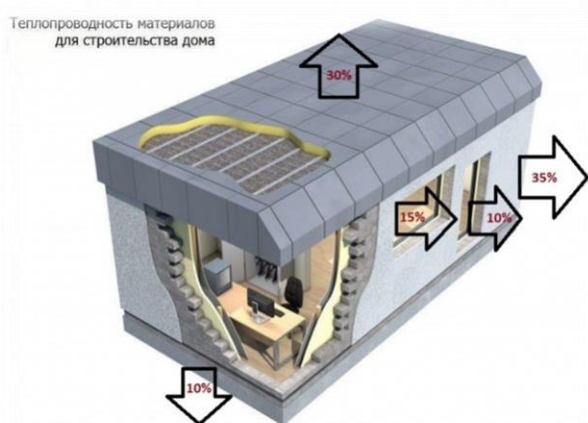


Рисунок 1.2 –Тепловые потери через части здания характерного арабского жилища

Теплоизоляция оказывает значительное влияние на сокращение теплопередачи с внешней части здания во внутренние помещения и, тем самым, снижает

потребление электроэнергии, используемой для создания комфортных условий для жизнедеятельности людей. Поскольку проблема энергопотребления и стоимость электроэнергии в странах Ближнего Востока весьма высока, вопросы теплоизоляции зданий и сооружений представляют серьезную задачу, требующую своего решения.

Кроме того, в последние годы в мире наблюдается существенное изменение климата, известное как явление глобального потепления, что приводит к повышению летних температур. В связи с этим растет спрос на принудительное механическое охлаждение, которое потребляет значительно большее количество электроэнергии, ему соответствует удвоенная генерирующая мощность электроэнергии, поскольку она покрывает 50-70 % фактической потребности населения. В последние десятилетия в странах Ближнего Востока возникла проблема увеличения норм энергопотребления в жилых и гражданских зданиях для целей охлаждения вследствие более широкого использования механических методов охлаждения для обеспечения теплового комфорта в помещениях.

Ограждающие конструкции здания являются основным объектом всех операций терморегулирования, так они должны обеспечивать изоляцию внутренней среды, отличной от внешней, которая обычно используется в традиционных зданиях, а также гарантировать прочность и надежность к изменениям во внешней среде; предотвращать влияние окружающей среды за счет снижения затрат энергии, необходимой для охлаждения и уменьшения потока тепла из окружающей среды внутрь здания. При этом в жилых и гражданских зданиях должны создаваться нормативные комфортные внутренние условия, независимо от внешних климатических условий. Помимо высоких энергетических показателей к ограждающим конструкциям предъявляются определенные требования по затратам энергии охлаждения, чтобы здание было термически комфортным и обладало наименьшим энергопотреблением. Исследованиями установлено, что на энергопотребление зданий приходится наибольшая часть общего энергопотребления [1-6]. В основном жилые и гражданские здания поглощают тепловую энергию за счет конвекции и излучения из внешней среды [7], интенсивность ее зависит от

ряда параметров, таких, как площадь крыш и наружных стен, теплоемкости применяемых материалов, их теплопроводности и плотности, толщины стен и др. [8, 9].

В мире для оценки эффективности потребления энергии зданий используется коэффициент эффективности здания (КЭЗ), который применяется для определенных разновидностей зданий и сооружений с позиции использования энергии. В соответствие с зарубежными стандартами существует градация, в соответствие с которой низкоэнергетические здания могут потреблять не более 50 кВт·ч/м² энергии в годовом исчислении. Здания с условным средним расходом энергии требуют энергии в 100-200 кВт·ч/м² в годовом исчислении. Условное разделение моноэнергетических зданий должно использовать менее 50 кВт·ч/м² ежегодно (рисунок 1.3).

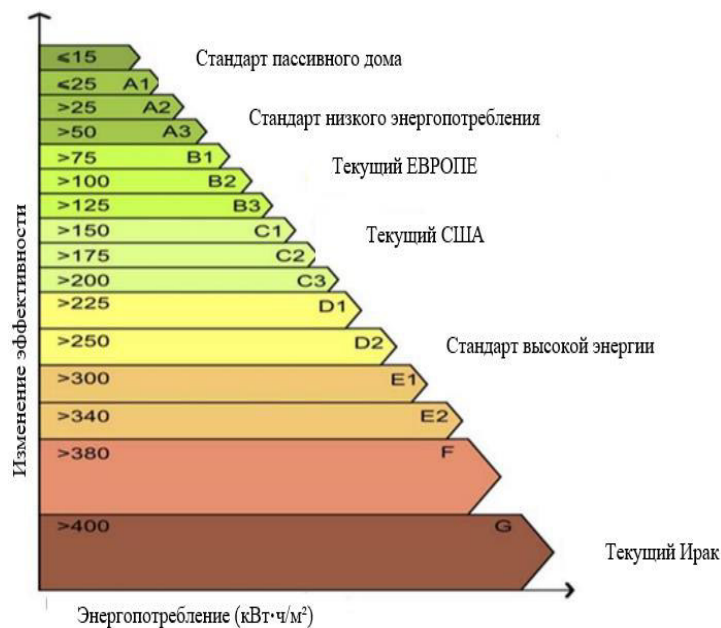


Рисунок 1.3 – Стандарты энергопотребления в различных странах

Анализ диаграммы свидетельствует об очень низкой энергоэффективности зданий и сооружений Ирака, которые потребляют свыше 400 кВт·ч/м² в год. К сожалению, такой низкий показатель энергоэффективности характерен для многих стран Ближнего Востока, что требует его повышения.

Теплотехнические свойства применяемых строительных материалов, обусловленные теплопроводностью, зависят в основном от плотности этих материалов. Вследствие чего проектировщики стремятся использовать строительные ма-

териалы с низкой плотностью, то есть с высокой пористостью, путем введения легких заполнителей для получения различных строительных блоков, элементов или легких облицовочных растворов, обладающих высокими теплозащитными свойствами при сохранении их прочностных свойств [10-16].

Исходя из принципов теплообмена, тепловая инерция здания напрямую зависит от теплозащитных характеристик применяемых строительных материалов и массы воздуха, подлежащего обработке в помещении [7, 17]. Вследствие этого строительные нормы и правила предписывают проектировщикам уменьшать высоту потолков и использовать эффективные теплоизоляционные строительные материалы. Согласно экспериментальным наблюдениям, низкая высота здания оказывает положительное влияние на температуру воздуха в помещении в холодный период года, но для жаркого периода времени пребывание в таких условиях помещения некомфортно, что требует проектирования высоких потолков [18, 19].

Кроме того, размер и высота окон оказывают существенное влияние на вентиляцию и тепловой комфорт в помещении [20]. Ранее были изучены различные условия нахождения людей в помещениях [8, 20-22] и было установлено, что высокие потолки создают больше вертикальных температурных перепадов, что положительно сказывается на ощущении теплового комфорта летом, особенно в жарком климате. С другой стороны, это увеличение приводит к улучшению условий естественной вентиляции и увеличению периодов самоохлаждения [23]. Период самоохлаждения – это временной период, в диапазоне которого системы отопления или охлаждения не требуют значительных затрат энергии [24]. Другими словами, в здании достигается определенный уровень комфорта только вследствие естественной вентиляции, без какой-либо системы кондиционирования. Таким образом, дизайн помещений с высокими потолками может снизить высокий расход энергии. Благодаря последним новейшим разработкам в области строительных технологий был достигнут высокий уровень создания комфортных условий в помещениях, заключающийся в следующем. Вместо использования энергоемких систем кондиционирования необходимо и целесообразно применять эффективные теплоизоляционные материалы и системы теплозащиты.

Одной из основных проблем человечества в настоящее время является глобальное потепление и сокращение природных ресурсов [25]. Эти опасения усугубляются ростом населения на планете, что также приводит к увеличению выбросов углекислого газа в атмосферу [26]. С другой стороны, в развитых странах почти 90 % времени жители проводят в помещении [27], что свидетельствует о важности создания комфортных условий в зданиях. Кроме того, современный мир сталкивается с серьезными энергетическими проблемами, значительную роль в развитии цивилизованного общества играет строительная отрасль, на ее долю приходится более 40% всего мирового энергопотребления [28, 29].

Одна из главных целей создания благоприятных условий для комфортной жизнедеятельности человека заключается в обеспечении удовлетворительного теплового комфорта и приемлемого качества воздуха в помещении. Для реализации поставленной цели необходимо разработать стратегию рационального проектирования зданий и сооружений с целью их естественного охлаждения при минимальном энергопотреблении и максимальном комфорте.

Прежде всего, исследуем условия для того, чтобы создать эффективные условия по тепловому режиму в жилых и гражданских зданиях. Существует мнение, что создать благоприятные тепловые условия для эффективной работы и нахождения в рабочих комнатах можно вследствие двух основных факторов. Первое – за счет использования энергии и второе – за счет принятия эффективных архитектурно-планировочных приемов и решений, целью которых является создание комфортных условий для жизнедеятельности человека (рисунок 1.4).

Мировой энергетический кризис в начале 1970-х годов заставил задуматься о необходимости разработки систем самоохлаждения [30], применение этих систем произошло в результате поиска альтернатив энергии. Эксперименты показали успех этих систем благодаря убежденности жильцов в их эффективности, и, несмотря на преимущества систем самоохлаждения, они не лишены некоторых недостатков. Недостатки, связанные с процессом обслуживания их частей, которые составляют наибольшую часть общей устойчивости здания и системы, а также потребность в некоторых системах самоохлаждения для дополнительных за-

трат, особенно в отношении первоначальных затрат на строительство, которые могут составлять препятствие для распространения его использования.

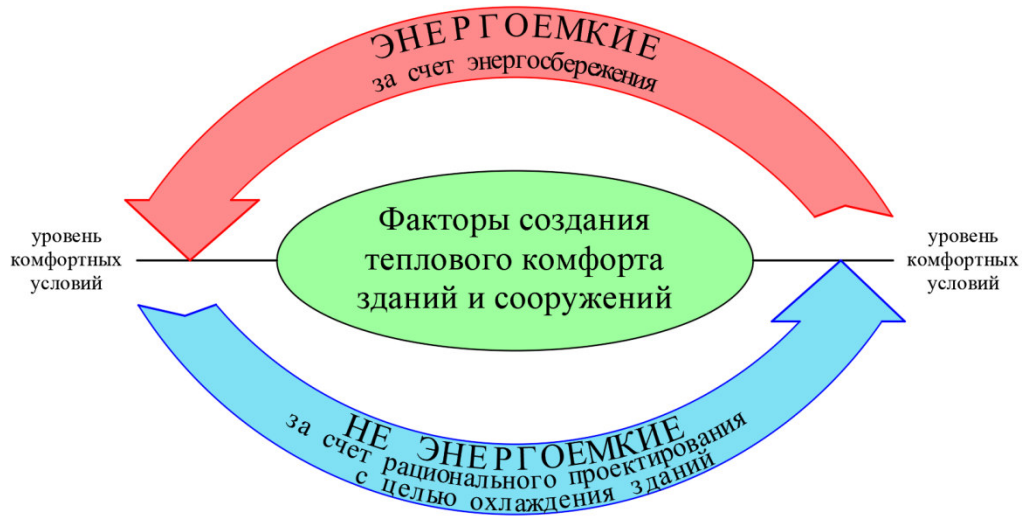


Рисунок 1.4 – Факторы создания теплового комфорта зданий и сооружений одинаковой теплопроводности

Энергоемкие стратегии проектирования включают в себя проектные решения и эффективные методы охлаждения, направленные на создание самых высоких условий охлаждения и минимального энергопотребления, другими словами, организацию управления энергопотреблением в здании с помощью эффективных методов охлаждения, повышающих эффективность охлаждения, и минимальное использование механических охлаждающих устройств, которые большое энергопотребление.

Активное охлаждение в принципе похоже на самоохлаждение, но отличается от него тем, что использует механические средства для создания движения воздуха или повышения процессов испарения, чтобы активировать процесс охлаждения с наименьшим потреблением энергии. Некоторые исследователи классифицировали эффективные методы охлаждения как системы охлаждения с низким энергопотреблением [31].

К сожалению, энергоемкие факторы создают целый ряд сложных проблем и зависят от различных источников энергии во всех аспектах жизни [32]. Сегодня мы живем в эпоху возрастающего спроса на энергию, когда основные источники производства энергии заканчиваются [33].

Вопрос потребления энергии в различных сферах жизни стал важнейшим из потребностей времени и фундаментальной проблемой, которая волнует все страны мира, особенно в странах Ближнего Востока, в частности, Ирака, где наблюдается значительный рост объемов потребления энергии, особенно в летний сезон, что компенсируется неспособностью удовлетворить потребности населения в энергии вследствие войны, которую пережил Ирак, и тяжелых последствий для инфраструктуры энергетического сектора.

Установлено, что расход электроэнергии в жилых зданиях в Ираке достигает 48 %, что включает значительную долю энергопотребления в общем объеме энергопотребления, что представляет достаточно высокую долю при сравнении с остальными и распределенными по другим секторам, таким как промышленность (29 %), сельское хозяйство (4 %), коммерческие (6 %) и правительственные здания (13 %) [34]. Ограниченные источники энергии, используемые сегодня, требуют, чтобы здание могло служить и адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям [35]. Это в свою очередь выставляет требования по использованию природной энергии и материалов с наименьшим возможным ущербом, что трактуется, как экологическая ориентация при проектировании зданий, поскольку эти здания в большей мере зависят от систем кондиционирования, которые позволяют эффективно дополнять системы эксплуатации здания в соответствии с местным климатом, регулировать энергию и материалы и находить наиболее эффективные решения [36]. Поскольку здание является рукотворным ответом на силы внешней среды для обеспечения стабильной внутренней среды, в которой человек должен затрачивать минимум энергии или усилий для поддержания теплового комфорта. Управление солнечным излучением через само здание с точки зрения энергосбережения обеспечивает наименьшие потери энергии при сохранении стабильности требуемой внутренней среды [37].

Анализ особенностей (рисунок 1.5), климата Ирака показывает, что в три зимних месяца: декабрь, январь и февраль отмечаются холодные температуры окружающей среды, а в период с марта по ноябрь устанавливается относительно умеренная температура, остальные 5 месяцев с мая по сентябрь характеризуются

очень жарким климатом. Необходимо обратить внимание на расход энергии в период жарких месяцев (достигающих высоких температур до 50 °С по сравнению с холодными (характеризующихся зимними температурами до 14-16 °С) и запроектировать жилое и гражданское здание с учетом климатических условий.

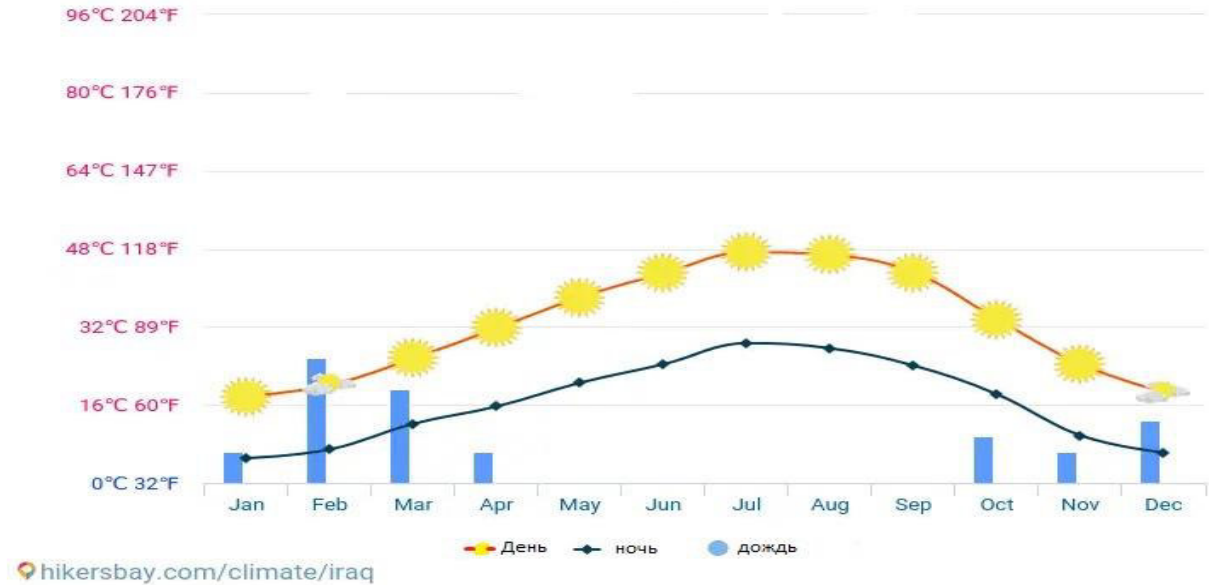


Рисунок 1.5– Распределение зимних и летних температур в Ираке за 2022 год

Человек, как и другие живые системы, адаптировался к тепловым изменениям окружающей среды через одежду, затем человеческое тело адаптировалось к этим изменениям и в большей степени адаптировалось к окружающей среде, строя примитивные жилища как более эффективное средство достижения высокого контроля над характеристиками его тепловой среды [37].

Оболочка здания или сооружения представляет собой основу всех процессов теплового контроля – ограждающей стены, через которую осуществляются все процессы теплопередачи между внешней и внутренней частью стены, оценивается качество и эффективность всех процессов теплообмена, осуществляется контроль на теоретическом или практическом уровне создаваемых конструкций на различных уровнях на стадиях процесса проектирования для различных климатических условий [38]. Ограждающая стена является разделительной границей между климатическими условиями, окружающими здание, и требуемыми условиями теплового комфорта, создаваемыми внутри помещения, и на нее ложится основная нагрузка по регулированию тепловых потоков в зависимости от физиче-

ских и теплотехнических свойств ее элементов или конструктивных соединений. Поскольку климат Ирака характеризуется высокой температурой в большинстве месяцев в году и короткими периодами равноденствия потребляется значительное количество энергии, необходимой для охлаждения помещений. Технологическое развитие в области техники кондиционирования воздуха сделало их менее дорогим и, следовательно, более доступным, что увеличило спрос на него, особенно в последние два десятилетия, и, таким образом, выявило проблемную область в увеличении норм энергопотребления зданий для охлаждения в результате растущего применения методов механического охлаждения путем использования кондиционеров, в результате чего создается комфортный режим жилища.

На основе имеющегося многовекового практического опыта и современных подходов предлагается следующая стратегия по эффективному проектированию гражданских и жилых зданий и сооружений с обеспечением естественной вентиляции, и охлаждения в странах, характеризующихся жарким и сухим климатом (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Стратегия рационального проектирования зданий и сооружений

Принцип проектирования для охлаждения зданий зависят главным образом от типа климата, в котором они используются. Любая система охлаждения может быть эффективной в одном климате, но она теряет свою эффективность, если

применяется в другом климате без внесения в нее соответствующих корректировок, которые могут быть простыми или фундаментальными в зависимости от климатических условий [39], но все эти целевые подходы направлены на то, чтобы внутренняя среда здания максимально соответствовала пределам теплового комфорта для людей. Проектировщик Лехнер указал на возможность достижения теплового комфорта летом за счет трех уровней охлаждения зданий: архитектурного решения здания; принятых технологий самоохлаждения и охлаждения механическими средствами [40]. Архитектор Дживони классифицировал принцип проектирования с целью охлаждения с точки зрения их энергопотребления на два уровня: уровня стратегий проектирования (неэнергоемких), включая проектирование зданий и самоохлаждение и уровня энергоемких проектных стратегий, содержащее эффективное механическое охлаждение [34].

Архитектурный дизайн здания и самоохлаждение. На этом уровне проект направлен на то, чтобы заставить здание работать так, чтобы избежать притока тепла при достижении баланса между требованиями жаркого и холодного периодов и с наименьшими потерями энергии, затрачиваемой в зависимости от механических средств. Конструктивное решение здания включает в себя шесть основных факторов [41], представленных: геометрической формой строительного объекта, ориентацией здания, затенением, размерами окон и процентом остекления, теплоизоляцией, а также тепловыми характеристиками строительных материалов, применяемых при создании ограждающих конструкций [31].

Геометрическая форма строительного объекта определяет влияние температуры воздуха и солнечной радиации, а значит, суммарно определяет геометрическую взаимосвязь между климатическими элементами и зданием. В целом выбор формы направлен на уменьшение влияния изменения внешних климатических факторов на внутреннюю среду [39]. Формы жилища классифицируются на основании определения соотношения границ внешней формы жилого квартала и краев жилого участка с отдельными жилыми помещениями, примыкающими к ним домами и дворовыми домами. Каждое из таких дизайнерских направлений имеет возможность увеличивать или уменьшать теплоприток жилища [41].

Ориентация здания. Исследования по данному направлению определило различные результаты и их связь с количеством прямого и рассеянного падающего солнечного излучения, поскольку было установлено, что ограждающие конструкции здания значительно сильно зависят от количества солнечного излучения, которое они получает на единицу площади, и, таким образом, этот эффект отражается на общей тепловой нагрузке здания. Южная ориентация представляет собой наилучший вариант, поскольку он наименее подвержен солнечному излучению в летний период и наиболее подвержен радиации в зимний период. Так западная ориентация здания представляет собой наименьший вариант с точки зрения эффективности тепловых характеристик, связанная с ориентацией зданий, когда они подвергаются высокому солнечному притоку в летний период, что компенсируется относительным уменьшением солнечного притока зимой и незначительно отличается от восточной ориентации, потому что путь солнца равнозначен в обоих из них.

Принимая во внимание, что северная ориентация представляет собой наименее подверженное воздействию радиации направление в течение летнего и зимнего периодов, из-за отсутствия прямого солнечного излучения от этого направления, поскольку на него влияет только рассеянное излучение. Что касается вторичных ориентировок, то юго-восточное и юго-западное направления несколько более эффективны, чем северо-восточное и северо-западное.

Размер и ориентация окон, процент остекления не отличается по эффективности от ранее упомянутых факторов, так как ориентация окон иногда используется как частный случай внутри здания. В случае, если нет возможности контролировать ориентацию здания в целом, из-за наличия соседних строений или примыкающих к нему, поэтому теплоприток увеличивается летом для окна за счет увеличения процента площади остекления. Как правило, увеличение размеров окон приводит к увеличению солнечного притока, особенно если окна расположены на фасадах, непосредственно подвергающихся солнечному излучению. Охлаждающая нагрузка также значительно возрастает в светлое время суток, особенно в часы пик, когда увеличивается процент площади окна.

Затенение – это способ избежать прямого поступления солнечного тепла на поверхность здания, стены, конструкции. Проемы представляют собой большинство элементов ограждающих конструкций. С точки зрения возможности проникновения через них прямой солнечной радиации, вызывающей прямой приток тепла, обычно покрывают стеклом, с одной стороны, и снижают их проницаемость для солнечного излучения с другой стороны за счет использования цветных стекол. Блокирование солнечного излучения, попадающего на окна в жаркий период с помощью солнечных блокаторов и пропуска их в холодный период, является важным фактором в достижении климат-контроля здания [38].

Теплоизоляция. Устройство теплоизоляции необходимо для создания внутри здания комфортного режима жизнеобеспечения людей, вследствие хорошей теплоизоляции препятствует проникновению холодного воздуха зимой во внутрь помещения и горячего воздуха с внешней части во внутреннюю. В результате хорошей теплоизоляции, созданной с помощью эффективных строительных материалов, создаются комфортные условия для жизнедеятельности человека.

Для создания теплозащитных свойств ограждающим стеновым конструкциям выполнено значительное количество исследований, посвященных использованию легкого заполнителя, которые используются при приготовлении легких бетонных смесей, а также в легких штукатурных и облегченных отделочных растворах, для создания надежных теплоизоляционных показателей применяют различные легкие заполнители: пемзу, глины вспученные, диатомит, вспученный перлит, вспученного вермикулит. Сухой жаркий климат создает в странах Ближнего Востока очень некомфортные условия для жизнедеятельности, для обеспечения комфортного проживания и жизнедеятельности жителей в летний период необходимо сделать эффективную теплозащиту в гражданских и жилых помещениях и создать необходимый микроклимат и жилым доме, но при этом необходимо максимально понизить использование электроэнергии, необходимой при кондиционировании воздуха, что экономит расходы на электроэнергию [42-44].

Тепловые характеристики строительных материалов. Ограждающие конструкции напрямую влияют на количество тепла, передаваемого через эти

слои. Целью применения теплоизоляции для зданий является уменьшение теплообмена между зданием и внешней средой, и тем самым, обеспечение комфорта для пользователей здания и снижение энергопотребления. Для достижения этого необходимо учитывать несколько факторов. Это правильный выбор теплоизоляционных материалов, обеспечивающих термические свойства: удельную теплоемкость, теплоемкость, коэффициент расширения и диффузии; механические свойства: обладать приемлемой прочностью на сжатие, растяжение и сдвиг, а также иметь требуемые акустические свойств и огнестойкость.

Теплоизоляционные материалы в зависимости от их теплотехнических показателей (рисунок 1.7) часто комбинируют в сочетании со стенами и перекрытиями для обеспечения общего требуемого сопротивления теплопередаче и создания наилучшей системы теплоизоляции, что способствует улучшению теплозащитных характеристик ограждающих элементов зданий и сооружений.

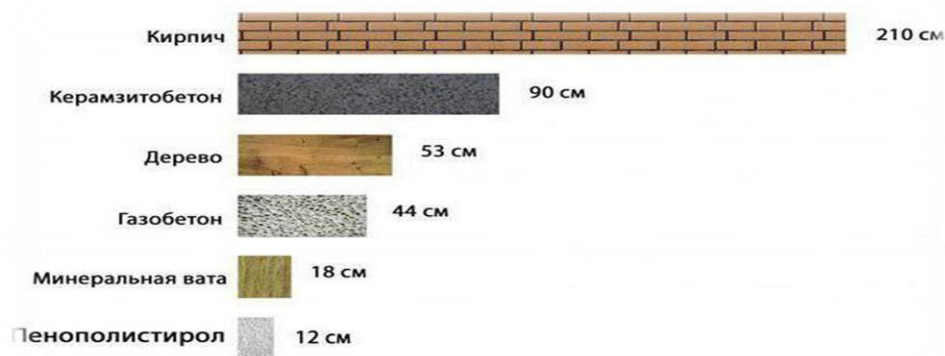


Рисунок 1.7 – Сравнительные толщины стенок из некоторых строительных материалов, одинаково препятствующих тепловым потерям в здании, в соответствии с действующими российскими строительными нормами

Для рациональной теплоизоляции здания стены интегрируются с потолками, что блокирует всевозможные тепловые потери «мостики холода», в результате чего создается благоприятные тепловые условия и понижается расход энергии. Таким образом, в результате обеспечивается значительная экономия энергии как для частного потребителя и государства в целом. Следует отметить, что на устройство теплоизоляции в современных сооружениях и зданиях расходуется 5 % от общего объема энергозатрат, а вот энергозатраты на кондиционирование во много раз превышают их. Применение теплоизоляции в ограждающих конструкциях зданий

и сооружений обеспечивает ежегодную экономию дорогостоящей электроэнергии в странах Ближнего Востока.

На основании выше изложенного следует, что архитектурный проект здания и рациональный выбор теплоизоляционных материалов для изоляции здания имеют приоритеты над стратегиями охлаждения здания, несмотря на обеспечение этого объекта различными методами самоохлаждения, которые характеризуются своей простотой реализации.

Таким образом, рациональные подходы при проектировании зданий с учетом экологических требований, многолетней практики возведения жилых зданий, использования эффективных материалов для теплоизоляции обеспечивает комфортные условия для жизнедеятельности и отдыха людей. Значение теплоизоляционных материалов в процессе создания эффективной теплоизоляции играет важную роль, вследствие этого необходимо наличие и разработка составов с требуемыми свойствами материалов для тепло- и звукоизоляции, а также разработки новейших технологий при их изготовлении.

1.2 Современные теплоизоляционные материалы

В современных условиях теплоизоляционную защиту на Ближнем Востоке производят с использованием самых различных теплозащитных материалов: экструдированный полистирол, пенополистирол, наноизоляционные материалы, вакуумные изоляционные, газоизоляционные панели, аэрогели, минеральная вата, вакуумные изоляционные панели, полиуретан, а также заслуживает внимания использование новых материалов, приготовленных по совершенным вакуумным технологиям и с использованием наноразмерных наполнителей. Все теплоизоляционные материалы, используемые для создания теплоизоляции должны обладать требуемыми физико-механическими характеристиками, обеспечивать теплозащитные и огнезащитные свойства, быть безвредными для окружающих и быть приемлемыми для использования в сухих жарких условиях. К сожалению, на те-

кущий период отсутствуют теплозащитные материалы и изделия, которые обладали бы комплексом эксплуатационных свойств.

К теплоизоляционным материалам приоритетным требованием является теплопроводность, которая обеспечивает теплозащитные свойства помещения или какого-то объекта, обеспечивая необходимые условия для нормального функционирования технологического процесса и жизнедеятельности человека.

Суммарная теплопроводность складывается из суммы следующих слагаемых и измеряется как соотношение общей толщины материала к его тепловому сопротивлению:

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{тверд}} + \lambda_{\text{газ}} + \lambda_{\text{рад}} + \lambda_{\text{конв}} + \lambda_{\text{связь}} + \lambda_{\text{утеч}}, \quad (1.1)$$

где $\lambda_{\text{общ}}$ – суммарная теплопроводность;

$\lambda_{\text{тверд}}$ – теплопроводность, принятая для твердого тела;

$\lambda_{\text{газ}}$ – теплопроводность, принятая для газа;

$\lambda_{\text{рад}}$ – теплопроводность, учитывающая излучения;

$\lambda_{\text{конв}}$ – теплопроводность, учитывающая конвекцию;

$\lambda_{\text{связь}}$ – коэффициент средней теплопроводности, зависящий от тепловых эффектов поверхностей второго порядка между различными теплопроводностями;

$\lambda_{\text{утеч}}$ – теплопроводность утечки теплоизоляционного покрытия.

Для снижения теплопроводности системы требуется, чтобы каждый из перечисленных коэффициентов имел минимальное значение, при суммировании всех пониженных коэффициентов теплопроводности обеспечиваются необходимые условия для комфортного нахождения человека и протекания технологических процессов.

В условиях стран Ближнего Востока также, как и по всем другим странам используется теплоизоляционные материалы, обеспечивающие комфортные условия для жизнедеятельности человека. Рассмотрим наиболее часто применяемые материалы для проведения теплозащитных работ в странах с сухим жарким климатом, в частности в Ираке [45, 46].

Минеральная вата – наиболее применяемый теплоизоляционный материал, представляющий собой прямоугольные маты или плиты, эту теплоизоляцию ис-

пользуют, как правило, в щитовых домах и при изготовлении каркасных конструкций. Жесткие минераловатные плиты применяют для изоляции полов или крыш. Минеральную вату товарную, а также и в виде плит используют для заполнения различных пространств и полостей. Минеральная вата производится из диабазы (долерита) при температуре около 1500 °С. Теплопроводность минеральной ваты составляет от 30 до 40 мВт/(м·К) и зависит от ее влажности и плотности. Особенностью минераловатных плит является тот факт, что они обладают свойством легкого подгона при установлении их в строительные конструкции, обеспечивая хорошую теплоизоляцию на строительном объекте.

Пенополистирольные изделия формуруются из ранее полученных шариков из полистирола. Этот материал формуется в виде непрерывного ковра, который разрезается на определенные размеры на конвейерной линии. Особенности пенополистирола являются то, что этот материал обладает частичной пористостью, причем открытой, что дополнительно снижает плотность материала. Диапазон значений показателей по теплопроводности для пенополистирола составляет от 30 до 40 мВт/(м·К). Теплопроводность пенополистирола зависит от температуры, влажности и плотности. Пенополистирольные изделия хорошо подвергаются перфорированию, что позволяет на строительной площадке создавать плотную теплозащиту, без дефектов и открытых полостей.

Экструдированный полистирол (ЭПС) изготавливается из расплава предварительного полистирольного порошка, при этом расплавленная масса формуется через расплавленный мундштук при резком сбросе давления, при этом приводящим к значительному расширению массы. Изготовление полистирольного ковра идет непрерывно, специальное оборудование регулирует изготовление изделий определенной длины. Изделия экструдированного полистирола можно перфорировать, а также резать и устанавливать на строительной площадке для проведения теплоизоляционных работ.

Целлюлоза, вследствие своего строения обладает хорошей теплоизоляционной способностью, приготовление этого изоляционного материала осуществляют из древесно-волокнутой массы или бумажной макулатуры. процесс изготовления

обеспечивает теплоизоляционному материалу необходимую консистенцию. Для обеспечения защитных свойств и требуемой долговечности в смесь добавляют борную кислоту или бораты натрия. Этот утеплитель целесообразно использовать для теплоизоляции сложных полостей и трещин, кроме того, из этого утеплителя формуют теплоизоляционные маты и плиты. Средний показатель теплопроводности для теплоизоляционных материалов от 40 до 50 мВт/(м·К). Показатели теплопроводности этой теплоизоляции зависят от влажностных и температурных условий помещения.

Пробковая теплоизоляция. Этот тип изоляции готовят из органического материала – дуба пробкового, который может использоваться в качестве наполнителя, а также для изготовления отформованных плит. Средние показатели теплоизоляции от 40 до 50 мВт/(м·К). Материалы, приготовленные из пробкового дуба подвергаются перфорации, хорошо режутся. Создание теплоизоляции из пробкового дуба обеспечивает высокую долговечность и устойчивость покрытия.

Полиуретан получается в процессе химической реакции между спиртами и изоцианатами. В результате химической реакции происходит расширение образующихся пор, которые заполняются образующимся газом. Изоляционный материал производится в виде плит или непрерывно на конвейерной производственной линии. В последние годы полиуретан широко используется в роли пены, которая имеет свойства расширяться в процессе выдавливания из тубы и используется для создания надежной герметизации трещин и стыков, а также для изоляции различных неровностей и углублений. Коэффициент теплопроводности полиуретановых изделий находится в диапазоне 25-35 мВт/(м·К), этот показатель имеет коэффициент теплопроводности гораздо ниже в сравнении с минеральной ватой, целлюлозой и полистиролом. Следует отметить, что показатели теплопроводности полиуретана также зависят от влажности и температуры изолируемого помещения. Следует отметить, что даже если пенополиуретан безопасен при использовании по назначению, он опасен при пожаре. При воздействии высоких температур полиуретан выделяет изоцианаты и цианистый водород, данные соединения

относятся к очень ядовитым веществам, что представляет огромную опасность для человек и живых организмов.

Панели изоляционные вакуумные представляют собой изделия, изготовленные из кремнезема пирогенного, имеющего открытую пористость, на которой наносится полимерный ламинат в несколько слоев (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Вакуумные изоляционные панели

ВИП представляет собой современную теплоизоляцию с теплопроводностью в диапазоне от 3 до 4 мВт/(м·К) в свежем состоянии до обычно 8 мВт/(м·К). После 25-летнего старения из-за диффузии водяного пара и воздуха через конверт ВИП и в материал сердечника ВИП, который имеет структуру с открытыми порами. В зависимости от типа оболочки ВИП стареющая теплопроводность через 50 лет увеличится. Изменения теплопроводности с ее возрастанием является главным недостатком этих изоляций. Любое механическое воздействие на такую оболочку приводит к возрастанию теплопроводности до 15 мВт/(м·К). Анализ специфики ВИП свидетельствует, что их недопустимо резать для обустройства теплоизоляции строительной конструкции, так как при этом они теряют свои теплоизоляционные свойства. Особенности ВИП исследовали ряд ученых, рассматривая создаваемые модели, изучая условия проводимости и, а также старение и изменение свойств в процессе эксплуатации и интеграции VIP в строительство зданий [47, 48]. Недавно сделали всесторонний обзор ВИП для строительных приложений (рисунок 1.9).

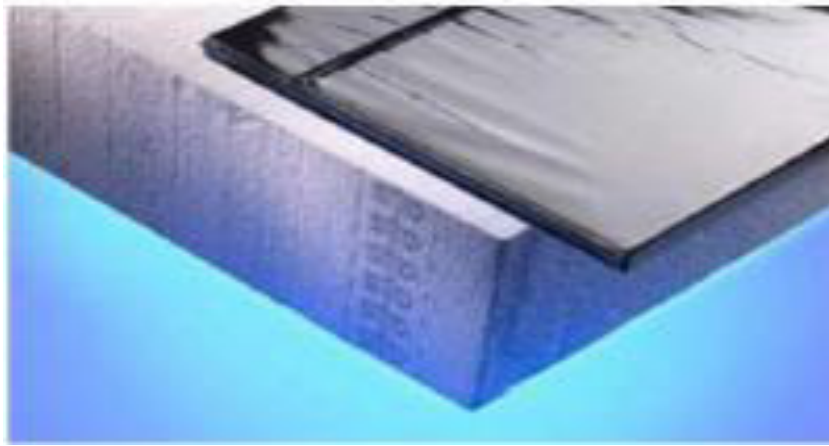


Рисунок 1.9 – Сравнение эквивалентной толщины теплового сопротивления традиционной теплоизоляции и ВИП

Исследования и практика показали, что создание теплоизоляции свыше 50 см нецелесообразно, так как такой толстый слой потребует создания новых строительных приемов и удорожания строительства. Следует иметь ввиду, что логистические операции по созданию и доставке массивных теплоизоляционных элементов увеличивают затраты на строительство. Современные строительные технологии требуют создания новых эффективных теплоизоляционных материалов с оптимальными размерами теплоизоляции и высокими теплозащитными свойствами.

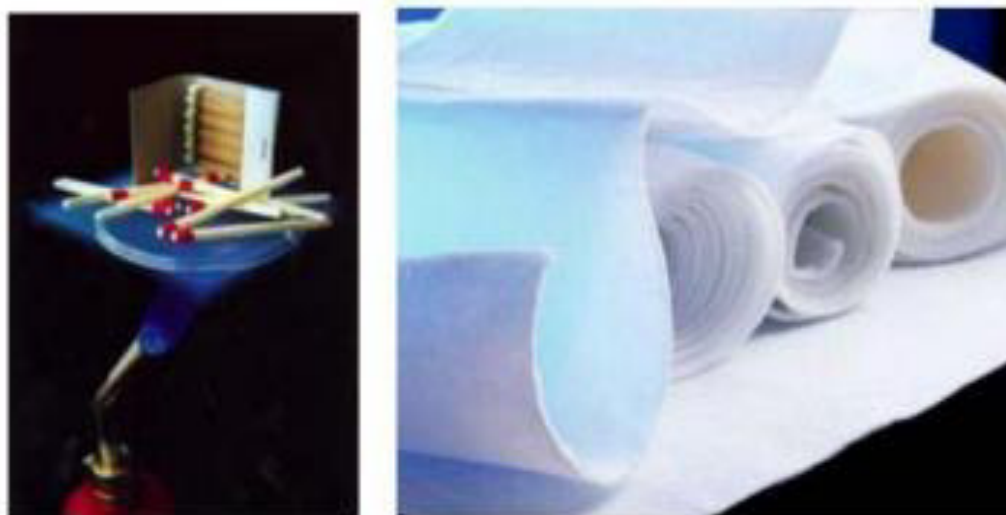
Газонаполненные панели (ГНП). Близкой к ВИП в принципе является технология газонаполненных панелей (ГНП), изученная авторами [49] среди прочих. Недавний обзор ГНП для создания приложений дан в работе [50]. В ГНП используется газ с меньшей теплопроводностью, чем воздух, например, аргон (Ar), криптон (Kr) или ксенон (Xe), вместо вакуума, как в ВИП. Барьерная фольга и перегородка внутри ГНП показаны на рисунке 1.10. Поддержание концентрации газа с низкой проводимостью внутри ГНП и предотвращение проникновения воздуха и влаги в ГНП имеют решающее значение для тепловых характеристик этих панелей. Вакуум является лучшим теплоизолятором, чем различные газы, используемые в ГНП. С другой стороны, структура сетки ГНП не должна выдерживать внутренний вакуум, как ВИП. Поверхности с низким коэффициентом излучения внутри ГНП уменьшают теплопередачу излучением. Теплопроводность прототипов ГНП довольно высока, составляет 40 мВт/(м·К), хотя были рассчитаны гораз-

до более низкие теоретические значения. ГНП обладают многими преимуществами и недостатками ВИП. Тем не менее, будущее стеклопакетов в качестве теплоизоляции зданий может быть поставлено под сомнение или даже сомнительно, по сравнению с ними ВИП кажутся лучшим выбором как сегодня, так и завтра.



Рисунок 1.10 – Барьерная фольга и перегородка внутри ГНП

Аэрогели современный теплоизоляционный материал (рисунок 1.11) и, возможно, наиболее многообещающий среди современных материалов, разработанный рядом ученых [50]. Используя сажу для подавления переноса излучения, теплопроводность до $4 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ может быть достигнута при давлении 50 мбар. Однако сообщалось, что коммерчески доступные современные аэрогели имеют теплопроводность от 13 до $14 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при атмосферном давлении [51]. Материальные затраты на изготовление аэрогелей в настоящее время достаточно высоки. Аэрогели характеризуются высокими показателями по прочности при сжатии, но следует отметить, что они очень хрупки, так как имеют очень малую прочность на растяжение. Для увеличения прочности при воздействии на растяжение необходимо в матрицу материала включить углеродное волокно, которое обеспечивает высокие показатели при растяжении. Очень интересным аспектом применения аэрогелей является в том, что они могут быть изготовлены как непрозрачные, полупрозрачные или прозрачные материалы, что позволяет использовать их в самых разных областях строительства. Чтобы аэрогели стали широко распространенным теплоизоляционным материалом для непрозрачных применений, необходимо существенно расширить исследования в этих направлениях.



а

б

Рисунок 1.11 – (а) спички поверх аэрогеля защищены от пламени снизу (НАСА, 2010 г.) и (б) материал аэрогеля

Материалы с фазовым переходом (МФП) в настоящее время не относятся к теплозащитным материалам, однако представляет определенный интерес так как обеспечивает теплозащитные свойства ограждающим конструкциям вследствие изменения фазового состояния при переходе из твердого в жидкое при воздействии температур. Когда температура окружающей среды снова падает, жидкие МФП снова превращаются в твердые материалы, выделяя ранее поглощенное тепло в экзотермическом процессе. Такой цикл фазового перехода стабилизирует температуру внутри здания и снижает расходы на отопление и кондиционирование воздуха. Наиболее яркими примерами МФП представляются парафины различных типов, имеющие различные теплопроводности и температуры фазовых переходов, что ограничивает их применение в строительстве [52, 53]. Обзор основных МФП был дан [54], тогда как другие обзоры по МФП можно найти в работах [55, 56]. Подходящий диапазон температур фазового перехода в зависимости от климатических условий и желаемой комфортной температуры, а также способность поглощать и выделять большое количество тепла являются важными свойствами для выбора конкретного МФП для строительных работ. Соответствующие энтальпии плавления и температуры плавления показаны для различных групп МФП в работе [57].

На рынке жилищного строительства существует множество строительных растворов и продуктов с улучшенными тепловыми характеристиками, и во многих научных работах также изучается поведение нескольких альтернативных материалов, которые при использовании в строительных растворах улучшают теплоизоляцию, например, растворы с включением сменных фаз в материалы. Используя материалы с фазовым переходом, можно регулировать колебания температуры внутри зданий таким образом, чтобы они могли поддерживать требуемую температуру в течение более длительного периода времени, что снижает потребность в кондиционерах [58].

Вакуумные изоляционные материалы (ВИМ). ВИМ в основном представляют собой имеют закрытую мелкую пористую структуру, которая с заземленным воздухом. Теплопроводность этих материалов составляет менее $4,5 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в нормальных условиях, этот материал хорошо режется и подгоняется в строительных конструкциях при установке, достаточно долговечен [59].

Газоизоляционные материалы (ГИМ) в основном представляет собой однородный материал с закрытой мелкопористой структурой, заполненный газом с низкой теплопроводностью, например, аргоном (Ar), криптоном (Kr) или ксеноном (Xe), с общей теплопроводностью менее $4 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в исходном состоянии [60]. То есть ГИМ в основном такой же, как ВИМ, за исключением того, что вакуум внутри структуры с закрытыми порами заменен газом с низкой проводимостью.

Наноизоляционные материалы (НИМ). В НИМ размер пор в материале установлен ниже определенного уровня, т.е. составляют менее 40 нм для достижения требуемой теплопроводности ниже $3,5 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Этот материал имеет однородную структуру с наличием открытой и закрытой пористости [61].

Динамические изоляционные материалы (ДИМ) характеризуются тем, что в этих материалах можно достигать и контролировать теплопроводность в требуемом диапазоне. Теплопроводность можно обеспечивать за счет регулирования нижеследующих показателей:

- количество внутренних газообразных пор;

– термическую проводимость твердого состояния решетки.

Для решения поставленных задач по созданию надежной теплоизоляции жилых и общественных зданий проводятся научные работы по разработке. Эффективных теплоизоляционных материалов и технологий их получения.

Разрабатываемые теплозащитные материалы должны отвечать требуемым показателям по теплозащите, так при холодных климатических условиях должны обеспечить высокую теплозащиту стеновых конструкций для обеспечения комфортных условий нахождения в помещении. А в условиях повышенных температур должны обеспечить хорошую теплоизоляцию от воздействия высоких температур от проникновения высоких температур внутрь здания. Следует учитывать тот фактор, что с увеличением влажности окружающей среды теплоизоляционные материалы теряют свои свойства, т.е. как правило, теплоизоляционные материалы очень уязвимы к поглощению влаги. Высокоэффективным теплоизоляционным материалом с самой низкой теплопроводностью до $20 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ является полиуретан по сравнению с другими теплоизоляционными материалами, которые обычно находятся в диапазоне $30\text{--}40 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, однако, выделение токсичного газа из полиуретана во время пожара создает серьезную опасность для здоровья людей и окружающей среды.

Наиболее перспективными современными изоляционными материалами являются вакуумные изоляционные панели (ВИП) и аэрогелевая изоляция, которые характеризуются высокими показателями по теплозащите. Представляется, что панели газонаполненные не получают существенного распространения, так как они сложны в изготовлении, монтаже и эксплуатации. Поэтому в настоящее время этот вопрос требует глубокого изучения и принятия определенных решений. Среди современных теплоизоляционных материалов. ВИП имеют самое низкое значение теплопроводности из всех - около $4 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, среднее значение для аэрогеля составляет $13 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Однако теплопроводность ВИП увеличивается со временем из-за проникновения влаги и воздуха путем диффузии, достигая значения $20 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в не вакуумном или перфорированном состоянии, но и ВИП и аэрогели очень дороги, что требует значительных экономических затрат.

Теплоизоляционный раствор с легким заполнителем. Вследствие низкой теплопроводности некоторых видов вулканических заполнителей их возможно использовать в составах растворных смесей вместо традиционных заполнителей типа песка, что обеспечит снижение теплопроводности растворам. Так как, бетон и железобетон обладают высокой теплопроводностью, соответственно: 1700 и 2500 мВт/(м·К), то в бетонной оболочке здания всегда должны использоваться различные теплоизоляционные материалы для обеспечения удовлетворительного низкого коэффициента теплопередачи [62].

При разработке теплозащитных материалов необходимо их разрабатывать не только с созданием теплозащитных свойств и требуемой прочности, но и созданием технологических, физико-технических и эксплуатационных свойств: с обеспечением их устойчивости к влажности, к старению, к пожароопасности, к перфорации, адаптации на строительной площадке и ряду других свойств.

1.3 Теплоизоляционные растворы с использованием вермикулита

Вермикулит является одним из наиболее часто используемых легких заполнителей в строительстве для получения огнеупорных строительных растворов, он классифицируется как легкий заполнитель, поскольку его плотность составляет менее 0,180 г/см³.

Вермикулит – минерал, относящийся к группе силикатов, и среди его важнейших свойств – низкая теплопроводность, низкая насыпная плотность, стабильность, химическая инертность и относительно высокая температура плавления, что придает ему высокую огнеупорность. При нагревании до температур от 650 до 900 °С, он увеличивается в объеме в 30 раз по сравнению с первоначальным размером [63]. Использование вспученного вермикулита в качестве легкого заполнителя для получения огнеупорных свойств, является важнейшим направлением применения, требующего изучения [83-88].

Вермикулит следует отнести к группе гидрослюдистых минералов, при воздействии высоких температур этот минерал существенно увеличивается в своем

объеме, значительно увеличиваясь по длине, получая форму гармошки. Вермикулит сложен пластинками достаточно гибкими и не эластичными, имеющими твердость 1,5, представлен гидратированными минералами из силиката железа, алюминия и магния, которые сформировались в результате изменения слюдистых минералов, при этом переслаивающиеся слои этой слюды чередуются с вермикулитом и гидробиотитом [89-93]. Для вермикулита характерны высокие звуко- и теплоизоляционные показатели, термостоек, характеризуется водопоглощением в диапазоне 120-400 % по массе, что является следствием пористой пластинчатого строения. Вермикулит сложен параллельными пакетами, при вспучивании которых сформировалось значительное количество дополнительных пор, имеющих продолговатое строение. Установлено, что крупные поры в общей массе составляют около 30 % пор, а более мелких до 70 %.

Структура вермикулита представлена параллельными слоями, которые представлены параллельно выпуклыми прослоями, внутри которых дополнительно формируется продолговатые поры различных размеров.

В настоящее время широко используются различные легкие заполнители в строительных растворах для получения удовлетворительных тепловых характеристик ограждающих конструкций зданий. Одним из таких материалов является вспученный вермикулит, который благодаря своим структурным характеристикам обеспечивает низкую теплопроводность при включении в раствор. Множество работ [64] посвящено исследованиям по частичной замене песка легкими заполнителями, такими как пемза, перлит, керамзит и пенополистирол, и возможности их применения в легких бетонах для производства строительных блоков, стеновых конструкций и легких бетонов [65]. При введении этих заполнителей в раствор, а также в бетон последние приобретают низкую плотность, что сказывается на тепло-, звукоизоляционных свойствах и огнестойкости, а также на их малой массе и конструктивных нагрузках [66]. Также заслуживает внимания материалы техногенного происхождения, к примеру, производственных отходов керамического кирпича. Выполнены значительные исследования по использованию отходов керамического кирпича, которым можно использовать как пуццолановую добавку

при приготовлении в различных растворах. Исследователи [67] занимаются легкими заполнителями, которые можно использовать для полной или частичной замены традиционных заполнителей, таких как керамзит, пемза, вермикулит и топливная летучая зола.

Теплоизоляционные растворы для покрытий обладают многими свойствами [68], которые рассматриваются в свеженанесенном, так и в отвержденном состоянии. В первом случае основными свойствами являются удобоукладываемость, консистенция, пластичность, водоудерживание, когезия, массовая плотность и начальная адгезия. В отвержденном состоянии основными свойствами являются адгезия, эластичность, плотность, прочность и теплопроводность. Исследователь [69] утверждает, что важными свойствами этого состояния являются механическая прочность, деформируемость, огнестойкость, устойчивость к воздействию агрессивных химических веществ, адгезия, проницаемость и теплопроводность. Carasek [70] утверждает, что важными свойствами этого состояния являются механическая прочность, долговечность, способность поглощать деформации и адгезия к подложке.

Растворное покрытие должно обладает свойствами, выходящим за рамки функции простого покрытия конструкций, оно должно защищать кладку и конструкцию от атмосферных воздействий и агрессивных факторов, во внешних покрытиях они должны интегрировать систему герметизации зданий, способствующие другим функциям, таких, как теплоизоляция (30 %), звукоизоляция (50 %), водонепроницаемость (от 70 до 100 %), пожаробезопасность, она также должна быть устойчива к износу и иногда к поверхностным ударам [71].

Вермикулит, как природный минерал имеет несколько важных свойств, таких как: низкую плотность, и теплопроводность и высокую огнестойкость [72]. Принадлежность вермикулита к семейству слюды определяет его основные характеристики, по наличию слоев гидроксिलированных катионов магния. Именно благодаря этому присутствию происходит расслоение после нагрева, вызывающее устранение существующей межпластинчатой воды при температуре выше 300 °C; это явление характеризуется объемным расширением до 30 раз по сравнению с

первоначальным размером, а пустоты, образовавшиеся в результате расширения, заполняются воздухом и придают вермикулиту низкую плотность, теплоизоляцию и звукопоглощение [73]. По мнению [63], объемное расширение вермикулита зависит от многих факторов: скорости нагрева, времени обжига при максимальной температуре, скорости охлаждения, содержания влаги и других факторов. Частицы вспученного вермикулита представляют собой тонкие пластинки, он имеет пористую структуру и шелковистый блеск, разделены тонкой прослойкой воздуха. Цвет, зерновой состав, форма и яркость вермикулита зависят от его происхождения.

Различные образцы вермикулита представлены на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Различные образцы вермикулита

Минерал семейства филлосиликатов, близкий к группе слюд. Это гидратированный силикат в пластинчатой форме, образующий плоские шестиугольные кристаллы с четко выраженной спайностью и параллельные направлению плоских поверхностей, что приводит к его разделению на пластинки или тонкие гибкие пластинки. Они содержат два кремниевых тетраэдрических слоя и алюминиевый октаэдрический слой между ними, две группы имеют свои вершины, состоящие из ионов кислорода и гидроксидов вокруг небольших катионов [74]. Образовались в природных условиях, таких как гидротермальное чередование биотита, вывет-

ривания или флогопита. Состоящие в основном из SiO_2 (около 37-42 %), MgO (14-12 %), AlO_3 (10-13 %), Fe_2O_3 (5-17 %), H_2O (8-18 %) и примерно (1-3 %) FeO . Это изменение его химического состава может изменить его физические свойства [75].

Вермикулит проявляет те же физические свойства, что и слюда, в отношении типичной спайности, распадаясь на тонкие гибкие пластинки, без упругости. Его цвет может варьироваться от бронзового до коричневатого-желтого, с типичным жемчужным блеском [74]. В вспученном виде вермикулит имеет привлекательные для применения характеристики (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Свойства вспученного вермикулита

Характеристики	Свойства
Водопоглощающая способность	удерживать воду, даже впитывая до 5 раз больше собственного объема из-за пористости
Негорючесть.	Выдерживает температуры до 1100 °С без изменения структуры. Его спекание происходит от 1150 °С.
Низкая теплопроводность	Заполняя воздухом пустоты между ламелями, вспученный вермикулит становится пористым материалом, что придает ему низкую теплопроводность, что позволяет использовать его в качестве теплоизолятора, его теплопроводность составляет около 0,06 ккал м/м ² °С, при 25 °С.
Низкая акустическая проводимость	Это позволяет снизить внешний шум до 62 % при использовании в строительных растворах или бетоне.

Функция цемента в растворной вермикулитовой смеси заключается в обеспечении стойкости смесей, повышении адгезии, содействии удобоукладываемости и водоудерживанию. Однако при избыточном использовании цемент сильно увеличивает усадку раствора, что может напрямую влиять на долговечности сцепление, чем больше количество цемента, тем больше теплота гидратации в растворе, что в избытке может вызвать усадку раствора, что впоследствии может стимулировать появление трещин и дефектов [76].

Песок представляет собой мелкий заполнитель, в котором преобладает кварц, из которого состоит раствор. Песок при введении в смесь повышает ее эффективность и смягчает последствия использования слишком большого количества цемента [77]. Песок, используемый в смеси, может поступать из разных источников: речной, овражный, полученный в результате дробления, размер песка может варьироваться от 0,06 до 2,0 мм. Гранулометрический состав песка напря-

мую связан с характеристиками, получаемого раствора. Например, более мелкие пески или пески с меньшим гранулометрическим составом повышают обрабатываемость смеси, обеспечивая лучшую адгезию между частицами, несмотря на это, сопротивление значительно снижается [78], более мелкие пески требуют больше воды, так как они имеют большие удельные поверхности. Следовательно, чем больше используется мелкого песка, тем больше требуется воды для затворения. С другой стороны, пески с крупной гранулометрией обеспечивают большую прочность на сжатие. Так по мнению [78] прочность на сжатие и модуль упругости заполнителей являются взаимосвязанными свойствами, на которые влияет пористость. Исследования показали, как влияют размер и форма зерен на свойства раствора (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Влияние размер и формы зерен на свойства раствора

Свойство	Преобладание более тонких зерен	Преобладание прерывистой гранулометрии	Преобладание угловатых зерен
Удобообрабатываемость	Лучше	Худший	Худший
Водоудержание	Лучше	-	Лучше
Усадка при высыхании	увеличивается	увеличивается	-
Пористость	-	увеличивается	-
Адгезия	Худший	Худший	Лучше
Механическая стойкость		Худший	-
Непроницаемость	Худший	Худший	-

В теплоизоляционных растворах обычно используются легкие заполнители, частично или полностью заменяющие песок для получения определенных характеристик в растворах, такие заполнители могут обеспечить снижение массы конструкции из-за их низкой плотности, термоакустическую изоляцию и обеспечение экологической устойчивости. Вермикулит представляет собой легкий заполнитель, который широко применяется благодаря своим химическим, минералогическим и структурным характеристикам, которые обеспечивают такие свойства, как негорючесть, водоудерживание, тепло- и звукоизоляцию, снижение массы раствора, отсутствие токсичности и другие характеристики.

В строительном растворе вода является элементом, который обеспечивает протекание химических реакций и процессы затвердевания раствора вследствие реакций гидратации цемента, образующего цементное тесто. На практике вода до-

зируется до тех пор, пока не будет достигнута консистенция смеси, поэтому она является элементом, способным повысить удобоукладываемость смеси в ее свежем состоянии. Для замешивания рекомендуется использовать питьевую воду, так как вода, содержащая органические вещества, может повлиять на качество раствора. В термических растворах, содержащих легкие заполнители, расход воды до достижения требуемой консистенции обычно выше из-за поглощающей способности заполнителя. В более легких заполнителях водоцементное отношение обычно выше, что может отрицательно сказаться на механической прочности.

Добавки, используемые в строительных растворах в количестве менее 5 %, способствуют улучшению удобоукладываемости, схватыванию, отверждению и устойчивости. Основными добавками являются:

- ускорители схватывания и твердения, влияющие на схватывание, твердение и набор прочности, наиболее часто применяемым ускорителем твердения является хлористый кальций;

- замедлители схватывания, которые затормаживают начало процессов гидратации портландцемента, эти добавки наибольшее влияние оказывают на алюминаты, что позволяет дольше работать с раствором;

- водоредуцирующие добавки, направленные на получение строительных растворов с большей устойчивостью за счет снижения водоцементного отношения, но для создания требуемой удобоукладываемости;

- пластифицирующие добавки и суперпластифицирующие добавки, которые обеспечивают значительное снижение водоцементного отношения и способствуют более активному протеканию процессов гидратации с достижением высокой прочности;

- добавки, обеспечивающие высокое воздухововлечение, они разжижают и пластифицируют раствор за счет образования пузырьков, выполняют основную функцию восполнения дефицита мелких частиц и могут уменьшить соотношение вода/цемент, компенсирующее снижение прочности из-за большей количества воздуха.

Необходимо контролировать количество вводимого воздуха, так как избыток может привести к значительному снижению прочности. Добавки могут быть добавлены в теплоизоляционные растворы, чтобы свести к минимуму влияние на некоторые свойства. Суперпластификаторы призваны существенно сокращать расход воды без доступа воздуха, что обеспечивает требуемую прочность раствора. Чем легче раствор, тем ниже его теплопроводность и, таким образом, создается надежная теплозащита. Проведение теплозащитных работ для ограждающих конструкций зданий и сооружений обеспечивает создание внутреннего комфорта. При выполнении теплозащитных работ следует использовать материалы, обладающие низкой теплопроводностью, пористой структурой и малой плотностью, так как эти характеристики позволяют сдерживать теплообмен между поверхностями.

Вермикулит во вспученном виде широко используется в облегченных строительных растворах, так как его химические, минералогические и микроструктурные характеристики обеспечивают полезные свойства, такие как снижение массы конструкции, отсутствие токсичности, негорючесть, способность поглощать жидкости, звукоизоляция и теплоизоляция. Вермикулит имеет низкую теплопроводность ($60 \text{ кал/м}^2 \cdot \text{ч } ^\circ\text{C}$ при $25 ^\circ\text{C}$).

Для растворов используют вермикулит средней, мелкой и сверхтонкой гранулометрии, обычно в этих растворах используются известные пропорции по объему. По данным [79] состав растворов, содержащих вермикулит, будет зависеть от цели его применения, для обмазки раствором внутренних стен с теплоизоляцией наиболее распространено соотношение 3:1:1:1 (вермикулит : известь : цемент : песок), или 3:1:1 (вермикулит : известь : цемент). Исследователь [80] утверждает, что идеальной смесью для покрытий является смесь 1:5 (цемент: вермикулит) с толщиной от 20 до 30 мм. Автор [63] сообщает в работе, что удобоукладываемость смесей со вспученным вермикулитом возрастает с увеличением количества вермикулита в смеси, и это улучшение свойств может быть связано с увеличением содержания воздуха в смеси. Автор [80] проводил исследования с частичной заменой мелкого заполнителя вермикулитом вместе с использованием переработанной шинной резины. Полученные растворы показали удовлетвори-

тельные результаты по свойствам в свежем и отвержденном состоянии, а также показали хорошие показатели по стойкости к сжатию и прочности. Свойства остались в пределах, установленных стандартом, не изменив, следовательно, его эксплуатационных характеристик. Авторы [81], указали в своих исследованиях, что использование вермикулита в смеси уменьшило плотность и объяснили, что снижение плотности вызвано тем, что частицы вермикулита имеют низкую плотность из-за наличия пустот в заполнителе или в пустотах. между частицами заполнителя и делает вывод, что вермикулит расширяется для получения легких материалов, таких как раствор. В своих исследованиях [82] с использованием вспененного парафина/вермикулита в качестве заполнителя показали снижение теплопроводности на 49,3 % и 64 % при замене 50 % и 100 % песка парафином и вермикулитом.

Сектор жилищного строительства в странах Ближнего Востока переживает переходный процесс в отношении стандартов качества и безопасности для зданий с упором на качество и эффективность, которым должны соответствовать здания на протяжении всего срока их службы, с упором на снижение потребляемой энергии в них, обеспечивая комфорт и жилищные условия, а также способствуя улучшению тепловых характеристик зданий. При этом необходимо использование эффективных теплозащитных материалов, которые улучшают тепловое сопротивление конструкции более эффективным способом и с большей простотой в применении. В связи с поставленной целью особое место уделяется созданию надежных и долговечных теплоизоляционных материалов с использованием недорогих сырьевых ресурсов.

Выполненный литературный обзор показал широкие возможности использования вспученного вермикулита в цементном растворе для улучшения его физических и теплофизических свойств, он широко используется в качестве наполнителя из-за его низкой объемной плотности, высокой огнеупорности, низкой теплопроводности и применение вермикулита в разработанных теплозащитных растворах гарантирует повышенные показатели по теплозащите зданий.

1.4 Выводы по 1 главе

1. Во многих развивающихся странах Ближнего Востока, особенно с жарким сухим климатом, таких как Ирак, большая часть жилых домов непригодна для проживания из-за несоответствующего климатического проектирования зданий, так энергетические нагрузки в жилых домах возрастают из-за отсутствия эффективных теплоизоляционных материалов. Создание надежной теплоизоляции является одним из перспективных решений по снижению энергопотребления и повышению теплового комфорта здания, поэтому при проектировании здания необходимо учитывать тепловые свойства материалов, принятых для обеспечения достижения теплового комфорта для жителей и оптимального использования электрической энергии в зданиях.

2. Теплоизоляция оказывает значительное влияние на сокращение теплопередачи с внешней части здания во внутренние помещения и, тем самым, снижает потребление электроэнергии, используемой для создания комфортных условий для жизнедеятельности людей. Поскольку проблема энергопотребления и стоимость электроэнергии в странах Ближнего Востока весьма высока, вопросы теплоизоляции зданий и сооружений представляют серьезную задачу, требующую своего решения. В последние десятилетия в странах Ближнего Востока возникла проблема увеличения норм энергопотребления в жилых и гражданских зданиях, что требует создания высокоэффективных теплоизоляционных растворов.

3. Одна из главных целей создания благоприятных условий для комфортной жизнедеятельности человека заключается в обеспечении удовлетворительного теплового комфорта и приемлемого качества воздуха в помещении. Для реализации поставленной цели необходимо разработать стратегию рационального проектирования зданий и сооружений с целью их естественного охлаждения при минимальном энергопотреблении и максимальном комфорте.

4. Оптимальные технологические и проектные решения для создания современных зданий с учетом современных требований, а также значительная вековая практика строительства жилья позволяют создавать комфортные тепловые

условия с обеспечением комфортных температурных условий для жизнедеятельности людей.

5. В современных условиях теплоизоляционную защиту на Ближнем Востоке производят с использованием самых различных теплозащитных материалов: экструдированный полистирол, пенополистирол, наноизоляционные материалы, вакуумные изоляционные, газоизоляционные панели, аэрогели, минеральная вата, вакуумные изоляционные панели, полиуретан, а также заслуживает внимания использование новых материалов, приготовленных по совершенным вакуумным технологиям и с использованием ноноразмерных наполнителей. Все теплоизоляционные материалы, используемые для создания теплоизоляции должны обладать требуемыми физико-механическими характеристиками, обеспечивать теплозащитные и огнезащитные свойства, быть безвредными для окружающих и быть приемлемыми для использования в сухих жарких условиях.

6. Наиболее перспективными современными изоляционными материалами являются вакуумные изоляционные панели (ВИП) и аэрогелевая изоляция, которые характеризуются высокими показателями по теплозащите. Представляется, что панели газонаполненные не получают существенного распространения, так как они сложны в изготовлении, монтаже и эксплуатации. Поэтому в настоящее время этот вопрос требует глубокого изучения и принятия определенных решений. Среди современных теплоизоляционных материалов. ВИП имеют самое низкое значение теплопроводности из всех - около $4 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, среднее значение для аэрогеля составляет $13 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Однако теплопроводность ВИП увеличивается со временем из-за проникновения влаги и воздуха путем диффузии, достигая значения $20 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в невакуумном или перфорированном состоянии, но и ВИП и аэрогели очень дороги, что требует значительных экономических затрат.

7. Анализ состояния технической и научной литературы по вопросу применения вспученного вермикулита в мировой практике строительства показал широкие возможности использования вспученного вермикулита в цементном растворе для улучшения его физических и теплофизических свойств. Вермикулит за счет низкой плотности, высокой степени огнеупорности, низких показателей по

теплопроводности, высокой химической стойкости позволяет получать теплоизоляционные материалы с требуемыми характеристиками для теплоизоляции строительных объектов.

8. Исследованиями в области использования вермикулита для получения звуко- и теплоизоляционных материалов, проведенными учеными России и зарубежных стран установлено, что этот материал заслуживает всестороннего научного внимания и дальнейших исследований, так как он обладает уникальными химическими и минеральным составом, позволяющим создавать эффективные теплозащитные материалы. Композиты с вспученным вермикулитом могут стать жизнеспособным и перспективным строительным материалом с точки зрения энергоэффективного и экологического проектирования в будущем.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика применяемых сырьевых материалов

При выполнении экспериментов и опытно-промышленной апробации применяли сырьевые материалы на основании их наличия и возможностью достижения поставленной цели.

При испытаниях использовали портландцементы российского и иракского производителей. Научно-исследовательские лабораторные работы проводили на белгородском цементе, а при проведении полупромышленных испытаний и внедрении использовали иракский цемент.

Портландцемент. Портландцемент ЗАО «Белгородский цемент» ЦЕМ 0 42,5Н (ГОСТ 31108-2020. «Цементы общестроительные. Технические условия») [94], портландцемент иракского завода «Аль-Каим» (OPC) IQS-0 No 5:1984(таблица 2.1). Свойства портландцементов проводили по ГОСТ 310.1-76 – 310.4-81 «Цементы. Методы испытаний» [95-96]. Полученные строительно-технические показатели портландцемента и интервалы их варьирования указаны в таблицах 2.1-2.3.

Таблица 2.1 –Химический состав портландцементов

Марка цемента	Химический состав портландцементов, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Прочее
ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108-2020	22,4	5,4	4,32	66,22	0,67	0,18	0,81
(OPC) IQS-0 No 5:1984 Завод «Аль-Каим»	21,82	4,7	5,0	61,72	2,32	2,77	1,67

Таблица 2.2 – Физико-механические свойства портландцементов

Физико-механические свойства цемента					
Марка цемента	Удельная поверхность м ² /кг	Сроки схватывания, ч : мин.		Активность вяжущего, МПа, в возрасте, сут.	
		Начало	Конец	2	28
ЦЕМ0 42,5Н	340	2:30	3:55	33	52
(OPC) IQS-0 No 5:1984 Завод «Аль-Каим»	355	2:10	3:30	17,5	38

Таблица 2.3 – Строительно-технические характеристики портландцемента ЗАО «Белгородский цемент» ПЦ500-Д0 и(ОПС) Завод «Аль-Каим» IQS-0No5:1984

Наименование показателя	ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108-2020	(ОПС) Завод «Аль-Каим» IQS-0No5:1984
Минералогический состав клинкера, масс. %		
C_3S	62±2	42,84
C_2S	16±2	30,36
C_3A	5±1	2,56
C_4AF	15±1	15,41
Удельная поверхность, м ² /кг	330,4	355
Нормальная густота цементного теста, %	26,5±1,0	27
Сроки схватывания, мин		
начало	100-140	130
конец	180-200	210
Средняя активность при пропаривании, МПа	37,2	38
Активность в двухсуточном возрасте, МПа	26	18

Для исследования был использован природный вермикулитовый заполнитель, который является основной частью заполнителя легкого бетона [97].

Вермикулит. В работе использовали вермикулит, вспученный термообработанный из природного вермикулита Потанинского месторождения (Челябинской области). Химический состав вермикулита представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Химический состав вермикулита (% по массе)

Химический состав, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Прочее
43,3	15,3	13,4	2,2	17,4	1,3	0,4	2,6	4,1

Вермикулит относится к гидрослюдистым минералам, состоящий из силикатов алюминия, железа и магния (рисунок 2.1), в результате термообработки при температуре около 700 °С расширяется и расслаивается, увеличивая свой первоначальный объем в 20-30 раз, что приводит к образованию вспученного вермикулита (рисунок 2.2), обладающего такими свойствами, как низкие значения кажущейся удельной массы и теплопроводности. Эти обусловленные гранулометрическим составом представляют вермикулит для применения в различных областях

строительства: в гражданском строительстве, в химической и лакокрасочной промышленности и др.



Рисунок 2.1 – Структура вермикулита

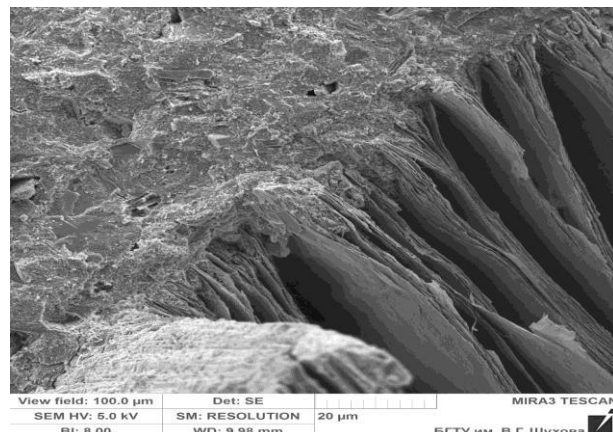


Рисунок 2.2 – Вспученный вермикулит на контакте с вяжущим

Вермикулиты относятся к группе гидрослюдов с переменным химическим составом $(\text{Mg}, \text{Fe})_3[(\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10}] \cdot (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Дифрактограмма вспученного вермикулита ($d = 11,38; 4,54; 3,45; 2,66; 2,43; 2,19; 1,70; 1,44 \text{ \AA}$) указана на рисунке 2.3.

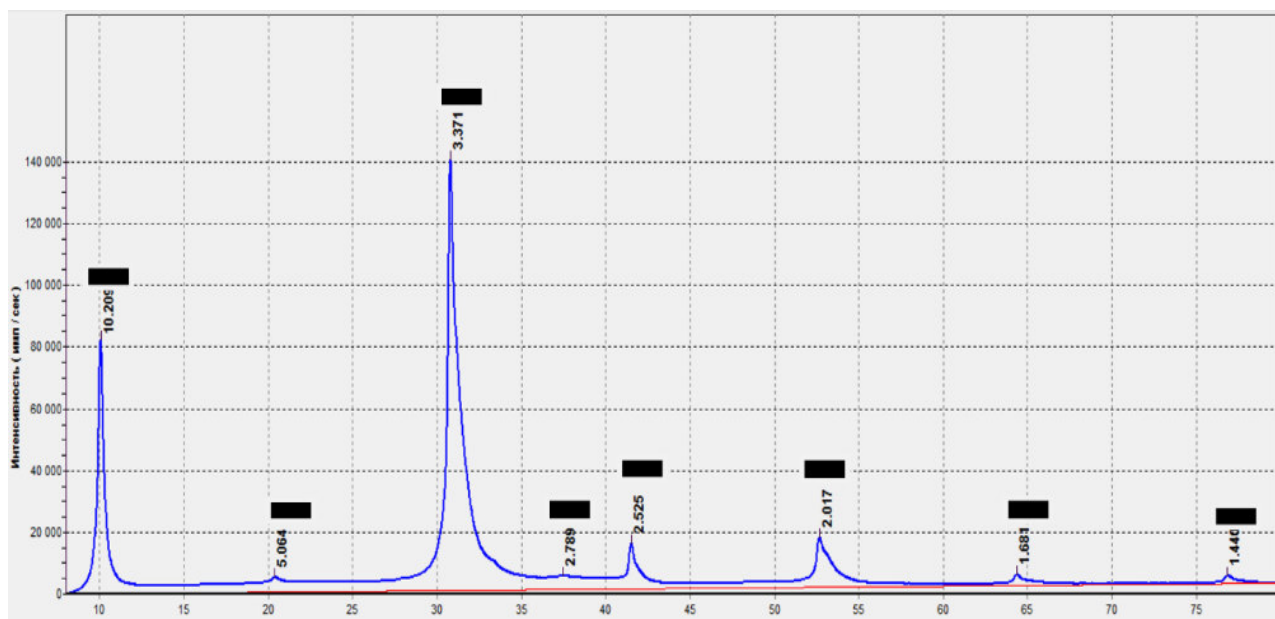


Рисунок 2.3 – Дифрактограмма вермикулита

При термообработке пластины вермикулита формируются в изогнутые скрученные столбики, формирующиеся в процессе гидратации и различных изменений гидрослюдов. Вермикулит представлен пластинами, которые достаточно мягки и гибки, имеют совершенную спаянность, характеризуется твердостью около 1,5 и

состоит из прогидратированных силикатов железа, алюминия и магния, которые образовались в результате переформирования слизистых минералов, при этом в материале чередуются первичные образованные слои со слоями, сформированные гидробиотитом и слоями вермикулита. Вспученный перлит обладает высокими тепло- и звукоизоляционными показателями.

Вермикулит вспученный имеет существенные отличия от прочих пористых заполнителей в том, что имеет пластинчатое строение, обладает малой прочностью, у него есть существенное достоинство – сильно развитая удельная поверхность, этот материал обладает значительным водопоглощением и высокой деформативностью. Образцы вермикулита представлены пластинками толщиной 0,01-0,04 мм, разделенных между собой воздушными прослойками и одновременно собранных в крупные пакеты, обладающие определенной адгезией, при этом они визуально представляют своеобразные гармошки. Вследствие описанного, истинная плотность и общая поверхность кусков вспученного вермикулита весьма значительна в сравнении с другими пористыми заполнителями. Примерная прочность частиц вермикулита при испытании на сжатие перпендикулярных слоев имеет величину 0,14-0,25 кг/см², а по параллельным слоям 0,4-0,8 кг/см². Показатели водопоглощения составляет 110-450 % по общей массе в зависимости от разновидностей вермикулита. Зерна вермикулита характеризуются значительным расслоением, присутствием внутри вспученных пакетных зерен мелких и крупных продолговатых пор.

Количество крупных пор занимает приблизительно 30 % всего рассматриваемого объема, само твердое вещество составляет примерно 5 % от всей площади среза, отмечается, что поры мелкие распространяются по площади около 64,5 % всей рассматриваемой площади. При изучении под микроскопом вермикулита отчетливо представлены мельчайшие поры, отмечается, что для вермикулита высокого сорта эти поры имеют достаточно высокое распределение. Исследуемая структура представлена перегородками, которые обеспечивают вермикулиту определенную упругость и прочность. За счет вспучивания тонких лепестковых пластинок формируется теплозащитный слой, при этом процессы дегидратации

внутренних слоев замедляются, при этом понижается способность вспучивания и увеличивается во времени. В объеме вспученного вермикулита отмечается равномерное вспучивание расслаивающихся слоев, на этих поверхностях отмечаются линзы различного типа: выпуклые или впалые, а также отмечается наличие крупной пористости. Отмечается, что на поверхности линз наблюдаются более мелкие участки вспучивания. Вермикулиты представляют собой группу минералов из различных гидрослюдов, отмечается их переменный состав $(\text{Mg, Fe})_3[(\text{Al, Si})_4 \text{O}_{10}] \cdot (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Образцы вермикулита, который прошел термическую обработку характеризуется кубовидной формой, а также наличием на поверхностях значительного количества каких-то бугристых новообразований. Вспученный вермикулит при использовании в засыпке приобретает хаотическое расположение, отмечается отличное сцепление с вяжущим веществом, за счет значительной удельной поверхности при формовании вермикулитовых изделий расходуется меньшее количество вяжущего, без потери прочности готового изделия (рисунок 2.2).

Показатель теплопроводности вермикулита, прошедшего термообработку определяется особенностями исходного вермикулита, величиной кусков, температуры обжига, а также расположением ее в тепловом потоке. Исследования Н.Н. Кальянова [98] свидетельствуют, что при возрастании температуры теплопроводность возрастает, это связано с увеличенным воздействием конвективного теплообмена в поровом пространстве. Отмечается, что до 100 °С теплопроводность мелких частиц увеличена, в сравнении с крупными, которые обладают меньшей плотностью. При возрастании температур отмечается обратная зависимость, это связано с конвективным теплообменом в более крупных частицах. Из вышеизложенного следует, что для создания надежной теплоизоляции целесообразно применять вермикулит с крупными частицами, при использовании при повышенных температурах лучше применять мелкие частицы.

Вермикулит относится к материалам негорючим, группа его горючести – Г1.

Порообразователь ESAPON 1214 применяется для создания дополнительной поризации в создаваемом композите, в качестве пластификатора и дополнительного смачивателя [99]. Образующиеся поры вследствие воздействия ESAPON 1214 характеризуются стабильностью, их присутствие положительно влияет на снижение усадочных деформаций, а также предотвращение возможного растрескивания и других дефектов. Добавка ESAPON 1214 способствует хорошему смачиванию и тонкому диспергированию высокодисперсных систем, способствует качественной переработке при перекачке и придает улучшенные свойства создаваемым композитам, вводится в количестве от 0,06 до 0,04 массовых процентов от сухой смеси.

Суперпластификатор Melment F10. Суперпластификатор этого типа производит Германия. Эффект действия заключается в электростатическом диспергировании порошка, что связано на эффекте значительного смещения дзета-потенциала зерен цемента в область отрицательного воздействия. Значительное измельчение зерен цемента наблюдается в начальные сроки гидратации, в этот период проходят хемсорбция отдельных молекул применяемого суперпластификатора на поверхности зерен цемента, этот эффект проходит наиболее активно при значительном содержании в вяжущем фаз C_3S и C_3A . При возрастании гидратационных процессов отмечается значительное падение удобоукладываемости цементной системы. Положительное действие суперпластификатора заключается в создании увеличенной текучести бетонных и растворных композиций, возрастающих в 2-3 раза при стабильном значении водотвердого отношения, снижение водотвердого отношения до 45 % при получении равноподвижных растворных смесей; возрастание требуемой прочности, и гомогенности затвердевшего цементного камня, значительное понижение усадочных деформаций [100]. Суперпластификаторы широко применяются для создания полов самовыравнивающихся, а также для устройства наливочных составов на различные основания, выполненных из различных вяжущих; стяжек самовыравнивающихся, приготовленных с использованием портландцемента.

Редиспергирующий дисперсионный порошок Vinnapas LL 4042 Н изготавливается в Германии, представляет собой высоко дисперсионный сополимерный порошок из смеси этилена и винилацетата, который создает препятствия к омылению. Вследствие значительного присутствия этилена редиспергирующий порошок характеризуется достаточной гибкостью и мягкостью в использовании. Данная добавка положительно влияет на адгезию, повышает прочность при растяжении и при изгибе, обеспечивает высокую пластичность, препятствует истиранию, не оказывает отрицательного влияния на повышение растекаемости, а также на водоудерживающие характеристики. Сухие смеси с применением таких добавок характеризуются значительным сроком хранения и использования [101].

Для проведения исследований использовали водопроводную питьевую, соответствующую ГОСТ 23732-2011 [102].

2.2 Оборудование и методы исследований

Прибор для проведения рентгенофазового анализа (РФА) ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific (рисунок 2.4) предназначен для того, чтобы определить полуколичественный и качественный состав сырья, продуктов, которые были получены в результате действия высоких температур на клинкер или гидратационных процессов портландцемента. С помощью РФА возможна расшифровка некоторых составов объектов исследования, кроме того, проводить косвенную оценку качественных показателей портландцемента и клинкера [103-106].

Сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU (рисунок 2.5) применяли для того, чтобы исследовать особенности микроструктуры.



Рисунок 2.4 – Аппарат для проведения рентгенофазового анализа ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific

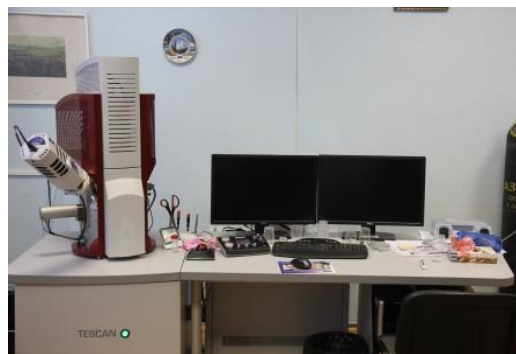


Рисунок 2.5 – Сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU

Особенности портативного микроскопа: высококонтрастный конденсор Шоттки с заданием обеспечения высокого разрешения, высококонтрастных, малозумных изображений; специальный датчик In-Beam как утилита с заданием получения изображений сверхвысокого разрешения; прогрессивный цифровой объектив; нетривиальная конструкция портативной оптико-электронной колонны с тремя диоптриями по методу Wide Field Optics; перераспределение эффективной конечной апертуры осуществляется посредством запатентованной промежуточно-волновой оптики TESCAN (IML); разработка In-Flight Beam Tracing для мониторинга и автоматизации характеристик электронного пучка в реалистичном времени с использованием электронно-оптического дизайна; сканирование со сверхвысокой скоростью (до 20 нс/пиксель) [107].

Лазерный анализатор Analysette 22 NanoTec plus (рисунок 2.6) использовали для того, чтобы определить распределение размеров зерен.

Analysette 22 Nano Tec Plus с полным диапазоном измерений 0,01–2000 мкм является совершенным многофункциональным плазменным датчиком для высокоэффективного и простого определения распределения частиц по размерам.



Рисунок 2.6 – Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec plus

Преимущества: быстрое измерение проб, рассеянных при сильном воздухе; Для номеров образцов от 1 см³ до примерно 100 см³; Эффективное удаление отходов благодаря дополнительному соплу Вентури с радиальным зазором; отсутствие реактивных поверхностей – защита от обмолота микрочастиц; эффективная передача проб с помощью электромагнитного лоткового распределителя; Полуавтоматическая регулировка воздействия воздуха с помощью ноутбука [108].

Для изучения термокинетических характеристик применяли калориметр дифференциальный ToniCAL (рисунок 2.7).

С помощью этого прибора можно измерить тепловой поток, который свидетельствует о процессах схватывания и гидратации в цементных системах.

Проведение испытаний по срокам схватывания и нормальной густоте цементного теста осуществляли по ГОСТ 310.3-76 на приборе Вика.

Показатели влажности смеси сухой строительной исследовали по ГОСТ 8735-88 по изменению массы пробы в процессе высушивания.

Исследования подвижности растворов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 5802-86 [110-111].

Исследования водоудерживающей способности проводили по ГОСТ 5802-86 [112].

Физико-механические испытания отформованных образцов в виде кубов 30×30×30 мм проводили на гидравлическом прессе в возрасте 2 и 28 суток нормального твердения. При испытании исследовали по 5-7 образцов и средний показатель выводили как средний статистический.

При испытании стандартных образцов по ГОСТ 5802 с размерами 70,7×70,7×70,7 мм применяли гидравлический пресс [112].

Испытания по водопоглощению проводили по стандартной методике, путем высушивания в сушильном шкафу и насыщения по влажной среде.



Рисунок 2.7 – Дифференциальный калориметр ToniCAL

Исследования теплопроводности проводили в образцах $150 \times 150 \times 20$ мм отформованных и выдержанных в течение 28 сут в условиях нормального твердения. Перед испытанием на приборе ИТС-1 образцы высушивались до стабильной массы (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Общий вид прибора ИТС-1

При определении наилучших составов теплоизоляционных смесей, а также влияния отдельных ингредиентов на технологические, эксплуатационные и физико-механические свойства теплоизоляционных растворов применяли метод математического планирования эксперимента. С помощью этого метода были обработаны результаты испытаний и получены данные для управления и регулирования технологическими процессами [113].

На сканирующем электронном микроскопе типа TescanMira 3 изучали микроструктуру и проводили микроанализ элементного состава типичных образцов теплоизоляционного раствора.

3 КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА

3.1 Вяжущие композиции с использованием вермикулита

Для снижения плотности теплоизоляционных растворов требуется создание композиционного вяжущего с пониженной плотностью, но с достаточной прочностью, чтобы связать зерна легкого наполнителя в единый композит. В соответствии с выдвинутой нами рабочей гипотезой о том, что возможно разработать композиционное вяжущее с высокой пористой структурой и с низкой плотностью за счет дисперсного легкого наполнителя и высокодисперсного портландцемента и обеспечения создания высокой прочности, вследствие формирующегося объемного каркаса гидросиликатов кальция на минеральных частицах вспученного вермикулита и постепенно зарастающего по всему объему кристаллогидратами силикатов и алюминатов кальция, представляло интерес изучить особенности получения вяжущих композиций в вибрационной мельнице, определить наиболее рациональные технологические характеристики получения вяжущих композиций пониженной плотности и изучить их физико-механические и технологические свойства.

Известно, что процесс измельчения представляет очень важный технологический передел, предопределяющий последующие физико-химическое взаимодействия в создаваемой высокодисперсной системе и благоприятно влияющий на получение высоких физико-механических показателей композита.

3.1.1 Разработка составов вяжущих композиций

В соответствии с вышеизложенным были разработаны вяжущие композиции, имеющие в своем составе портландцемент и в качестве минерального наполнителя, вводился вспученный вермикулит в диапазоне от 10 до 30 %, совместно механоактивированных в установке вибрационного типа (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Составы и физико-механические характеристики вяжущих композиций, приготовленных в вибрационной мельнице

№ составов	Время помола, мин	Состав %		Удельная поверхность м ² /кг	Физико-механические показатели в возрастах 7 и 28 сут		
					Прочность, МПа		Плотность, кг/м ³
		вермикулит	цемент		7	28	
0*	0	0	100	308	19,2	48,1	2200
1**	0	10	90	308	3,8	9,6	1459
1-1	5	10	90	504	14,6	36,4	1620
1-2	10	10	90	583	18,2	45,5	1803
1-3	15	10	90	597	20,0	50,1	1917
1-4	30	10	90	612	23,3	58,2	1933
1-5	40	10	90	600	20,4	51,0	1920
2**	0	20	80	275	3,1	7,9	1043
2-1	5	20	80	517	11,96	29,9	1510
2-2	10	20	80	604	16,0	40,2	1650
2-3	15	20	80	612	18,0	45,2	1790
2-4	30	20	80	643	20,3	50,9	1881
2-5	40	20	80	620	18,6	46,5	1795
3**	0	30	70	275	2,0	5,2	951
3-1	5	30	70	546	7,8	19,7	1400
3-2	10	30	70	616	11,1	27,8	1530
3-3	15	30	70	642	13,6	34,2	1650
3-4	30	30	70	722	17,1	42,8	1720
3-5	40	30	70	650	14,2	35,5	1665

*Чистый товарный цемент;

**Состав, полученный в результате ручного смешения товарного цемента и вермикулита фракции менее 5 мм.

Для всех составов вяжущих композиций приготовленных в вибрационной мельнице (рисунок 3.1) отмечается, что при продолжительности помола возрастает удельная поверхность, при этом отмечается, что наибольший прирост удельной поверхности наблюдается у образцов размолотых до 10 мин, свыше этой величины эффективность помола снижается у составов вяжущих композиций, содержащих 10-20 % вермикулита. Наблюдается увеличение удельной поверхности у состава вяжущей композиции с 30 % содержанием вермикулита, что связано с переизбытком минерального наполнителя.

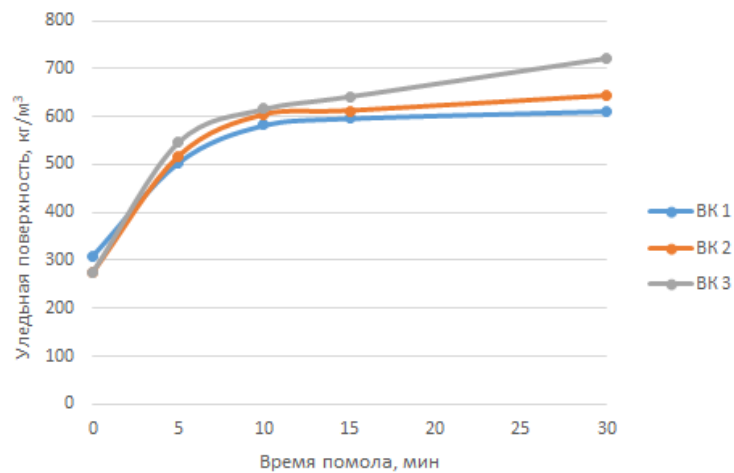


Рисунок 3.1 – Влияние продолжительности помола на удельную поверхность вяжущих композиций
ВК 1 – состав 3-4; ВК 2 – состав 2-4; ВК 3 – состав 1-4

Сравнительные показатели плотности и прочности гидратированных вяжущих композиций различных составов (таблица 3.1, рисунки 3.2, 3.3), механоактивированных в вибрационной мельнице свидетельствуют об эффективности механообработки. Так, если плотность исходного гидратированного портландцемента составляет 2200 кг/м^3 , то перемешанная вручную смесь при соотношении портландцемента 90 % и вермикулита 10 % имеет плотность 1459 кг/м^3 (состав 1). С увеличением продолжительности механоактивации указанных составов до 30 мин плотность возрастает до 1933 кг/м^3 (состав 1-4), при дальнейшей активации до 40 мин (состав 1-5), показатель плотности снижается до 1920 кг/м^3 .

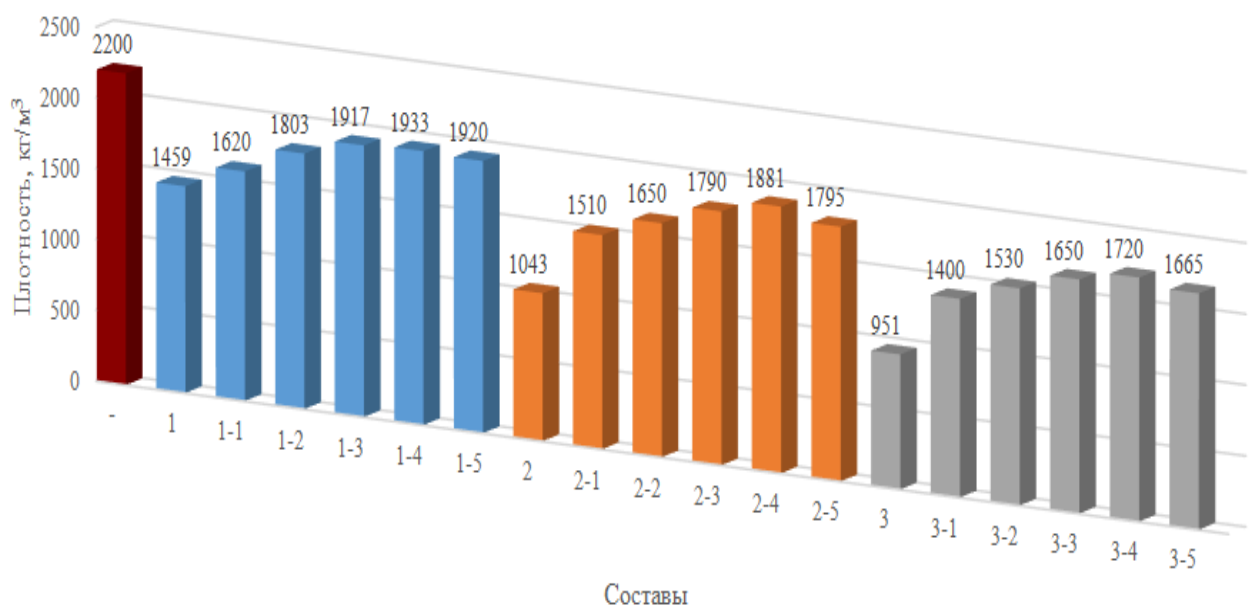


Рисунок 3.2 – Сравнительные показатели плотности вяжущих композиций различных составов, приготовленных в вибрационной мельнице в возрасте 28 суток

Рассматривая смеси состава портландцемент 80 % и вермикулит 20 % следует отметить, что ручное смешение обеспечило плотность 1043 кг/м^3 (состав 2), обусловленную меньшим содержанием портландцемента в сравнении с составами 1-5. Анализ изменения плотности с 1510 кг/м^3 до 1881 кг/м^3 , гидратированных вяжущих композиций составов с 2-1 по 2-4, указывает на увеличение плотности составов до продолжительности помола до 30 мин.

При дальнейшей механоактивации плотность композиции состава 2-5 снижается до 1795 кг/м^3 , что связано с переизмельчением материала и уплотнением его структуры.

Гидратированные вяжущие композиции составов 70 % портландцемента и 30 % вермикулита ручного смешения, имеют плотность 951 кг/м^3 вследствие значительного содержания пористого наполнителя.

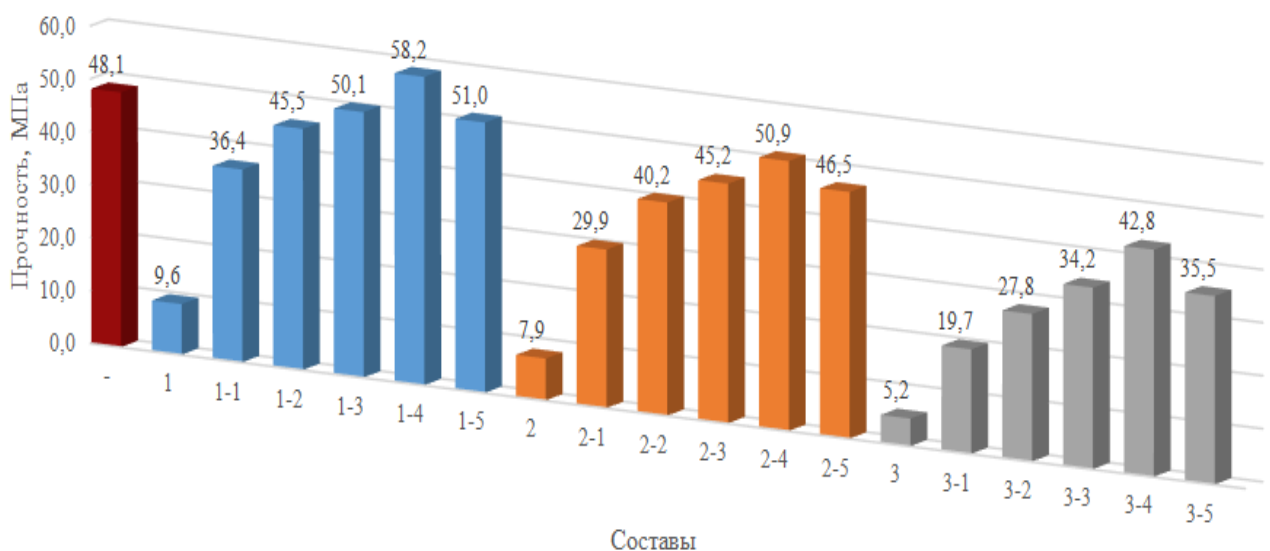


Рисунок 3.3 – Сравнительные показатели прочности вяжущих композиций различных составов, приготовленных в вибрационной мельнице в возрасте 28 суток

Механоактивация составов с 3-1 по 3-5 при различных продолжительностях помола показала, что наблюдается увеличение плотности с 1400 кг/м^3 до 1720 кг/м^3 у составов с 3-1 по 3-4, а затем плотность снижается до 1665 кг/м^3 при дальнейшей активации до 40 мин (состав 3-5).

Результаты исследований влияния длительности механоактивации на плотность составов с различным содержанием портландцемента и вермикулита свидетельствует, что все составы независимо от количества наполнителя при механоак-

тивации до 30 мин приобретают наибольшую плотность, при которой формируется наиболее эффективная структура вяжущих композиций.

Характер изменения показателей по прочности при сжатии гидратированных вяжущих композиций составов с 1-1 по 3-5 (таблица 3.1) идентичен показателям плотностей, с увеличением показателей плотностей вяжущих композиций пропорционально увеличивается прочность.

Механоактивация вяжущих композиций в зависимости от продолжительности механообработки от 5 до 30 минут в сравнении с неактивированными смесями увеличивает показатель прочности при сжатии в возрасте 28 суток: для состава 1 (9,6 МПа) в 3,8-6,1 раза для состава 2 (7,9 МПа) в 3,8-6,5 раза и для состава 3 (5,2 МПа) в 3,8-8,2 раза.

Таким образом, механоактивация в вибрационной мельнице исследуемых композиций при продолжительности механообработки до 30 мин позволяет получить вяжущие композиции с высокими показателями прочности при сжатии, превосходящие показатели прочности исходного цемента на 20,1 % для состава: портландцемент 90 % и вермикулит 10 % (составов 1-4); на 6 % для состава: портландцемент 80 % и вермикулит 20 % (состав 2-4), а также позволяющие экономить до 10-20 % дорогостоящего энергоёмкого цемента.

Для дальнейших исследований был принят наилучший состав вяжущей композиции 1-4, включающий 90 % портландцемента и 10 % вермикулита, полученный механоактивацией в вибрационной мельнице в течение 30 мин обеспечивающий получение прочности при сжатии 58,2 МПа с плотностью 1933 кг/м³.

3.1.2 Дисперсные характеристики вяжущей композиции

В работе для измельчения применяли мельницу вибрационную МВ-20, эти мельницы по принципу работы приближаются к шаровым, но имеют свои особенности, так основной вал при вращении придает вибрационное действие рабочей камере, камера же обеспечивает движение мелющих тел, находящихся в ней.

Сравнительный анализ гранулометрического состава цемента и полученной вяжущей композиции, приготовленных в вибрационном агрегате показал, что показатель помола вяжущей композиции превосходит показатель дисперсности помола цемента (рисунок 3.4).

Наблюдается, что по гранулометрическому составу вяжущая композиция смещается в область пониженных значений удельной поверхности, что составляет 25 % (с величины 20 мкм до величины 15 мкм). После измельчения удельная поверхность вяжущей композиции имеет 650 м²/кг, такой же показатель получен в случае измельчения и в шаровой мельнице.

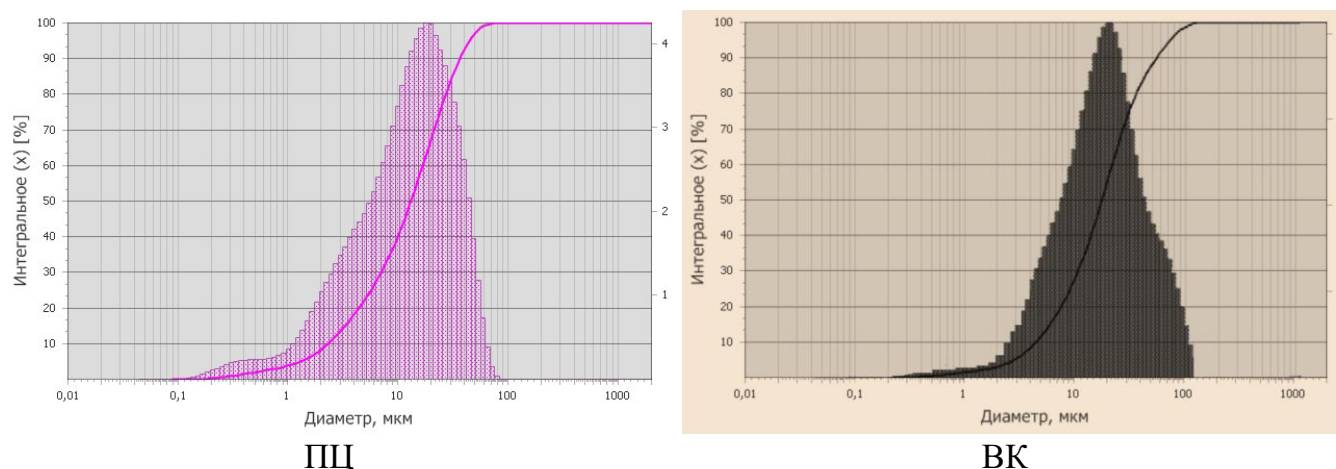


Рисунок 3.4 – Гранулометрический состав цемента и вяжущей композиции при соотношении компонентов 95 % : 5 %, измельченных в вибрационной мельнице

Таблица 3.2 – Фракционный состав цемента и вяжущей композиции при соотношении компонентов 95 % : 5 %, измельченных в вибрационной мельнице

Наименование	Фракционный состав, мкм							
	0-1	1-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-100
Портландцемент, %	5	33	23	23	10	4	1	1
Вяжущая композиция, %	3	17	36	17	5	9	1	10

Установлено, что измельченные в вибрационной мельнице портландцемент и вяжущая композиция имеют близкий гранулометрический состав, однако, гранулометрические характеристики вяжущей композиции превышают долю частиц размером 1-30 мкм на несколько процентов (до 3 %) в сравнении с гранулометрическим составом портландцемента, что связано с генезисом вермикулита.

Высокая близость фракционного состава полученного композиционного вяжущего с измельченным портландцементом свидетельствуют о создании высокой гомогенности в вяжущей смеси композиционного вяжущего. Следует отметить присутствие в смеси частиц вермикулита в виде тончайших пластинок (0,01-0,02 мм), на которых впоследствии будут формироваться мелкозернистые новообразования силикатов кальция и алюминия, что обеспечит повышение прочности композита.

3.1.3 Исследование фазовых продуктов гидратации вяжущей композиции

Методом рентгенофазового анализа изучены полученные гидратированные соединения портландцемента (рисунок 3.5) и вяжущей композиции (рисунок 3.6), проведены сравнения и установлено, что рентгенограммы ВК представлены типичными фазами для портландцемента: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93$; $3,11$; $2,63$; $1,93$; $1,79$ Å); CSH(I) ($d = 3,04$; $2,88$; $1,83$; $2,78$; $1,66$ Å); CSH (II) ($d = 9,8$; $3,04$; $2,88$; $2,81$; $1,84$ Å); $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ($d = 9,83$; $5,62$; $4,69$; $5,88$; $3,48$; $3,25$; $2,72$; $2,55$; $2,25$; $2,19$ Å), учитывая, что в композиционном вяжущем был использован вермикулит, то в дифрактограммах композиционного вяжущего появились максимумы, характерные вермикулиту: ($d = 11,38$; $4,54$; $3,45$; $2,66$; $2,43$; $2,19$; $1,70$; $1,44$ Å).

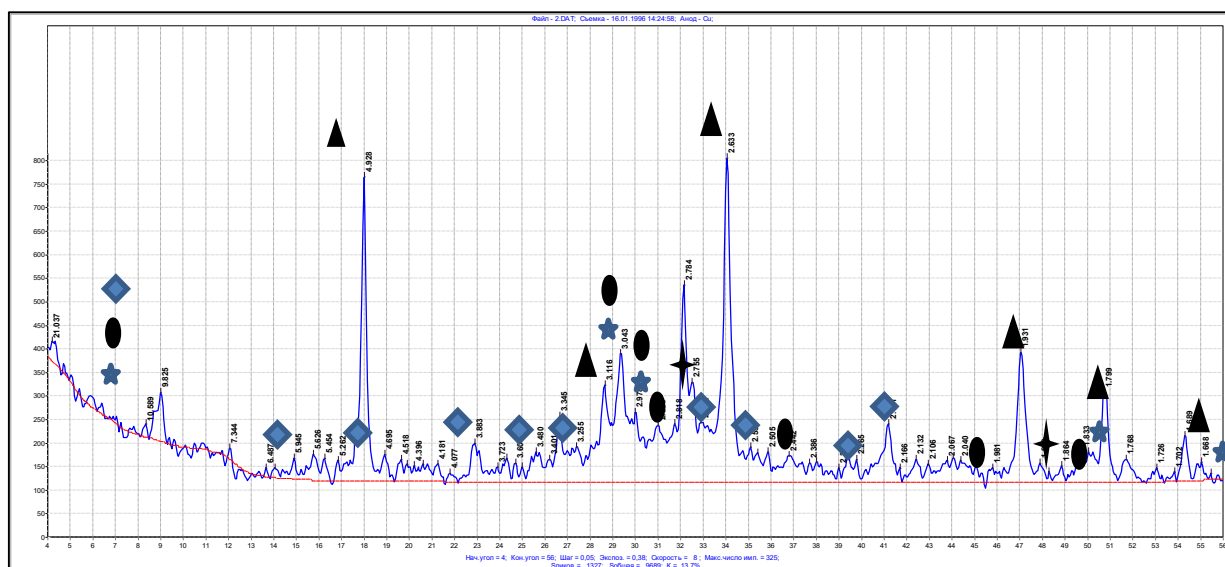


Рисунок 3.5 – Рентгенограмма гидратированного портландцемента в возрасте 28 сут:
 ▲ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93$; $3,11$; $2,63$; $1,93$; $1,79$); ★ – CSH-I ($d=3,04$; $2,88$; $1,83$; $2,78$; $1,66$);
 ● – CSH-II ($d=9,8$; $3,04$; $2,88$; $2,81$; $1,84$); ✱ – $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$ ($2,75$; $1,89$);
 ◆ – Этtringит ($9,83$; $5,62$; $4,69$; $5,88$; $3,48$; $3,25$; $2,72$; $2,55$; $2,25$; $2,19$)

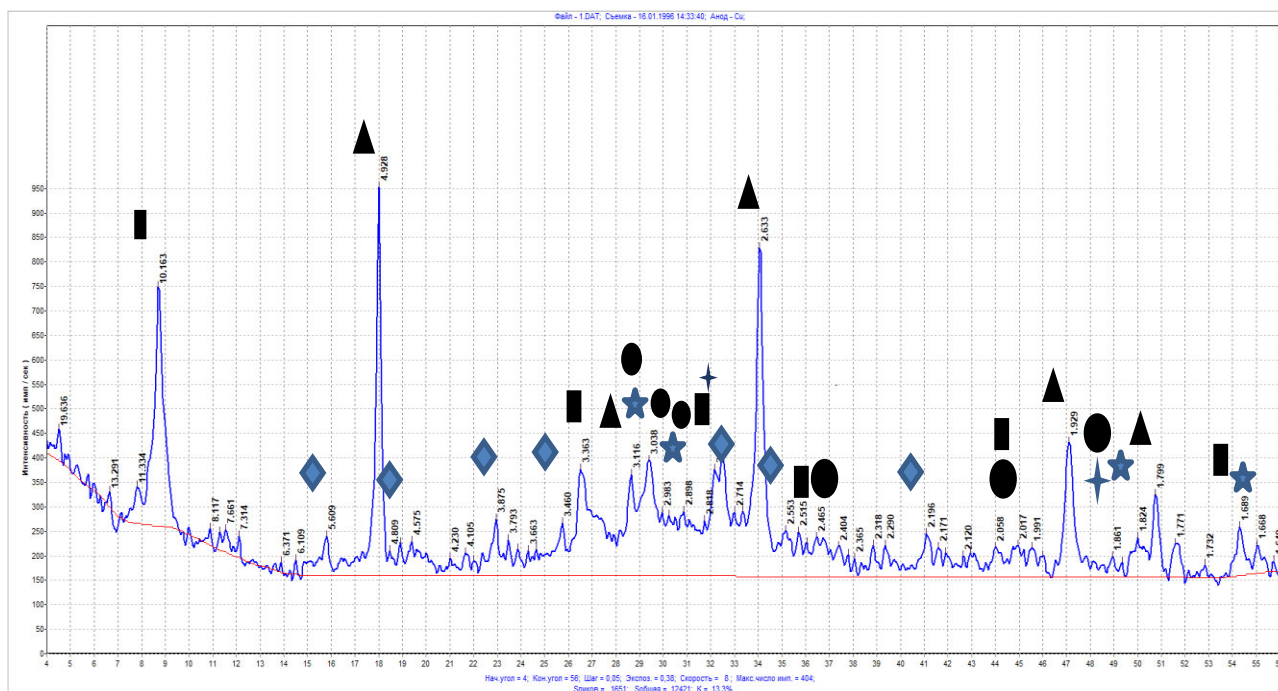


Рисунок 3.6—Рентгенограмма гидратированной вяжущей композиции состава 1-4 в возрасте 28 сут:

- ▲— $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79$); ★— CSH-I ($d=3,04; 2,88; 1,83; 2,78; 1,66$);
- CSH-II ($d=9,8; 3,04; 2,88; 2,81; 1,84$); ✦— $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$ ($2,75; 1,89$);
- ◆— Эtringит ($9,83; 5,62; 4,69; 5,88; 3,48; 3,25; 2,72; 2,55; 2,25; 2,19$)
- вермикулит ($d = 11,38; 4,54; 3,45; 2,66; 2,43; 2,19; 1,70; 1,44$)

Анализ дифрактограммы гидратированной вяжущей композиции показывает, что новых соединений в системе не установлено, но дифракционный фон характеризуется повышенной интенсивностью, что свидетельствует о наличии в системе повышенного количества субмикроскопических кристаллических новообразований гидросиликатов кальция, способствующих повышению прочности композиционного вяжущего.

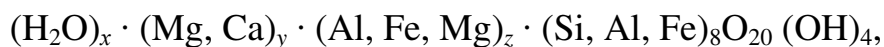
3.1.4 Исследование микроструктуры вяжущих композиций

Присутствие минерального наполнителя в виде вермикулита в вяжущих композициях создает особые условия для формирования требуемых характеристик теплоизоляционному раствору.

С позиции кристаллохимии генезис первичных слюд: биотида и флогопита в процессе перекристаллизации формы вермикулита объясняется переходом ионов калия в молекулы воды [114-119]. В процессе этих взаимодействий форми-

руется гидратный слой, состоящий из пакета гидратированных ионов металла и молекул воды (рисунок 3.7).

Таким образом, структурная формула вермикулита может быть записана [115]:



где x – число молекул воды;

y – обменные ионы;

z – ионы в октаэдрических положениях.

Катионы с Mg^{2+} и Ca^{2+} в совокупности с гидратными оболочками характеризуются значительным радиусом, в сравнении с заменяемыми ими ионами калия. Вследствие этого, расстояние между соседними пакетами (рисунок 3.7) у вермикулита значительно больше, чем у флогопита и биотита. Процесс превращения биотита и флогопита в вермикулит протекает постепенно. Поэтому существует ряд переходных разновидностей, находящихся на различных стадиях изменения. У этих разновидностей в межпакетных промежутках присутствуют не только гидратные слои, но и сохраняется часть межпакетных щелочей.

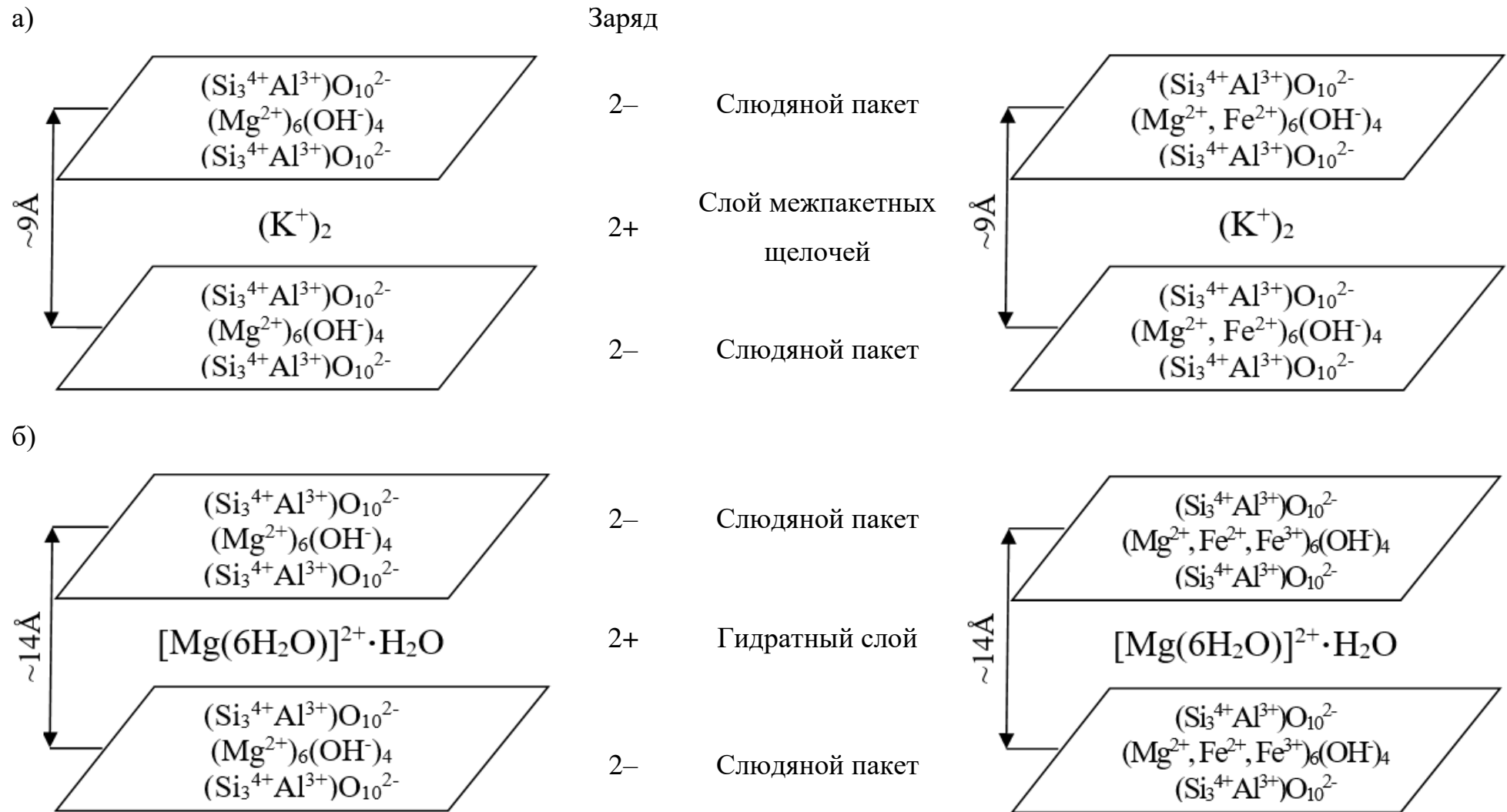


Рисунок 3.7 – Схематическое изображение элементарной структурной ячейки флогопита, биотита и вермикулита

Таким образом, переходные разновидности являются минералами смешанной структуры слоистого типа. Наличие между слюдяными пакетами вермикулита гидратного слоя обуславливают одно из наиболее характерных физических свойств – способность к вспучиванию при нагревании. Смесь пористых агрегатов обеспечивают высокую пористость и низкую плотность вермикулиту.

Сравнительное исследование микроструктур цементного камня на основе портландцемента и вяжущих композиций показали, что все составы отличны, но в каждом составе присутствует различное количество вермикулита. Для всех образцов типично, что они характеризуются равномерно пористой структурой, но и имеют различное количество пор, в порах различного размера активно формируется гидросиликаты различных новообразований, в том числе гидросиликаты алюминия и кальция. Следует отметить наличие четких контактных зон на поверхностях вермикулита и образующихся кристаллогидратах. Отмечается, что на зернах наполнителя образуется структура, которая имеет равномерное кристаллическое распределение и которая прорастает в общем композите по всему объему, при этом четко просматриваются отдельные срастания кристаллогидратов в общий конгломерат.

Вследствие проведенной механоактивации вяжущих композиций всех составов (портландцемента с вермикулитовым наполнителем) в вибрационной мельнице, зерна портландцемента обнажились до свежей поверхности и тонким слоем распределились на бугристой поверхности зерен вспученного вермикулита. Таким образом, создав благоприятные условия для размещения на тонкодисперсных вермикулитовых силикатных подложках центров кристаллизации гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

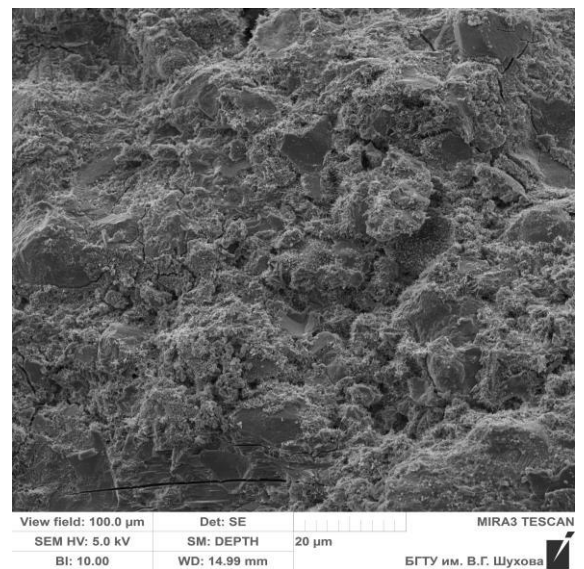
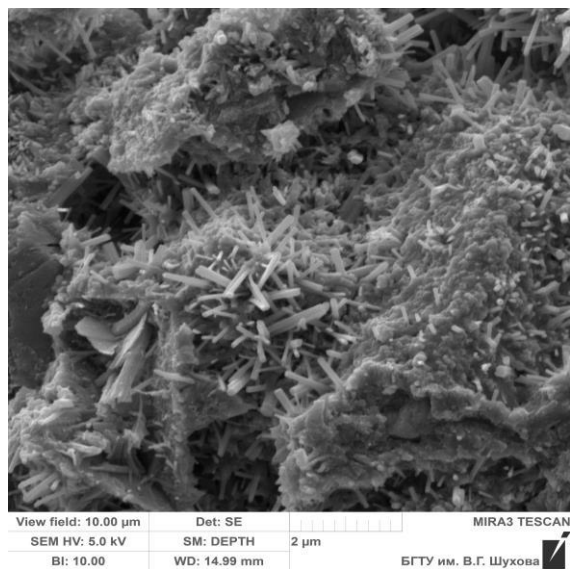


Рисунок 3.8 – Микроструктура цементного камня в возрасте 7 суток

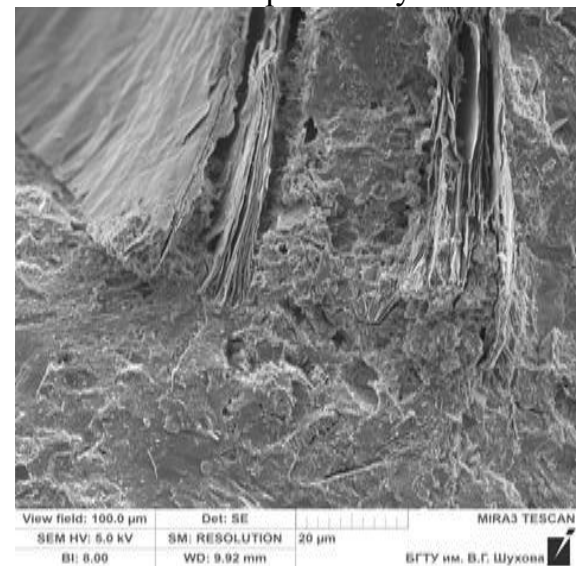


Рисунок 3.9 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 1-4 в возрасте 7 суток

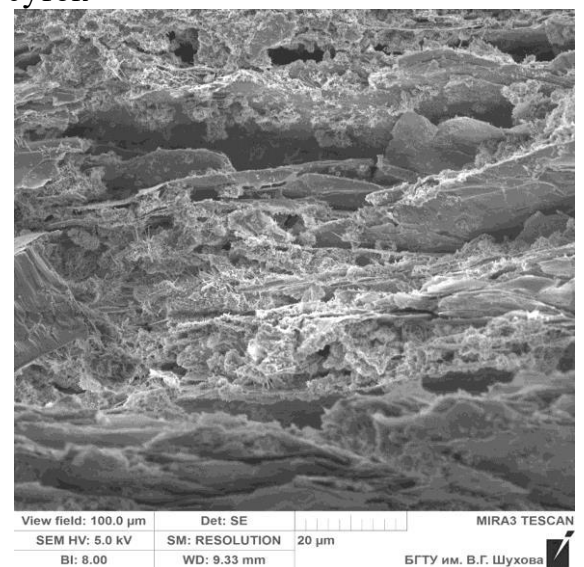
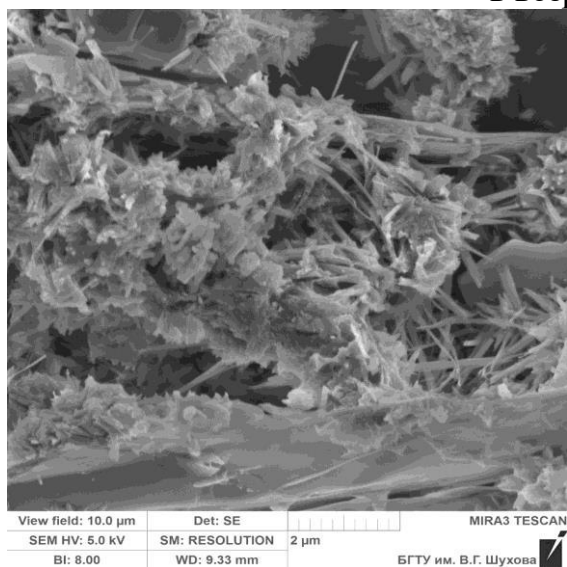


Рисунок 3.10 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 2-4 в возрасте 7 суток

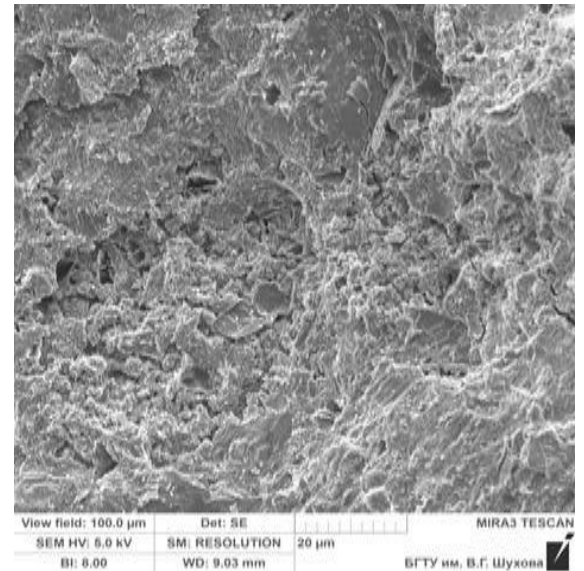
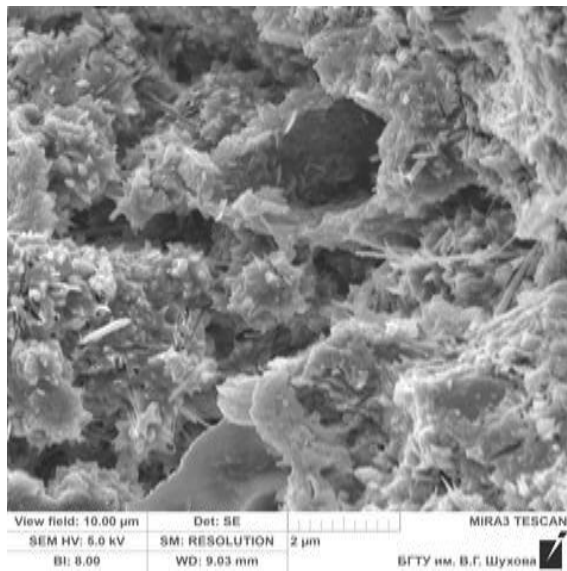


Рисунок 3.11 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 3-4 в возрасте 7 суток

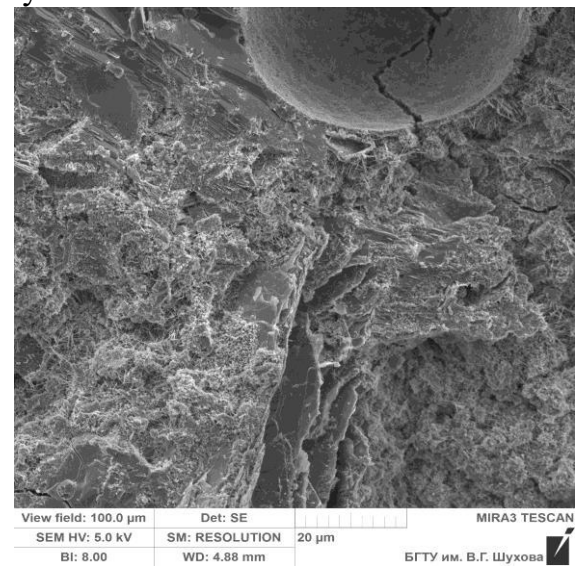
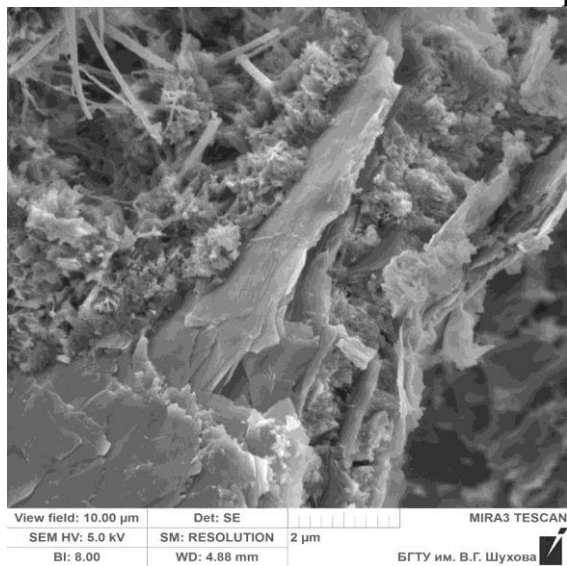


Рисунок 3.12 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток

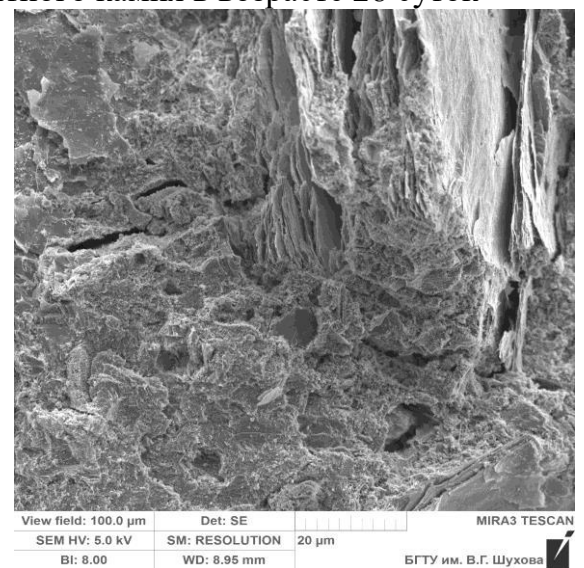
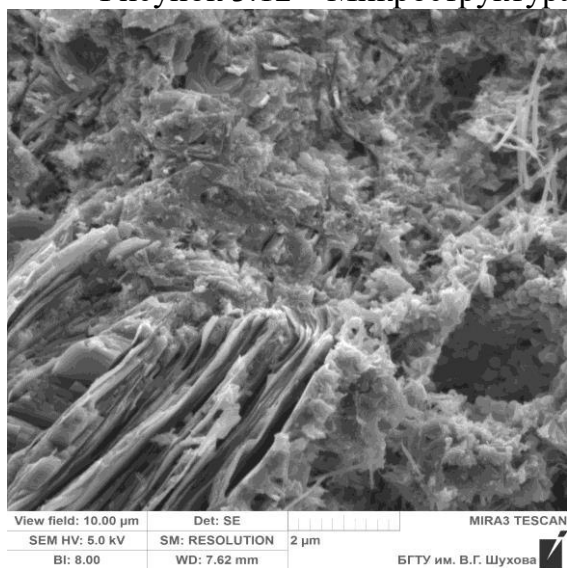


Рисунок 3.13 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 1-4 в возрасте 28 суток

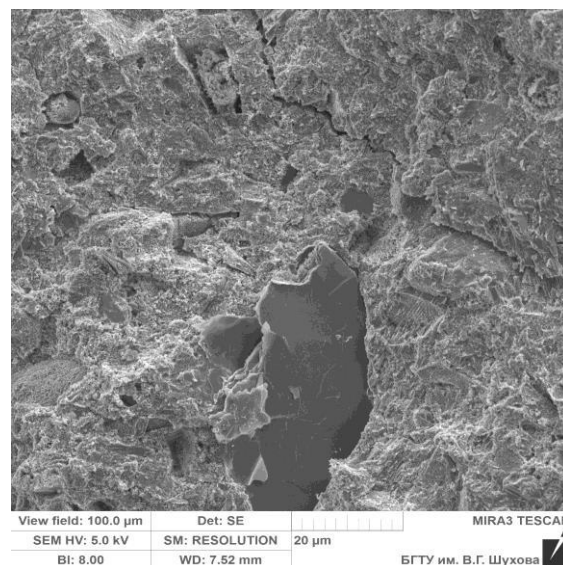
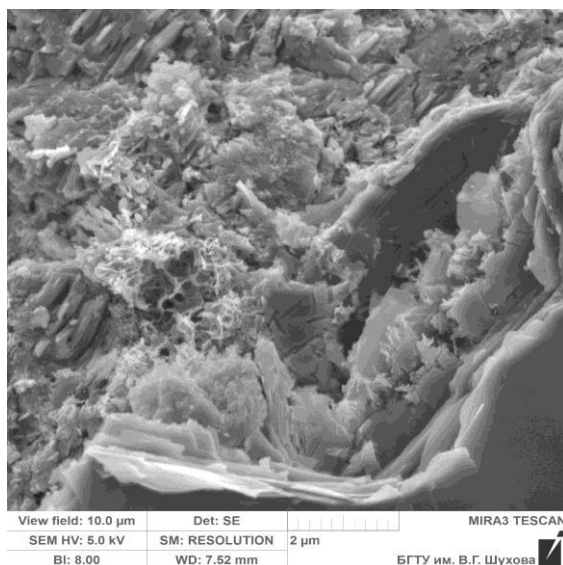


Рисунок 3.14 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 2-4 в возрасте 28 суток

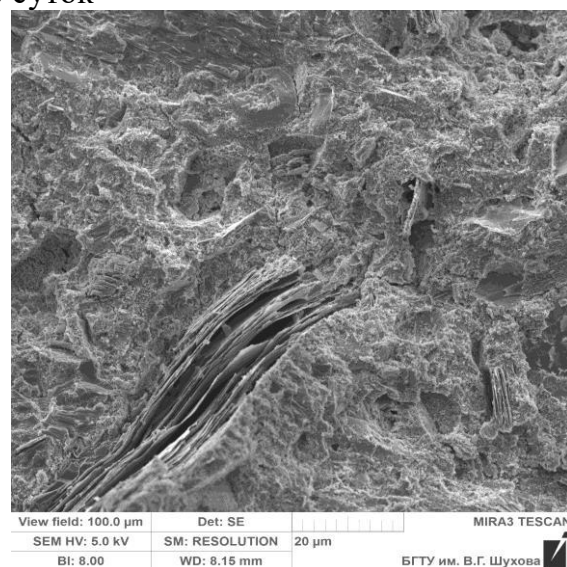
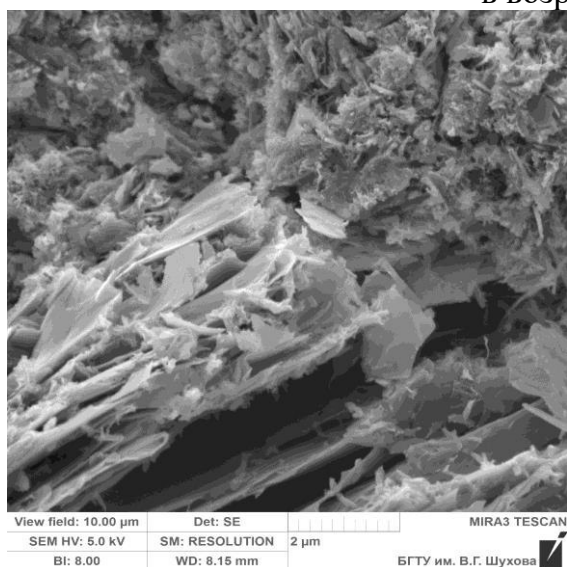


Рисунок 3.15 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 3-4 в возрасте 28 суток

Установлено, что образующийся цементный камень на основе вяжущей композиции (рисунки 3.8-3.15) формируется за счет объемного каркаса, сформированного вермикулитовым наполнителем и на этом наполнителе, как на отдельных подложках формируются объемная структура из кристаллов гидросиликатов и гидроалюминатов, отмечается что на этом первичном каркасе образуется новые кристаллические прорастания, состоящие из тонкодисперсных частиц.

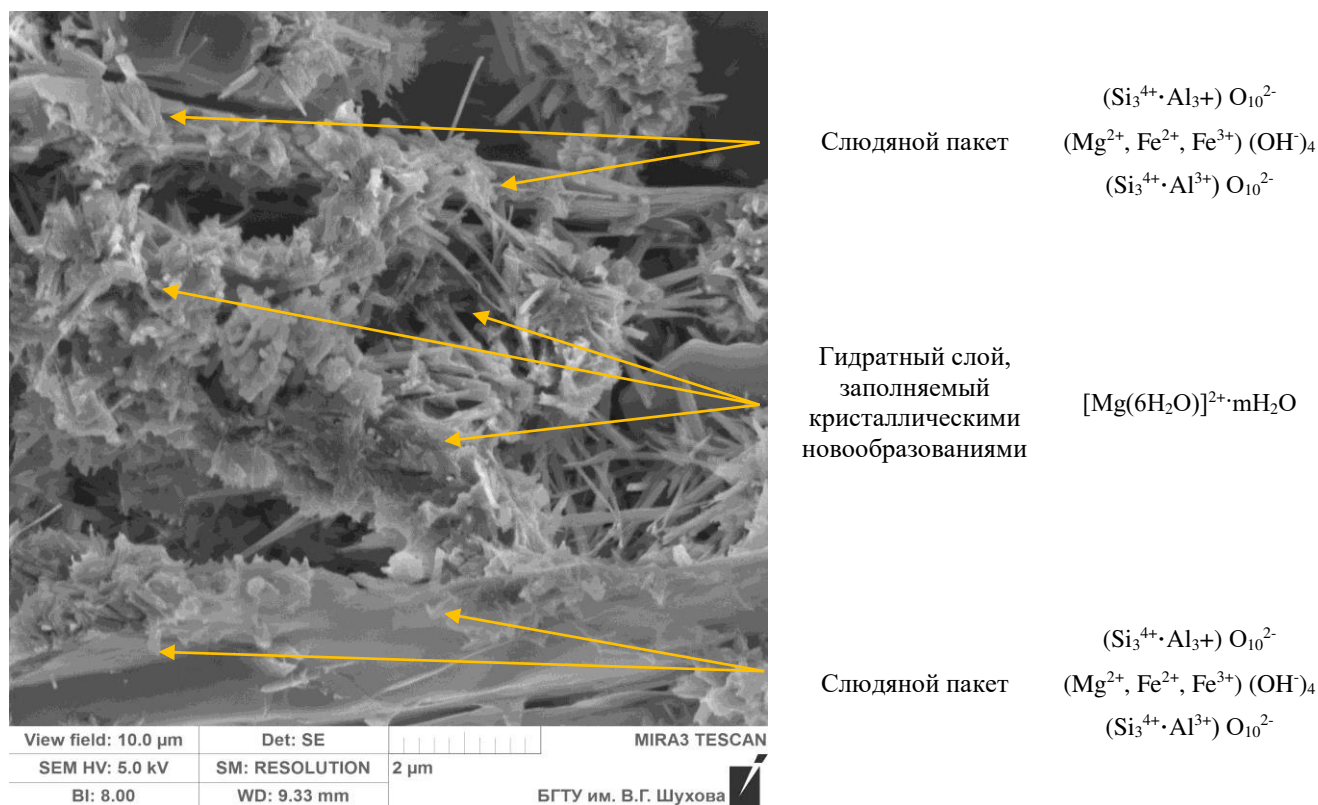


Рисунок 3.16 – Микроструктура скола цементного камня из вяжущей композиции

Анализ микроструктуры показал, что все гидратированные вяжущие композиции включают базовую структуру, внесенную вермикулитовыми пакетами, на которых, как на подложках образуются мелкозернистые прорастания в объемном пространстве (рисунок 3.16) образовавшихся межпакетных слоях вермикулита.

Проведенные микроскопические исследования свидетельствуют о стабильном формировании микроструктуры вяжущих композиций в возрастах 7 и 28 сут., что четко согласуется с результатами их физико-механических испытаний в соответствующие сроки твердения.

Установлено, что при введении вермикулита в составы до 30 % и более, растворы обладают хорошими теплоизоляционными свойствами, но низкими показателями прочности при сжатии. Особенности природы вспученного вермикулита влияют снижение плотности и обеспечивают теплозащитные свойства. Механоактивация вяжущих композиций в зависимости от продолжительности обработки в вибрационной мельнице составов: портландцемент 90-70 %, вермикулит 10-30 %, позволила получить плотность в диапазоне 1720-1933 кг/м³, при прочно-

сти 42,8-58,2 МПа, обеспечивая экономию до 20 % дорогостоящего энергоёмкого цемента.

Полученное вяжущее характеризуется высокопористой структурой вследствие использования вермикулита, который гарантирует низкую теплопроводность теплоизоляционному раствору. Применение разработанных вяжущих композиций, синтезированных в результате совместного помола цемента и вермикулита в совокупности с легким заполнителем – вермикулитом обеспечит получение теплоизоляционного раствора с высокими показателями качества по теплозащите и прочности.

3.2 Зондовые исследования

Для изучения внутренней структуры и особенностей формирования структуры материала с использованием вермикулита, проводили микрозондовые исследования. При этом предварительно наносили проводящий слой хрома толщиной порядка 5 нм с помощью напылительной установки Quorum Technologies Q150TES. Были изучены три типа карт распределения элементного состава вяжущих композиций с целью установления особенностей формирования структуры создаваемых композитов: 1) наиболее типичные участки образцов вяжущих композиций; 2) формирование вяжущего в композиции; 3) контактная зона: вяжущее - минеральный наполнитель.

1)наиболее типичные участки образцов вяжущих композиций. Анализ карты распределения элементного состава в наиболее типичных участках затвердевшей вяжущей композиции (таблица 3.3 и рисунки 3.17, 3.18) показал, что по составу исследуемый образец представлен смесью преимущественно силикатов и алюмосиликатов кальция, а также наличием слюдяных пакетов, представленных содержанием полевых шпатов, алюминия и железа, силикатов магния, полученных в результате генезиса слюды, что четко прослеживается на всех исследуемых спектрах, начиная со спектра 1-3 ВК.1 и до 1-3 ВК.12.

Таблица 3.3 – Сравнение элементного состава вяжущей композиции

Название спектра, вес. %	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1-3 ВК. К1	5.39	49.88	0.18	2.10	3.20	9.94	0.98	1.62	22.65	0.52	3.54
1-3 ВК. 1	4.57	50.69		7.27	4.61	14.28		3.49	7.00	1.28	6.82
1-3 ВК. 2	4.50	44.79	0.32	7.74	5.28	16.42		4.13	6.47	1.34	9.00
1-3 ВК. 3	6.35	55.50		4.65	3.33	11.11	0.41	2.06	11.18	0.82	4.60
1-3 ВК. 4	6.22	55.66	0.34	0.91	1.65	8.59	1.00	0.58	23.76		1.29
1-3 ВК. 5	4.57	51.50		0.78	3.61	4.70	0.82	0.30	23.34	0.66	9.72
1-3 ВК. 6	6.32	60.26			6.46	2.71	1.41	0.27	22.57		
1-3 ВК. 7	6.53	56.49	0.31	0.69	1.58	9.08	0.92	0.55	22.68		1.16
1-3 ВК. 8	6.44	49.77	0.34	4.29	3.54	11.81	0.67	2.64	15.62	0.67	4.21
1-3 ВК. 9	7.19	53.86	0.32	1.58	2.82	9.26	0.97	1.34	19.10	0.49	3.08
1-3 ВК. 10	8.44	52.45		3.70	3.02	11.40	0.54	2.14	13.54	0.75	4.03
1-3 ВК. 11	5.72	53.23			10.20	13.41	0.20	0.37	12.93		3.94
1-3 ВК. 12	5.09	54.01		0.63	3.88	5.46	0.91	0.29	22.89		6.84
1-3 ВК. К2	4.67	50.28	0.16	1.30	2.26	9.46	0.92	0.96	26.79	0.42	2.79
1-3 ВК. 13	4.83	54.56		5.61	4.34	12.22	0.34	2.78	9.65	0.73	4.95
1-3 ВК. 14	2.30	41.35		1.15	8.38	2.19			29.98	0.65	14.00
1-3 ВК. 15	3.89	44.70			0.99	12.00	0.21	0.58	36.42		1.20
1-3 ВК. 16	4.16	49.47		0.29	0.86	11.54	0.25		32.31		1.13
1-3 ВК. 17	5.86	59.25			6.05	3.35	1.27	0.29	23.05		0.88
1-3 ВК. 18	7.36	57.90		0.58	1.37	8.97	0.82	0.40	21.49		1.11
1-3 ВК. 19	13.57	56.79		12.56	0.67	0.27			16.14		
1-3 ВК. К3	3.94	49.41	0.21	1.77	2.59	10.11	0.85	1.12	25.16	0.74	4.11
1-3 ВК. 20	4.78	40.64	0.31	0.66	1.39	8.81	1.08	0.87	38.44		3.02
1-3 ВК. 21	6.91	56.24		0.99	1.34	8.67	0.89	0.46	23.31		1.18
1-3 ВК. 22	4.98	52.60		5.99	6.02	13.17		2.31	3.78	1.78	9.36
1-3 ВК. 23	3.95	44.59		0.60	1.73	11.07	1.15	0.76	34.36		1.78
1-3 ВК. 24	5.09	54.42		1.25	4.03	5.05	0.49	0.39	20.02	0.72	8.54
1-3 ВК. 25	4.42	45.77		0.36	1.14	11.53	0.43	0.82	33.84	0.46	1.23
1-3 ВК. 26	6.37	52.36		3.20	2.95	11.36	0.56	1.82	17.12	0.69	3.57

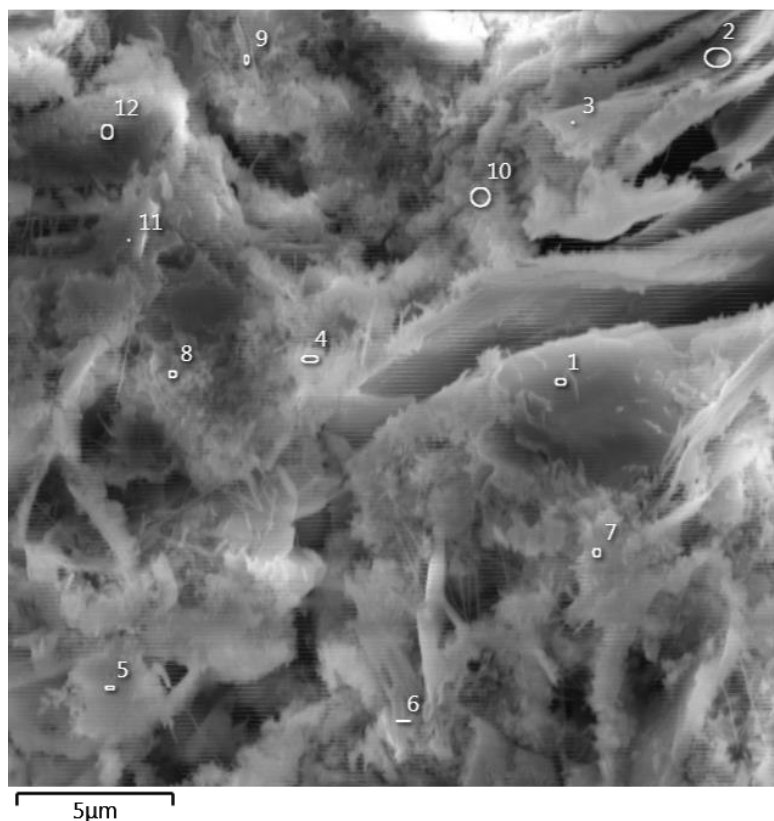


Рисунок 3.17 – Карта распределения элементного состава наиболее типичного участка вяжущей композиции

Отмечается высокая пористость структуры вяжущей композиции при достаточно равномерно-ритмичном строении созданной матрицы. По всей видимой поверхности образца наблюдается системное формирование и густое прорастание кристаллических мелкозернистых образований силикатов и алюмосиликатов кальция. Присутствуют агрегаты размером до 5 мкм, которые дополнительно армируют структуру композита.

Изучение многослойной карты (рисунок 3.19) распределения элементного состава вяжущей композиции показало, что она характеризуется высокой дисперсностью и однородностью, обеспечивая высокую гомогенность смеси и ее высокую химическую активность. На рисунке 3.19 наглядно и четко просматривается на вермикулитовых зернах-подложках (1-3 ВК.1, 1-3 ВК.2, 1-3 ВК.3, 1-3 ВК.8) формирование мелкозернистой кристаллической структуры силикатов кальция различной морфологии, которые равномерно распределились по всему рассматриваемому полю, что предопределяет высокую прочность создаваемому композиту.

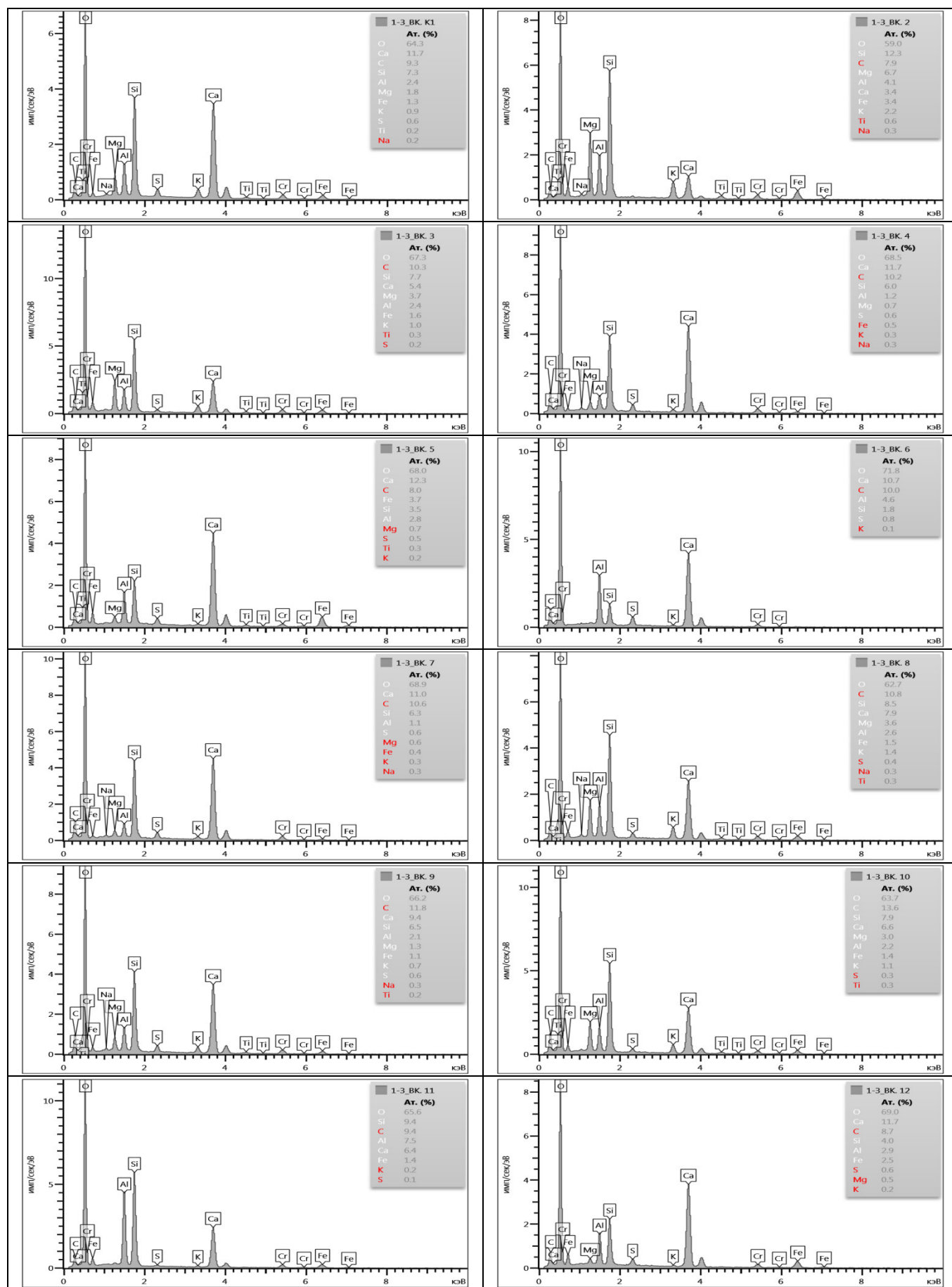


Рисунок 3.18 – Энергодисперсионные спектры: 1-3 ВК.1 – 1-3 ВК.12 элементных составов вяжущей композиции

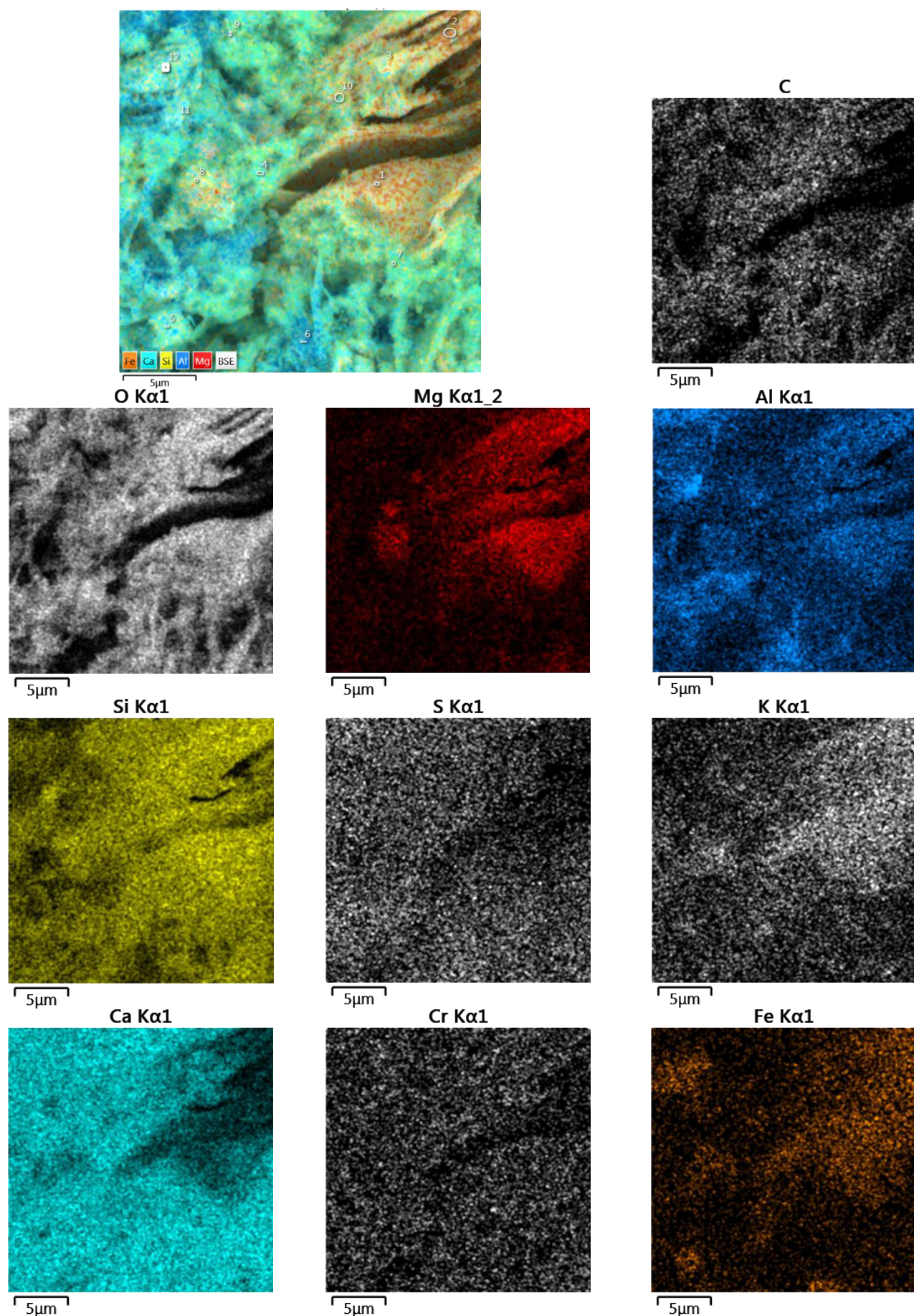


Рисунок 3.19 – Многослойная карта распределения элементного состава наиболее типичного участка вяжущей композиции

2) формирование вяжущего в композиции. Особый интерес представляет исследование особенностей формирования вяжущего вещества в создаваемой композиции в пространстве между минеральным наполнителем - вермикулитом. На рисунке 3.20 приведена карта распределения элементного состава наиболее типичного участка застывания вяжущего в композиции вокруг вермикулитовых зерен

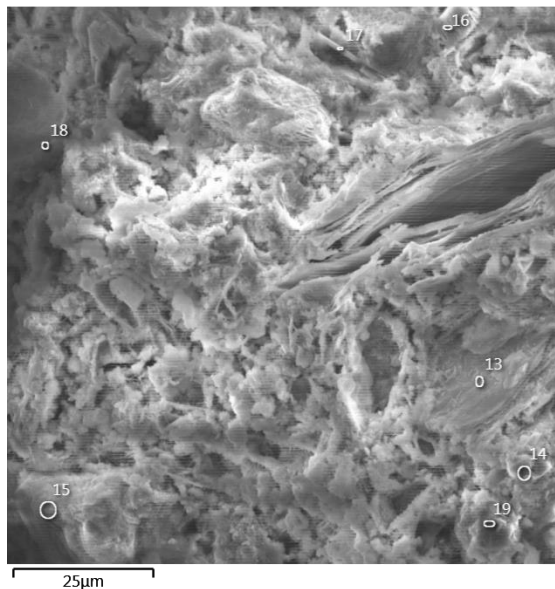


Рисунок 3.20 – Карта распределения элементного состава наиболее типичного участка застывания вяжущей композиции вокруг вермикулитовых зерен

Анализ карты распределения элементного состава в наиболее типичных зонах затвердевшей вяжущей композиции (таблица 3.3 и рисунки 3.20, 3.21) показал, что по составу проба представлена смесью преимущественно силикатов и алюмосиликатов кальция, только в точках 1-3 ВК.13 и 1-3 ВК.19 наблюдается присутствие вермикулитовых зерен, о чем свидетельствует присутствие в этих точках силикатов магния, алюминия и железа, что четко прослеживается на всех исследуемых спектрах, начиная со: спектра 1-3 ВК.13 и до 1-3 ВК.19. Отмечается высокая пористость структуры вяжущей композиции при достаточно равномерно-распределенном объеме созданной матрицы. По всей видимой поверхности образца наблюдается формирование кристаллических мелкозернистых образований силикатов и алюмосиликатов кальция. Присутствуют частицы вермикулита размером до 50 мкм, являющиеся минеральными подложками, на поверхности которых кристаллизуются силикаты и алюмосиликаты кальция и прочих силикатных фаз, отмечается их плотное зарастание различными новообразованиями.

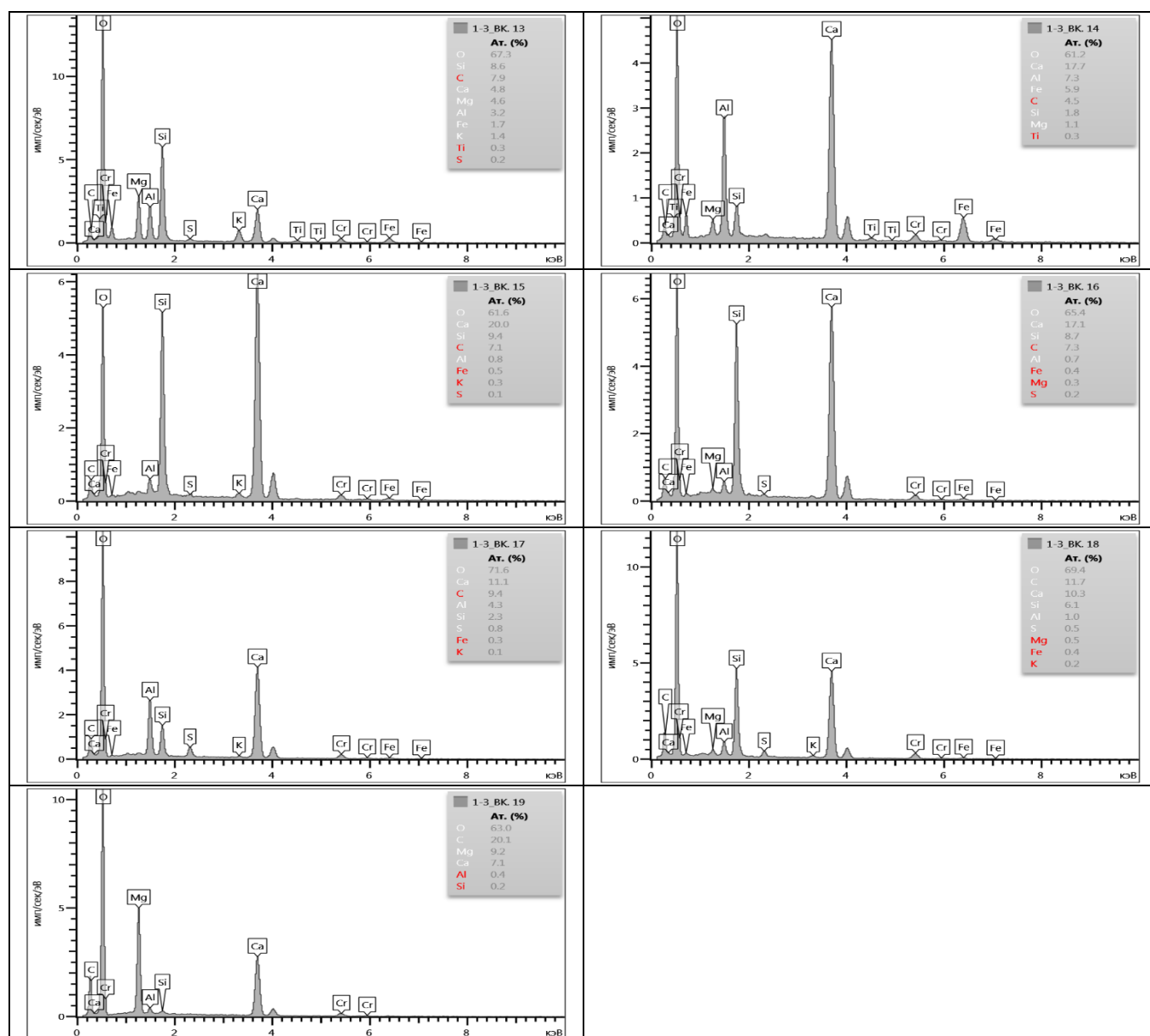


Рисунок 3.21 – Энергодисперсионные спектры: 1-3 ВК.13 – 1-3 ВК.19 элементных составов вяжущей композиции

Изучение многослойной карты (рисунок 3-22) распределения элементного состава вяжущей композиции показало, что все входящие элементы в раствор имеют высокую дисперсность и, как следствие, обеспечивают высокую степень распределения в общем объеме композита и последующую химическую активность. На рисунке 3.20 наглядно отражается активное формирование мелкозернистой кристаллической структуры силикатов кальция различной морфологии, что обеспечивает высокую прочность создаваемому композиту.

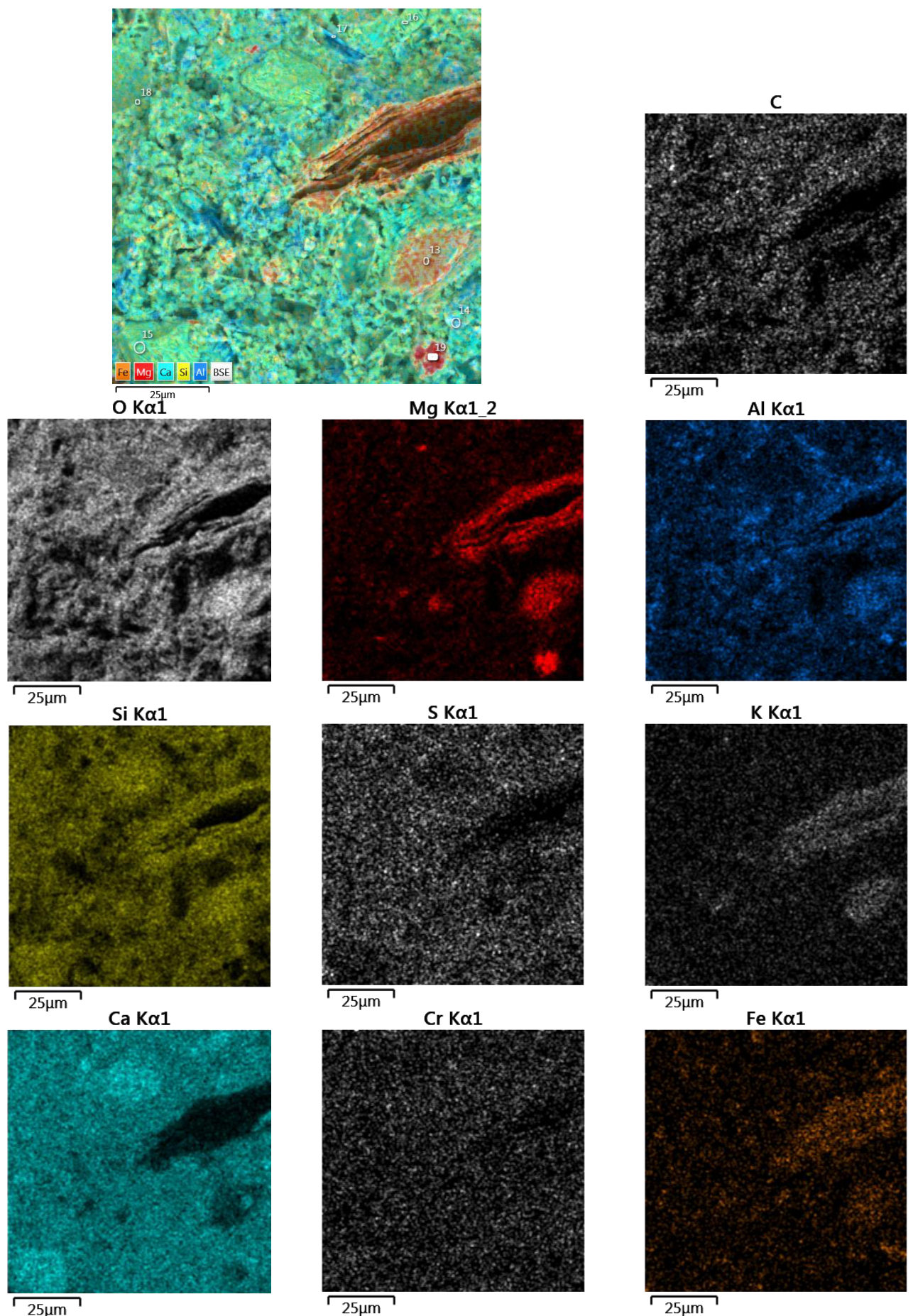


Рисунок 3.22 – Многослойная карта распределения элементного состава вяжущей композиции

3) контактная зона: вяжущее - минеральный наполнитель. На рисунке 3.23 приведена карта распределения элементного состава наиболее типичной контактной зоны: вяжущее- минеральный наполнитель.

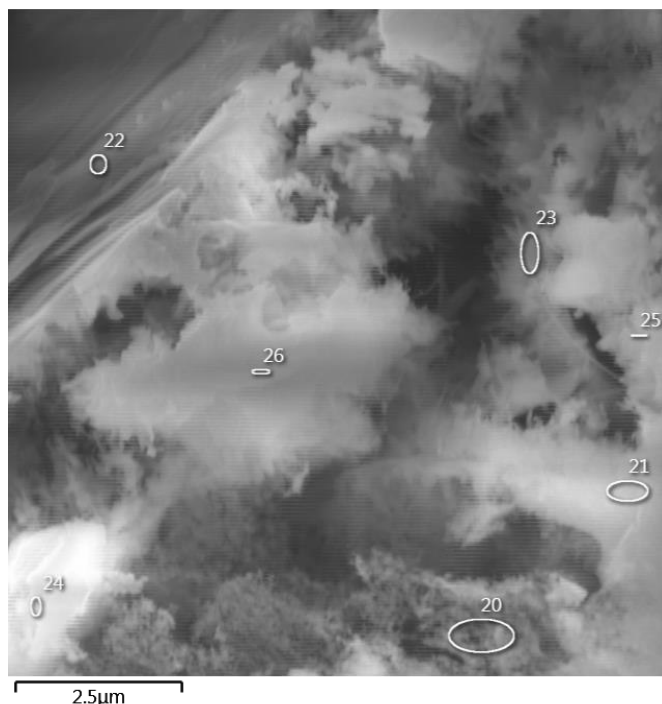


Рисунок 3.23 – Карта распределения элементного состава наиболее типичного участка контактной зоны: вяжущее – минеральный наполнитель

Анализ карты распределения элементного состава в контактной зоне: вяжущее - вермикулитовый наполнитель (таблица 3.3 и рисунки 3.23, 3.24) показал, что по составу проба представлена смесью преимущественно силикатов и алюмосиликатов кальция. В зоне спектра 1-3 ВК.22 наблюдается присутствие вермикулитового зерна, о чем свидетельствует наличие в этой зоны силикатов магния, алюминия и железа. Анализ распределения элементного состава в области зоны контакта показал, что по составу эта зона представлена преимущественно силикатами и алюминатами кальция различной морфологии, отмечается, что кристаллические новообразования плотно проросли в основание вермикулитовой подложки. Соотношение CaO/SiO_2 в фазовых агрегатах изменяется в зависимости от сформированных гидратированных фаз. Изучение многослойной карты (рисунок 3.25) распределения элементного состава контактной зоны на границе «вяжущее-минеральный наполнитель» показало, что все входящие элементы в раствор имеют высокую дисперсность и, как следствие, обеспечивают высокую степень рав-

номерного распределения в общем объеме композита, что отразилось на высокой химической активности.

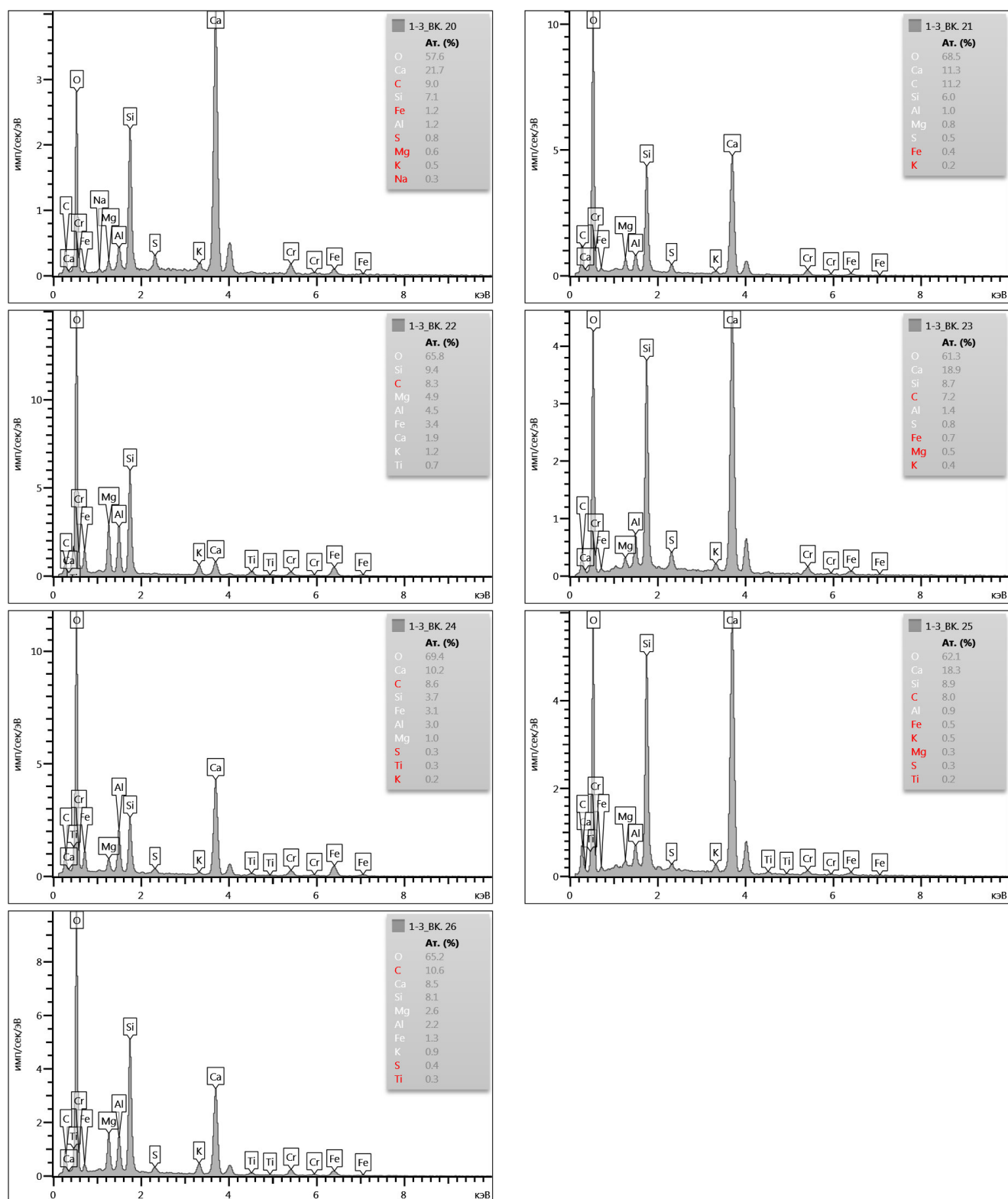


Рисунок 3.24 – Энергодисперсионные спектры контактной зоны: вяжущее – минеральный наполнитель

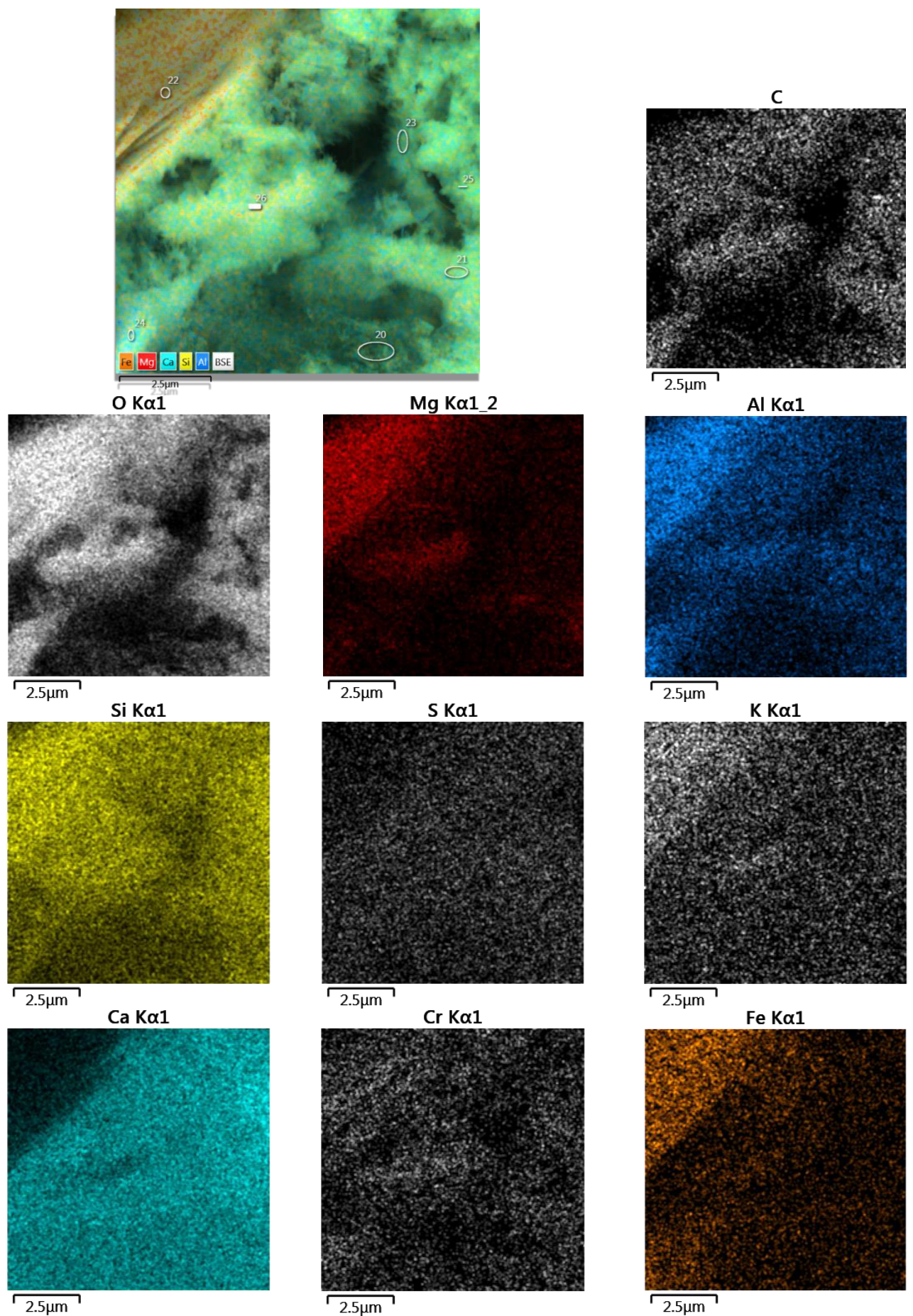


Рисунок 3.25 – Многослойная карта распределения элементного состава контактной зоны: вяжущее – минеральный наполнитель

На рисунке 3.23 наглядно просматривается на вермикулитовых зернах-подложках формирование мелкозернистой кристаллической структуры силикатов кальция различной морфологии, что обеспечивает высокую прочность создаваемому композиту.

Проведенные исследования микроструктуры и микроанализ элементного состава образцов цементного камня вяжущих композиций на сканирующем электронном микроскопе позволили установить особенности формирования структуры композитов.

Карта распределения элементного состава в наиболее типичных участках затвердевшей вяжущей композиции показала, что по химическому составу исследуемый образец представлен смесью преимущественно силикатов и алюмосиликатов кальция, а также наличием слюдяных пакетов, представленных содержанием полевых шпатов, силикатов алюминия, железа и магния, образовавшихся в результате генезиса слюды, что четко прослеживается на всех исследуемых спектрах.

Установлена высокая пористость структуры вяжущей композиции при достаточно равномерно-ритмичном строении созданной матрицы, закономерном формировании структуры и объемном прорастании мелкозернистых силикатов в композите.

Многослойная карта распределения элементного состава вяжущей композиции показала ее высокую дисперсность, однородность и высокую гомогенность смеси и, как следствие, ее высокую химическую активность. На вермикулитовых зернах-подложках формируются мелкозернистые кристаллические новообразования силикатов кальция различной морфологии, равномерно распределяющиеся и прорастающие в объеме раствора, это обстоятельство способствует формированию высокой прочности, создаваемому композиту.

С целью улучшения технологических и физико-механических свойств вяжущей композиции на следующем этапе изучали влияние пластифицирующей добавки Melment F10 на ее свойства.

3.3 Получение композиционного вяжущего

Композиционное вяжущее (КВ) для теплоизоляционного раствора синтезировали вследствие совместного помола 90 % портландцемента и 10 % вермикулита (таблица 3.1) с введением СП Melment F10 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Влияние суперпластификатора Melment F10

№ п/п	Дозировка суперпластификатора, %	Интервал варьирования	Определяемые параметры			
			ρ , г/см ³	Кол-во воды, мл	НГ, %	R _{сж ср} при 28 сут, МПа
1	-	-	1,9	155	38	58,2
2	0,2	0,6	2,0	154	37	62,1
3	0,8		2,1	149	36	70,1
4	1,4		2,0	145	35	65,6
5	2,0		2,0	147	34	63,9

Суперпластификатор в массу вяжущего вводили в количестве от 0,2 до 2,0 % в связи с рекомендациями производителя по использованию добавки в диапазоне 0,2-1,5 мас. % от вяжущего.

В результате испытаний установлена дозировка суперпластификатора в количестве 0,8 %, обеспечивающая высокие показатели прочности композиционного вяжущего – 70,1 МПа, превосходящего на 20 % исходный бездобавочный состав.

Таким образом, получено КВ в результате совместного помола 90 % портландцемента и 10% вермикулита с Melment F10 в вибрационной мельнице с показателями прочности при сжатии бездобавочного портландцемента на 21 % и вяжущей композиции на 45,3 %.

3.4 Изучение кинетики тепловыделения композиционного вяжущего

С помощью калориметра ToniCAL изучены процессы гидратационного твердения полученного КВ в сравнении с портландцементом.

Для изучения процессов гидратации модифицированного вяжущего была исследована кинетика его тепловыделения с момента затворения водой с использованием дифференциального калориметра ToniCAL с компьютерной обработкой и записью результатов.

Известно, что процессы гидратации портландцемента обусловлены выделением определенного количества тепла, которые образуются в результате химических процессов, тепловыделение имеет место на протяжении всего периода от момента затворения и до определенного периода твердения. Процесс и величина количества тепла для различных портландцементов индивидуален, в зависимости от минералогического состава, а также от тонкости помола вяжущего.

На рисунке 3.26 приведены результаты исследования тепловыделения товарного цемента, характеризующегося удельной поверхностью $308 \text{ м}^2/\text{кг}$, ВК с удельной поверхностью $612 \text{ м}^2/\text{кг}$ и КВ с удельной поверхностью $612 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Рассматривая рисунок 3.26 а, отмечается, что зерна цемента с момента затворения водой растворяются и начинаются процесс тепловыделения, на что указывает первый пик на кривые тепловыделения (первая стадия). На указанной стадии отмечается интенсивная гидратация минеральных частиц с поверхности, которые насыщаются тончайшем покрытием из гелеобразных соединений, которые препятствуют проникновению воды к твердой части зерна и их выходу в свободное межзерновые участки. Отмечается в первый час гидратации выделение тепла в количестве $53 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{ч})$, это обусловлено химическим взаимодействием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, при этом происходит растворение портландита, ионы которого переходят в растворную часть. Следует отметить, что дисперсность вяжущего значительно влияет на процессы гидратации с увеличением тонкости помола активно протекают реакции гидратации и наоборот.

Второй условный этап, при котором протекают гидратационные реакции, называют – индукционным. В этот период происходят дальнейшие реакции гидратации, скорость их различна, которые зависят от минерального состава, тонкости помола, температуры окружающей среды и так далее. именно в этот период отмечается зарождение и формирование начальных кристаллов гидроалюминатов и гидросиликатов кальция, а также портландита.

Третий этап процесса гидратации начинается, когда в системе появляется определенное количество кристаллических фаз и создаются наилучшие условия подхода воды к ранее негидратированным зернам цемента. Этот период относится

к ускоренному периоду твердения (рисунок 3.26 б). В этот период идет быстрое формирование кристаллов, с образованием объемного каркаса, при этом идет уплотнение его и отмечается некоторое снижение скорости реакций гидратации.

Кривая тепловыделения, присущая ВК имеет свою специфику, для портландцемента отмечается сильное тепловыделение на первой стадии через 15 минут, с выделением 53 кДж/(кг·ч), а у ВК этот показатель составляет 59 кДж/(кг·ч), то есть тепловыделение ВК превышает на 10 %, что обеспечивается общими явлениями при гидратации, свойственными портландцементу, а также влиянием тепловыделения от внесенного вермикулита.

Так как система имеет высокую дисперсность поверхностное натяжение тонких пленок снижается до минимального значения, что обеспечивает достаточный доступ воды к негидратированным зернам минералов портландцементного клинкера. Этот период характеризуется наивысшими показателями гидратационных процессов и его называют третьим этапом гидратации портландцемента, в этот период тепловыделение характеризуется максимальным количеством. На зернах минералов портландцементного клинкера адсорбируется наполнитель минерального происхождения и при этом формируется тончайшая оболочка из кристаллов эттрингита, закрывающая доступ воды, но присутствие в системе насыщенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и других кристаллогидратов создает благоприятные условия для проникновения воды из объема системы для процессов гидратации.

При достижении максимальной концентрации ионов Ca^{2+} и OH^- процессы гидратации достигают наивысшей скорости. При этом гидратация минералов портландцемента активно протекает. При наличии в системе зерен C_3S и C_3A , обладающих более крупными размерами, процессы гидратации на этом этапе замедляются.

Следующим этапом гидратации является условный четвертый этап. В этот период величина тепловыделения ВК возрастает более чем на 25 % в сравнении с портландцементом. Следует отметить теплоэффект в возрасте 13 часов, по нашему наблюдению этот эффект обусловлен гидратацией минеральных составляющих, присутствующих в вермикулите.

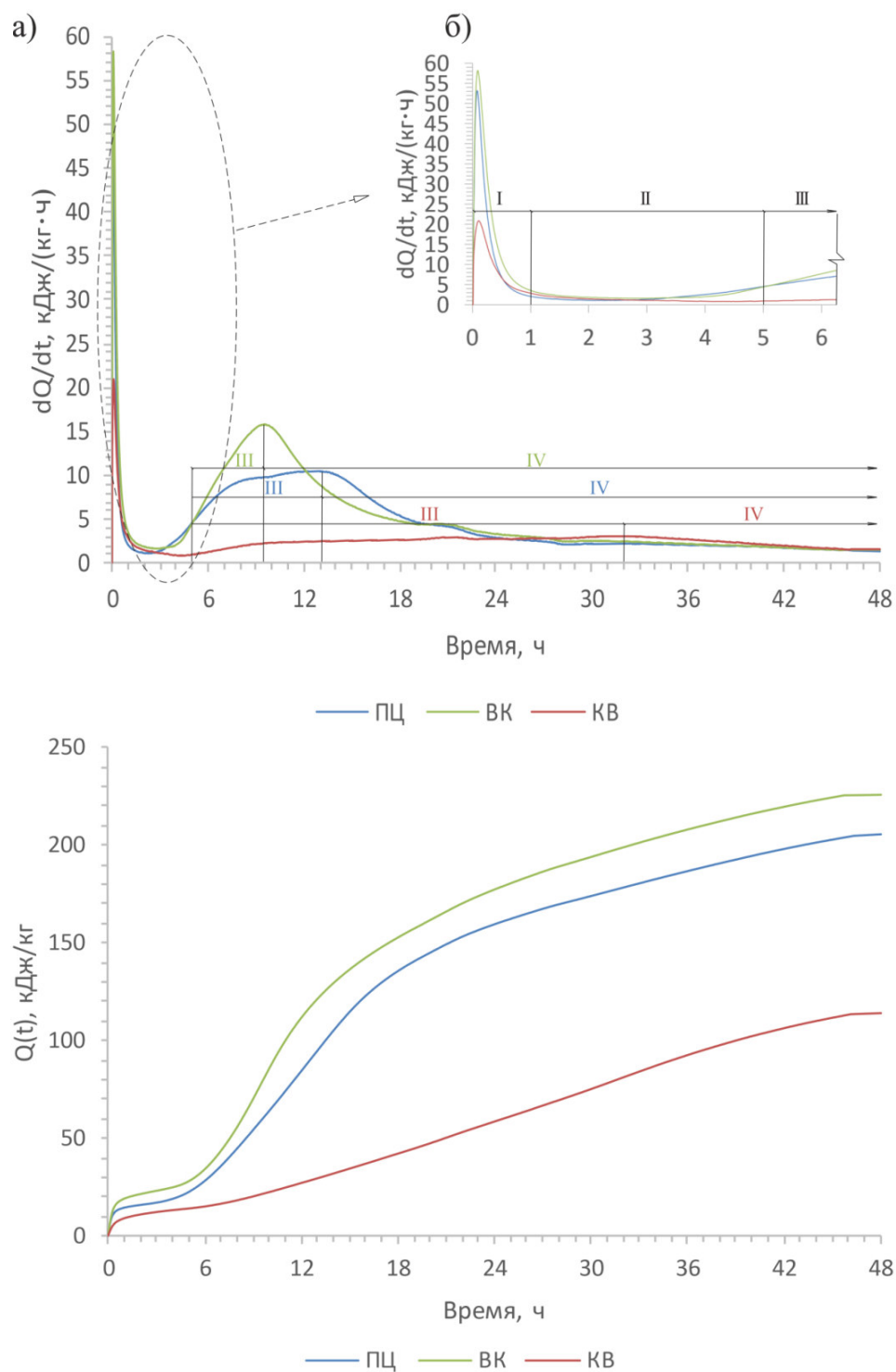


Рисунок 3.26 – Кинетика тепловыделения рядового портландцемента (ПЦ, $S_{уд}=308 \text{ м}^2/\text{кг}$), вяжущей композиции (ВК, $S_{уд}=612 \text{ м}^2/\text{кг}$) и композиционного вяжущего (КВ, $S_{уд}=612 \text{ м}^2/\text{кг}$)

Последующее тепловыделение ВК понижается. Отмечается стабилизации процессов гидратации вследствие протекания пуццолановых взаимодействий и активной химической реакции с минералами портландцемента, и значительной концентрации полученных новообразований: гидроалюминатов и гидросиликатов

кальция. Следует отметить, что тепловыделение в ВК проходит в плавном режиме, при этом формируется мелкокристаллические фазы, этот факт доказан полученными данными РФА и физико-механических исследований растворов.

Сравнительные исследования тепловыделения КВ и портландцемента указывают на то, что если у цемента активное тепловыделение на первой стадии проходит в 15 минут с максимальным тепловыделением в начальный час процессы гидратации 53 кДж/(кг·ч), то для ВК показатель максимального тепловыделения к этому возрасту показывает 59 кДж/(кг·ч), разница показателей тепловыделения выражается 10 %, то для КВ показатели ВК тепловыделения в этот период имеет 26 кДж/(кг·ч), этот показатель в два раза ниже, чем у портландцемента и в два с лишним раза ниже для ВК. Отмечается смещение 1-го пика показателей тепловыделения и уменьшения тепловыделения у КВ, этот факт можно объяснить значительным показателем удельной поверхности у этих вяжущих, присутствием минерального наполнителя, обладающего пластинчатыми и игловидными зернами, высоким показателем их дисперсности, которые активно блокируют и покрывают определенным слоем новообразований систему, определенное влияние оказывает СП Melment F10, которые также обволакивают минеральные частицы вяжущего, тем самым затормаживают химические и физико-химические процессы взаимодействия данной системы, все указанные факторы замедляют процессы гидратации в КВ. Представленные результаты подтверждаются с результатами исследований профессора Ушеров-Маршака, который доказал, что СП в результате блокирования частиц СП замедляют процессы гидратации и снижают тепловыделение в системе.

В результате проведенных исследований установлено, что СП Melment F10 определенным образом сорбируется на тонких частицах высокодисперсного вермикулита, обладающего незначительной гидравлической активностью и приближенных гранулометрических характеристик цемента и вермикулитовых частиц, особенность поведения пластифицирующей добавки обеспечивает направленное структурообразование в создаваемых композитах.

3.5 Выводы по главе 3

1. Установлено, что все вяжущие композиции, синтезированные в вибрационном агрегате, характеризуются повышенной удельной поверхностью, отмечается наибольшее увеличение тонкости помола к 10 минутам помола. Эффективность помола свыше 10 минут у составов ВК с содержанием 10-20 % понижается. Отмечается возрастание удельной поверхности у вяжущей композиции с содержанием 30 % вермикулитового наполнителя, что обусловлено генезисом этой осадочной выветренной породой.

2. Доказано, что механообработка разработанных ВК, прошедших механоактивацию в вибрационном агрегате эффективна, так возрастание продолжительности механической активации составов вяжущей композиции до 30 минут увеличивается до величины 1933 кг/м^3 , дальнейшая механоактивация до 40 минут приводит к снижению плотности до 1920 кг/м^3 , обусловленное переизмельчением композиции, что приводит к структурному уплотнению.

3. Установлено, что 30 минутная механоактивация положительно влияет на показатели плотности и прочности всех составов вяжущих композиций, обеспечивающая наилучшие условия формирования внутренней структуры при их гидратации. Так, состав 1-4 с содержанием портландцемента 90 % и вермикулита 10 % обеспечивают повышение прочности свыше 20 % в сравнении с товарным портландцементом, а состав 2-4 с содержанием портландцемента 80 % и вермикулита 20 % гарантирует повышение прочности на 6 %, что свидетельствует об экономии портландцемента, что составляет величину 10 и 20 %.

4. Высокая близость фракционного состава, полученного композиционного вяжущего с измельченным портландцементом, свидетельствуют о создании высокой гомогенности в вяжущей смеси композиционного вяжущего. Следует отметить, что присутствие в смеси частиц вермикулита в виде тончайших пластинок (0,01-0,02 мм), на которых впоследствии будут формироваться мелкозернистые новообразования силикатов кальция и алюминия, что обеспечит повышение прочности композита.

5. Анализ дифрактограммы гидратированной вяжущей композиции показывает, что новых соединений в системе не образовалось, но дифракционный фон характеризуется повышенной интенсивностью, что свидетельствует о наличии в системе повышенного количества мелкокристаллических образований, способствующих повышению прочности композиционного вяжущего.

6. При формировании цементного камня, полученного с использованием вяжущих композиций, образуется пространственный каркас, представленный мелкодисперсным пористым заполнителем – вермикулитом. Вследствие того, что вермикулитовые зерна имеют пространственную ориентацию и на них, как на подложках, образуются первичный каркас, на котором в дальнейшем прорастают кристаллы гидроалюминатов и гидросиликатов кальция, срастаясь в единый композит.

7. Проведенные микроскопические исследования свидетельствуют о стабильном формировании микроструктуры вяжущих композиций в начальный возраст 7 и в марочный возраст 28 суток, формирование структуры цементных камней исследуемых композиций четко согласуются с результатами их физико-механических испытаний в соответствующие сроки твердения.

8. Установлено, что при использовании вермикулита до 30 % и более, растворы обладают хорошими теплоизоляционными свойствами, но низкими показателями при сжатии. Особенности природы вспученного вермикулита способствуют снижению плотности и обеспечению теплозащитных свойств. Механоактивация вяжущих композиций в зависимости от продолжительности обработки в вибрационной мельнице составов: портландцемент 90-70 %, вермикулит 10-30 %, позволила получить плотность в диапазоне 1720-1933 кг/м³, при прочности 42,8-58,2 МПа, снижая расход дорогостоящего цемента на 10-20 %.

9. Вследствие использования при приготовлении теплоизоляционного раствора пористого заполнителя – вермикулита, а также использования разработанного композиционного вяжущего, приготовленного из композиции портландцемент – вермикулит и СП Melment F10, обладающего повышенной внутренней

структурной прочностью, получен вермикулитовый раствор, имеющий достаточную прочность и обладающего надежными теплоизоляционными показателями.

10. В результате проведенных исследований установлено, что СП Melment F10 определенным образом сорбируется на тонких частицах высокодисперсного вермикулита, обладающего незначительной гидравлической активностью и приближенных гранулометрических характеристик цемента и вермикулитовых частиц, особенность поведения пластифицирующей добавки обеспечивает направленное структурообразование в создаваемых композитах. Использование модификатора СП Melment F10 позволило разработать композиционное вяжущее: портландцемент – вермикулит, обеспечивающее получение теплоизоляционного раствора с прочностью при сжатии 70,1 МПа, превосходящим прочность при сжатии бездобавочного портландцемента на 21 % (48,1 МПа) и вяжущей композиции на 45,3 % (58,2 МПа).

12. Проведенные исследования микроструктуры и микроанализ элементного состава образцов цементного камня вяжущих композиций на сканирующем электронном микроскопе позволили установить особенности формирования структуры композитов. Карта распределения элементного состава в наиболее типичных участках затвердевшей вяжущей композиции показала, что по химическому составу исследуемый образец представлен смесью преимущественно силикатов и алюмосиликатов кальция, а также наличием слюдяных пакетов, представленных содержанием полевых шпатов, силикатов магния, алюминия и железа, сформированных вследствие преобразования слюды, что четко прослеживается на всех исследуемых спектрах.

Установлена высокая пористость структуры вяжущей композиции при достаточно равномерно-ритмичном строении созданной матрицы, системном структурообразовании и формированием кристаллических минеральных фаз алюмосиликатов и силикатов кальция, в структуре материала отмечается объемное прораствание мелкодисперсных игловидных кристаллов, пронизывающая в различных направлениях создаваемый композит.

Многослойная карта распределения элементного состава вяжущей композиции показала ее высокую дисперсность, однородность и высокую гомогенность смеси и, как следствие, ее высокую химическую активность. На вермикулитовых зернах-подложках формируются мелкозернистые кристаллические новообразования силикатов кальция различной морфологии, равномерно распределяющиеся и прорастающие по всему композиту, что обеспечивает достаточную прочность создаваемому композиту.

4 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАСТВОРОВ

Для разработки составов теплоизоляционных растворов использовали в качестве вяжущего полученное композиционные вяжущие с применением портландцемента и минерального наполнителя - вермикулита и вспученного вермикулита в качестве заполнителя.

По сравнению с обычными цементно-песчаными растворами растворы с использованием вермикулита обладают значительно меньшей плотностью и в 4-6 раз меньшей теплопроводностью, что позволяет их отнести к группе «теплых» растворов. При создании теплоизоляционных штукатурок защитный цементно-вермикулитовый слой в 1-2 см может заменить цементно-песчаный раствор толщиной 10-15 см. При применении теплоизоляционного вермикулитового раствора при толщине до 3 см, размер кирпичной стены может уменьшаться на 25 % [120-128]. При этом коэффициент звукопоглощения вермикулитовых теплоизоляционных штукатурок характеризуется величиной 0,2-0,62, в то время как обычных песчаных – 0,015-0,02. Растворы теплоизоляционные, разработанные на вермикулите мелкой фракции 0,6-2,0 мм и высокодисперсном вермикулите с размерами до 0,06 мм имеют достаточную пластичность и требуемую удобоукладываемость. Несомненным достоинством вермикулитовых штукатурных растворов является то, что при высыхании они не растрескиваются и не имеют усадки.

При выполнении отделочных теплоизоляционных работ стен и потолков внутри помещения прочностные показатели и морозостойкость штукатурных покрытий не так важны, как при выполнении наружных работ: эти растворы не подвергаются перепадам температур в помещениях. К настоящему времени при приготовлении смешанных вермикулитовых растворов используют, как правило, обычные портландцементы.

Особый интерес при создании теплоизоляционных растворов представляет использование в качестве вяжущего компонента разработанных нами композици-

онных вяжущих, в которых в качестве наполнителя используется вермикулитовый отсев фракции менее 0,6 мм.

Исследовали составы штукатурных растворов, состоящих из композиционного вяжущего и вспученного вермикулитового песка (таблице 4.1).

Таблица 4.1 – Составы штукатурного раствора

№ п/п	Соотношение композиционное вяжущее : вспученный вермикулитовый песок М100 по объему	В/Т	Осадка конуса, см	Средняя плотность, кг/м ³	Средняя прочность при сжатии, МПа
				В возрасте 28 сут	
1	1:1	1,32	10,1	1300	11,6
2	1:3	1,36	10,2	1050	8,9
3	1:5	1,57	10,4	870	6,2
4	1:7	1,74	10,5	770	5,4
5	1:9	2,11	10,6	680	4,0
6	1:11	2,13	10,7	550	3,7
7	1:13	2,20	10,9	590	1,6
8	1:15	2,26	11,2	650	1,2

Установлены наилучшие соотношения композиционного вяжущего и вспученного вермикулитового песка М100 по объему, определяющие получение штукатурных растворов с наименьшей плотностью 550 кг/м³. Для дальнейшей оптимизации принимаем состав композиционного вяжущего и вспученного вермикулитового песка при соотношении компонентов 1:11.

4.1 Получение теплоизоляционного раствора с использованием метода математического планирования

При проведении исследований применяли добавки: редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 Н, суперпластификатор Melment F10, порообразователь ESAPON 1214. Химические добавки применяли в композициях в количестве, указанной производителем добавок с принятым интервалом [129-131].

Действие составных компонентов на технологические свойства и физико-механические характеристики исследовали методом математического планирования эксперимента для плотности и прочности (таблицы 4.2)

4.1.1 Модель зависимости плотности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов

Условия планирования эксперимента

При планировании эксперимента изучали взаимное влияние на среднюю плотность создаваемого раствора следующих добавок: редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 Н, суперпластификатор Melment F10, порообразователь ESAPON 1214

Таблица 4.2 – Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
Порообразователь ESAPON 1214	X1	0,1	0,15	0,2	0,05
Суперпластификатор Melment F10	X2	0,2	0,8	1,4	0,6
Редиспергирующий порошок VinnapasLL 4042 Н	X3	1,5	3	4,5	1,5

Параметры для расчета коэффициентов приведены в таблице 4.3.

Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости

Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии и их значимость.

$T_1 \dots T_6$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_1 = 0,1832$; $T_2 = 0,0704$; $T_3 = 0,1$; $T_4 = 0,5$; $T_5 = -0,1268$; $T_6 = 0,125$.

Свободный член b_1 вычисляем по формуле:

$$b_1 = T_1 \sum_{u=1}^N y_u - T_2 \sum_{i=1}^K \left(\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot y_u \right), \quad (4.1)$$

$$b_1 = 0,1832 \cdot 7736 - 0,0704 \cdot (4495 + 4438 + 4723) = 455,853$$

Коэффициенты для линейных членов определяем по формуле:

$$b_i = T_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u, \quad (4.2)$$

$$b_2 = 0,1 \cdot 545 = 54,5; b_3 = 0,1 \cdot 182 = 18,2; b_4 = 0,1 \cdot (-53) = -5,3.$$

Таблица 4.3 – Параметры для расчета коэффициентов

Точка плана	Факторы			Экспе- римен- тальные значения y_u	Расчетные параметры для определения коэффициентов								
	X_1	X_2	X_3		при линейных членах			при квадратичных членах			при взаимодействиях		
					yx_1	yx_2	yx_3	yx_1^2	yx_2^2	yx_3^2	yx_1x_2	yx_1x_3	yx_2x_3
1	1	1	1	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560
2	1	1	1	510	510	510	-510	510	510	510	510	-510	-510
3	1	1	-1	480	480	-480	480	480	480	480	-480	480	-480
4	1	1	-1	540	540	-540	-540	540	540	540	-540	-540	540
5	1	-1	1	395	-395	395	395	395	395	395	-395	-395	395
6	1	-1	1	460	-460	460	-460	460	460	460	-460	460	-460
7	1	-1	-1	370	-370	-370	370	370	370	370	370	-370	-370
8	1	-1	-1	360	-360	-360	-360	360	360	360	360	360	360
9	-1	1	1	430	430	0	0	430	0	0	0	0	0
10	-1	1	1	390	-390	0	0	390	0	0	0	0	0
11	-1	1	-1	385	0	385	0	0	385	0	0	0	0
12	-1	1	-1	378	0	-378	0	0	378	0	0	0	0
13	-1	-1	1	530	0	0	530	0	0	530	0	0	0
14	-1	-1	1	518	0	0	-518	0	0	518	0	0	0
15	-1	-1	-1	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	-1	-1	-1	550	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма:					545	182	-53	4495	4438	4723	-53	-75	45

Коэффициенты для квадратичных членов рассчитываем по формуле:

$$b_{ii} = T_4 \sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u + T_5 \sum_1^K \left(\sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u \right) - T_2 \sum_1^N y_u, \quad (4.3)$$

$$b_5 = 0,5 \cdot 5495 - 0,1268 \cdot (5495 + 5438 + 5723) - 0,0704 \cdot 9436 = -28,775;$$

$$b_6 = 0,5 \cdot 5438 - 0,1268 \cdot (5495 + 5438 + 5723) - 0,0704 \cdot 9436 = -57,275;$$

$$b_7 = 0,5 \cdot 5723 - 0,1268 \cdot (5495 + 5438 + 5723) - 0,0704 \cdot 9436 = 85,2248,$$

Коэффициенты при взаимодействиях определяем по формуле:

$$b_{ij} = T_6 \sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u, \quad (4.4)$$

$$b_8 = 0,125 \cdot (-75) = -9,375;$$

$$b_9 = 0,125 \cdot 45 = 5,625;$$

$$b_{10} = 0,125 \cdot 35 = 4,375.$$

Проверяем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Для этого дополнительно выполняем 3 опыта, фиксируя факторы на основном уровне (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Результаты опытов и расчетов в нулевых точках

Точка плана	Фактор			y	$\bar{y}$	y- $\bar{y}$	(y- $\bar{y}$) ²
	X ₁	X ₂	X ₃				
1	0	0	0	621	512,6667	108,3333	11736,11
2	0	0	0	374		- 138,667	19228,44
3	0	0	0	543		30,33333	920,1111
Сумма:							31884,67

Дисперсию воспроизводимости определяют по формуле:

$$S_{(y_0)}^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (4.5)$$

$$S_{(y_0)}^2 = \frac{31884,67}{3 - 1} = 15942,333.$$

Среднеквадратичное отклонение рассчитываем по формуле:

$$S_{(y_0)} = \sqrt{S^2(y_0)}, \quad (4.6)$$

$$S_{(y_0)} = \sqrt{15942,333} = 126,263.$$

Среднеквадратичную ошибку рассчитываем по формулам:

$$S_{(b_0)} = T_7 \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.7)$$

$$S_{(b_i)} = T_8 \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.8)$$

$$S_{(b_{ii})} = T_9 \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.9)$$

$$S_{(b_{ij})} = T_{10} \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.10)$$

где $T_7 \dots T_{10}$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_7 = 0,4279$; $T_8 = 0,3162$; $T_9 = 0,6109$; $T_{10} = 0,3536$.

$$S_{(b_0)} = 0,4787 \cdot 126,263 = 60,442;$$

$$S_{(b_i)} = 0,2357 \cdot 126,263 = 29,760;$$

$$S_{(b_{ii})} = 0,6212 \cdot 126,263 = 78,435;$$

$$S_{(b_{ij})} = 0,25 \cdot 126,263 = 31,566.$$

Находим табличное t_T значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0,05$ и $f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$; $t_T = 3,18$.

Расчетные значения t_P критерия Стьюдента определяем по формулам:

$$t_{P(b_0)} = \frac{|b_0|}{S_{(b_0)}}; \quad (4.11)$$

$$t_{P(b_i)} = \frac{|b_i|}{S_{(b_i)}}; \quad (4.12)$$

$$t_{P(b_{ii})} = \frac{|b_{ii}|}{S_{(b_{ii})}}; \quad (4.13)$$

$$t_{P(b_{ij})} = \frac{|b_{ij}|}{S_{(b_{ij})}}. \quad (4.14)$$

$$t_1 = \frac{|455,853|}{60,442} = 7,54;$$

$$t_2 = \frac{|54,5|}{29,76} = 1,83;$$

$$t_3 = \frac{|18,2|}{29,760} = 0,61;$$

$$t_4 = \frac{|-5,3|}{29,760} = 0,18;$$

$$t_5 = \frac{|-28,7752|}{78,435} = 0,37;$$

$$t_6 = \frac{|-57,2752|}{78,435} = 0,73;$$

$$t_7 = \frac{|85,2248|}{78,435} = 1,09;$$

$$t_8 = \frac{|-9,375|}{31,566} = 0,3;$$

$$t_9 = \frac{|5,625|}{31,566} = 0,18;$$

$$t_{10} = \frac{|4,375|}{31,566} = 0,14,$$

При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Следовательно, к таковым относятся коэффициенты $b_2, b_3, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии. С учетом вышеизложенного, зависимость плотности от исследуемых факторов имеет следующий вид:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot X_1 + 18,2 \cdot X_2 - 5,3 \cdot X_3 - 28,6952 \cdot X_1^2 - 57,1952 \cdot X_2^2 + 85,305 \cdot X_3^2 + 9,375 \cdot X_1 \cdot X_2 + 5,625 \cdot X_1 \cdot X_3 + 4,375 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

где,

$$X_1 = \frac{\text{Порообразователь ESAPON 1214} - 0,15}{0,05};$$

$$X_2 = \frac{\text{Суперпластификатор Melment F10} - 0,8}{0,6};$$

$$X_3 = \frac{\text{Редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 H} - 3}{1,5}$$

Проверка адекватности уравнений регрессии

Далее определяем адекватность полученного уравнения регрессии. Рассчитываем дисперсию адекватности (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Расчет дисперсии адекватности

Точка плана	y	$\hat{y}$	y – $\hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$
1	560	523,29	36,708	
2	510	513,89		-3,892
3	480	496,89		-16,892
4	540	504,99	35,0078	1225,546061
5	395	421,79	-26,7922	717,8219808
6	460	434,89	25,1078	630,4016208
7	370	357,89	12,1078	146,5988208
8	360	388,49	-28,4922	811,8054608
9	430	481,66	-51,6576	2668,507638
10	390	372,66	17,3424	300,7588378
11	385	416,86	-31,8576	1014,906678
12	378	380,46	-2,4576	6,03979776
13	530	535,86	-5,8576	34,31147776
14	518	546,46	-28,4576	809,8349978
15	360	455,85	-95,8528	9187,759268
16	550	455,85	94,1472	8863,695268
17	520	455,85	64,1472	4114,863268
Сумма:				30512,06677

Определяем дисперсию адекватности S_{ag}^2 по формуле:

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_1^N (y - \hat{y}_u)^2}{N - m} \quad (4.15)$$

$$S_{ag}^2 = \frac{30512,06677}{17 - 10} = 4358,9$$

Находим расчетное значение критерия Фишера F_P по формуле:

$$F_P = \frac{S_{(y)}^2}{S_{ag}^2}, \quad (4.16)$$

$$F_P = \frac{15942,333}{4358,9} = 3,6574.$$

Табличное значение критерия Фишера при доверительной вероятности 95 %:

$f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$ и $f_{ag} = 17 - 10 = 7$ и $F_T = 9,34$. $F_P < F_T$, поэтому уравнение регрессии считается адекватным.

Анализ уравнений регрессии

В линейных моделях знак «+» при коэффициенте свидетельствует о том, что с увеличением этого фактора величина выходного параметра увеличивается, а

знак «-» о том, что убывает. Чем больше значение коэффициента, тем сильнее влияние фактора. Если необходимо получить максимальное значение выходного параметра, значения всех факторов, коэффициенты которых имеют знак «+», следует принимать максимальными, а значения коэффициентов со знаком «-» - минимальными.

Оптимизационные задачи заключаются в нахождении такого сочетания факторов, которое обеспечивает максимальное (минимальное) значение выходного параметра. В этом случае экстремум находят из дифференцирования уравнения последовательно по X_1 , X_2 , X_3 и т.д. Полученная система линейных уравнений приравнивается к нулю. Путем ее решения находят значение x_i , обеспечивающее экстремальное значение y .

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot X_1 + 18,2 \cdot X_2 - 5,3 \cdot X_3 - 28,6952 \cdot X_1^2 - 57,1952 \cdot X_2^2 + 85,305 \cdot X_3^2 + 9,375 \cdot X_1 \cdot X_2 + 5,625 \cdot X_1 \cdot X_3 + 4,375 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_1} = 54,5 - 57,3904x_1 - 9,375x_2 + 5,625x_3;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_2} = 18,2 - 9,375x_1 - 114,3904x_2 + 4,375x_3;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_3} = -5,3 + 5,625x_1 + 4,375x_2 + 170,61x_3.$$

Решение системы уравнений:

$$\begin{aligned} -57,3904x_1 - 9,375x_2 + 5,625x_3 &= -54,5; \\ -9,375x_1 - 114,3904x_2 + 4,375x_3 &= -18,2; \\ 5,625x_1 + 4,375x_2 + 170,61x_3 &= 5,3 \end{aligned}$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} \frac{-35869}{625} & \frac{-75}{8} & \frac{45}{8} & \frac{-109}{2} \\ \frac{-75}{8} & \frac{-71494}{625} & \frac{35}{8} & \frac{-91}{5} \\ \frac{45}{8} & \frac{35}{8} & \frac{17061}{100} & \frac{53}{10} \end{array} \right) (2)-(1) \cdot \left(\frac{46875}{286952} \right);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} \frac{-35869}{625} & \frac{-75}{8} & \frac{45}{8} & \frac{-109}{2} \\ 0 & \frac{-161925504679}{1434760000} & \frac{7933945}{2295616} & \frac{-26678389}{2869520} \\ \frac{45}{8} & \frac{35}{8} & \frac{17061}{100} & \frac{53}{10} \end{array} \right) (3)-(1) \cdot \left(\frac{-28125}{286952} \right);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} \frac{-35869}{625} & \frac{-75}{8} & \frac{45}{8} & \frac{-109}{2} \\ 0 & \frac{-161925504679}{1434760000} & \frac{7933945}{2295616} & \frac{-26678389}{2869520} \\ 0 & \frac{7933945}{2295616} & \frac{9823016769}{57390400} & \frac{-119669}{2869520} \end{array} \right) (3)-(2) \cdot \left(\frac{-4958715625}{161925504679} \right);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} \frac{-35869}{625} & \frac{-75}{8} & \frac{45}{8} & \frac{-109}{2} \\ 0 & \frac{-161925504679}{1434760000} & \frac{7933945}{2295616} & \frac{-26678389}{2869520} \\ 0 & \frac{7933945}{2295616} & \frac{9823016769}{57390400} & \frac{-119669}{2869520} \end{array} \right) (3)-(2) \cdot \left(\frac{-4958715625}{161925504679} \right);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} \frac{-35869}{625} & \frac{-75}{8} & \frac{45}{8} & \frac{-109}{2} \\ 0 & \frac{-161925504679}{1434760000} & \frac{7933945}{2295616} & \frac{-26678389}{2869520} \\ 0 & 0 & \frac{1386626075281397}{8096275233950} & \frac{-15545539857}{47625148435} \end{array} \right);$$

$$\frac{1386626075281397}{8096275233950} \cdot x_3 = \frac{-15545539857}{47625148435};$$

$$x_3 = \frac{-2642741775690}{1386626075281397} \approx -0,002;$$

$$x_2 = \frac{114147368869750}{1386626075281397} \approx 0,082;$$

$$x_1 = \frac{1297884735028750}{1386626075281397} \approx 0,936$$

$$x_1 = 0,936;$$

$$x_2 = 0,082;$$

$$x_3 = -0,002.$$

$$X_1 = \frac{\text{Порообразователь ESAPON 1214} - 0,15}{0,05};$$

$$X_2 = \frac{\text{Суперпластификатор Melment F10} - 0,8}{0,6};$$

$$X_3 = \frac{\text{Редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 H} - 3}{1,5}$$

$$\text{Порообразователь ESAPON 1214} = 0,936 \cdot 0,05 + 0,15 = 0,1968, [0,1 \dots 0,2];$$

$$\text{Суперпластификатор Melment F10} = 0,082 \cdot 0,6 + 0,8 = 0,849, [0,2 \dots 1,4];$$

$$\begin{aligned} \text{Редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 H} &= -0,002 \cdot 1,5 + 3 \\ &= 2,997, [1,5 \dots 4,5]. \end{aligned}$$

Подставим полученные значения в уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot 0,94 + 18,2 \cdot 0,08 - 5,3 \cdot (-0,002) - 28,6952 \cdot 0,94^2 - 57,1952 \cdot 0,08^2 + 85,305 \cdot (-0,002)^2 - 9,375 \cdot 0,94 \cdot 0,08 + 5,625 \cdot 0,94 \cdot (-0,002) + 4,375 \cdot 0,08 \cdot (-0,002) = 482,110 \text{ кг/м}^3.$$

Оптимальное расчетное значение плотности теплоизоляционного раствора составляет 482,110 кг/м³.

Построение зависимостей выходных параметров от исследуемых факторов

Используя полученное уравнение регрессии, можно произвести анализ влияния исследуемых факторов на плотность теплоизоляционного раствора.

Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от порообразователя ESAPON 1214:

$$\hat{y} = 455,9 + 54,5 \cdot X_1 - 28,6952 \cdot X_1^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot (-1) + (-28,6952) \cdot (-1)^2 = 372,6576,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot (-0,5) + (-28,6952) \cdot (-0,5)^2 = 421,429,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot 0 + (-28,6952) \cdot 0^2 = 455,8528,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot 0,5 + (-28,6952) \cdot 0,5^2 = 475,929,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 455,85 + 54,5 \cdot 1 + (-28,6952) \cdot 1^2 = 481,6576,$$

Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от суперпластификатора Melment F10:

$$\hat{y} = 455,85 + 18,2 \cdot X_1 - 57,1952 \cdot X_1^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 455,85 + 18,2 \cdot (-1) + (-57,1952) \cdot (-1)^2 = 380,4576,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 455,85 + 18,2 \cdot (-0,5) + (-57,1952) \cdot (-0,5)^2 = 432,454,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 455,85 + 18,2 \cdot (0) + (-57,57,1952) \cdot (0)^2 = 455,8528,$$

при $X_1=0,5$:

$$\hat{y} = 455,85 + 18,2 \cdot 0,5 + (-57,57,1952) \cdot 0,5^2 = 450,654,$$

при $X_1=1$:

$$\hat{y} = 455,85 + 18,2 \cdot 1 + (-57,1952) \cdot 1^2 = 416,8576,$$

Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 Н:

$$\hat{y} = 455,85 + (-5,3) \cdot X_1 + 85,225 \cdot X_1^2,$$

при $X_1=-1$:

$$\hat{y} = 455,85 + (-5,3) \cdot (-1) + 85,305 \cdot (-1)^2 = 546,4576,$$

при $X_1=-0,5$:

$$\hat{y} = 455,85 + (-5,3) \cdot (-0,5) + 85,305 \cdot (-0,5)^2 = 479,829,$$

при $X_1=0$:

$$\hat{y} = 455,85 + (-5,3) \cdot 0 + 85,305 \cdot 0^2 = 455,8528,$$

при $X_1=0,5$:

$$\hat{y} = 455,85 + (-5,3) \cdot 0,5 + 85,305 \cdot 0,5^2 = 474,529,$$

при $X_1=1$:

$$\hat{y} = 455,85 + (-5,3) \cdot 1 + 85,305 \cdot 1^2 = 535,8576,$$

Строим графики зависимости плотности от исследуемых факторов (рисунок 4.1-4.6):

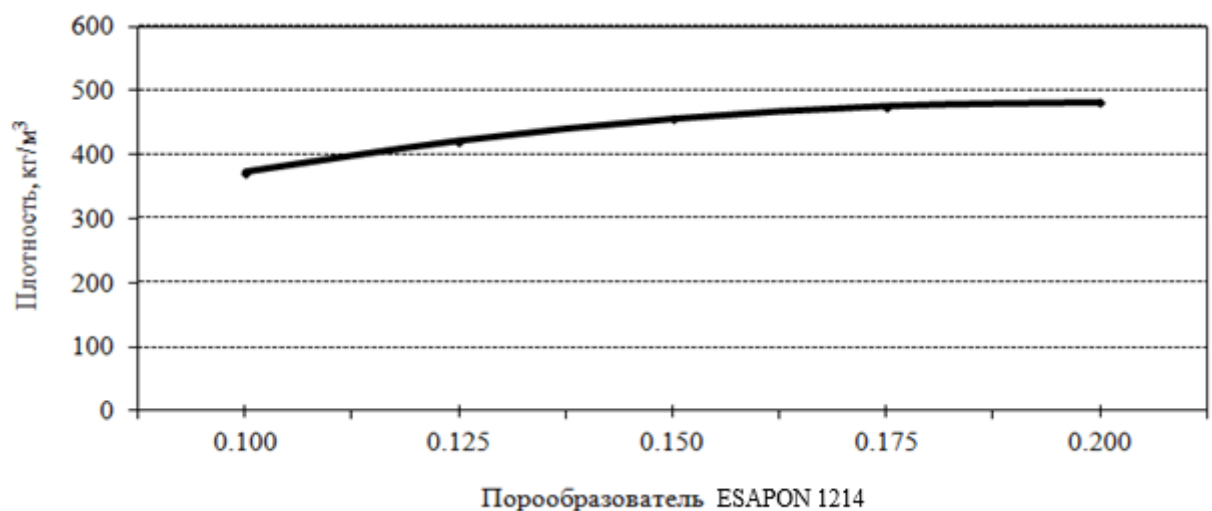


Рисунок 4.1 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от количества порообразователя ESAPON 1214

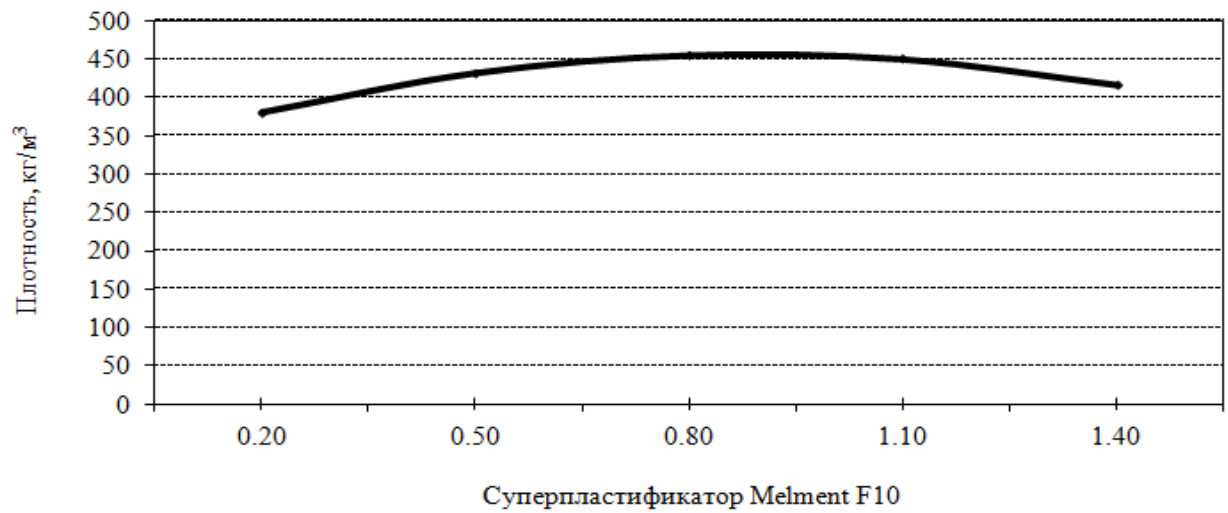


Рисунок 4.2 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от количества суперпластификатора Melment F10

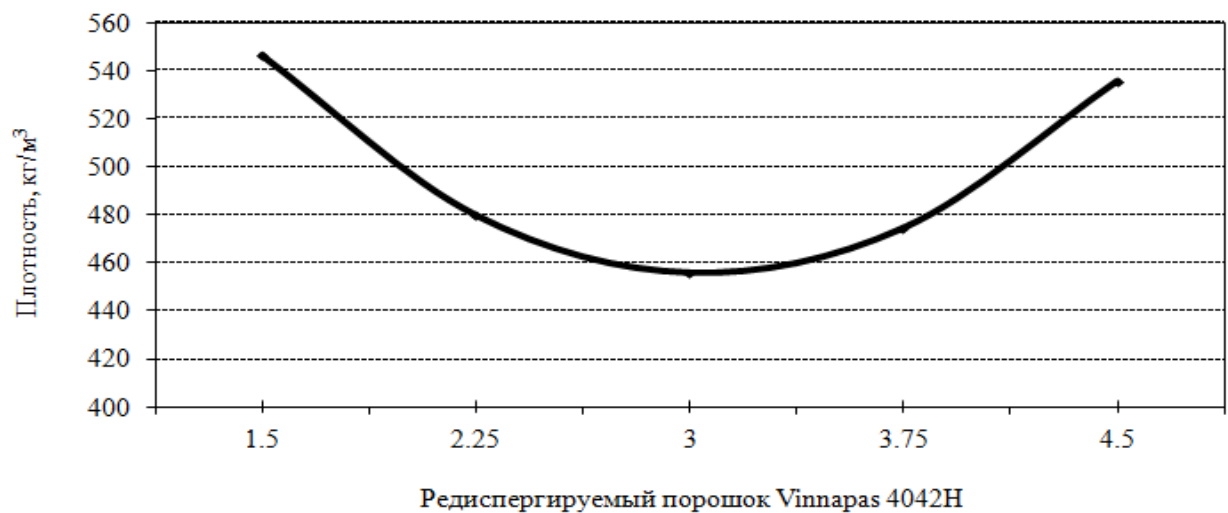


Рисунок 4.3 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от количества редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H

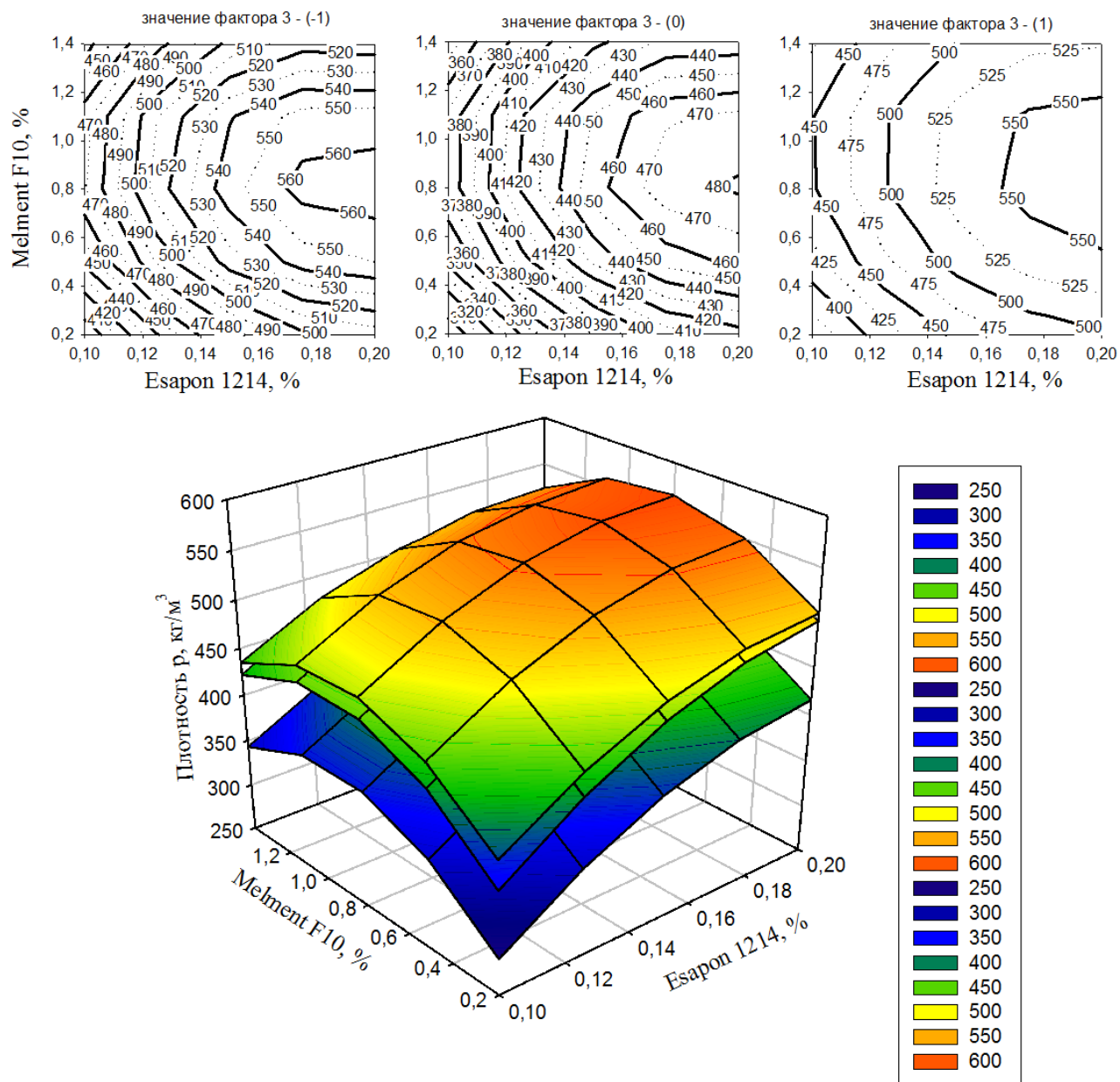


Рисунок 4.4 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от количества порообразователя ESAPON 1214 и суперпластификатора Melment F10

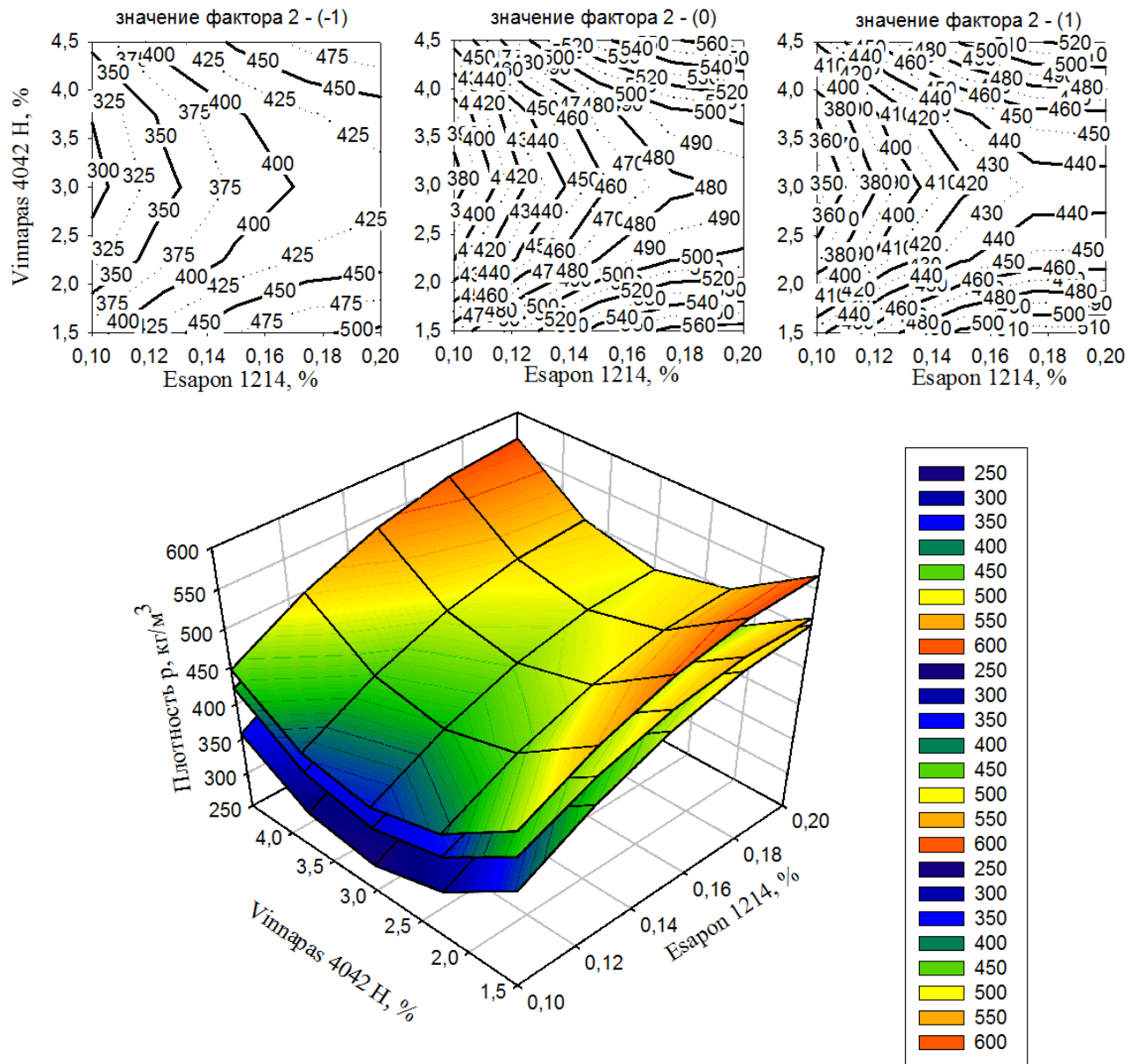


Рисунок 4.5 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от количества порообразователя ESAPON 1214 и редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H

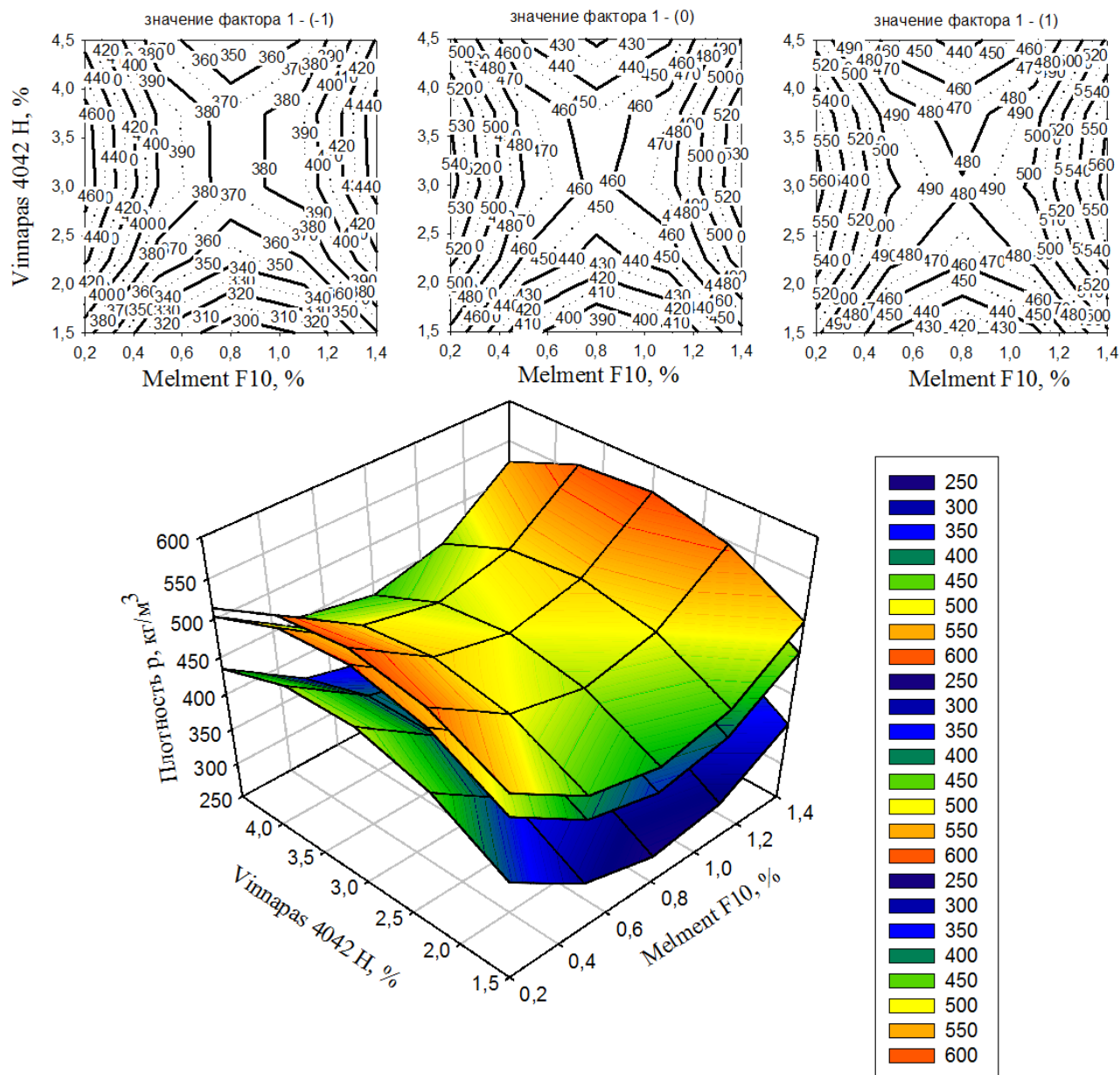


Рисунок 4.6 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от количества суперпластификатора Melment F10 и редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H

Анализ проведенных исследований позволил установить соотношение плотности раствора от различных химических добавок редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H, суперпластификатора Melment F10, порообразователя ESAPON 1214. Произведен расчет уравнений регрессии, выполнена графическая интерпретация в виде номограмм и графиков, использование которых дает представление о влиянии каждого фактора на получение требуемой плотности.

4.1.2 Модель зависимости прочности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов

Условия планирования эксперимента

Целью условий планирования эксперимента является найти соотношение между применяемыми добавками редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 Н; суперпластификатора Melment F10; порообразователя ESAPON 1214 и установить их влияние на выходной параметр. Условия планирования эксперимента приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
Порообразователь ESAPON 1214	X_1	0,1	0,15	0,2	0,05
Суперпластификатор Melment F10	X_2	0,2	0,8	1,4	0,6
Редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 Н	X_3	1,5	3	4,5	1,5

Параметры для расчета коэффициентов приведены в таблице 4.7.

Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости

Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии и их значимость.

$T_1 \dots T_6$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_1 = 0,1832$; $T_2 = 0,0704$; $T_3 = 0,1$; $T_4 = 0,5$; $T_5 = -0,1268$; $T_6 = 0,125$.

Свободный член b_1 вычисляем по формуле (4.1):

$$b_1 = 0,1832 \cdot 3833 - 0,0704 \cdot (22,34 + 22,24 + 23,15) = 2,254.$$

Коэффициенты для линейных членов определяем по формуле (4.2):

$$b_2 = 0,1 \cdot 2,18 = 0,218; b_3 = 0,1 \cdot 1,02 = 0,102; b_4 = 0,1 \cdot (-0,13) = -0,013.$$

Коэффициенты для квадратичных членов рассчитываем по формуле (4.3):

$$b_5 = 0,5 \cdot 22,34 - 0,1268 \cdot (22,34 + 22,24 + 23,15) - 0,0704 \cdot 38,33 = -0,1166;$$

$$b_6 = 0,5 \cdot 22,24 - 0,1268 \cdot (22,34 + 22,24 + 23,15) - 0,0704 \cdot 38,33 = -0,1666;$$

$$b_7 = 0,5 \cdot 23,15 - 0,1268 \cdot (22,34 + 22,24 + 23,15) - 0,0704 \cdot 38,33 = 0,2884.$$

Таблица 4.7 – Параметры для расчета коэффициентов

Точка плана	Факторы			Экспе- римен- тальные значения y_u	Расчетные параметры для определения коэффициентов								
	X_1	X_2	X_3		при линейных членах			при квадратичных членах			при взаимодействиях		
					yx_1	yx_2	yx_3	yx_1^2	yx_2^2	yx_3^2	yx_1x_2	yx_1x_3	yx_2x_3
1	1	1	1	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78
2	1	1	1	2,55	2,55	2,55	-2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	-2,55	-2,55
3	1	1	-1	2,32	2,32	-2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	-2,32	2,32	-2,32
4	1	1	-1	2,56	2,56	-2,56	-2,56	2,56	2,56	2,56	-2,56	-2,56	2,56
5	1	-1	1	1,98	-1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	-1,98	-1,98	1,98
6	1	-1	1	2,23	-2,23	2,23	-2,23	2,23	2,23	2,23	-2,23	2,23	-2,23
7	1	-1	-1	1,89	-1,89	-1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	-1,89	-1,89
8	1	-1	-1	1,87	-1,87	-1,87	-1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87
9	-1	1	1	2,05	2,05	0	0	2,05	0	0	0	0	0
10	-1	1	1	2,11	-2,11	0	0	2,11	0	0	0	0	0
11	-1	1	-1	2,09	0	2,09	0	0	2,09	0	0	0	0
12	-1	1	-1	1,97	0	-1,97	0	0	1,97	0	0	0	0
13	-1	-1	1	2,54	0	0	2,54	0	0	2,54	0	0	0
14	-1	-1	1	2,43	0	0	-2,43	0	0	2,43	0	0	0
15	-1	-1	-1	1,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	-1	-1	-1	2,65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	2,43	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма:					2,18	1,02	-0,13	22,34	22,24	23,15	22,34	22,24	23,15

Коэффициенты при взаимодействиях определяем по формуле (4.4):

$$b_8 = 0,125 \cdot 0 = 0;$$

$$b_9 = 0,125 \cdot 0 = 0;$$

$$b_{10} = 0,125 \cdot 0,2 = 0,025.$$

Проверяем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Для этого дополнительно выполняем 3 опыта, фиксируя факторы на основном уровне (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Результаты опытов и расчетов в нулевых точках

Точка плана	Фактор			y	$\bar{y}$	y- $\bar{y}$	(y- $\bar{y}$) ²
	X ₁	X ₂	X ₃				
1	0	0	0	3,45	2,623333	0,826667	0,683378
2	0	0	0	1,7		-0,92333	0,852544
3	0	0	0	2,72		0,096667	0,009344
Сумма:							1,545267

Дисперсию воспроизводимости определяют по формуле (4.5):

$$S_{(y_0)}^2 = \frac{1,545267}{3 - 1} = 0,7726.$$

Среднеквадратичное отклонение рассчитываем по формуле (4.6):

$$S_{(y_0)} = \sqrt{0,7726} = 0,8790.$$

Среднеквадратичную ошибку рассчитываем по формулам (4.7 - 4.10):

где $T_7 \dots T_{10}$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_7 = 0,4279$; $T_8 = 0,3162$; $T_9 = 0,6109$; $T_{10} = 0,3536$.

$$S_{(b_0)} = 0,4787 \cdot 0,8790 = 0,421;$$

$$S_{(b_i)} = 0,2357 \cdot 0,8790 = 0,207;$$

$$S_{(b_{ii})} = 0,6212 \cdot 0,8790 = 0,546;$$

$$S_{(b_{ij})} = 0,25 \cdot 0,8790 = 0,220.$$

Находим табличное t_T значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0.05$ и $f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$; $t_T = 3.18$.

Расчетные значения t_p критерия Стьюдента определяем по формулам (4.11 - 4.14):

$$t_1 = \frac{|556,09|}{60,442} = 5,36;$$

$$t_2 = \frac{|54,5|}{29,76} = 1,05;$$

$$t_3 = \frac{|18,2|}{29,760} = 0,49;$$

$$t_4 = \frac{|-5,3|}{29,760} = 0,06;$$

$$t_5 = \frac{|-28,7752|}{78,435} = 0,21;$$

$$t_6 = \frac{|-57,2752|}{78,435} = 0,31;$$

$$t_7 = \frac{|85,2248|}{78,435} = 0,53;$$

$$t_8 = \frac{|-9,375|}{31,566} = 0;$$

$$t_9 = \frac{|5,625|}{31,566} = 0;$$

$$t_{10} = \frac{|4,375|}{31,566} = 0,11.$$

При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Следовательно, к таковым относятся коэффициенты $b_2, b_3, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии. С учетом вышеизложенного, зависимость прочности от исследуемых факторов имеет следующий вид:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot X_1 + 0,102 \cdot X_2 - 0,013 \cdot X_3 - 0,1166 \cdot X_1^2 - 0,1666 \cdot X_2^2 + 0,2884 \cdot X_3^2 + 0,025 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

где

$$X_1 = \frac{\text{Порообразователь ESAPON 1214} - 0,15}{0,05};$$

$$X_2 = \frac{\text{Суперпластификатор Melment F10} - 0,8}{0,6};$$

$$X_3 = \frac{\text{Редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 H} - 3}{1,5}$$

Проверка адекватности уравнений регрессии

Далее определяем адекватность полученного уравнения регрессии. Рассчитываем дисперсию адекватности (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Расчет дисперсии адекватности

Точка плана	y	$\hat{y}$	y - $\hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$
1	2,78	2,591076	0,188924	0,035692
2	2,55	2,567076	-0,01708	0,000292
3	2,32	2,337076	-0,01708	0,000292
4	2,56	2,413076	0,146924	0,021587
5	1,98	2,155076	-0,17508	0,030652
6	2,23	2,131076	0,098924	0,009786
7	1,89	1,901076	-0,01108	0,000123
8	1,87	1,977076	-0,10708	0,011465
9	2,05	2,355268	-0,30527	0,093189
10	2,11	1,919268	0,190732	0,036379
11	2,09	2,189268	-0,09927	0,009854
12	1,97	1,985268	-0,01527	0,000233
13	2,54	2,529268	0,010732	0,000115
14	2,43	2,555268	-0,12527	0,015692
15	1,88	2,253864	-0,37386	0,139774
16	2,65	2,253864	0,396136	0,156924
17	2,43	2,253864	0,176136	0,031024
Сумма:				0,593071

Определяем дисперсию адекватности S_{ag}^2 по формуле (4.15):

$$S_{ag}^2 = \frac{0,593071}{17 - 10} = 0,08472$$

Находим расчетное значение критерия Фишера F_p по формуле (4.16):

$$F_p = \frac{0,7726}{0,08472} = 9,12.$$

Табличное значение критерия Фишера при доверительной вероятности 95%: $f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$ и $f_{ag} = 17 - 10 = 7$ и $F_T = 9,34$. $F_p < F_T$, поэтому уравнение регрессии считается адекватным.

Анализ уравнений регрессии

В линейных моделях знак «+» при коэффициенте свидетельствует о том, что с увеличением этого фактора величина выходного параметра увеличивается. а знак «-» о том, что убывает. Чем больше значение коэффициента, тем сильнее

влияние фактора. Если необходимо получить максимальное значение выходного параметра, значения всех факторов, коэффициенты которых имеют знак «+», следует принимать максимальными, а значения коэффициентов со знаком «-» - минимальными.

Оптимизационные задачи заключаются в нахождении такого сочетания факторов, которое обеспечивает максимальное (минимальное) значение выходного параметра. В этом случае экстремум находят из дифференцирования уравнения последовательно по X_1, X_2, X_3 и т.д. Полученная система линейных уравнений приравнивается к нулю. Путем ее решения находят значение x_i , обеспечивающее экстремальное значение $\hat{y}$.

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot X_1 + 0,102 \cdot X_2 - 0,013 \cdot X_3 - 0,1166 \cdot X_1^2 - 0,1666 \cdot X_2^2 + 0,2884 \cdot X_3^2 + 0,025 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_1} = 0,218 - 0,2332x_1;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_2} = 0,102 - 0,3332x_2 + 0,025x_3;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_3} = -0,013 + 0,025x_2 + 0,5768x_3,$$

Решение системы уравнений:

$$-0,2332x_1 = -0,218;$$

$$-0,3332x_2 + 0,025x_3 = -0,102;$$

$$0,025x_2 + 0,5768x_3 = 0,013$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} -0,2332 & & & -0,218 \\ & -0,3332 & 0,025 & -0,102 \\ & 0,025 & 0,5768 & 0,013 \end{array} \right) (3) - (2) \cdot (-0,075);$$

$$-0,2332x_1 = -0,218;$$

$$-0,3332x_2 + 0,025x_3 = -0,102;$$

$$+0,5787x_3 = 0,0053$$

$$x_1 = 0,93;$$

$$x_2 = 0,31;$$

$$x_3 = 0,01;$$

$$X_1 = \frac{\text{Порообразователь ESAPON 1214} - 0,15}{0,05};$$

$$X_2 = \frac{\text{Суперпластификатор Melment F10} - 0,8}{0,6};$$

$$X_3 = \frac{\text{Редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 H} - 3}{1,5}$$

Порообразователь ESAPON 1214 = $0,93 \cdot 0,05 + 0,15 = 0,1965$, [0,1 ... 0,2];

Суперпластификатор Melment F10 = $0,31 \cdot 0,6 + 0,8 = 0,986$, [0,2 ... 1,4];

Редиспергирующий порошок VinnapasLL 4042 H = $0,01 \cdot 1,5 + 3 = 3,015$, [1,5 ... 4,5];

Подставим полученные значения в уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot 0,93 + 0,102 \cdot 0,31 - 0,013 \cdot 0,01 - 0,1166 \cdot 0,93^2 - 0,1666 \cdot 0,31^2 + 0,2884 \cdot 0,01^2 + 0,025 \cdot 0,31 \cdot 0,01 = 2,37 \text{ МПа},$$

Оптимальное расчетное значение прочности теплоизоляционного раствора составляет 2,37 МПа.

Построение зависимостей выходных параметров от исследуемых факторов

Используя полученное уравнение регрессии. можно произвести анализ влияния исследуемых факторов на прочность теплоизоляционного раствора.

Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от порообразователя ESAPON 1214:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot X_1 - 0,1166 \cdot X_1^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot (-1) + (-0,1166) \cdot (-1)^2 = 1,919,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot (-0,5) + (-0,1166) \cdot (-0,5)^2 = 2,116,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot 0 + (-0,1166) \cdot 0^2 = 2,254,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot 0,5 + (-0,1166) \cdot 0,5^2 = 2,334,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,218 \cdot 1 + (-0,1166) \cdot 1^2 = 2,355.$$

Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от суперпластификатора Melment F10:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,102 \cdot X_2 - 0,1666 \cdot X_2^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,102 \cdot (-1) + (0,1666) \cdot (-1)^2 = 1,985,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,102 \cdot (-0,5) + (0,1666) \cdot (-0,5)^2 = 2,199,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,102 \cdot 0 + (0,1666) \cdot 0^2 = 2,254,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,102 \cdot 0,5 + (0,1666) \cdot 0,5^2 = 2,263,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 2,2539 + 0,102 \cdot 1 + (0,1666) \cdot 1^2 = 2,189.$$

Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 Н:

$$\hat{y} = 2,2539 - 0,013 \cdot X_3 + 0,2884 \cdot X_3^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 2,2539 - 0,013 \cdot (-1) + 0,2884 \cdot (-1)^2 = 2,555,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 2,2539 - 0,013 \cdot (-0,5) + 0,2884 \cdot (-0,5)^2 = 2,332,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 2,2539 - 0,013 \cdot 0 + 0,2884 \cdot 0^2 = 2,254,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 2,2539 - 0,013 \cdot 0,5 + 0,2884 \cdot 0,5^2 = 2,320,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 2,2539 - 0,013 \cdot 1 + 0,2884 \cdot 1^2 = 2,529.$$

Строим графики зависимости прочности от исследуемых факторов (рисунок 4.7-4.12):

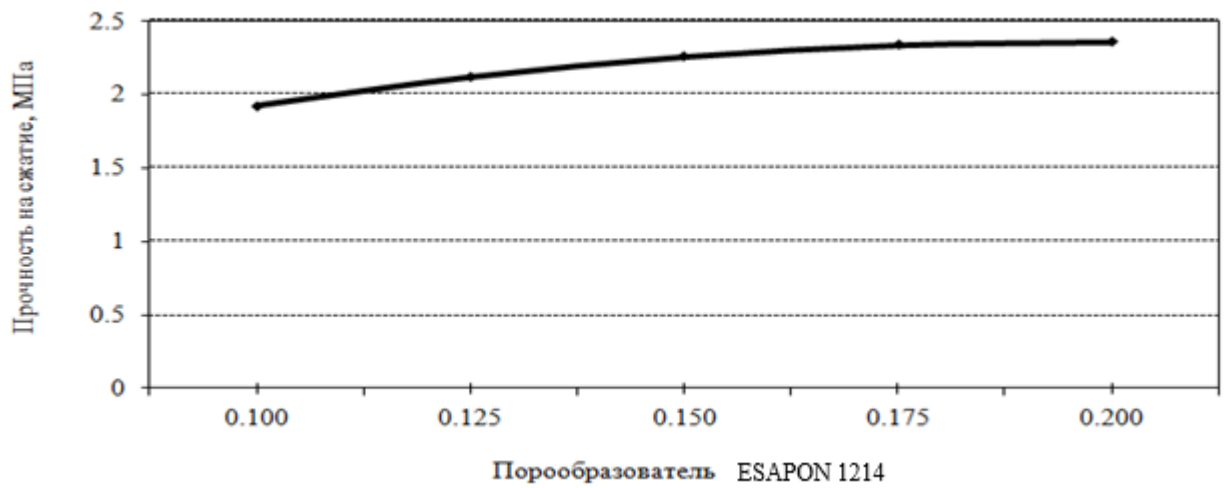


Рисунок 4.7 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от количества порообразователя ESAPON 1214

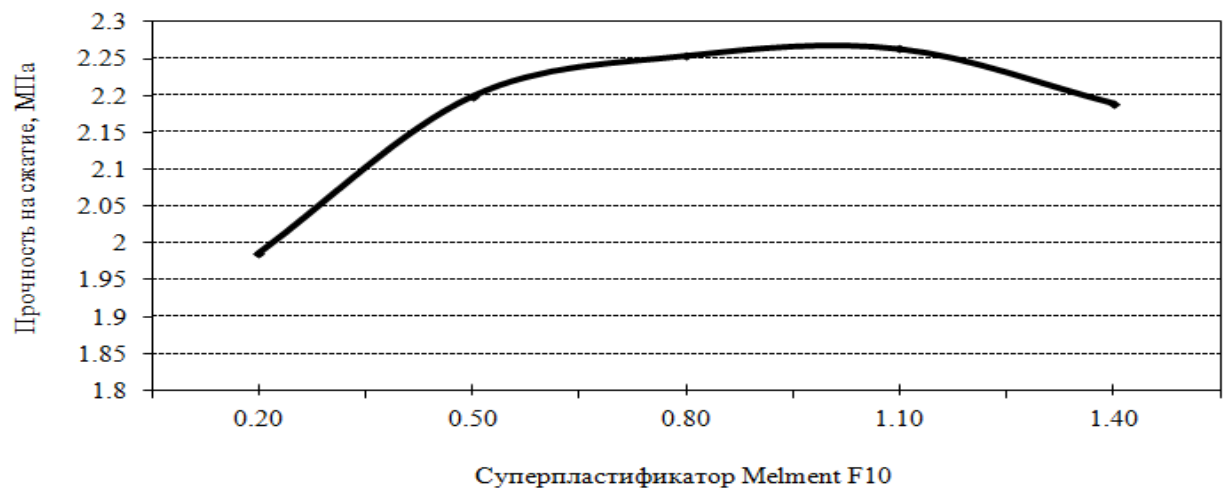


Рисунок 4.8 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от количества суперпластификатора Melment F10

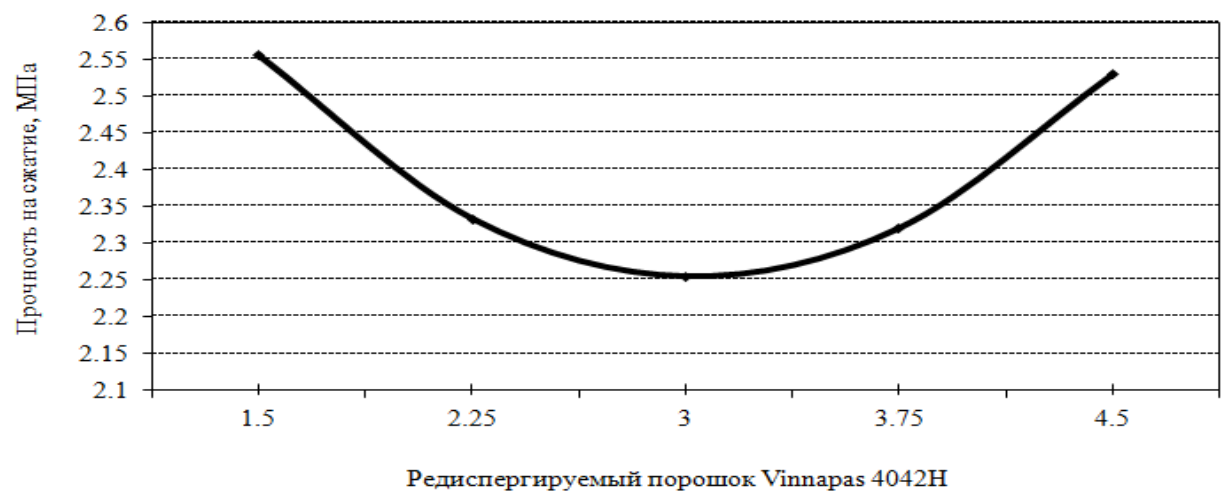


Рисунок 4.9 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от количества редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H

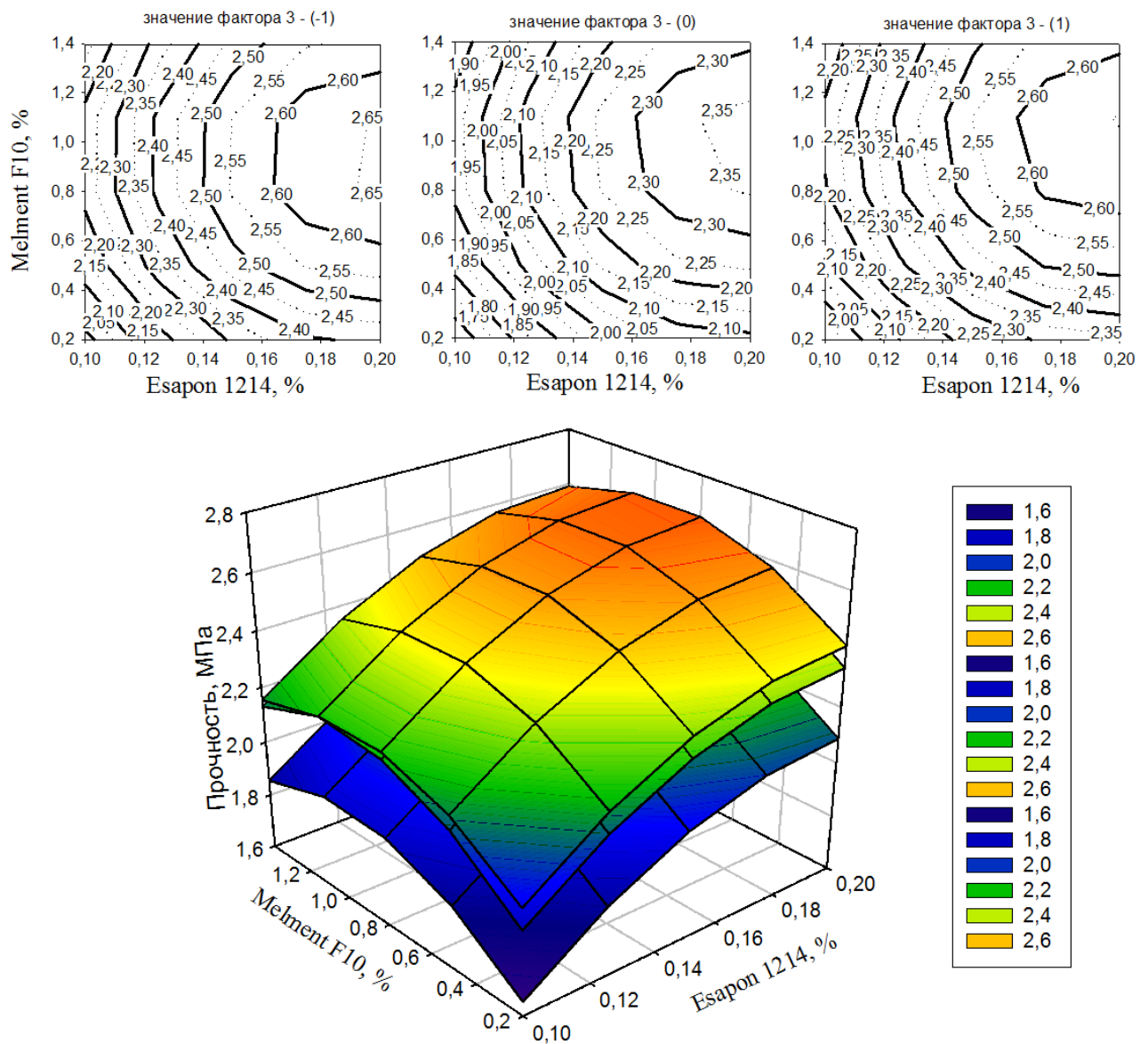


Рисунок 4.10 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от количества порообразователя ESAPON 1214 и суперпластификатора Melment F10

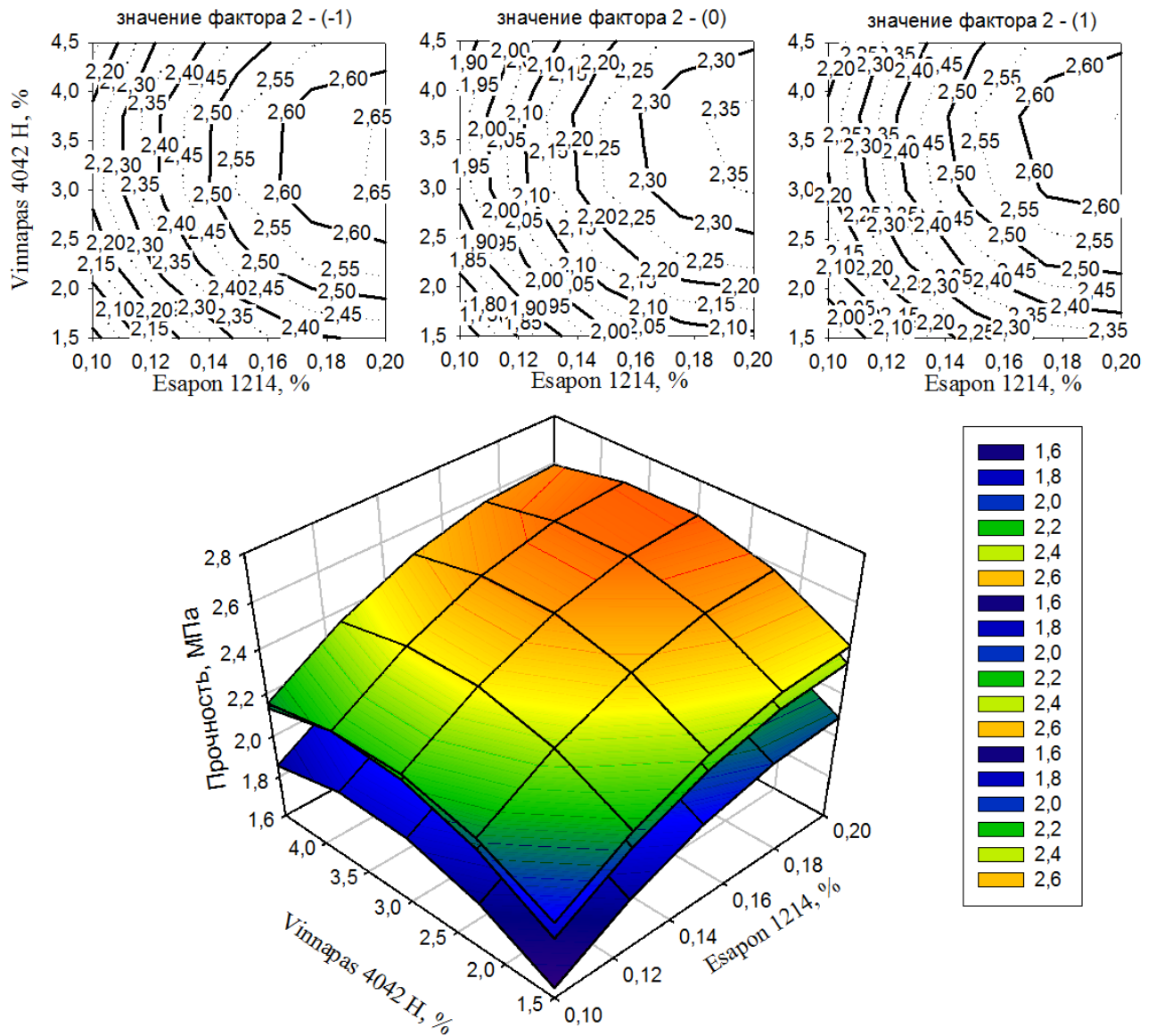


Рисунок 4.11 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от количества порообразователя ESAPON 1214 и редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H

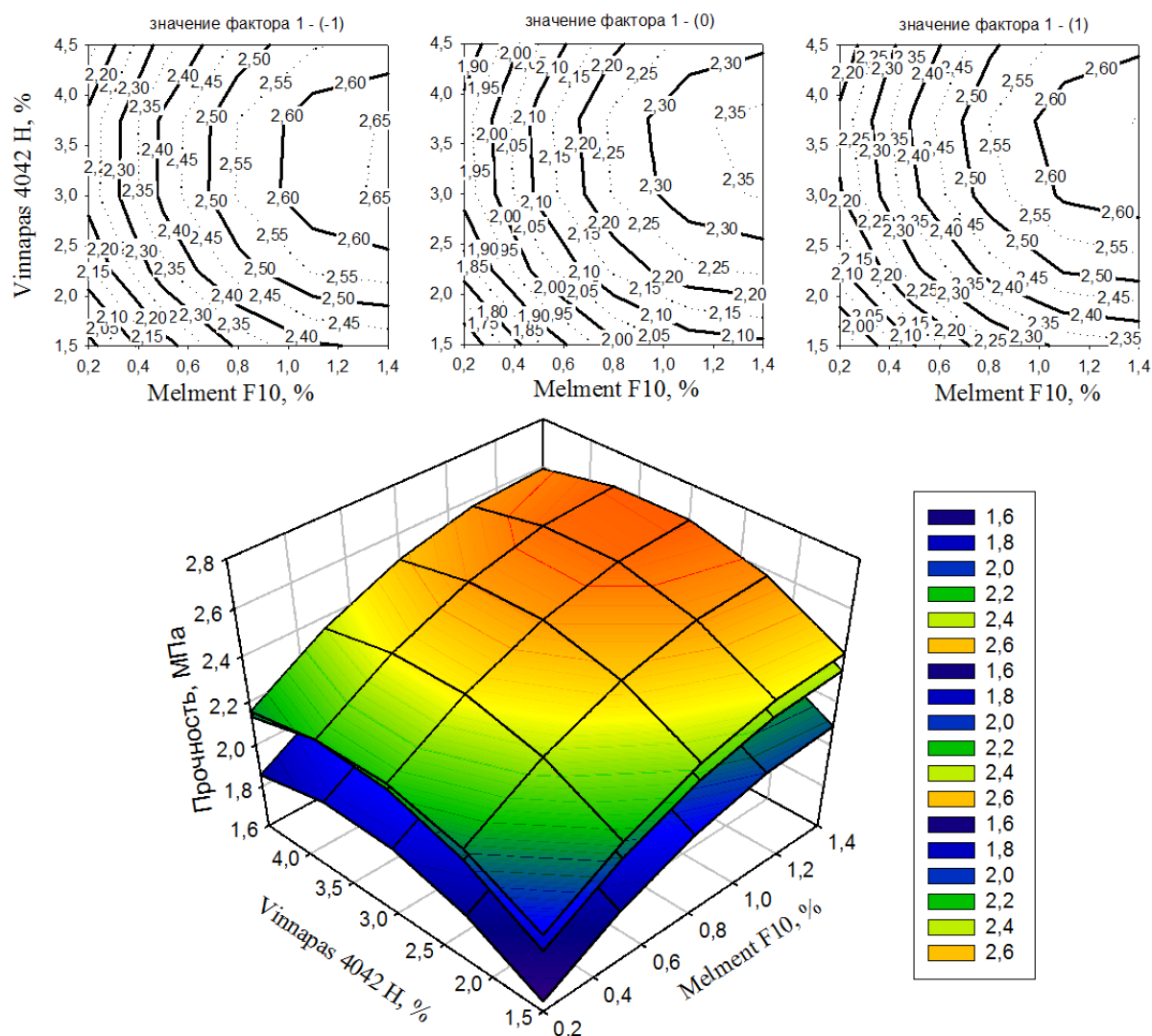


Рисунок 4.12 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от количества суперпластификатора Melment F10 и редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H

В результате выполнения этого этапа работы были проанализированы соотношения прочностных и физико-механических показателей создаваемого раствора в зависимости от действия химических добавок редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 H; суперпластификатора Melment F10; порообразователя ESAPON 1214. На основании решенных уравнений регрессии даны графические интерпритации в виде номограмм и графиков, которые позволяют визуально проследить действия каждого составляющего фактора на конечный показатель, а также регулировать процесс получения оптимального состава.

Оптимальное расчетное значение плотности теплоизоляционного раствора составляет $482,11 \text{ кг/м}^3$, при $x_1 = 0,936$, $x_2 = 0,082$, $x_3 = -0,002$, а прочности характеризуются величиной $2,37 \text{ МПа}$, при $x_1 = 0,93$, $x_2 = 0,31$, $x_3 = 0,01$.

Применение диаграмм позволит поддерживать на требуемом уровне контролируемый параметр производственного процесса синтеза строительных растворов теплоизоляционного назначения путем соотношения принятых факторов, входящих в общую совокупность параметров.

4.2 Изучение микроструктуры теплоизоляционных растворов

Исследования микроструктуры теплоизоляционных растворов в возрасте 180 сут проводили при различном увеличении – от 1000 мкм до 10 мкм. Сравнительные исследования микрофото участков растворов, синтезированных на товарном портландцементе и разработанных композиционных вяжущих с использованием в качестве заполнителя вспученного вермикулита, показали, что при увеличении 1000 мкм затвердевшая структура этих растворов характеризуется как равномерно-пористая, при этом отмечается, что пористость растворов с использованием композиционного вяжущего более отчетлива. При изучении участков растворов, синтезированных на композиционном вяжущем при увеличении 100 мкм отмечается наличие тонкозернистых пористых образований на частичках минеральных наполнителей, представленных частичками вермикулита по всей поверхности скола, отмечается формирование тонкозернистых новообразований гидросиликатов кальция и алюминия, которые прорастают на тонкодисперсных подложках и срастаются между собой, образуя пористую сросшуюся структуру. На образцах теплоизоляционного раствора, приготовленного на портландцементе, отмечается, наличие густо прорастающих гидросиликатов кальция и алюминия и срастающихся в единый плотный конгломерат (рисунок 4.13).

Дальнейшее сравнение сколов теплоизоляционных растворов на разных вяжущих при меньших увеличениях 25 мкм показывает, что структура теплоизоляционных растворов имеет тонкозернистые образования по всем поверхностям минерального наполнителя - вермикулита, а также отмечаются проросшие новообразования, которые дополнительно армируют структуру материала.

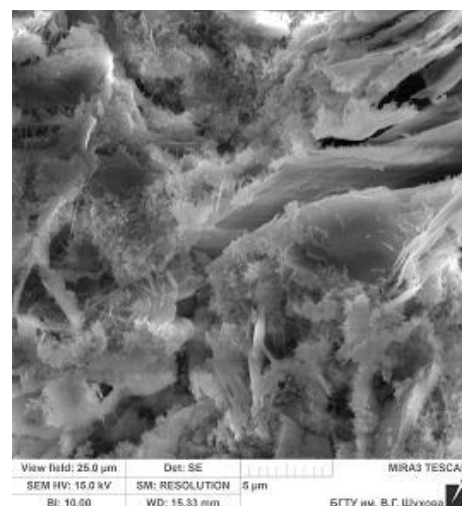
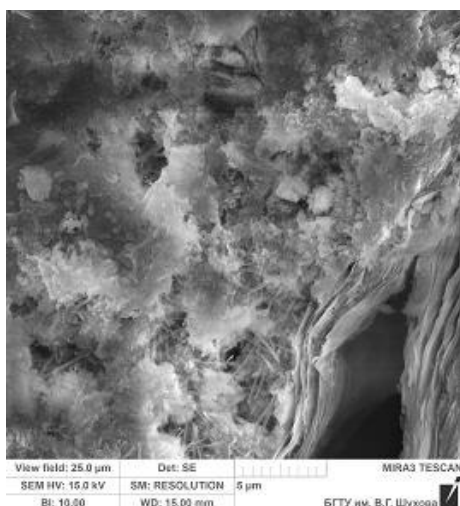
Теплоизоляционный раствор

Теплоизоляционный раствор

на основе портландцемента

на основе композиционного вяжущего

×25 мкм



×10 мкм

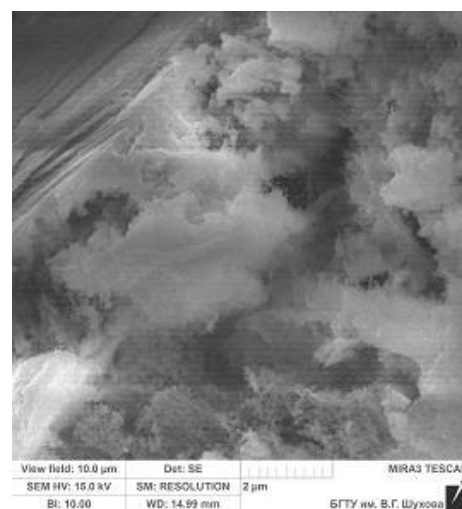
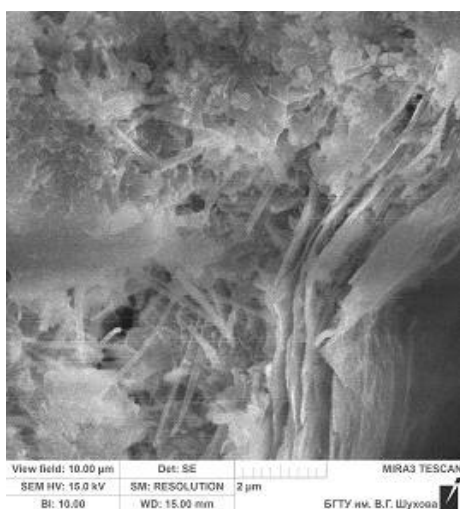


Рисунок 4.13 – Микроструктуры теплоизоляционных растворов на основе портландцемента и на основе композиционного вяжущего

Отмечаются зерна вермикулита, на которых формируются многочисленные кристаллические новообразования, окаймляющие образовавшиеся поры вследствие разноориентированных минеральных наполнителей. Сравнение с теплоизоляционных растворов на основе портландцемента показывает, что теплоизоляционный раствор имеет уплотненную структуру, а зерна вермикулита служат крупными подложками для формирования различных кристаллических новообразований, отмечается, отсутствие пористой структуры. Изучение микроструктуры раствора, приготовленного на композиционном вяжущем свидетельствует, что именно это вяжущее позволяет формироваться пористой структуре вследствие наличия минерального наполнителя – вспученного вермикулита, который выступает в качестве разноориентированных минеральных подложек, на которых формируются

гидросиликаты кальция и алюминия, которые прорастают, сращиваются, образуя блоки-агрегаты по всему объему материала, создавая единый пористый каркас, который обладает повышенной прочностью, что и доказывается высокими физико-механическими показателями исследуемого раствора.

Таким образом, использование предлагаемого композиционного вяжущего при приготовлении теплоизоляционных растворов с применением минерального наполнителя – вермикулита обеспечивают изготовление растворов теплоизоляционного назначения с большой пористостью и требуемой прочностью.

4.3 Выводы по главе 4

1. Определены оптимальные количественные соотношения между композиционным вяжущим и применяемым легким заполнителем – вермикулитовым песком 1:11, при этом соотношении возможно получение теплоизоляционных растворов с минимальной плотностью до 550 кг/м^3 и прочностью 3,7 МПа. Для дальнейшей оптимизации принят состав композиционного вяжущего и вспученного вермикулитового песка при указанном соотношении.

2. Оптимизацию теплоизоляционных растворов обеспечили за счет применения следующих функциональных добавок редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 Н; суперпластификатор Melment F10; порообразователь ESAPON 1214. Указанные добавки применяли в исследуемых композициях в количестве, предложенном их производителем с установленным варьируемым интервалом. Для установления наилучших составов с использованием добавок, а также изучения влияния каждого компонента на технологические свойства и физико-механические показатели, был применен метод математического планирования эксперимента, выходными параметрами являлись показатели по прочности и плотности.

3. Методом математического планирования эксперимента оптимизирован состав теплоизоляционного раствора с получением пониженных показателей плотности 482 кг/м^3 и прочности 2,37 МПа на предложенных композиционных

вяжущих, вспученного вермикулита при установленном соотношении компонентов. Выявлена значимость расчетных коэффициентов, как превосходящих установленные табличные значения критерия Стьюдента. Установлена адекватность уравнений регрессии по определению плотности и прочности в соответствие с критериями Фишера.

4. Проведен анализ результатов изменения плотности и прочности разработанных растворов от применения различных химических добавок редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 Н; суперпластификатора Melment F10; порообразователя ESAPON 1214. Представлена наглядная интерпретация зависимостей в виде номограммы графиков, отражающих результаты полученных уравнений регрессии, используя которые можно легко установить показатели выходных параметров в зависимости от изменения каждого исследуемого фактора. Применение построенных диаграмм обеспечивает стабильность технологических процессов на требуемом уровне, за счет изменения комбинаций факторов, составляющих уравнение регрессии.

5. Установлено, что структура теплоизоляционных растворов имеет тонкозернистые образования по всем поверхностям минерального наполнителя - вермикулита, отмечаются проросшие новообразования, дополнительно армирующие структуру раствора. На зернах вермикулита формируются многочисленные кристаллические новообразования, окаймляющие образовавшиеся поры вследствие разно ориентированных минеральных наполнителей. Раствор с теплоизоляционными свойствами, синтезированный на композиционном вяжущем характеризуется пористой структурой вследствие наличия минерального наполнителя – вспученного вермикулита, который выступает в качестве разно ориентированных минеральных подложек, на которых формируются гидросиликаты кальция и алюминия, прорастающие по всему объему материала, создавая сросшийся пористый каркас, обладающий повышенной прочностью, что подтверждается высокими физико-механическими показателями полученного раствора, а также высокими теплозащитными свойствами.

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ РАСТВОРЫ

5.1 Изучение процесса смешения и выбор оборудования

Важным технологическим процессом при приготовлении строительных композитов, является их эффективное смешение, так как строительные композиции полиструктурные, и требуют подбора эффективного аппарата для их высокой гомогенности. Задача смешения создать общую нано-, микро- и макроструктуру, обладающую едиными свойствами.

В настоящей главе приведены результаты исследования процессов смешения сухих строительных смесей, разработанных с использованием вермикулита. Следует учитывать, что сырьевые компоненты имели различный гранулометрический состав и отличную плотность, применяемые композиционные вяжущие характеризовались высокой удельной поверхностью до $480 \text{ м}^2/\text{кг}$ и насыпной плотностью 1300 кг/м^3 , а вспученный вермикулит представлен частицами размерами от 0,16 до 5 мм и имеет плотность 80 кг/м^3 . Принимая во внимание различную плотность сырьевых компонентов, а также высокую пористость вермикулита, ставилась задача подобрать смеситель для качественного перемешивания сухих теплоизоляционных смесей.

В процессе смешения компоненты сухих теплоизоляционных смесей должны обеспечить равномерное распределение во всем объеме композиций с целью получения единой гомогенной массы, это обеспечит при добавлении воды требуемые технологические, физико-механические и эксплуатационные свойства теплоизоляционных растворов.

В ходе смешения вследствие возникновения конвективных и диффузионных процессов, частицы сухой смеси занимают определенные места. При перемешивании компонентов часто наблюдается процесс агрегирования частиц, что является отрицательным явлением.

В промышленности используются самые различные смесители для смешения широкого спектра сырьевых компонентов и приготовления сырьевых смесей для получения различных строительных материалов.

Особый интерес для исследуемых материалов представляет пневмосмеситель со спиральной энергонесущей трубкой (приложение А), так как он характеризуется высокoэкологическими и эффективными производственными показателями. При приготовлении теплоизоляционных смесей используются сырьевые материалы с различными характеристиками, они имеют разное физическое состояние, различную плотность, различную прочность. Принимая во внимание, что вермикулит является легким заполнителем и имеет низкую прочность, то есть хорошо измельчается. Учитывая, что пористые заполнители в виде зерен вермикулита будет перемешиваться с высокодисперсным композиционным вяжущим, зерна которых должны равномерно распределяться по всему объему легкого заполнителя, предполагается, что вяжущие оседающие на частицах легкого заполнителя при гидратации будет сшивать все пластинчатые частицы вермикулита, объединяя их в единый конгломерат.

При проведении исследований была использована лабораторная смесительная установка, на которой проводились опыты по изучению процессов смешения различных составов теплоизоляционных растворов. Принципиальная схема используемого лабораторного смесителя указана на рисунке 5.1, технические характеристики приведены в таблице 5.1. Фото используемого лабораторного смесителя указано на рисунке 5.2.

Принципиальные особенности работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой состоит в применении принятого энергоносителя (сжатого воздуха), который обеспечивается компрессором 4ВУ1-5/9М. Сжатый воздух из ресивера поставляется в объем смесителя.

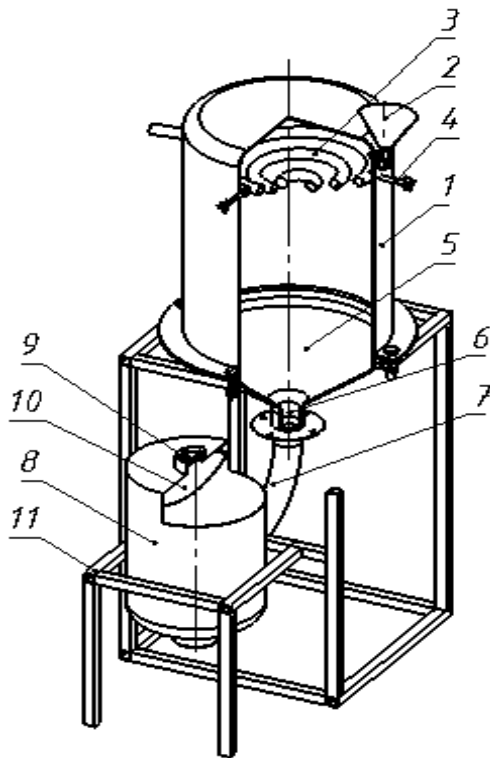


Рисунок 5.1 – Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой: 1 – камера; 2 – загрузочный патрубок; 3 – спиральная энергонесущая трубка; 4 – держатели; 5 – коническое днище; 6 – выгрузочный патрубок; 7 – труба; 8 – бункер; 9 – вентилятор; 10 – фильтр; 11 – рама



Рисунок 5.2 – Лабораторная установка пневматического со спиральной энергонесущей трубкой

Посредством шнекового дозатора ингредиенты поступают в смесительную камеру установки, загрузка осуществляется через патрубок (2). В рабочей камере смешиваемые ингредиенты сжатым воздухом подхватываются и передаются спиральной трубкой (3) в основной корпус смесительного аппарата. Спиральная вид энергонесущей трубки положительно влияет на получение значительной поверхности контактов сжатого воздуха со смешиваемыми ингредиентами, что обеспечивает высокое качество смешения и получение высокоомогенного продукта. В установке через днище (5) и с помощью патрубка (6) осуществляется выгрузка готового смешанного материала. После этого полученная смесь посредством трубы (7) передается в бункер (8). В вентиляторе (9) сжатый воздух очищается и попадает в фильтр (10). Полученная смесь через систему трубопроводов передается на упаковку и складировается.

Таблица 5.1 – Техническая характеристика пневматического смесителя

№ п/п	Характеристика	Размерность	Обозначение	Значение
1	Давление энергоносителя	кПа	P	100-200
2	Размер частиц исходного материала	мм	d	$\leq 1,5$
3	Производительность	кг/ч	Q	≤ 20
4	Габаритные размеры камеры смешения -длина -ширина -высота	м	L B H	0,260 0,260 0,370
4	Габаритные размеры установки -длина -ширина -высота	м	L B H	0,700 0,500 0,910
5	Масса	кг	m	10

Пневмосмеситель со спиральной энергонесущей трубкой состоит из следующих основных частей: патрубок загрузочный (рисунок 5.3), камера смешения (рисунок 5.4), трубка спиральная энергонесущая (рисунок 5.5), бункер, оборудованный вентилятором (рисунок 5.6) и металлическая рама.

Патрубок загрузочный (рисунок 5.3) включает воронку 1, трубу 2 диаметром $10 \cdot 10^{-3}$ м, сопло 3 с выходным диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Смешиваемые материалы подаются в загрузочную воронку 1, куда подается сжатый воздух через сопло 3. Смешиваемый материал тангенциально подается в камеру смешения.

Камера смешения 1 (рисунок 5.4) представляет цилиндр 1 диаметром 25,5 см с высотой 40 см и днищем 2 в виде конуса высотой 10,6 см, оборудованный выгрузочным отверстием 3 диаметром 4 см. С помощью крепежных изделий пневмосмеситель закрепляется на раме.

Спиральная энергонесущая трубка (рисунок 5.5) выполненная из трубы диаметром 0,4 см и изогнута в форме конуса. По всей длине спиральной энергонесущей трубки имеются отверстия, расположенные с одинаковым шагом, а оси отверстий расположены к вертикали под углом 30-35°.

Корпус смесителя (рисунок 5.6) имеет врезанную крышку Ø 17,5 см, высотой h 2,0 см и патрубок 2 для отвода очищенного сжатого воздуха, оснащающего вентилятором 3.

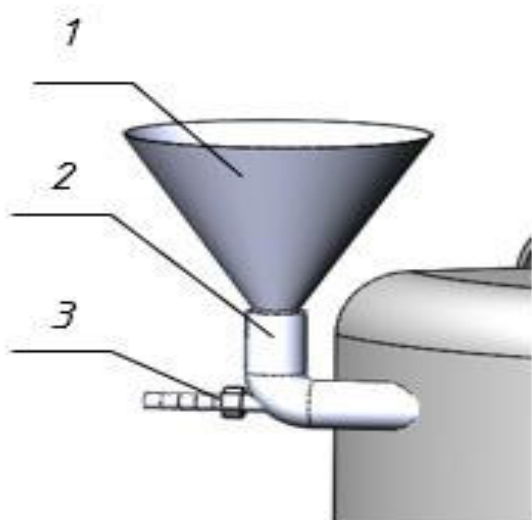


Рисунок 5.3 – Загрузочный патрубок
1 – воронка; 2 – труба; 3 – сопло

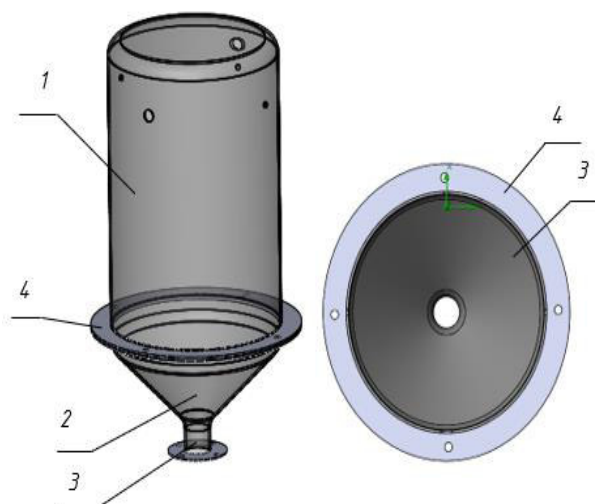


Рисунок 5.4 – Камера смешения
1 – камера; 2 – коническое днище;
3 – выгрузочный патрубок; 4 – фланцы.

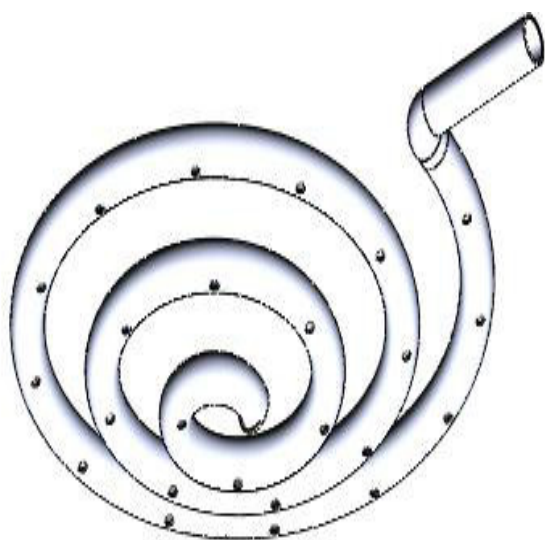


Рисунок 5.5 – Спиральная энергонесущая трубка

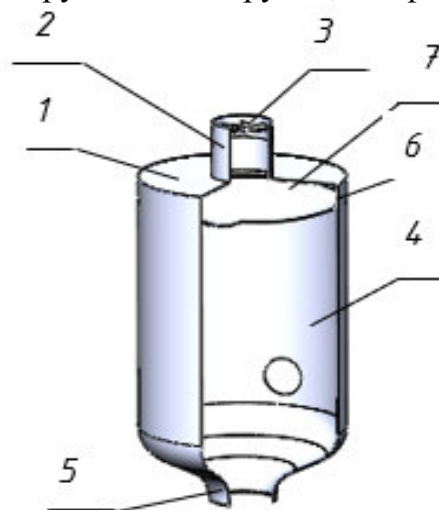


Рисунок 5.6 – Корпус смесителя
1 – крышка; 2 – патрубок; 3 – вентилятор;
4 – загрузочная камера; 5 – выходной
патрубок; 6 – прокладки; 7 – фильтр

Загрузочная емкость смесителя 4 для фильтрации готовой смеси и сжатого воздуха $\varnothing 17,5$ см и $h 2,40$ см имеет отверстие сбоку под шланг, соединяющий бункер с выходным патрубком пневматического смесителя 5. Между крышкой 1 и загрузочной камерой 4 расположены патрубки 2 с прокладками 6, в промежутке между которыми закреплен фильтр 7, сжатый воздух, проходя через него, очищается и уходит через вентилятор во внешнюю среду.

В данной главе представлены результаты, полученные при изучении процессов смешения теплоизоляционных смесей на основе вермикулита и портланд-цемента.

Исследованиями, приведенными в главе 3, установлен оптимальный состав и его физико-механические характеристики, полученных при ручном смешении, включающие следующие соотношения сырьевых компонентов в объемных частях: композиционное вяжущее – одна часть, вермикулит – одиннадцать частей. Заданный состав показал минимальную плотность 550 кг/м^3 и достаточно высокую прочность при сжатии 3,7 МПа (глава 4, таблица 4.1)

Исследования по процессу перемешивания сырьевых ингредиентов для изготовления растворных смесей теплоизоляционного назначения проводили в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой (ПССЭТ). Для изучения процесса смешения и однородности получаемых смесей использовали методы математического планирования эксперимента (МПЭ) с вариацией следующих параметров: давление в камере смешения, продолжительность перемешивания, коэффициент загрузки.

Технология приготовления теплоизоляционных смесей заключалась в следующем. Отдозированные ингредиенты загружаются в смеситель, где с помощью сжатого воздуха перемешиваются, а затем готовая смесь пакуется в крафт-мешки и отправляется на склад.

Из ранее разработанных составов растворных смесей для теплоизоляции готовили образцы в виде кубиков $3 \text{ см} \times 3 \text{ см} \times 3 \text{ см}$ в количестве 5-6 образцов.

Отформованные образцы выдерживали в течение 28 суток в нормальных условиях (влажность 80 % и температуры 20°C).

В процессе смешения в камере принятого пневмосмесителя происходит равномерное смешение ингредиентов смеси, учитывая, что пористый заполнитель имеет незначительную прочность в камере создаются те режимы, при которых создаются благоприятные условия для перемешивания без разрушения легкого заполнителя, а также создания возможности их перемешивания с композиционным вяжущим, который находится в летучем состоянии, в результате чего на частич-

ках легкого заполнителя – вермикулита равномерно распределяются частицы композиционного вяжущего. В результате такого смешения создается максимально благоприятные условия для формирования гомогенной структуры и в последствие при гидратации композиционных вяжущих создается надежный каркас, обеспечивающий достаточно высокие показатели по прочности с обеспечением требуемой плотности.

Применение метода МПЭ обеспечит получение максимального количества требуемых технологических параметров при проведении наименьшего количества экспериментов.

5.2 Модель зависимости плотности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов

5.2.1 Условия планирования эксперимента

Изучить влияние на плотность теплоизоляционного раствора действие изменения коэффициента загрузки, времени смешивания, давления в пневматическом смесителе.

Таблица 5.2 – Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
Коэффициент загрузки	X1	0.4	0.5	0.6	0.1
Время смешивания, с	X2	30	50	70	20
Давление в пневматическом смесителе, кПа	X3	50	150	250	100

Параметры для расчета коэффициентов приведены в таблице 4.2.

5.2.2 Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости

Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии и их значимость.

$T_1 \dots T_6$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_1 = 0,1832$; $T_2 = 0,0704$; $T_3 = 0,1$; $T_4 = 0,5$; $T_5 = -0,1268$; $T_6 = 0,125$.

Свободный член b_1 вычисляем по формуле (4.1):

$$b_1 = 0,1832 \cdot 7605 - 0,0704 \cdot (4583 + 4356 + 4499) = 447.201$$

Коэффициенты для линейных членов определяем по формуле (4.2):

$$b_2 = 0,1 \cdot 275 = 27.5; b_3 = 0,1 \cdot 38 = 3.8; b_4 = 0,1 \cdot 111 = 11.1.$$

Таблица 5.3 – Параметры для расчета коэффициентов

Точка плана	Факторы			Экспе- римен- тальные значения y_u	Расчетные параметры для определения коэффициентов								
	X_1	X_2	X_3		при линейных членах			при квадратичных членах			при взаимодействиях		
					yx_1	yx_2	yx_3	yx_1^2	yx_2^2	yx_3^2	yx_1x_2	yx_1x_3	yx_2x_3
1	1	1	1	507	507	507	507	507	507	507	507	507	507
2	1	1	1	470	470	470	-470	470	470	470	470	-470	-470
3	1	1	-1	489	489	-489	489	489	489	489	-489	489	-489
4	1	1	-1	456	456	-456	-456	456	456	456	-456	-456	456
5	1	-1	1	417	-417	417	417	417	417	417	-417	-417	417
6	1	-1	1	410	-410	410	-410	410	410	410	-410	410	-410
7	1	-1	-1	372	-372	-372	372	372	372	372	372	-372	-372
8	1	-1	-1	385	-385	-385	-385	385	385	385	385	385	385
9	-1	1	1	507	507	0	0	507	0	0	0	0	0
10	-1	1	1	570	-570	0	0	570	0	0	0	0	0
11	-1	1	-1	393	0	393	0	0	393	0	0	0	0
12	-1	1	-1	457	0	-457	0	0	457	0	0	0	0
13	-1	-1	1	520	0	0	520	0	0	520	0	0	0
14	-1	-1	1	473	0	0	-473	0	0	473	0	0	0
15	-1	-1	-1	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	-1	-1	-1	379	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	413	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма:					275	38	111	4583	4356	4499	-38	76	24

Коэффициенты для квадратичных членов рассчитываем по формуле (4.3):

$$b_5 = 0,5 \cdot 4583 - 0,1268 \cdot (4583 + 4356 + 4499) - 0,0704 \cdot 7605 = 52.1696;$$

$$b_6 = 0,5 \cdot 4356 - 0,1268 \cdot (5495 + 5438 + 5723) - 0,0704 \cdot 7605 = -61.3304;$$

$$b_7 = 0,5 \cdot 4499 - 0,1268 \cdot (5495 + 5438 + 5723) - 0,0704 \cdot 7605 = 10.1696,$$

Коэффициенты при взаимодействиях определяем по формуле (4.4):

$$b_8 = 0,125 \cdot (-38) = -4.75;$$

$$b_9 = 0,125 \cdot 76 = 9.5;$$

$$b_{10} = 0,125 \cdot 24 = 3.$$

Проверяем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Для этого дополнительно выполняем 3 опыта, фиксируя факторы на основном уровне (таблица 4.3).

Таблица 5.4 – Результаты опытов и расчетов в нулевых точках

Точка плана	Фактор			y	$\bar{y}$	y- $\bar{y}$	(y- $\bar{y}$) ²
	X ₁	X ₂	X ₃				
1	0	0	0	621	512,6667	108,3333	11736,11
2	0	0	0	374		-138,667	19228,44
3	0	0	0	543		30,33333	920,1111
Сумма:							31884,67

Дисперсию воспроизводимости определяют по формуле (4.5):

$$S_{(y_0)}^2 = \frac{31884,67}{3 - 1} = 15942,333.$$

Среднеквадратичное отклонение рассчитываем по формуле (4.6):

$$S_{(y_0)} = \sqrt{15942,333} = 126,263.$$

Среднеквадратичную ошибку рассчитываем по формулам (4.7 – 4.10):

$$S_{(b_0)} = T_7 \cdot S_{(y_u)};$$

$$S_{(b_i)} = T_8 \cdot S_{(y_u)};$$

$$S_{(b_{ii})} = T_9 \cdot S_{(y_u)};$$

$$S_{(b_{ij})} = T_{10} \cdot S_{(y_u)};$$

где $T_7 \dots T_{10}$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_7 = 0,4279$; $T_8 = 0,3162$; $T_9 = 0,6109$; $T_{10} = 0,3536$.

$$S_{(b_0)} = 0,4787 \cdot 126,263 = 60,442;$$

$$S_{(b_i)} = 0,2357 \cdot 126,263 = 29,760;$$

$$S_{(b_{ii})} = 0,6212 \cdot 126,263 = 78,435;$$

$$S_{(b_{ij})} = 0,25 \cdot 126,263 = 31,566.$$

Находим табличное t_T значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0,05$ и $f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$; $t_T = 3,18$.

Расчетные значения t_p критерия Стьюдента определяем по формулам (4.11 – 4.14):

$$t_1 = \frac{|447.201|}{60,442} = 7,40;$$

$$t_2 = \frac{|27.5|}{29,76} = 0,92;$$

$$t_3 = \frac{|3.8|}{29,760} = 0,13;$$

$$t_4 = \frac{|11.1|}{29,760} = 0,37;$$

$$t_5 = \frac{|52.1696|}{78,435} = 0,67;$$

$$t_6 = \frac{|-61.3304|}{78,435} = 0,78;$$

$$t_7 = \frac{|10.1696|}{78,435} = 0,13;$$

$$t_8 = \frac{|-4.75|}{31,566} = 0,15;$$

$$t_9 = \frac{|9.5|}{31,566} = 0,3;$$

$$t_{10} = \frac{|3|}{31,566} = 0,1,$$

При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Следовательно, к таковым относятся коэффициенты $b_2, b_3, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии. С учетом вышеизложенного, зависимость плотности от исследуемых факторов имеет следующий вид:

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot X_1 + 3,8 X_2 - 11,1 \cdot X_3 + 52,1696 \cdot X_1^2 - 61,33 \cdot X_2^2 + 10,17 \cdot X_3^2 - 4,75 \cdot X_1 \cdot X_2 + 9,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 3 \cdot X_2 \cdot X_3$$

где,

$$X_1 = \frac{\text{Коэффициент загрузки} - 0,5}{0,1};$$

$$X_2 = \frac{\text{Время смешивания} - 50}{20};$$

$$X_3 = \frac{\text{Давление в пневматическом смесителе} - 150}{100}$$

5.2.3 Проверка адекватности уравнений регрессии

Далее определяем адекватность полученного уравнения регрессии. Рассчитываем дисперсию адекватности (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Расчет дисперсии адекватности

Точка плана	y	$\hat{y}$	y - $\hat{y}$	(y - $\hat{y}$) ²
1	507	498,36	8,640	
2	470	451,16		18,840
3	489	494,26		-5,260
4	456	459,06	-3,0596	9,36115216
5	417	433,86	-16,8596	284,2461122
6	410	424,66	-14,6596	214,9038722
7	372	410,76	-38,7596	1502,306592
8	385	413,56	-28,5596	815,6507522
9	507	526,87	-19,8704	394,8327962
10	570	471,87	98,1296	9629,418396
11	393	389,67	3,3296	11,08623616
12	457	382,07	74,9296	5614,444956
13	520	468,47	51,5296	2655,299676
14	473	446,27	26,7296	714,4715162
15	387	447,2	-60,2008	3624,136321
16	379	447,2	-68,2008	4651,349121
17	413	447,2	-34,2008	1169,694721
Сумма:				31304,78302

Определяем дисперсию адекватности S_{ag}^2 по формуле (4.15):

$$S_{ag}^2 = \frac{31304,78302}{17 - 10} = 4472$$

Находим расчетное значение критерия Фишера F_p по формуле (4.16):

$$F_p = \frac{15942,333}{4472} = 3,565.$$

Табличное значение критерия Фишера при доверительной вероятности 95 %:

$f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$ и $f_{ag} = 17 - 10 = 7$ и $F_T = 9,34$. $F_p < F_T$, поэтому уравнение регрессии считается адекватным.

5.2.4 Анализ уравнений регрессии

В линейных моделях знак «+» при коэффициенте свидетельствует о том, что с увеличением этого фактора величина выходного параметра увеличивается, а знак «-» о том, что убывает. Чем больше значение коэффициента, тем сильнее влияние фактора. Если необходимо получить максимальное значение выходного параметра, значения всех факторов, коэффициенты которых имеют знак «+», следует принимать максимальными, а значения коэффициентов со знаком «-» - минимальными.

Оптимизационные задачи заключаются в нахождении такого сочетания факторов, которое обеспечивает максимальное (минимальное) значение выходного параметра. В этом случае экстремум находят из дифференцирования уравнения последовательно по X_1 , X_2 , X_3 и т.д. Полученная система линейных уравнений приравнивается к нулю. Путем ее решения находят значение x_i , обеспечивающее экстремальное значение $\hat{y}$.

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot X_1 + 3,8 \cdot X_2 + 11,1 \cdot X_3 + 52,1696 \cdot X_1^2 - 61,33 \cdot X_2^2 + 10,17 \cdot X_3^2 + 4,75 \cdot X_1 \cdot X_2 + 9,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 3 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_1} = 27.5 + 104.3392x_1 - 4.75x_2 + 9.5x_3;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_2} = 3.8 - 4.75 - 122.66x_2 + 3x_3;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_3} = 11.1 + 9.5x_1 + 3x_2 + 20.34x_3.$$

Решение системы уравнений:

$$\begin{aligned} 104.339x_1 - 4.75x_2 + 9.5x_3 &= -27.5; \\ -4.75x_1 - 122.66x_2 + 3x_3 &= -3.8; \\ 9.5x_1 + 3x_2 + 20.34x_3 &= -11.1 \end{aligned}$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} 104.339 & -4.75 & 9.5 & -27.5 \\ -4.75 & -122.66 & 3 & -3.8 \\ 9.5 & 3 & 20.34 & -11.1 \end{array} \right) (2) - (1) \cdot (-0.046);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} 104.339 & -4.75 & 9.5 & -27.5 \\ 0 & -122.876 & 3.432 & -5.052 \\ 9.5 & 3 & 20.34 & -11.1 \end{array} \right) (3) - (1) \cdot (0.091);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} 104.339 & -4.75 & 9.5 & -27.5 \\ 0 & -122.876 & 3.432 & -5.052 \\ 0 & 3.432 & 19.475 & -8.596 \end{array} \right) (3) - (2) \cdot (-0.028);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} 104.339 & -4.75 & 9.5 & -27.5 \\ 0 & -122.876 & 3.432 & -5.052 \\ 0 & 0 & 19.571 & -8.737 \end{array} \right) (3) - (2) \cdot (-0.028);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} 104.339 & -4.75 & 9.5 & -27.5 \\ 0 & -122.876 & 3.432 & -5.052 \\ 0 & 0 & 19.571 & -8.737 \end{array} \right);$$

$$19.571 \cdot x_3 = -8.737;$$

$$x_3 = -0.446;$$

$$-122.876 \cdot x_2 = -5.052 - 3.432x_3 = -5.052 - 3.432 \cdot (-0.446) = -3.520;$$

$$x_2 = 0.029;$$

$$\begin{aligned} 104.339 \cdot x_1 &= -27.5 + 4.75 \cdot x_2 - 9.5 \cdot x_3 = -27.5 + 4.75 \cdot 0.029 - 9.5 \cdot (-0.446) \\ &= -23.123; \end{aligned}$$

$$x_1 = -0.222;$$

$$x_1 = -0.222;$$

$$x_2 = 0.029;$$

$$x_3 = -0.446.$$

$$X_1 = \frac{\text{Коэффициент загрузки} - 0,5}{0,1};$$

$$X_2 = \frac{\text{Время смешивания} - 50}{20};$$

$$X_3 = \frac{\text{Давление в пневматическом смесителе} - 150}{100}$$

$$\text{Коэффициент загрузки} = -0.222 \cdot 0,1 + 0,5 = 0,4778, [0,4 \dots 0,6];$$

$$\text{Время смешивания} = 0,029 \cdot 20 + 50 = 50,58, [30 \dots 70];$$

$$\begin{aligned} \text{Давление в пневматическом смесителе} &= -0,002 \cdot 100 + 150 \\ &= 149,8, [50 \dots 250]. \end{aligned}$$

Подставим полученные значения в уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= 447,2 + 27,5 \cdot (-0,222) + 3,8 \cdot 0,029 + 11,1 \cdot (-0,446) + 52,1696 \cdot (-0,222)^2 - \\ &61,33 \cdot 0,029^2 + 10,17 \cdot (-0,446)^2 - 4,75 \cdot (-0,222) \cdot 0,029 + 9,5 \cdot (-0,222) \cdot (-0,446) + \\ &+ 3 \cdot 0,029 \cdot (-0,446) = 436,949 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Оптимальное расчетное значение плотности теплоизоляционного раствора составляет 436,949 кг/м³.

5.2.5 Построение зависимостей выходных параметров от исследуемых факторов

Применяя выведенное уравнение регрессии проводим анализ по действию установленных факторов на полученную плотность разработанного раствора теплоизоляционного назначения.

Зависимость показателя плотности от раствора теплоизоляционного назначения от применяемого коэффициента загрузки смесителя.

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot X_1 + 52,1696 \cdot X_1^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot (-1) + 52,1696 \cdot (-1)^2 = 471,8704,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot (-0,5) + 52,1696 \cdot (-0,5)^2 = 446,4932,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot 0 + 52,1696 \cdot 0^2 = 447,2008,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot 0,5 + 52,1696 \cdot 0,5^2 = 473,9932,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 447,2 + 27,5 \cdot 1 + 52,1696 \cdot 1^2 = 526,8704,$$

Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от времени смешивания:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot X_2 - 61,33 \cdot X_2^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot (-1) - 61,33 \cdot (-1)^2 = 382,0704,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot (-0,5) - 61,33 \cdot (-0,5)^2 = 429,9682,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot 0 - 61,33 \cdot 0^2 = 447,2008,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot (-0,5) - 61,33 \cdot (-0,5)^2 = 433,7682,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot 1 - 61,33 \cdot 1^2 = 389,6704,$$

Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от давления в пневматическом смесителе:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot X_2 - 61,33 \cdot X_3^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot (-1) - 61,33 \cdot (-1)^2 = 446,2704,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot (-0,5) - 61,33 \cdot (-0,5)^2 = 444,1932,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot 1 - 61,33 \cdot 1^2 = 447,2008,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot 0,5 - 61,33 \cdot 0,5^2 = 455,2932,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 447,2 + 3,8 \cdot 1 - 61,33 \cdot 1^2 = 468,4704,$$

Строим графики зависимости плотности от исследуемых факторов (рисунок 5.7-5.12):

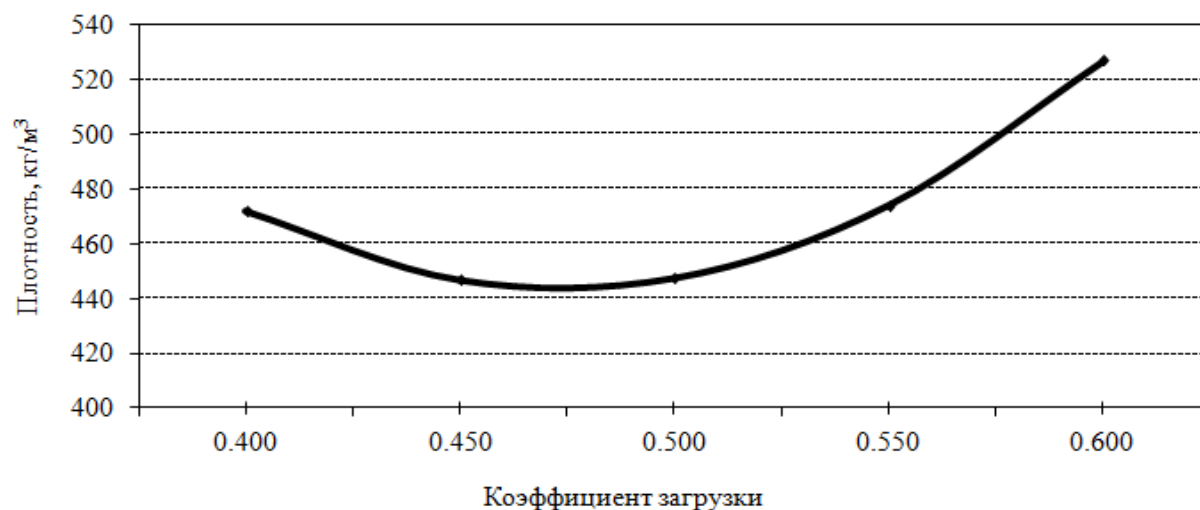


Рисунок 5.7 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от коэффициента загрузки

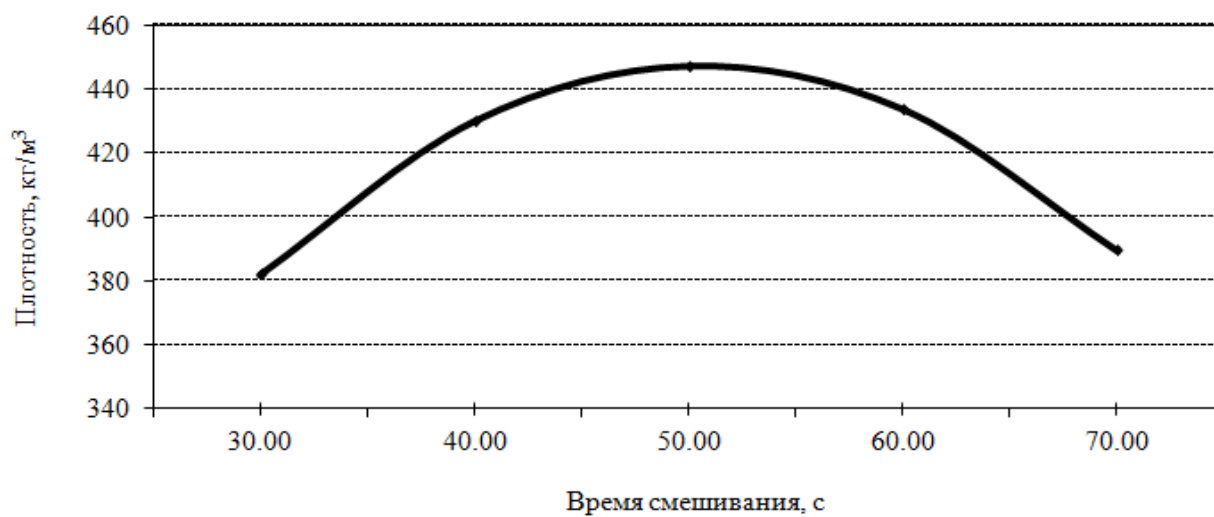


Рисунок 5.8 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от времени смешивания



Рисунок 5.9 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от давления в пневматическом смесителе

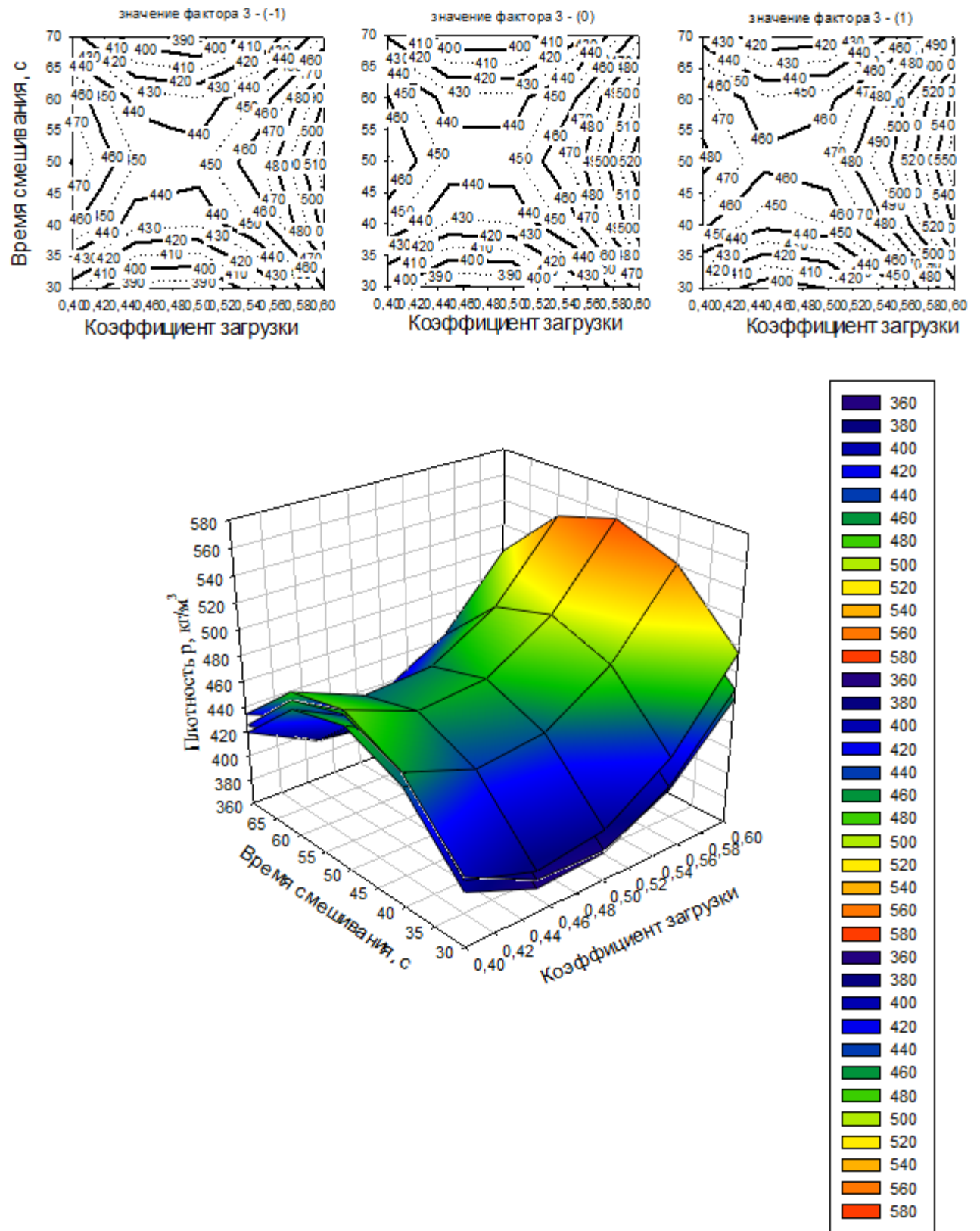


Рисунок 5.10 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от коэффициента загрузки и времени смешивания

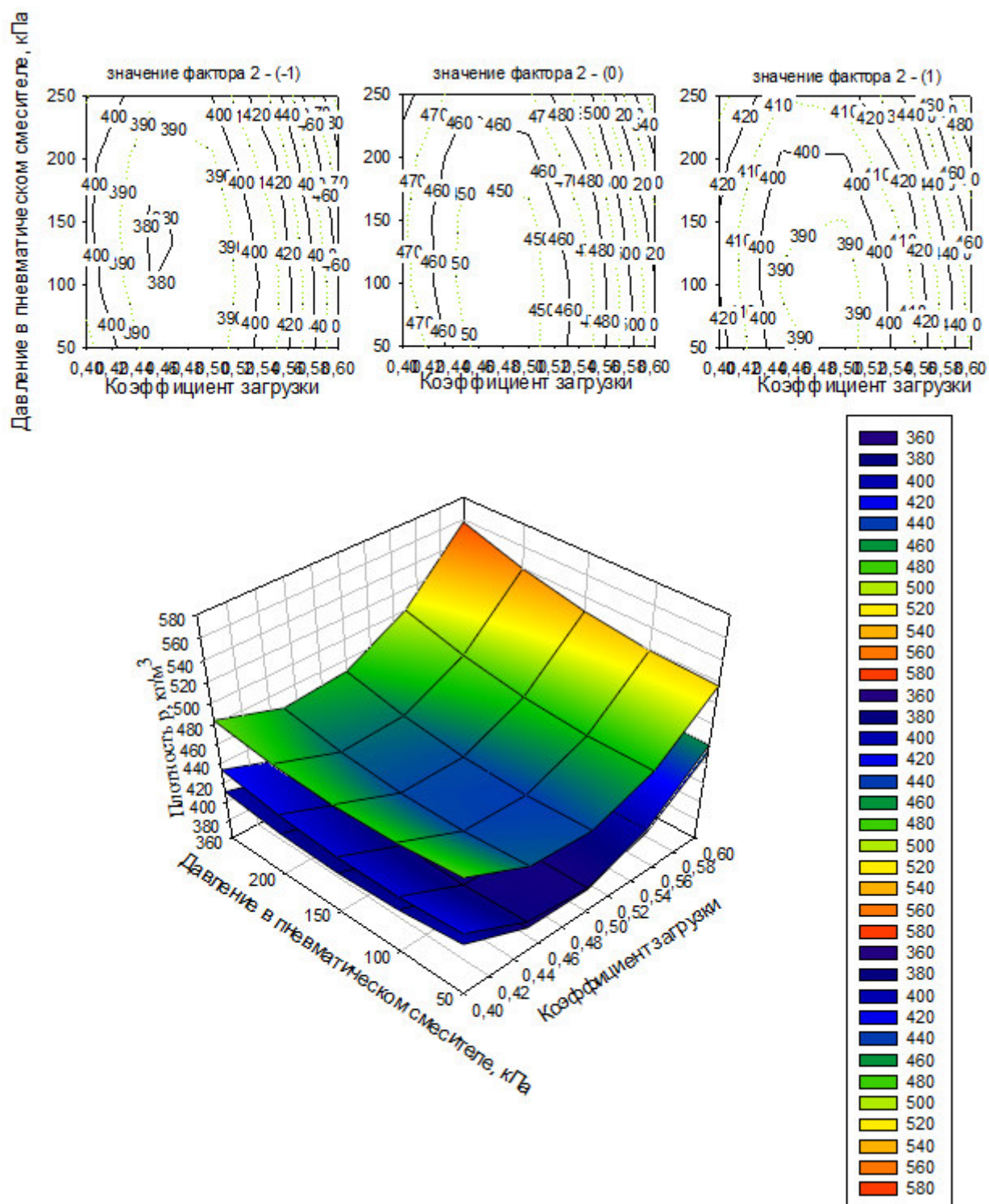


Рисунок 5.11 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от коэффициента загрузки и давления в пневматическом смесителе

Давление в пневматическом смесителе, кПа

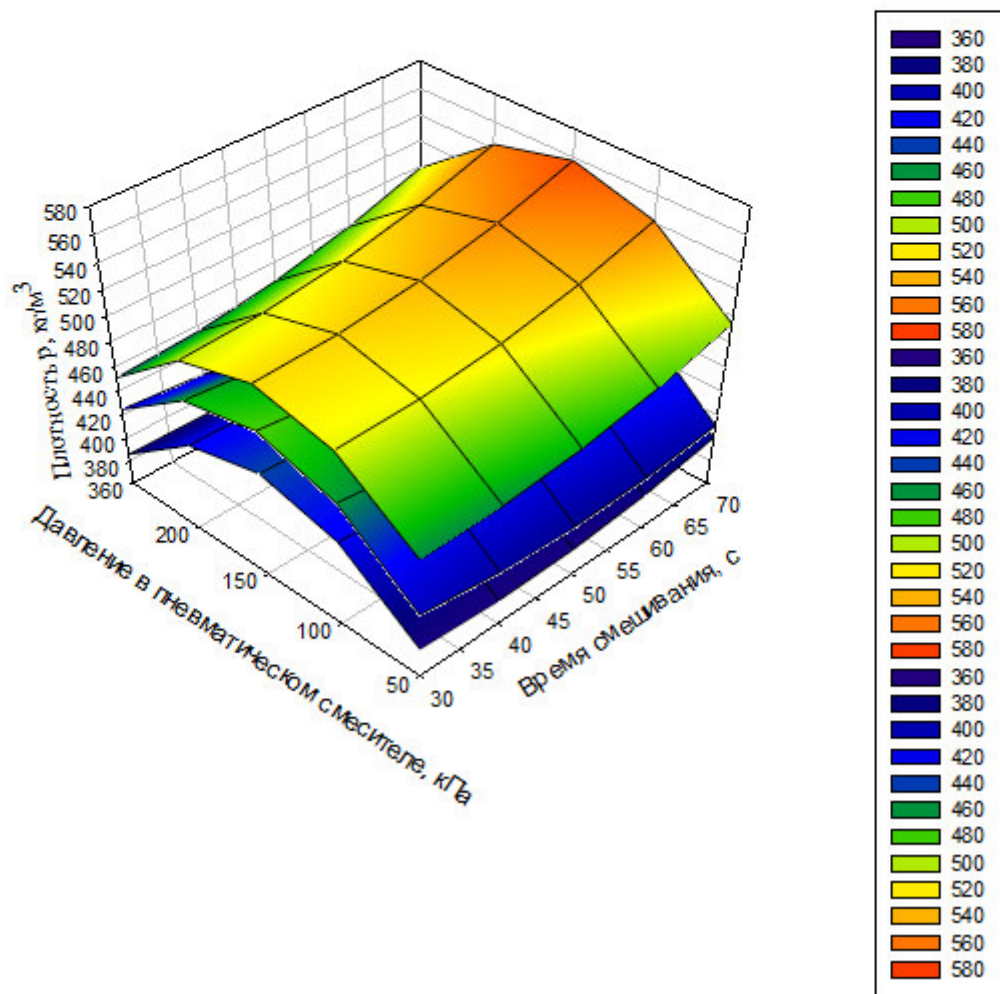
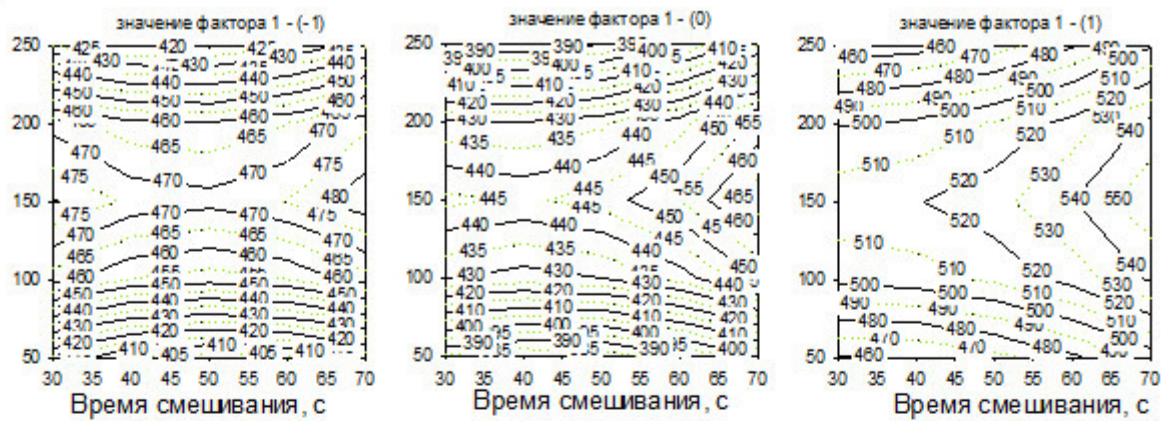


Рисунок 5.12 – Зависимость плотности теплоизоляционного раствора от времени смешивания и давления в пневматическом смесителе

5.3 Модель зависимости прочности теплоизоляционного раствора от исследуемых факторов

5.3.1 Условия планирования эксперимента

Для изучения влияния на прочность теплоизоляционного раствора следующих параметров работы смесительного оборудования: изменение коэффициента загрузки, времени смешивания, давления в пневматическом смесителе. были приняты условия планирования эксперимента (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
Коэффициент загрузки	X1	0.4	0.5	0.6	0.1
Время смешивания, с	X2	30	50	70	20
Давление в пневматическом смесителе, кПа	X3	50	150	250	100

Параметры для расчета коэффициентов приведены в таблице 5.7.

5.3.2 Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости

Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии и их значимость.

$T_1 \dots T_6$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_1 = 0,1832$; $T_2 = 0,0704$; $T_3 = 0,1$; $T_4 = 0,5$; $T_5 = -0,1268$; $T_6 = 0,125$.

Свободный член b_1 вычисляем по формуле (4.1):

$$b_1 = 0,1832 \cdot 35,55 - 0,0704 \cdot (15,6 + 15,2 + 18,18) = 3,06457$$

Коэффициенты для линейных членов определяем по формуле (4.2):

$$b_2 = 0,1 \cdot (-3,3) = -0,33; b_3 = 0,1 \cdot 2,06 = 0,206; b_4 = 0,1 \cdot 0,48 = 0,048.$$

Таблица 5.7 – Параметры для расчета коэффициентов

Точка плана	Факторы			Экспе- римен- тальные значения y_u	Расчетные параметры для определения коэффициентов								
	X_1	X_2	X_3		при линейных членах			при квадратичных членах			при взаимодействиях		
					yx_1	yx_2	yx_3	yx_1^2	yx_2^2	yx_3^2	yx_1x_2	yx_1x_3	yx_2x_3
1	1	1	1	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
2	1	1	1	0.69	0.69	0.69	-0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	-0.69	-0.69
3	1	1	-1	1.11	1.11	-1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	-1.11	1.11	-1.11
4	1	1	-1	0.86	0.86	-0.86	-0.86	0.86	0.86	0.86	-0.86	-0.86	0.86
5	1	-1	1	1.07	-1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	-1.07	-1.07	1.07
6	1	-1	1	1.67	-1.67	1.67	-1.67	1.67	1.67	1.67	-1.67	1.67	-1.67
7	1	-1	-1	1.81	-1.81	-1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	-1.81	-1.81
8	1	-1	-1	2.1	-2.1	-2.1	-2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
9	-1	1	1	2.2	2.2	0	0	2.2	0	0	0	0	0
10	-1	1	1	2.8	-2.8	0	0	2.8	0	0	0	0	0
11	-1	1	-1	1.85	0	1.85	0	0	1.85	0	0	0	0
12	-1	1	-1	2.75	0	-2.75	0	0	2.75	0	0	0	0
13	-1	-1	1	4.05	0	0	4.05	0	0	4.05	0	0	0
14	-1	-1	1	3.53	0	0	-3.53	0	0	3.53	0	0	0
15	-1	-1	-1	2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	-1	-1	-1	2.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	2.87	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма:					-3,3	-2,06	0,48	15.6	15.2	18.18	1.18	0	0.04

Коэффициенты для квадратичных членов рассчитываем по формуле (4.3):

$$b_5 = 0,5 \cdot 15,6 - 0,1268 \cdot (15,6 + 15,2 + 18,18) - 0,0704 \cdot 35,55 = -0,9134;$$

$$b_6 = 0,5 \cdot 15,2 - 0,1268 \cdot (15,6 + 15,2 + 18,18) - 0,0704 \cdot 35,55 = -1,1134;$$

$$b_7 = 0,5 \cdot 18,18 - 0,1268 \cdot (15,6 + 15,2 + 18,18) - 0,0704 \cdot 35,55 = 0,3766,$$

Коэффициенты при взаимодействиях определяем по формуле (4.4):

$$b_8 = 0,125 \cdot 1,18 = 0,1475;$$

$$b_9 = 0,125 \cdot 0 = 0;$$

$$b_{10} = 0,125 \cdot 0,04 = 0,005.$$

Проверяем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Для этого дополнительно выполняем 3 опыта, фиксируя факторы на основном уровне (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Результаты опытов и расчетов в нулевых точках

Точка плана	Фактор			y	$\bar{y}$	y - $\bar{y}$	(y - $\bar{y}$) ²
	X1	X2	X3				
1	0	0	0	3,45	2,62333	0,826667	0,683378
2	0	0	0	1,7		-0,92333	0,852544
3	0	0	0	2,72		0,096667	0,009344
Сумма:							1,545267

Дисперсию воспроизводимости определяют по формуле (4.5):

$$S_{(y_0)}^2 = \frac{1,545267}{3 - 1} = 0,7726.$$

Среднеквадратичное отклонение рассчитываем по формуле (4.6):

$$S_{(y_0)} = \sqrt{0,7726} = 0,8790.$$

Среднеквадратичную ошибку рассчитываем по формулам (4.7 – 4.10):

где $T_7 \dots T_{10}$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте; $T_7 = 0,4279$; $T_8 = 0,3162$; $T_9 = 0,6109$; $T_{10} = 0,3536$.

$$S_{(b_0)} = 0,4787 \cdot 0,8790 = 0,421;$$

$$S_{(b_i)} = 0,2357 \cdot 0,8790 = 0,207;$$

$$S_{(b_{ii})} = 0,6212 \cdot 0,8790 = 0,546;$$

$$S_{(b_{ij})} = 0,25 \cdot 0,8790 = 0,220.$$

Находим табличное t_T значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0,05$ и $f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$; $t_T = 3,18$.

Расчетные значения t_p критерия Стьюдента определяем по формулам (4.11 – 4.14):

$$t_1 = \frac{|3,06457|}{0,4208} = 7,28;$$

$$t_2 = \frac{|-0,33|}{0,2071} = 1,59;$$

$$t_3 = \frac{|-0,206|}{0,2071} = 0,99;$$

$$t_4 = \frac{|0,048|}{0,2071} = 0,23;$$

$$t_5 = \frac{|-0,9134|}{0,5460} = 1,67;$$

$$t_6 = \frac{|-1,1134|}{0,5460} = 2,04;$$

$$t_7 = \frac{|0,3766|}{0,5460} = 0,69;$$

$$t_8 = \frac{|0,1475|}{0,2197} = 0,67;$$

$$t_9 = \frac{|0|}{0,2197} = 0;$$

$$t_{10} = \frac{|0,005|}{0,2197} = 0,02,$$

При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Следовательно, к таковым относятся коэффициенты $b_2, b_3, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии. С учетом вышеизложенного, зависимость прочности от исследуемых факторов имеет следующий вид:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot X_1 - 0,206X_2 + 0,048 \cdot X_3 - 0,9134 \cdot X_1^2 - 1,1134 \cdot X_2^2 + 0,377 \cdot X_3^2 + 0,1475 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_2 \cdot X_3$$

где,

$$X_1 = \frac{\text{Коэффициент загрузки} - 0,5}{0,1};$$

$$X_2 = \frac{\text{Время смешивания} - 50}{20};$$

$$X_3 = \frac{\text{Давление в пневматическом смесителе} - 150}{100}$$

5.3.3 Проверка адекватности уравнений регрессии

Далее определяем адекватность полученного уравнения регрессии. Рассчитываем дисперсию адекватности (таблица 5.9).

Таблица 5.9 – Расчет дисперсии адекватности

Точка плана	y	$\hat{y}$	$y - \hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$
1	1,29	1,078916	0,211084	0,044556
2	0,69	0,972916	-0,28292	0,080041
3	1,11	1,185916	-0,07592	0,005763
4	0,86	1,099916	-0,23992	0,05756
5	1,07	1,443916	-0,37392	0,139813
6	1,67	1,337916	0,332084	0,11028
7	1,81	2,140916	-0,33092	0,109505
8	2,1	2,054916	0,045084	0,002033
9	2,2	1,821184	0,378816	0,143502
10	2,8	2,481184	0,318816	0,101644
11	1,85	1,745184	0,104816	0,010986
12	2,75	2,157184	0,592816	0,351431
13	4,05	3,489184	0,560816	0,314515
14	3,53	3,393184	0,136816	0,018719
15	2,6	3,064568	-0,46457	0,215823
16	2,3	3,064568	-0,76457	0,584564
17	2,87	3,064568	-0,19457	0,037857
Сумма:				2,328592

Определяем дисперсию адекватности S_{ag}^2 по формуле (4.15):

$$S_{ag}^2 = \frac{2,32859}{17 - 10} = 0,33266$$

Находим расчетное значение критерия Фишера F_P по формуле (4.16):

$$F_P = \frac{0,7726}{0,33266} = 2,32262.$$

Табличное значение критерия Фишера при доверительной вероятности 95 %:

$f_{(y_0)} = 4 - 1 = 3$ и $f_{ag} = 17 - 10 = 7$ и $F_T = 9,34$. $F_p < F_T$, поэтому уравнение регрессии считается адекватным.

5.3.4 Анализ уравнений регрессии

В линейных моделях знак «+» при коэффициенте свидетельствует о том, что с увеличением этого фактора величина выходного параметра увеличивается, а знак «-» о том, что убывает. Чем больше значение коэффициента, тем сильнее влияние фактора. Если необходимо получить максимальное значение выходного параметра, значения всех факторов, коэффициенты которых имеют знак «+», следует принимать максимальными, а значения коэффициентов со знаком «-» - минимальными.

Оптимизационные задачи заключаются в нахождении такого сочетания факторов, которое обеспечивает максимальное (минимальное) значение выходного параметра. В этом случае экстремум находят из дифференцирования уравнения последовательно по X_1 , X_2 , X_3 и т.д. Полученная система линейных уравнений приравнивается к нулю. Путем ее решения находят значение x_i , обеспечивающее экстремальное значение $\hat{y}$.

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot X_1 - 0,206X_2 + 0,048 \cdot X_3 - 0,9134 \cdot X_1^2 - 1,1134 \cdot X_2^2 + 0,377 \cdot X_3^2 + 0,1475 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_1} = -0,33 + 1,8268x_1 + 0,1475x_2;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_2} = -0,206 + 0,1475x_1 - 2,2268x_2 + 0,005x_3;$$

$$\frac{d\hat{y}}{dx_3} = 0,048 + 0,005x_2 + 0,754x_3.$$

Решение системы уравнений:

$$\begin{aligned} 1,8268x_1 \quad 0,1475x_2 &= 0,33; \\ 0,1475x_1 - 2,2268x_2 \quad 0,005x_3 &= 0,206; \\ 0,005x_2 \quad 0,754x_3 &= -0,048 \end{aligned}$$

$$150$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} -1,827 & 0,148 & 0 & 0,33 \\ 0,148 & -2,227 & 0,005 & 0,206 \\ 0 & 0,005 & 0,753 & -0,048 \end{array} \right) (2) - (1) \cdot (-0,086);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} -1,827 & 0,148 & 0 & 0,33 \\ 0 & -2,215 & 0,005 & 0,233 \\ 0 & 0,005 & 0,753 & -0,048 \end{array} \right) (3) - (2) \cdot (-0,002);$$

$$M = \left(\begin{array}{ccc|c} -1,827 & 0,148 & 0 & 0,33 \\ 0 & -2,215 & 0,005 & 0,233 \\ 0 & 0 & 0,753 & -0,047 \end{array} \right);$$

$$0,753 \cdot x_3 = -0,047;$$

$$x_3 = -0,063;$$

$$-2,215 \cdot x_2 = 0,233 - 0,005x_3 = 0,233 - 0,005 \cdot (-0,063) = 0,233;$$

$$x_2 = -0,105;$$

$$-1,827 \cdot x_1 = 0,33 - 0,148 \cdot x_2 = 0,233 - 0,148 \cdot (-0,105) = 0,346;$$

$$x_1 = -0,189;$$

$$x_1 = -0,189;$$

$$x_2 = -0,105;$$

$$x_3 = -0,063.$$

$$X_1 = \frac{\text{Коэффициент загрузки} - 0,5}{0,1};$$

$$X_2 = \frac{\text{Время смешивания} - 50}{20};$$

$$X_3 = \frac{\text{Давление в пневматическом смесителе} - 150}{100}$$

$$\text{Коэффициент загрузки} = -0,189 \cdot 0,1 + 0,5 = 0,4811, [0,4 \dots 0,6];$$

$$\text{Время смешивания} = -0,105 \cdot 20 + 50 = 47,9, [30 \dots 70];$$

$$\begin{aligned} \text{Давление в пневматическом смесителе} &= -0,063 \cdot 100 + 150 \\ &= 143,7, [50 \dots 250]. \end{aligned}$$

Подставим полученные значения в уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= 3,065 - 0,33 \cdot (-0,189) - 0,206 \cdot (-0,105) + 0,048 \cdot (-0,063) - 0,9134 \cdot (-0,189)^2 \\ &- 1,1134 \cdot (-0,105)^2 + 0,377 \cdot (-0,063)^2 + 0,1475 \cdot (-0,189) \cdot (-0,105) + 0,005 \cdot (-0,105) \cdot \\ &(-0,063) = 3,10509 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Оптимальное расчетное значение прочности теплоизоляционного раствора составляет 3,10509 МПа.

5.3.5 Построение зависимостей выходных параметров от исследуемых факторов

Применяя выведенное уравнение регрессии проводим анализ по действию установленных факторов на полученную плотность разработанного раствора теплоизоляционного назначения.

Зависимость показателя прочности от раствора теплоизоляционного назначения от применяемого коэффициента загрузки смесителя.

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot X_1 - 0,9134 \cdot X_1^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot (-1) - 0,9134 \cdot (-1)^2 = 2,481184,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot (-0,5) - 0,9134 \cdot (-0,5)^2 = 3,001222,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot 0 - 0,9134 \cdot 0^2 = 3,064568,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot 0,5 - 0,9134 \cdot 0,5^2 = 2,671222,$$

при $X_1 = 1$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,33 \cdot 1 - 0,9134 \cdot 1^2 = 1,821184,$$

Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от времени смешивания:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,206 \cdot X_2 - 1,1134 \cdot X_2^2,$$

при $X_1 = -1$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,206 \cdot (-1) - 1,1134 \cdot (-1)^2 = 2,157184,$$

при $X_1 = -0,5$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,206 \cdot (-0,5) - 1,1134 \cdot (-0,5)^2 = 3,1397334,$$

при $X_1 = 0$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,206 \cdot 0 - 1,1134 \cdot 0^2 = 3,064568,$$

при $X_1 = 0,5$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,206 \cdot 0,5 - 1,1134 \cdot 0,5^2 = 2,683222,$$

при $X_1=1$:

$$\hat{y} = 3,065 - 0,206 \cdot 1 - 1,1134 \cdot 1^2 = 1,745184,$$

Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от давления в пневматическом смесителе:

$$\hat{y} = 3,065 + 0,048 \cdot X_3 + 0,3766 \cdot X_3^2,$$

при $X_1=-1$:

$$\hat{y} = 3,065 + 0,048 \cdot (-1) + 0,3766 \cdot (-1)^2 = 3,393184,$$

при $X_1=-0,5$:

$$\hat{y} = 3,065 + 0,048 \cdot (-0,5) + 0,3766 \cdot (-0,5)^2 = 3,134722,$$

при $X_1=0$:

$$\hat{y} = 3,065 + 0,048 \cdot 0 + 0,3766 \cdot 0^2 = 3,064568,$$

при $X_1=0,5$:

$$\hat{y} = 3,065 + 0,048 \cdot 0,5 + 0,3766 \cdot 0,5^2 = 3,182722,$$

при $X_1=1$:

$$\hat{y} = 3,065 + 0,048 \cdot 1 + 0,3766 \cdot 1^2 = 3,489184,$$

Строим графики зависимости прочности от исследуемых факторов (рисунок 5.13-5.18):

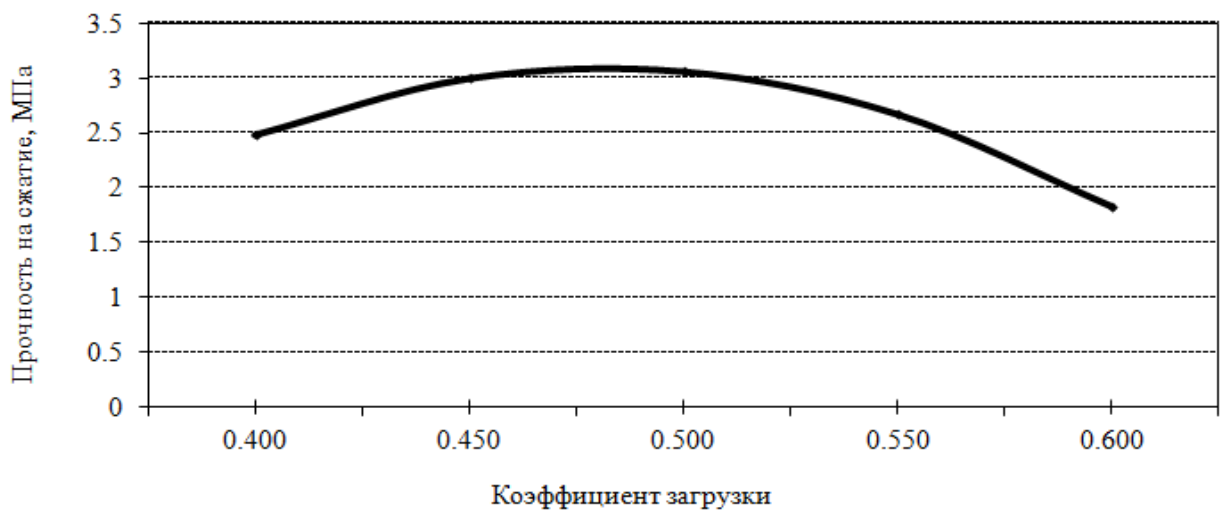


Рисунок 5.13 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от коэффициента загрузки

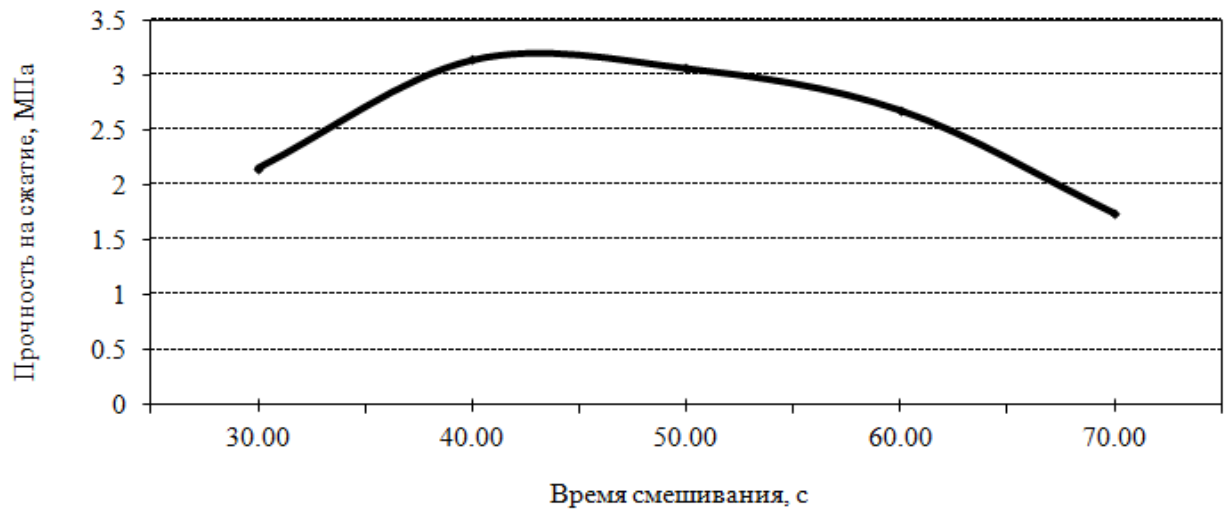


Рисунок 5.14 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от времени смешивания



Рисунок 5.15 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от давления в пневматическом смесителе

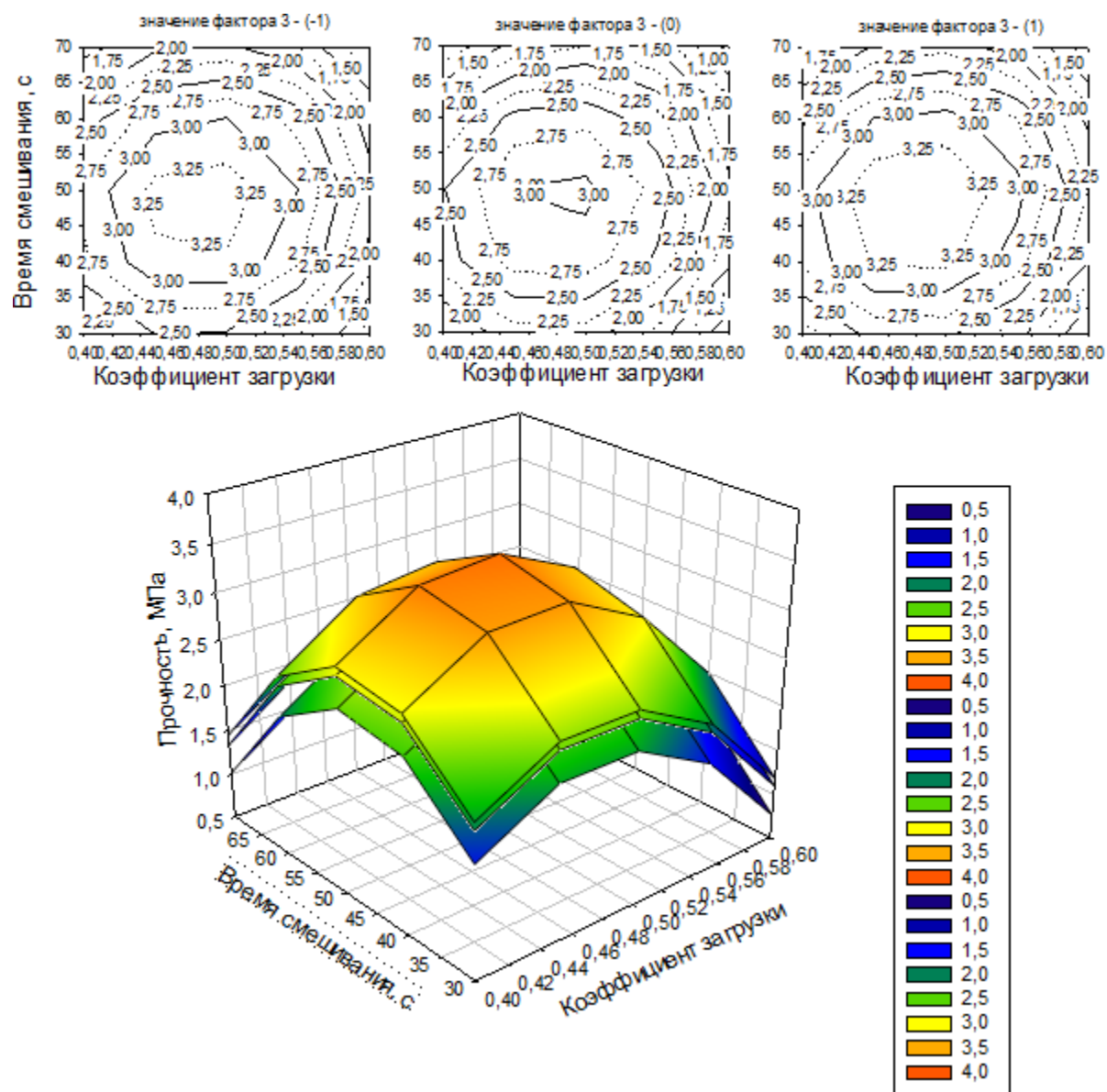


Рисунок 5.16 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от коэффициента загрузки и времени смешивания

Давление в пневматическом смесителе, кПа

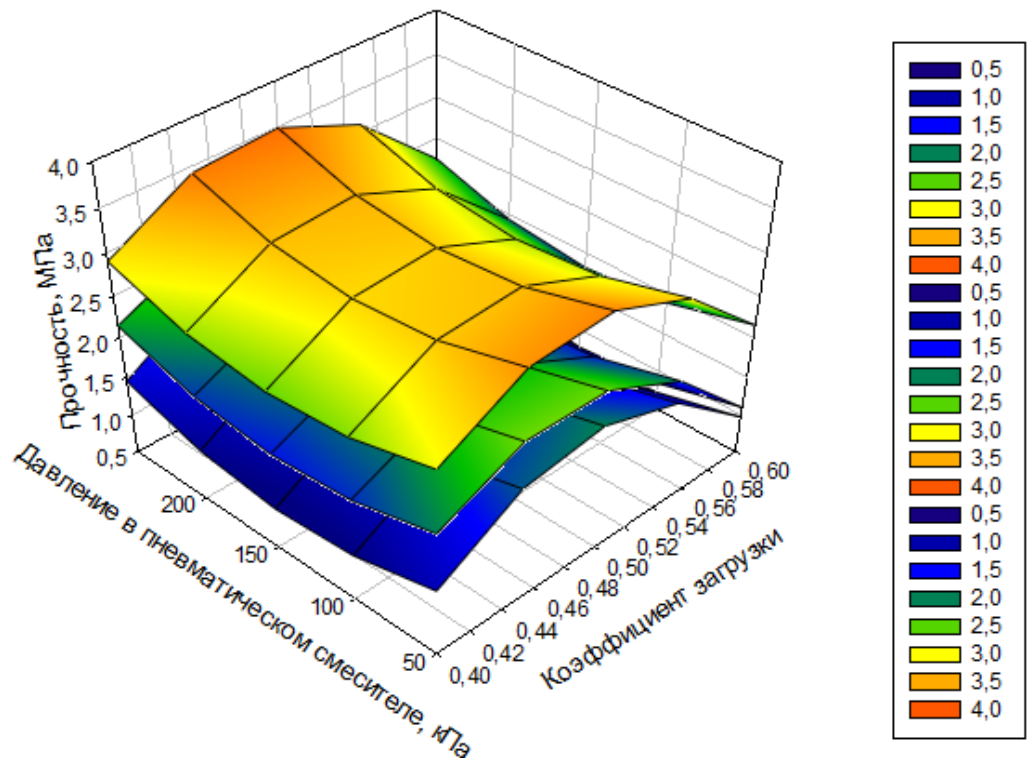
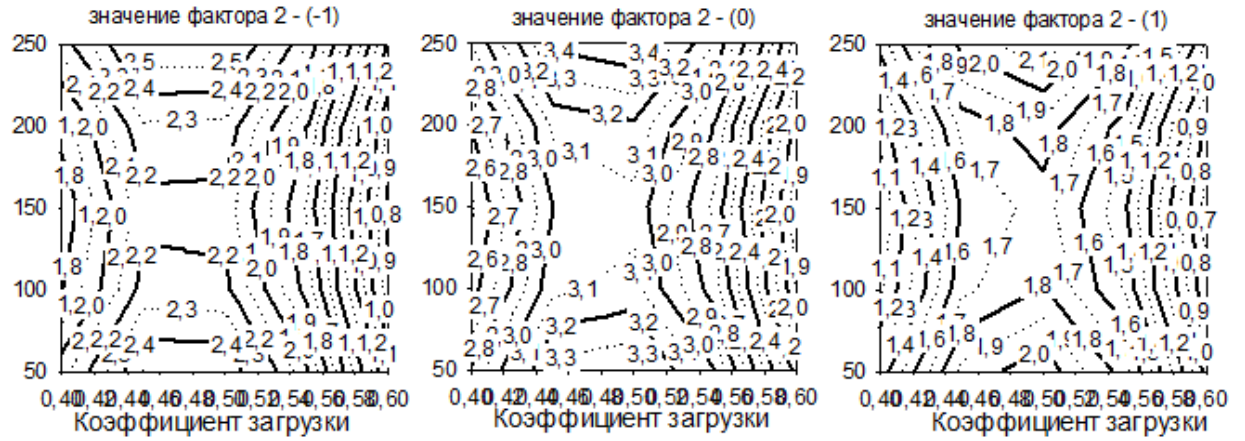


Рисунок 5.17 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от коэффициента загрузки и давления в пневматическом смесителе

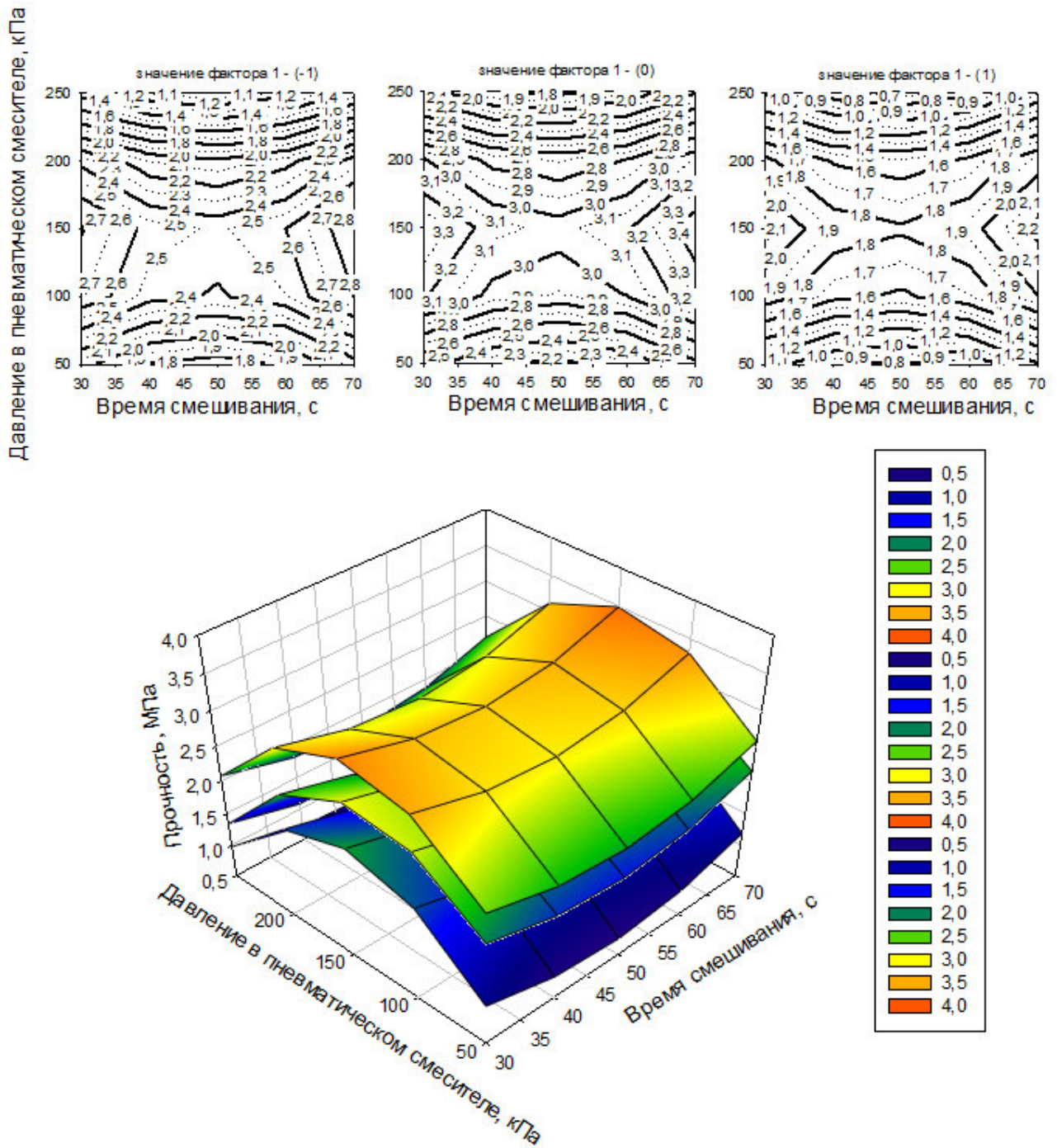


Рисунок 5.18 – Зависимость прочности теплоизоляционного раствора от времени смешивания и давления в пневматическом смесителе

С использованием метода МПЭ установлены наилучшие режимы по получению смеси теплоизоляционного назначения в ПССЭТ. В результате анализа полученных данных установлен оптимальный режим смешивания, при подаче сжатого воздуха при давлении $P = 144-150$ кПа, с использованием загрузки камеры сухими материалами в количестве 48 % и времени смешения 40-51 с. Образцы затвердевших теплоизоляционных растворов, приготовленные из полученных сме-

сей, обладают прочностью при сжатии $R_{сж} = 3,1$ МПа и средней плотностью $\rho = 436,9$ кг/м³. Смеси теплоизоляционного назначения, полученные в ПССЭТ гарантируют достаточно высокие показатели при сжатии при обеспечении сравнительно низкой плотности, что дает основания к рекомендации этого смесителя для применения приготовления легких смесей.

5.4 Технологическая схема производства теплоизоляционных растворов

Предложена технологическая схема производства сухой теплоизоляционной смеси для теплоизоляционных растворов пониженной плотности (рисунок 5.19), включающей получение композиционных вяжущих, полученных помолем портландцемента, вермикулита и суперпластификатора в вибрационной мельнице, смешение их в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой со вспученным вермикулитом М100 и с порообразующей и редиспергирующей добавкой, фасовкой и складированием сухой смеси.

Сырьевые материалы поставляются автомобильным транспортом и подаются в приемные бункера, так цемент подается посредством сжатого воздуха в бункер 1, в бункер 2 подается вспученный вермикулит, в бункер 3 хранится пластифицирующая добавка. Посредством пневмонасосов отдозированные компоненты: портландцемент, вермикулит и пластифицирующая добавка в вибрационную мельницу, где осуществляется приготовление композиционного вяжущего. В бункере 6 хранится вспученный вермикулит М100, а в бункерах 3 хранятся редиспергирующая и порообразующая добавки. Посредством пневмонасосов, отдозированные компоненты передаются в шнековый транспортер и попадают в пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой. В соответствии с технологическим регламентом осуществляется смешение компонентов. По истечению установленного времени через шнековый транспортер 10 готовая сухая строительная смесь подается в накопительный бункер, откуда с помощью дозаторов подается на фасовку и далее готовый продукт поступает на склад готовой продукции.

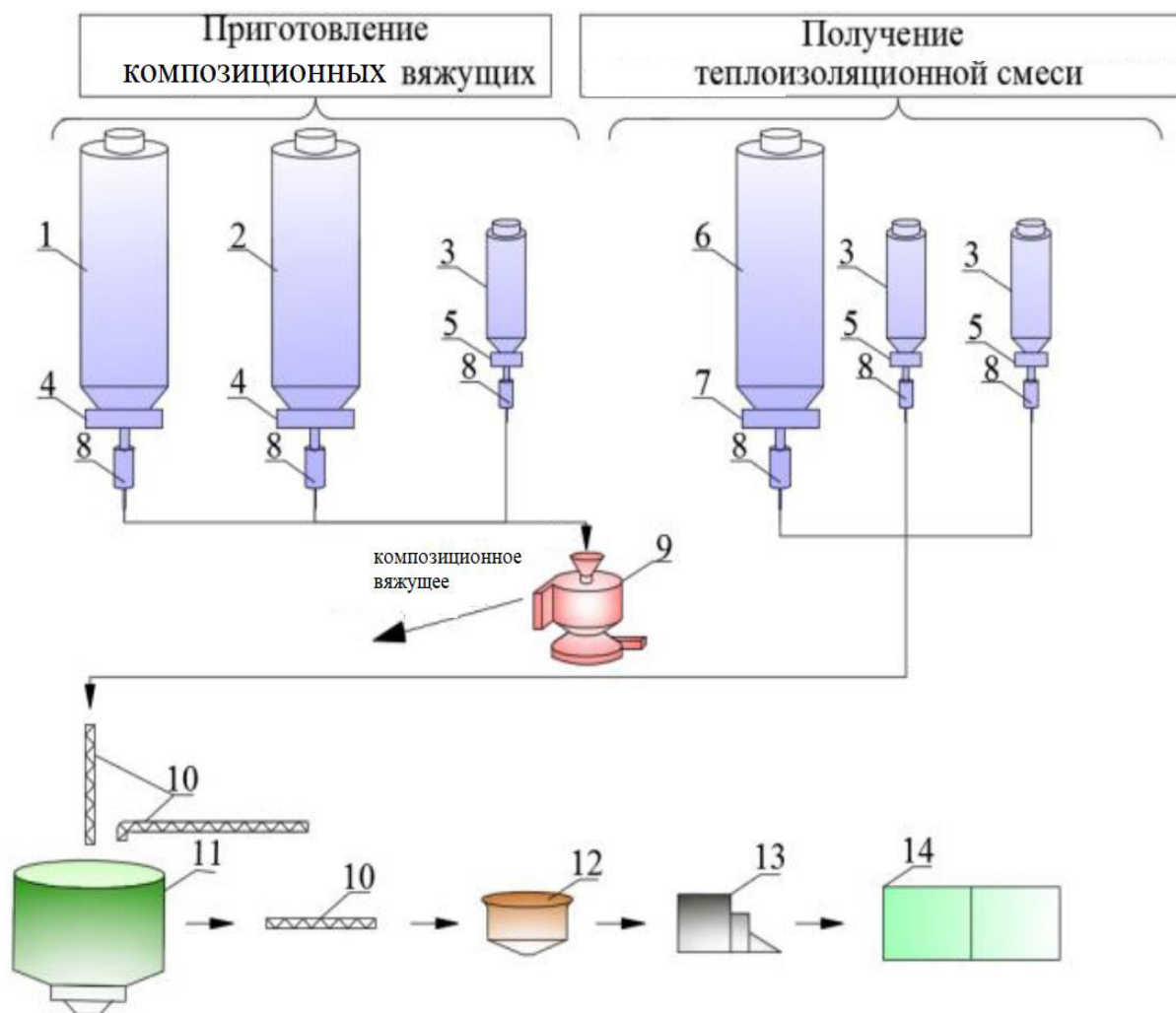


Рисунок 5.19 – Технологическая схема производства сухой теплоизоляционной смеси: 1 – бункер цемента; 2 – бункер вспученного вермикулита; 3 – бункера функциональных добавок; 4, 5, 7, 13 – дозаторы материалов; 6 – бункер вспученного вермикулита; 8 – пневмонасосы; 9 – вибрационная мельница; 10 – шнековый транспортер; 11 – пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой; 12 – бункер сухой теплоизоляционной смеси; 14 – склад готовой продукции

5.5 Сравнительный анализ свойств и характеристик теплоизоляционных штукатурных растворов с использованием вермикулита

Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия», ГОСТ 31189-2015 «Смеси сухие строительные. Классификация» [132-133]. В настоящее время на рынке теплоизоляционных растворов присутствуют следующие предложения (таблица 5.10, таблица 5.11), отмечается, что среди имеющихся современных теплоизоляционных смесей предлагаемый разработанный состав теплоизоляционный раствор с использованием вермикулита обладает

наилучшими показателями по плотности и теплопроводности, что свидетельствует о его эффективности.

Таблица 5.10 – Штукатурные смеси теплоизоляционные на рынке РФ

№ п/п	Наименование	Характеристики и свойства	
		Плотность, кг/м ³	Теплопровод- ность, Вт/(м·К)
1	Тепло- и звукоизоляционная штукатурка PALADIUM Palaplaster-207	<470	<0,07
2	Теплоизоляционная штукатурка IVSIL TERMOSIL	<480	<0,07
3	Штукатурка цементная теплоизоляционная KNAUF-GRUNBAND	<490	<0,08
4	Теплоизоляционный штукатурный раствор Thermo-Light TL 102	<500	<0,09
5	Теплоизоляционный штукатурный раствор с использованием вермикулита	430-440	0,064

Таблица 5.11 – Основные показатели качества теплоизоляционных штукатурных растворов

Наименование показателя	Нормативные значения	Результаты испытаний предлагаемого состава
Средняя плотность теплоизоляционного штукатурного раствора в сухом состоянии, кг/м ³ , не более	500	430-440
Прочность на сжатие, МПа, не менее	0,4-5	2,9-3,1
Прочность сцепления с основанием, МПа, не менее	0,2	0,34
Марка по морозостойкости контактной зоны	Устанавливается производителем	50
Морозостойкость, циклов, не менее	Устанавливается производителем	80
Капиллярное водопоглощение, кг/(м ² ·мин ^{0,5}), не более	0,4	0,3
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па), не более	0,07	0,06
Теплопроводность, Вт/(м·К), не более	0,1	0,064-0,070
Стойкость к образованию трещин	Не допускается	Трещин нет

Для требований Ирака нормативы морозостойкости не требуются, а лишь с учетом требований к теплоизоляционному штукатурному раствору для Ближнего Востока, изыскания проводились по условиям ГОСТ. Подчеркивается, что полученные растворные смеси имели низкую плотность и, как следствие, меньшую

теплопроводность, и более показатель по прочностным показателям сцепления с основанием и паропроницаемости.

Учитывая достаточно широкий диапазон показателей по плотности разработанные теплоизоляционные растворы рекомендуется использовать для теплоизоляции самых различных элементов зданий, а также для изоляции трубо- и паропроводов. Отмечается, что полученные растворы обладают повышенной стойкостью к трещинообразованию.

Проведенные исследования теплоизоляционного раствора в соответствии с требованиями ГОСТ 33083-2014, ГОСТ 5802-86, ГОСТ 24544-2020 [134], ГОСТ 25898-2020 [135], ГОСТ 30108-94 [136], а также выполненные полупромышленные испытания предложенных растворов позволили сделать вывод о том, что теплоизоляционный раствор с использованием вермикулита характеризуется значительной эффективностью, что позволяет рекомендовать его к использованию для проведения теплоизоляции зданий и сооружений.

5.6 Разработка нормативно-технической документации и апробация

В условиях предприятия ООО «Стройтехнология» были проверены и изучены свойства композиционных вяжущих для получения растворов теплоизоляционного назначения, полученных с применением вермикулита (приложение Б). Сухая смесь теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита (приложение В). Предложены ТУ на получение композиционных вяжущих, разработанных для растворов теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита (приложение Г) и ТР на получение композиционных вяжущих для растворов теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита (приложение Д), ТУ на смеси сухие теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита (приложение Е), ТР изготовления сухих смесей теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита (приложение Ж). Имеется акт о внедрении научных разработок по получению композиционных вяжущих для растворов теплоизоляционного назначения с при-

менением вспученного вермикулита от промышленной компании «Alaghar Company for General Contracting Ltd» (приложение З), акт об использовании научных результатов выполненной работы губернатора Кербелла (приложение И). Разработаны рекомендации по применению разработанных теплозащитных смесей для устройства покрытий для теплозащиты (приложение К).

5.7 Экономическая эффективность принятого технического решения

Теплоизоляция зданий и сооружений обеспечивает целый ряд преимуществ: снижает количество тепла, передаваемого через части дома; уменьшает энергопотребление для обогрева или охлаждения зданий; обеспечивает внутреннюю температуру зданий стабильной и энергонезависимой, увеличивая их долговечность; снижает расход топлива при сжигании на электростанциях; сокращает выбросы парниковых газов.

Теплоизоляция зданий и сооружений создает комфортную и здоровую среду для пребывания человека, снижает расходы на электроэнергию и обеспечивает положительное воздействие на окружающую среду. Вследствие теплоизоляции в странах Ближнего Востока летом в доме будет прохладнее, а зимой теплее, что снижает количество отопительных и охлаждающих приборов, необходимых для поддержания комфортных условий в помещениях. Кроме того, теплоизоляция одновременно улучшает звукоизоляцию, не пропуская нежелательные звуки внутрь помещения. Изолированные здания способствуют меньшему расходу электроэнергии для кондиционирования воздуха, что положительно повлияет на снижение углеродного следа, улучшит экологическую обстановку нашей планеты. Надежная теплоизоляция жилых, гражданских и промышленных зданий создаст благоприятные условия для жизнеобеспечения работы и отдыха населения.

Расчет потерь тепла через стену в зимний период

Рассчитываем снижение по уменьшению количества тепла, которое проникает сквозь стену (рисунок 5.20), для создания теплозащитного слоя, принятого из гипсоцементного теплоизоляционного раствора.

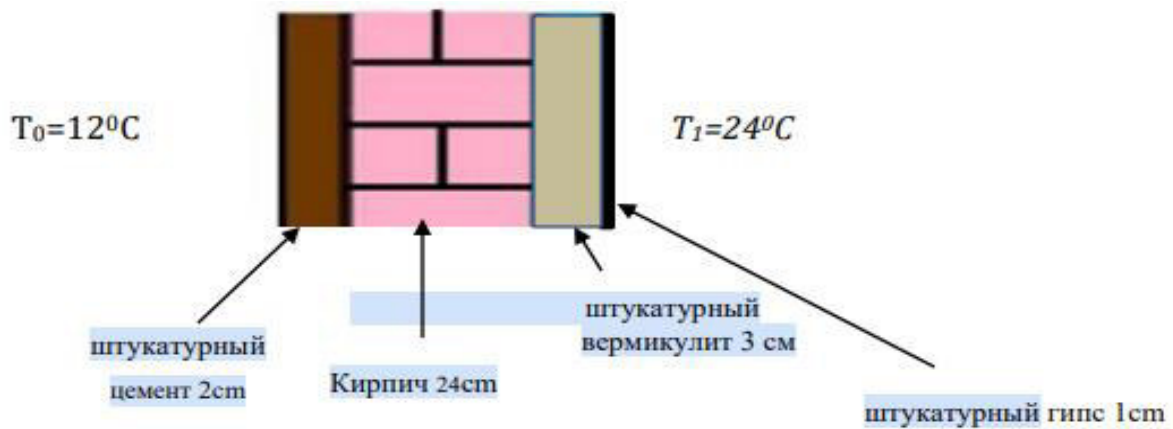


Рисунок 5.20 – Схема кирпичной стены с теплоизоляционными слоями в зимний период
Площадь стены 1 м^2 и коэффициенты конвекционной теплоотдачи являются:

- $(10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}))$ для внешней поверхности
- $(5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}))$ для внутренней поверхности

Значения теплопроводности материалов приняты из таблицы 5.12.

Таблица 5.12 – Теплопроводность утеплителей

Наименование материала	Коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
Цементная штукатурка	1
Кирпич	0,5
Гипсовая штукатурка	0,8
Полиуретан	0,02
Железобетон	2
Разработанный теплоизоляционный вермикулитовый раствор	0,064

До теплоизоляции

Термическое сопротивление цементной штукатурки, $R_1 = x_1/\lambda_1 = 0,02/1 = 0,02 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; кирпича $R_2 = x_2/\lambda_2 = 0,24/0,5 = 0,48 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; гипсовой штукатурки $R_3 = x_3/\lambda_3 = 0,01/0,8 = 0,0125 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; наружного воздуха $R_o = 1/h_o = 1/10 = 0,1 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; внутреннего воздуха $R_i = 1/h_i = 1/5 = 0,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Общее сопротивление $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_o + R_i = 0,8125 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$;

Коэффициент теплопередачи $U = 1/R = 1,23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Тепловой поток $Q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_0) = 1,23 \cdot 1 \cdot (24 - 12) = 14,8 \text{ Вт}$.

После теплоизоляции

Вермикулитовый раствор на основе разработанной теплоизоляционной смеси $R_v = x_v/\lambda_v = 0,03/0,064 = 0,469 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$;

Общее сопротивление $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_o + R_i + R_v = 1,282 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$;

Коэффициент теплопередачи $U = 1/R = 0,78 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Тепловой поток $Q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_o) = 0,78 \cdot 1 \cdot (24 - 12) = 9,36 \text{ Вт}$.

Таким образом, снижение тепловых потерь $= (14,8 - 9,36) / 14,8 = 0,367 = 37 \%$.

Расчет потерь тепла через стену в летний период.

Рассчитываем объем устройства кондиционирования воздуха (тонны холода), необходимого для охлаждения помещения размером $6 \times 4 \times 3 \text{ м}$ до и после теплоизоляции. Схема теплоизоляции ограждающих элементов: крыши и стен приведены на рисунках 5.21 и 5.22. При расчета воздействия конвекционного и радиационных теплообменов не учитываем. В соответствии с требованиями стран Ближнего Востока к общей расчетной нагрузке добавляется 3000 Вт, которая включает тепло, расходуемое на людей и оборудование, вентиляцию и потери через окна.

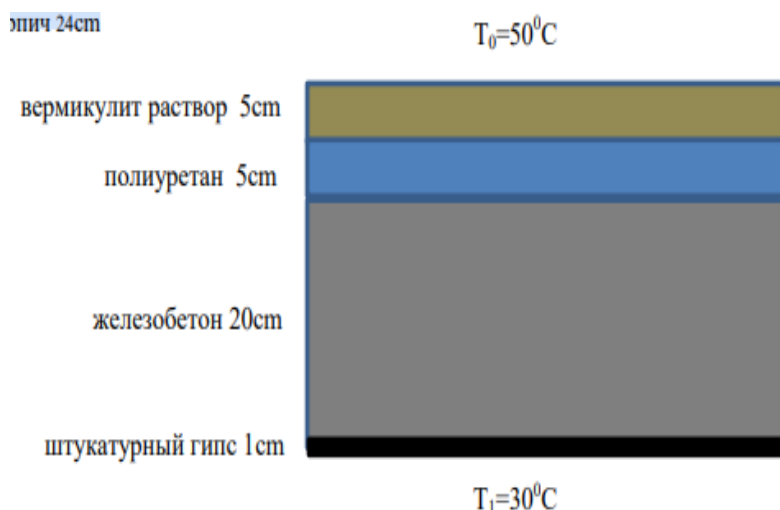


Рисунок 5.21 – Схема бетонной потолок стены с теплоизоляционными слоями

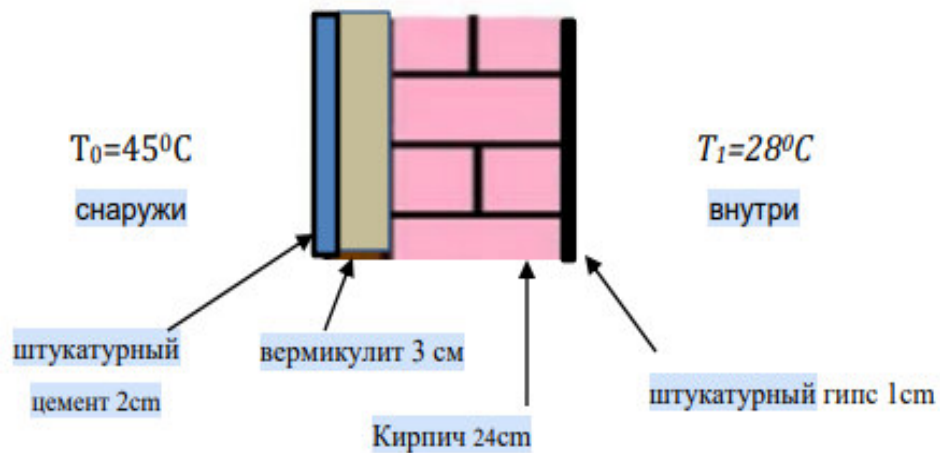


Рисунок 5.22 – Схема кирпичной теплоизоляционными слоями

Коэффициенты теплопроводности утеплителей: цементная штукатурка $\lambda=1$ Вт/(м·К), кирпич $\lambda=0,5$ Вт/(м·К), гипсовая штукатурка $\lambda=0,8$ Вт/(м·К), полиуретан $\lambda = 0,02$ Вт/(м·К), железобетон $\lambda=2$ Вт/(м·К), разработанный теплоизоляционный вермикулитовый раствор $\lambda=0,064$ Вт/(м·К).

До теплоизоляции

Стены

Термическое сопротивление цементной штукатурки $R_1 = x_1/\lambda_1 = 0,02/1 = 0,02$ (м²·К)/Вт; кирпича $R_2 = x_2/\lambda_2 = 0,24/0,5 = 0,48$ (м²·К)/Вт; гипсовой штукатурки $R_3 = x_3/\lambda_3 = 0,01/0,8 = 0,0125$ (м²·К)/Вт.

Общее сопротивление $R = R_1 + R_2 + R_3 = 0,5125$ (м²·К)/Вт;

Коэффициент теплопередачи $U = 1/R = 1,95$ Вт/(м²·К);

Площадь поверхности $A = (6 \cdot 3 \cdot 2) + (4 \cdot 3 \cdot 2) = 60$ м²;

Тепловой поток стен $Q_{\text{стен}} = U \cdot A \cdot (T_1 - T_0) = 1,95 \cdot 60 \cdot (45 - 28) = 1990$ Вт

Крыша

Термическое сопротивление железобетона $R_1 = x_1/\lambda_1 = 0,2/2 = 0,1$ (м²·К)/Вт; гипсовой штукатурки $R_3 = x_2/\lambda_2 = 0,01/0,8 = 0,0125$ (м²·К)/Вт.

Общее сопротивление $R = R_1 + R_2 + R_3 = 0,1125$ (м²·К)/Вт;

Коэффициент теплопередачи $U = 1/R = 8,89$ Вт/(м²·К);

Площадь поверхности $A = 6 \cdot 4 = 24$ м²;

Тепловой поток крыши $Q_{\text{крыши}} = U \cdot A \cdot (T_1 - T_0) = 8,89 \cdot 24 \cdot (50 - 30) = 4267$ Вт

Общий тепловой поток $Q_{\text{всего}} = Q_{\text{стен}} + Q_{\text{крыши}} + Q_{\text{остальных}} = 1990 + 4267 + 3000 = 9257 \text{ Вт}$.

С учетом производительности кондиционера $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ потребность охлажденного воздуха будет рассчитываться следующим образом. В летний период при традиционной теплоизоляции рассчитывается количество воздуха для создания комфортных условий в помещении по следующей формуле:

$$\text{Нагрузка} = Q_{\text{всего}} / 3500 = 9257 / 3500 = 2,6 \text{ т (тонны охлаждения воздуха)}$$

После теплоизоляции

Стены

Термическое сопротивление вермикулитового раствора $R_{\text{в}} = x_{\text{в}} / \kappa_{\text{в}} = 0,03 / 0,064 = 0,469 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$.

$$\text{Общее сопротивление } R = 0,5125 + 0,469 = 0,9815 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт};$$

$$\text{Коэффициент теплопередачи } U = 1/R = 1,02 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\text{Тепловой поток стен } Q_{\text{стен}} = U \cdot A \cdot (T_1 - T_0) = 0,332 \cdot 60 \cdot (45 - 28) = 734 \text{ Вт}$$

Крыша

Термическое сопротивление вермикулитового раствора $R_{\text{в}} = x_{\text{в}} / \kappa_{\text{в}} = 0,05 / 0,064 = 0,781 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$; полиуретана $R_{\text{п}} = x_{\text{п}} / \lambda_{\text{п}} = 0,05 / 0,02 = 2,5 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$.

$$\text{Общее сопротивление } R = 0,1125 + 0,781 + 2,5 = 3,394 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт};$$

$$\text{Коэффициент теплопередачи } U = 1/R = 0,295 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\text{Тепловой поток крыши } Q_{\text{крыши}} = U \cdot A \cdot (T_1 - T_0) = 0,295 \cdot 24 \cdot (50 - 30) = 141 \text{ Вт};$$

Общий тепловой поток $Q_{\text{всего}} = Q_{\text{стен}} + Q_{\text{крыши}} + Q_{\text{остальных}} = 734 + 141 + 3000 = 3875 \text{ Вт}$;

С учетом производительности кондиционера $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ потребность охлажденного воздуха будет рассчитываться следующим образом. В летний период при использовании предлагаемого теплоизоляционного штукатурного раствора с использованием вермикулита количество воздуха для создания комфортных условий в помещении будет составлять:

$$\text{Нагрузка} = Q_{\text{всего}} / 3500 = 3875 / 3500 = 1,1 \text{ т (тонны охлаждения воздуха)}.$$

Полученные данные сведены в таблицу 5.13.

Таблица 5.13 – Сравнительные характеристики тепловых потоков в зимний и летний периоды при использовании традиционного и предлагаемого теплоизоляционных растворов

Наименование	Времена года							
	зимний период		летний период					
	традиционный раствор	предлагаемый раствор	традиционный раствор			предлагаемый раствор		
			стены	крыша	общий	стены	крыша	общий
Тепловой поток, Вт	14,8	9,36	1990	4267	9257	734	141	3875
Снижение тепловых потерь, %	37		58					

На основании выполненных расчетов следует, что применение разработанного теплоизоляционного раствора с использованием вермикулита обеспечивает высокие теплоизоляционные характеристики для теплозащиты ограждающих конструкций зданий и сооружений и создания комфортных условий для жизнедеятельности человека. Анализ всего энергопотребления Ирака по секторам показывает, что в общем объеме жилищный сектор занимает наибольший объем потребления (рисунок 5.23), что составляет 50 %.

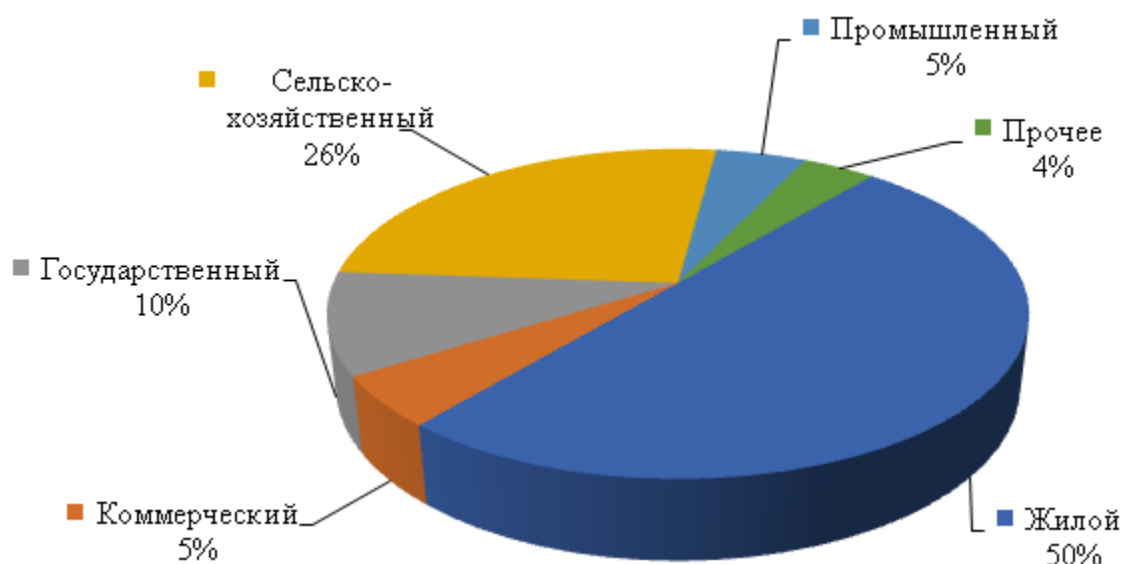


Рисунок 5.23 – Потребление электроэнергии по различным секторам в Ираке (2022 год)

В общей доле жилищного сектора Ирака значительную часть составляют затраты на кондиционирование как в зимнее, так и в летнее время, при этом

наибольшие затраты составляют значительный расход электроэнергии в летний период.

С 2003 года по настоящее время в Ираке ощущается острый энергетический кризис, к настоящему времени проблемы энергообеспечения усугубляются, что требует эффективных решений по снижению энергетических затрат.

Выполненные расчеты исходя из стоимости одного кубометра вермикулита, которого достаточно для выполнения теплоизоляции 50 м^2 составляют 100 долларов, при этом стоимость 1 м^2 теплоизоляционного раствора составит 2 доллара. Стоимость мешка цемента равна 5 долларов и его будет достаточно для изготовления теплоизоляционного раствора для площади - 5 м^2 . При этом, стоимость теплоизоляционного раствора, необходимого для теплоизоляции 1 м^2 площади составит – один доллар.

Таким образом, стоимость материалов для приготовления теплоизоляционного раствора для теплоизоляции 1 м^2 площади (1+2) составит 3 доллара.

Общая площадь наружных стен и потолков здания построенных при площади 100 м^2 составит 250 м^2 . При этом стоимость материалов, необходимых для теплоизоляции дома теплоизоляционным раствором составит 250×3 доллара = 750 долларов.

В среднем, ежемесячный расход на энергопотребление в летний период в иракских домах, в особенности в летний период может достигать 100 долларов. Использование растворов теплоизоляционного назначения для уменьшения потока тепла снижает расход на электроэнергию на 20 %, это аналогично уменьшению затрат на 20 долларов за один месяц. Таким образом, в течение трех с лишним лет ($750 \text{ долларов} / 20 \text{ долларов} = 38$ месяцев) сумма, потраченная на теплоизоляцию здания будет возмещена.

Экономические и экологические преимущества использования теплоизоляции в зданиях в странах Ближнего Востока слишком значительны.

Теплоизоляция снижает потребление энергии сооружений и зданий, уменьшает расходы на эксплуатацию и улучшает тепловой комфорт.

Производственная организация, а также введение растворов для теплоизоляции с применением вермикулита в сфере жилищного комплекса обеспечит значительную экономию электроэнергии на создание комфортных условий и жизнедеятельность людей.

5.8 Выводы по главе 5

1. С использованием метода МПЭ установлены наилучшие режимы по получению смеси теплоизоляционного назначения в ПССЭТ. В результате анализа полученных данных установлен оптимальный режим смешивания, при подаче сжатого воздуха при давлении $P = 144-150$ кПа, с использованием загрузки камеры сухими материалами в количестве 48 % и времени смешения 40-51 с. Образцы затвердевших теплоизоляционных растворов, приготовленные из полученных смесей, обладают прочностью при сжатии $R_{сж} = 3,1$ МПа и средней плотностью $\rho = 436,9$ кг/м. Смесей теплоизоляционного назначения, полученные в ПССЭТ гарантируют достаточно высокие показатели при сжатии при обеспечении сравнительно низкой плотности, что дает основания к рекомендации этого смесителя для применения приготовления легких смесей.

2. Предложена технологическая схема производства сухой теплоизоляционной смеси для теплоизоляционных растворов пониженной плотности, включающей получение композиционных вяжущих, полученных помолом портландцемента, вермикулита и суперпластификатора в вибрационной мельнице, смешение их в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой со вспученным вермикулитом М100 и с порообразующей и редиспергирующей добавкой, фасовкой и складированием сухой смеси.

3. В условиях предприятия ООО «Стройтехнология» были проверены и изучены свойства композиционных вяжущих для получения растворов теплоизоляционного назначения, полученных с применением вермикулита. Сухая смесь теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита. Предложены ТУ на получение композиционных вяжущих, разработанных для растворов

теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита и ТР на получение композиционных вяжущих для растворов теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита, ТУ на смеси сухие теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита, ТР изготовления сухих смесей теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита. Имеется акт о внедрении научных разработок по получению композиционных вяжущих для растворов теплоизоляционного назначения с применением вспученного вермикулита от промышленной компании «Alaghar Company for General Contracting Ltd», акт об использовании научных результатов выполненной работы губернатора Кербелла. Разработаны рекомендации по применению разработанных теплозащитных смесей для устройства покрытий для теплозащиты.

4. Проведенные исследования теплоизоляционного раствора в соответствии с требованиями ГОСТ 33083-2014, ГОСТ 5802-86, ГОСТ 24544-2020, ГОСТ 25898-2020, ГОСТ 30108-94, а также выполненные полупромышленные испытания предложенных растворов позволили сделать вывод о том, что теплоизоляционный раствор с использованием вермикулита характеризуется значительной эффективностью, что позволяет рекомендовать его к использованию для проведения теплоизоляции зданий и сооружений.

5. На основании выполненных расчетов следует, что применение разработанного теплоизоляционного раствора с использованием вермикулита обеспечивает эффективность теплозащиты в зимний период на 37 %, а в летний – на 58 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение сухих штукатурных смесей на основе: композиционного вяжущего, полученного совместной механоактивацией портландцемента, вспученного вермикулита и суперпластификатора; легкого заполнителя – вспученного вермикулита; комплекса функциональных добавок – порообразователя и редиспергирующего порошка. Для гомогенизации смеси с легким заполнителем обоснована эффективность применения разработанного пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Предложенное технологическое решение, в совокупности с реализацией структурно-механического и адсорбционно-сольватного факторов взаимодействия компонентов смеси, обеспечивает получение теплоизоляционных вермикулитовых растворов с рациональной поровой структурой, стабильными показателями по плотности, достаточными показателями по прочности при снижении расхода цемента на 10 %.

Установлен характер влияния механоактивации при получении композиционного вяжущего на процессы структурообразования цементной матрицы с учетом химических и структурно-морфологических особенностей вермикулитового наполнителя и пластифицирующей добавки, заключающийся в: аморфизации верхних слоев вермикулитового наполнителя, что обеспечивает вовлечение высокодисперсных частиц в процесс структурообразования цементной матрицы в качестве центров кристаллизации гидратных фаз; увеличении общей удельной поверхности вяжущего и, как следствие, ускорении физико-химических процессов гидратации; возрастании количества гидратных фаз. В совокупности это способствует получению композиционного вяжущего KB-90 с активностью, соответствующей исходному цементу.

Определены закономерности влияния количественного соотношения компонентов в составе штукатурной смеси, а также режимов работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой, позволяющие определить ра-

циональные границы варьирования и рецептурно-технологические факторы при проектировании сухих смесей для производства теплоизоляционных растворов с улучшенными физико-механическими свойствами и сниженной теплопроводностью.

Дополнены теоретические представления о: процессах структурообразования композиционных вяжущих при использовании механоактивированного вспученного вермикулитового наполнителя и суперпластификатора; влиянии комплекса добавок на поровую структуру штукатурных растворов; влиянии смесительного оборудования и технологических режимов его работы на формирование структуры и физико-механические свойства штукатурных растворов на пористых заполнителях.

Разработаны составы композиционных вяжущих на основе портландцемента, вспученного вермикулитового наполнителя и пластифицирующей добавки, получаемых при механоактивации в вибрационной мельнице, с активностью 70,1 МПа.

Разработаны составы теплоизоляционных вермикулитовых растворов на основе композиционного вяжущего, порообразователя ESAPON 1214, редиспергирующего порошка Vinnapas LL 4042 Н и вспученного вермикулита в качестве легкого заполнителя, с показателями прочности 2,9-3,1 МПа, плотности 430-440 кг/м³, теплопроводности 0,064-0,070 Вт/(м•К).

Предложена технология производства сухих штукатурных смесей на легких заполнителях для получения теплоизоляционных растворов, включающая применение разработанного пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Установлены рациональные режимы работы пневмосмесителя: давление сжатого воздуха 144-150 кПа, коэффициент загрузки материала в смеситель 48 %, время смешения 40-51 с.

На основании технико-экономических расчетов следует, что применение разработанного теплоизоляционного раствора с использованием вспученного вермикулита обеспечивает эффективность теплозащиты в зимний период на 37 %, а в летний – на 58 %.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** к применению на предприятиях по производству сухих строительных смесей, а также использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении возможности получения композиционных вяжущих для создания теплоизоляционных растворов более низких марок по плотности, расширение спектра используемых местных сырьевых материалов для получения композиционных вяжущих, а также продолжить исследования в направлении изучения особенностей протекания процессов структурообразования при использовании различных модифицирующих добавок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrari, S. Adaptive comfort: Analysis and application of the main indices / S. Ferrari, V. Zanutto // *Building and Environment*. – 2012. – V. 49. – P. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.022>
2. CEN/EN15251. Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Buildings: Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics; Comité Européen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2007.
3. Ozay, N.A. Comparative study of climatically responsive house design at various periods of Northern Cyprus architecture / N.A. Ozay // *Building and Environment*. – 2005. – V. 40. – P. 841–852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.024>
4. Nicol, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot and humid tropics / F. Nicol // *Energy and Buildings*. – 2004. – V. 36. – P. 628–637.
5. Nicol, J. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings / J. Nicol, M. Humphreys // *Energy and Buildings*. – 2002. – V. 34. – P. 563–572.
6. Kumar, S. Comparative study of thermal comfort and adaptive actions for modern and traditional multi-storey naturally ventilated hostel buildings during monsoon season in India / S. Kumar, M.K. Singh, R. Kukreja, S.K. Chaurasiya, V.K. Gupta // *Building and Environment*. – 2019. – V. 23. – P. 90–106.
7. Raja, I.A. Thermal comfort: Use of controls in naturally ventilated buildings / I.A. Raja, J.F. Nicol, K.J. McCartney, M.A. Humphreys // *Energy and Buildings*. – 2001. – V. 33. – P. 235–244.
8. Kenisarin, M. Passive thermal control in residential buildings using phase change materials / M. Kenisarin, K. Mahkamov // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 55. – P. 371–398.
9. Parsons, K. Thermal comfort in buildings. In *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings* / K. Parsons // *Woodhead Publishing Series in Energy*, UK. – 2010. – P. 127–147.

10. Schackow, A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent / A. Schackow, C. Effting, M.V. Folgueras, S. Guths, G.A. Mendes // *Construction Building Materials*. – 2014. – V. 57. – P. 190–197.
11. Sengul, O. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete / O. Sengul, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, M.A. Tasdemir // *Energy Buildings*. – 2011. – V. 43. – Iss. 2. – P. 671–676.
12. Zhang, H. *Building Materials in Civil Engineering* / H. Zhang // Woodhead Publishing, UK. – 2011. – V. 1. – P. 440.
13. Degirmenci, N. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar / N. Degirmenci, N.Y. Arin // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. – 2011. – V. 18. – P. 61–68.
14. Unal, O. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation / O. Unal, T. Uygunoglu, A. Yildiz // *Building and Environment*. – 2007. – V. 42. – P. 584–590.
15. Koksai, F. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite / F. Koksai, O. Gencel, W. Brostow, H.E. Hagg Lobland // *Materials Research Innovations*. – 2012. V. 16. – Iss. 1. – P. 7–13.
16. Lanzon, M. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability / M. Lanzon, P.A. Garcia-Ruiz // *Construction Building Materials*. – 2008. – V. 22. – Iss. 8. – P. 1798–1806.
17. Kaviany, M. *Heat Transfer Physics*, 2nd ed. / M. Kaviany // Cambridge University Press: Cambridge, UK. – 2014.
18. Guimarães, R.P. The Influence of Ceiling Height in Thermal Comfort of Buildings: A Case Study in Belo Horizonte Brazil / R.P. Guimarães, M.C.R. Carvalho, F.A. Santos // *Int. J. Hous. Sci.* – 2013. – V. 37. – P. 75–85.

19. Pulhan, H. The Traditional Urban House in Cyprus as Material Expression of Cultural Transformation / H. Pulhan, I. Numan // *Journal of Design History*. – 2006. – V. 19. – P. 105–119.
20. Lotfabadi, P. Optimization Method of Transparency Ratio for Building Envelope in Terms of Thermal and Visual Comfort. Ph.D. Thesis, Eastern Mediterranean University, Famagusta, Northern Cyprus, 2019, Unpublished work.
21. Huizenga, C. Air quality and thermal comfort in office buildings: Results of a large indoor environmental quality survey / C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus, E.A. Arens // *Proceedings of Healthy Buildings*. – 2006. – P. 393–397.
22. Wagner, A. Thermal comfort and workplace occupant satisfaction—Results of field studies in German low energy office buildings / A. Wagner, E. Gossauer, C. Moosmann, T. Gropp, R. Leonhart // *Energy Build.* – 2007. – V. 39. – P.758–769.
23. Aboulmaga, M. Improving night ventilation into low-rise buildings in hot-arid climates exploring a combined wall–roof solar chimney / M. Aboulmaga, S. Abdrabboh // *Renewable Energy*. – 2000. – V. 19. – P.47–54.
24. Ghiaus, C. Free-running building temperature and HVAC climatic suitability / C. Ghiaus // *Energy Build.* – 2003. – V. 35. – P. 405–411.
25. Mahlia, T. A review on fuel economy standard for motor vehicles with the implementation possibilities in Malaysia / T. Mahlia, R. Saidur, L. Memon, N. Zulkifli, H. Masjuki // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – V. 14. – P. 3092–3099.
26. Lotfabadi, P. The impact of city spaces and identity in the residents' behavior / P. Lotfabadi // *Humanit. Soc. Sci. Rev.* – 2013. – V. 3. – P. 589–601.
27. Hoppe, P. Indoor climate and air quality. Review of current and future topics in the field of ISB study group / P. Hoppe, I.Martinac //10 *International Journal of Biometeorology*. – 1998. – V. 1. – P. 42. 1–7.
28. Gupta, V. Thermal efficiency of building clusters: An index for nonair-conditioned buildings in hot climates / V. Gupta // *Energy and Urban Built Form*. – 1987. – P. 133–145.

29. Lotfabadi, P. Sustainability; as a combination of parametric patterns and bionic strategies / P. Lotfabadi, H.Z. Alibaba, A. Arfaei // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – V. 57. – P.1337–1346.
30. Balcomb, J. Dowglas, "Passive Solar In United States / J. Balcomb // *Passive Solar Journal.* – P. 1976–1986
31. Givoni, B. *Passive and Low-Energy Cooling of Building*: Van Nostrand Reinhold, 2004
32. Saini Balwant Singh. *Building in Hot dry Climate*. USA, John Wile & Son Ltd., 1980.
33. Вопрос потребления энергии. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ar.wikibooks.org>.
34. Alsammarae Aiham; "Electric power 2005"; minister of electricity, Iraq.
35. Markus T.A, Morris R.N. *Building Climate & Energy*. Pitman, London.1980.
36. Al-Babani Samal. Othman. Saeed. *The Role of Nature Simulation Approaches on Strategies for Sustainable Formal Building //Sustainable Architecture; Thesis Master, Department of Architectural Engineering, University of Technology, Baghdad, 2004.*
37. Hamad Arqam. Abdel-Hamid. *The ideal engineering configuration of the building envelope as a concept to reduce waste in energy; Master Thesis, Department of Architectural Engineering, University of Technology, Baghdad, 1996.*
38. Selim Younes. Mahmoud. Mohamed. *The Impact of Climate Design Decisions on Sun Control on Housing Building Regulations for the City of Baghdad; Master Thesis, Department of Architectural Engineering, University of Technology, Baghdad, 1997.*
39. Ibrahim Yahya. Adel. *The Effect of Using the Patio Ceiling System on Increasing the Efficiency of Thermal Performance of Buildings in Iraq; Master Thesis, Department of Architectural Engineering, University of Technology, Baghdad, 2006.*
40. Lechner Norbert. *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects*, 2002.

41. Al-Aqili Wael. Awwad.Reducing the cooling load by applying the smart building envelope system. master thesis, Department of Architectural Engineering, University of Technology, Baghdad, 2007.
42. Shmuradko, V.T. Composition structure and property formation of heat insulation fire and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation / V.T. Shmuradko, F.I. Panteleenko, O.P. Reut, E.F. Panteleenko, N.V. Kirshina // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2012. – V. 53. – № 4. – P. 254–258.
43. Suvorov, S.A. Vermiculite – a promising material for hightemperature heat insulation / S.A. Suvorov, V.V. Skurikhin // *Refractories and Industrial Ceramics* – 2003. – V. 44. – № 3. – P. 186–193.
44. Abdul Rahman, S. An experimental investigation on light weight cement concrete using vermiculite minerals / S. Abdul Rahman, G. Babu // *Internatinal Journal Innovative. Research Science Engineering Technology*. – 2016. – V. 5. – № 2. – P. 2389-2392.
45. Al-Homoud, M.S. Performance Characteristics and Practical Applications of Common Building Thermal Insulation Materials / M.S. Al-Homoud // *Building and Environment*. – 2005. – V. 40. – P. 353-366.
46. Papadopoulos, A.M. State of the Art in Thermal Insulation Materials and Aims for Future Developments / A.M. Papadopoulos // *Energy and Buildings*. – 2005. – V. 37. – P. 77-86.
47. Beck, O. Frank and M. Binder, .Influence of Water Content on the Thermal Conductivity of Vacuum Panels with Fumed Silica Kernels // *Proceedings of the 8th International Vacuum Insulation Symposium, 2007, ZAE Bayern / UniWue, Würzburg, 18-19 September, 2007*
48. S. Brunner and H. Simmler, "In Situ Performance Assessment and Service Life of Vacuum Insulation Panels (VIP) in Buildings", *Proceedings of the 8th International Vacuum Insulation Symposium, 2007, ZAE Bayern / UniWue, Würzburg, 18-19 September, 2007*
49. B.T. Griffith, D. Türler and D. Arashteh, «Optimizing the Effective Conductivity and Cost of Gas-Filled Panel Thermal Insulations», *Proceedings of the 22nd*

International Thermal Conductivity Conference, 1993, Arizona State University, 7-10 November, 1993.

50. Baetens, R. Aerogels for Building Applications: A Stateofthe Art Review / R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – P. 761–769.

51. Aspen Aerogels, Spaceloft 3251, 6251, 9251, «Flexible Insulation for Industrial, Commercial and Residential Applications». doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012

52. Farid, M.M. Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications / M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – V. 45. – P. 1597-1615.

53. Hasnain, S.M. Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques / S.M. Hasnain // *Energy Conversion and Management*. – 1998. – V. 39. – P. 1127-1138.

54. Demirbas, M.F. Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview/ M.F. Demirbas // *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*. – 2006. – V. 1. – P. 85–95,

55. Baetens, R. Phase Change Materials for Building Applications: A Stateofthe Art Review/ R. Baetens, B. P. Jelle, A. Gustavsen // *Energy and Buildings*. – 2010(b). – V. 42. – P. 1361-1368.

56. Farid, M.M. Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications / M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – V. 45. – P. 1597-1615.

57. Dieckmann, J. Latent Heat Storage in Concrete, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, Retrieved December 9, 2008. – V. 19. – Iss. 3–5. – P. 335–348

58. Cunha, S. Classificação de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase com base nas suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas / S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, A. Tadeu // *A. revista Matéria*. – 2018. – V. 23.

59. Jelle, B.P. The Path to the High Performance Thermal Building Insulation Materials and Solutions of Tomorrow / B.P. Jelle, A. Gustavsen, R. Baetens // *Journal of Building Physics*. – 2010 (a). – V. 34. – P. 99–123.

60. Jelle, B. P, A. Gustavsen and R. Baetens, «The High Performance Thermal Building Insulation Materials and Solutions of Tomorrow», *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference (Buildings XI)*, Clearwater Beach, Florida, U.S.A., 5-9 December, 2010(b).

61. Jelle, B.P. The Path to the High Performance Thermal Building Insulation Materials and Solutions of Tomorrow/ B.P. Jelle, A. Gustavsen, R. Baetens // *Journal of Building Physics*. – 2010 (a). – V. 34. – P. 99-123.

62. McArdle P. and Lindstrom P., «Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2008», U.S. Energy Information Administration, DOE / EIA-0573(2008), December 2009.

63. Rashad, A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer / A.M. Rashad // *Construction and Building Materials*. – 2016. – V. 125. – P. 53–62.

64. Koksall, F. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures / F. Koksall, O. Gencel, M. Kaya // *Construction and Building Materials*. – 2015. – P.175–187.

65. Unal, O. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation / O. Unal, T. Uygunoglu, A. Yildiz // *Building and Environment*. – 2007. – V. 42. – P. 584–590.

66. Barros, Ilana Maria da Silva. Análisetérmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculitaexpandidaemsustituiçãoaoagregado. 2018. 86f. Dissertação (MestradoemEngenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

67. Maycá, J. Cremonini, R.A. Recena, F.A. Contribuiçãoo Estudo da Argila Expandida Nacional Como Alternativa de Agregado Graúdo Para Concretos Leves Estruturais (CLE). Trabalhoapresentado no Curso de Especializaçãoom Construção Civil 2006/2008 - NORIE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

68. Carasek, H. Argamassas. Capítulo 26. In: ISAIA Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2 ed, Geraldo (Ed.) IBRACON. – 2010. – V. 1-2. – P. 863-891.
69. Lourenci, Sidnei. Caracterização de argamassas de revestimento fabricadas com materiais alternativos. Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Tecnológicas, 2003. Dissertação de Mestrado.
70. Pczieczek, A. Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis. UDESC, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade do Estado de Santa Catarina.
71. Leggerini, M.R.C.; Aurich, M. Capítulo IV - Argamassa de revestimento. In: Notas de aula: Materiais Técnicos e Estruturas I. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Faculdade de Arquitetura, 2011.
72. Aguiar, A.L.D.D. Estudo das propriedades tecnológicas da argamassa de revestimento com incorporação da vermiculita expandida. UFRN. Natal, p. 20. 2017.
73. Cintra, C.L.D. Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus. Tese (Doutorado) – Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. 154 p. BERNHOEFT, GUSMÃO, TAVARES, 2011.
74. Ugarte, J.F.D.O, Sampaio, J.A, França, S.C.A. Vermiculita. In: LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações. 2ª. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. Cap. 38, p. 677-698.
75. Suvorov, S.A. Vermiculite – a promising material for Hightemperature heat insulation / S.A. Suvorov, V.V. Skurikhin // Refract. Ind. Ceram. – 2003. – V. 44. – P. 186–193.
76. Kalil, S.B, Leggerini, M.R. Estruturas Mistas – Concreto Armado X Alvenaria Estrutural. Curso de Graduação. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

77. Bauer, F. Materiais de Construção. Vol 1. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008].
78. Martins, P. B. M. Influência da granulometria agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto. UEFS, 2008, p. 16, 28.
79. Refráttil. Vermiculita Expandida. Disponível em: <<http://www.refratil.com.br/produto/vermiculitaexpandida>>. Acesso em 6 out. 2020
80. Silva, I. C. R. Caracterização e utilização da vermiculita expandida como barreira térmica. Trabalho de conclusão de curso. Belo Horizonte. 2016.
81. Schackow, A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent / A. Schackow, C. Effting, M.V. Folgueras, S. Güths, G.A. Mendes // Constr. Build. Mater. – 2014. – V. 57. – P. 190–197.
82. Pannirselvam, H. Development and evaluation of vermiculite tiles, Mortar and concrete / H. Pannirselvam, R. Santoshini // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2018. – V. 7. – P. 92–96.
83. Suvorov, S.A. Vermiculite – a promising material for high temperature heat insulation / S.A. Suvorov, V.V. Skurikhin // Refract. Ind. Ceram. – 2003. – № 44 (3). P. 186–193.
84. Shmuradko, V.T. Composition, structure, and property formation of heat insulation fire- and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation / V.T. Shmuradko, F.I. Panteleenko, O.P. Reut, E.F. Panteleenko, N.V. Kirshina // Refract. Ind. Ceram. – 2012. – № 53 (4). – P. 254–258.
85. Bors, J. Iodide, cerium and strontium adsorption by organophilic vermiculite / J. Bors, A. Gorny, S. Dultz // Clay Miner. – 1997. – № 32 (1). – P. 21–28.
86. Yurkon, A.L. Properties of heat-insulating materials (A review) / A.L. Yurkon, L.M. Aksel'rod // Refract. Ind. Ceram. – 2005. – № 46 (3). – P. 170–174.
87. Abdeen, M.A.M., Hodhod H., Experimental investigation and development of artificial neural network model for the properties of locally produced light weight aggregate concrete, Engineering 2 (2010) 408–419.

88. Schackow A., Effting C., Folgueras M.V., Güths S., Mendes G.A., Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent, *Constr. Build. Mater.* 57 (2014) 190–197.
89. Abdul Rahman S., Babu G., An experimental investigation on light weight cement concrete using vermiculite minerals, *Int. J. Innovative Res. Sci. Eng. Technol.* 5 (2) (2016) 2389–2392.
90. Sutcu, M. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks, *Ceram. Int.* 41 (2015) 2819–2827.
91. Ахтямов, Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов / Р.Я. Ахтямов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – №1–2. – С. 58–64.
92. Ахтямов, Р.Я. Применение эффективных теплоизоляционных материалов и жаростойких бетонов в футеровках печей обжига керамического кирпича / Р.Я. Ахтямов // Строительные материалы. – 2004. – № 2. – С. 26–28.
93. Koksai F., Gencel O., Hagh-Lobland H.E., Brostow W. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite, *Mater. Res. Innov.* 16 (1) (2012) 7–13.
94. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: ФГУП ЦПП, 2020. – 15с.
95. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 7 с.
96. ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 11 с.
97. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: учеб. пособие / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая Школа, 1981. – 335 с.
98. Кальянов, Н.Н. Вермикулит и перлит / Н.Н. Кальянов, А.Н. Мерзляк. – М.: Госстройиздат, 1961.

99. ЕвроХим-І. Добавки для сухих строительных смесей. Порообразователь ASCO 93. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavkidlya-suhih-stroitelnyh-smesej/poroobrazovateli/asco-93>].
100. ЕвроХим-І. Добавки для сухих строительных смесей. Суперпластификатор Melment F10. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavkidlya-suhih-stroitelnyh-smesej/superplastifikatory/melmen>
101. ЕвроХим-І. Добавки для сухих строительных смесей. Редиспергируемые порошки. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavkidlya-suhih-stroitelnyh-smesej/redispergiruemye-poroshki/vinnapas-17>.
102. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2011. – 12 с.
103. Жерновский, И.В. Применение полнопрофильного метода в рентгенофазовом исследовании цементного клинкера / И.В. Жерновский, А.Н. Хархардин, В.В. Строкова // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 11. – С. 94–97.
104. Зевни, Д.С. Рентгеновские методы исследования строительных материалов / Д.С. Зевни, Д.М. Хейкер. – М.: Стройиздат, 1965. – 362 с.
105. Михеев, В.И. Рентгенометрический определитель минералов. Т. 2. / В.И. Михеев, Э.П. Сальдау. – Л.: Недра, 1965. – 363 с.
106. ASTM. Diffraction data cards and alphabetical and grouped numerical index of x-ray, Diffraction data. – Philadelphia, 1969.
107. Сканирующий электронный микроскоп TescanMira 3 LM. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tescan.ru/products/mirasem/mira-3-lm/>.
108. Лазерный прибор для измерения размера частиц Analysette 22 NanoТес. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gnrnord.ru/equipment/brands/fritsch/analysette-22-nanote>].

109. <http://cvtbstu.ru/differentsialnyj-kalorimetr-tonical-model-7338-tonitechnik-baustoffprufsysteme-gmbh-gustav-meyer-allee-germaniya/>.
110. ГОСТ 5802-86 Растворы строительные. Методы испытаний. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 16 с.
111. ГОСТ 28013-98 Растворы строительные. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2017. – 17 с.
112. ГОСТ 5802-86 Растворы строительные. Методы испытаний. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 16 с.
113. Королев, А.Л. Компьютерное моделирование / А.Л. Королев. – М.: БИНОМ. ЛЗ, 2013. – 230 с.
114. Рентгеновские методы определения и кристаллическое строение минералов глин. Сборник переводов, ИЛ, 1955.
115. Barshad, I. The effect of interlayer cations on the expansion of the mica type crystal lattice / I. Barshad // American Mineral. – 1960. – № 35.
116. Bassett, W.A. Origin of the vermiculite deposit at Libby / W.A. Bassett // American Mineral. – 1959. – V. 44. – № 3–4.
117. Bradley W.F., Seratose I.M. A discussion of the water content of vermiculite. Clays and minerals. Proceedings of the seventh National conference on clays and clay minerals. № 6, Oxford-London-New York, Paris, Pergamon Press, 1962.
118. Bruce G-G. The Stanleyville vermiculite deposit «Canadian Mineral Met. Bull», V. 45, № 484, 1952.
119. Vasilovskaya, N.G. Theoretical aspects of deposit swelling vermiculite Tatar / N.G. Vasilovskaya, I.G. Endzhievskaya, O.V. Slakova, G.P. Baranova // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2012. – V. 3. – № 5. – P. 294-300.
120. Usharov-Marshak, A.V. Calorimetry of cement and concrete: Selected Works / A.V. Usharov-Marshak. – Kharkov: Fact, 2002. – 180 p.
121. Vasilovskaya, N.G. Theoretical aspects of deposit swelling vermiculite Tatar / N.G. Vasilovskaya, I.G. Endzhievskaya, O.V. Slakova, G.P. Baranova // Journal of Si-

berian Federal University. Engineering and Technologies. – 2012. – V. 3. – № 5. – P. 294–300.

122. Pannirselvam, N. Development and evaluation of vermiculite tiles, mortar and concrete / N. Pannirselvam, R Santhoshini // International journal of engineering research and technology (IJERT). – 2018. – V. 7. – № 9. – P. 92–96.

123. Pannirselvam, N. Development of Mortar using Vermiculite / N. Pannirselvam, K.S. Gokul Kishor // International journal of engineering research and technology (IJERT). – 2019. – V. 7. – № 6. – P. 57–60.

124. Gunasekaran, M. Study on Vermiculite Incorporate in Mortar / M. Gunasekaran, V. Priyalakashmi // International Journal for Innovative Research in Science and Technology. – 2016. – V. 2. – № 12. – P. 36–42.

125. Koksall, F. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures / F. Koksall, O. Gencel, M. Kaya // Construction and Building Materials. – 2015. – V. 88. – P. 175–187.

126. Barabaszova, K.C. Characterization of vermiculite particles after different milling techniques / K.C. Barabaszova, M. Valášková // Powder Technology. – 2013. – V. 239. – P. 277–283.

127. Praveen, K.E. Experimental study on vermiculite insulated samples with conventional samples in construction industry / K.E. Praveen, C. Manojkumar, K.B. Prakash, K.P. Siddesh // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2015. – V. 2. – P. 615–622.

128. Rajini, L. Vermiculite cement mortar for thermal insulation / L. Rajini, S.P. Agharwal, R.K. Saxena // CSIR, Roorkee. – 2013. – V. 2. – P. 247–667.

129. Файнер М.Ш. Введение в математическое моделирование технологии бетона / М.Ш. Файнер. – Львов: Свит. 1993. – 240 с.

130. Гартман. Т.Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов / Т.Н. Гартман, Д.В. Клушин. – М.: ИКЦ «Академкнига». 1996. – 416 с.

131. Компьютерное моделирование технико-экономических задач: методические указания к выполнению курсовой работы для студентов специальности

270106 – Производство строительных материалов, изделий и конструкций/сост. Л.А. Сулейманова. – Белгород: Изд-во БГТУ. 2008. – 56 с.

132. ГОСТ 33083-2014 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 11 с.

133. ГОСТ 31189-2015 Смеси сухие строительные. Классификация. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 9 с.

134. ГОСТ 24544-2020 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2021. – 27 с.

135. ГОСТ 25898-2020 Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2021. – 14 с.

136. ГОСТ 30108-94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. – 10 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Патент на полезную модель №214199
«Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов»



**Приложение Б. Акт о выпуске полупромышленной партии
«Композиционных вяжущих для теплоизоляционных растворов
с использованием вермикулита»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор



ООО «Стройтехнология»

А.В. Свиначев

«11» октября 2021

Акт

**о выпуске полупромышленной партии «Композиционного вяжущего
для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита»**

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «Стройтехнология»: начальник цеха Апанасенко А.Н., начальник лаборатории Агаркова Ю.С. и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: ведущий научный сотрудник Загороднюк Л.Х., исполнитель Аль Мамури С.К.Ш. составили настоящий акт в том, что с 3 октября 2021 г. по 8 октября 2021 г. на предприятии была выпущена полупромышленная партия композиционных вяжущих на основе портландцемента, вспученного вермикулита и органической добавки и помольного агрегата типа ВМ-400 в объеме 3500 кг и испытана в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Результаты испытаний полученных композиционных вяжущих с использованием вермикулита показали следующие характеристики:

Средняя плотность, кг/м ³	2100
Нормальная густота, %	36
Средняя прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	70,1

Начальник цеха

А.Н. Апанасенко

Начальник лаборатории

Ю.С. Агаркова

Ведущий научный сотрудник

Л.Х. Загороднюк

Исполнитель

С.К.Ш. Аль Мамури

**Приложение В. Акт о выпуске полупромышленной партии
теплоизоляционной смеси «Теплоизоляционная смесь с использованием
вермикулита»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стройтехнология»

А.В. Свиначев

«19» октября 2021



**Акт о выпуске полупромышленной партии теплоизоляционной смеси
«Теплоизоляционная смесь с использованием вермикулита»**

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «Стройтехнология»: начальник цеха Апанасенко А.Н., начальник лаборатории Агаркова Ю.С. и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: ведущий научный сотрудник Загороднюк Л.Х., исполнитель Аль Мамури С.К.Ш. составили настоящий акт в том, что с 11 октября 2021 г. по 15 октября 2021 г. на предприятии была выпущена полупромышленная партия теплоизоляционной смеси плотности в объеме 180 кг и испытана в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Результаты испытаний полученной теплоизоляционной смеси с использованием вермикулита показали следующие характеристики:

Средняя плотность, кг/м ³	437
Водоудерживающая способность не менее	93,5
Прочность сцепления с основанием, МПа, не менее	0,28
Водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/м ²	4,51
Коэффициент паропроницаемости, мг/м*ч*Па	0,07
Усадка покрытия -	трещины отсутствуют
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	3,1
Коэффициент теплопроводности, Вт/м*С	0,085
Морозостойкость, циклов, не менее	80

Начальник цеха

А.Н. Апанасенко

Начальник лаборатории

Ю.С. Агаркова

Ведущий научный сотрудник

Л.Х. Загороднюк

Исполнитель

С.К.Ш. Аль Мамури

**Приложение Г. Технические условия «Композиционного вяжущего
для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита»**

ОКПД 2 41

ГРУППА Ж 13

ОКС 91.100.10

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стройтехнология»

А.В. Свинарев

«16» ноября 2021



**«КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ
ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАСТВОРОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА»**

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ**ТУ 23.64.10-001-10410443-2021**

(вводятся впервые)

Дата введения _____

Без ограничения срока действия

РАЗРАБОТАНО:

БГТУ им. В.Г. Шухова

ст. научный сотрудник

Л.Х. Загороднюк

инженер

С.К.Ш. Аль Мамури

Белгород 2021

**Приложение Д. Технологический регламент производства композиционных
вяжущих для теплоизоляционных растворов с использованием
вермикулита»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стройтехнология»

А.В. Свиначев

«16» ноября 2021



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ
ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ
ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЕРМИКУЛИТА**

(вводятся впервые)

Дата введения _____

Без ограничения срока действия

РАЗРАБОТАНО:

БГТУ им. В.Г. Шухова

ст. научный сотрудник

Л.Х. Загороднюк

инженер

С.К.Ш. Аль Мамури

A handwritten signature in blue ink, corresponding to the name L.K. Zagorodnyuk.

Белгород 2021

**Приложение Е. Технические условия «Сухие теплоизоляционные смеси
с использованием вермикулита»**

ОКПД 2 41

ГРУППА Ж 13

ОКС 91.100.10

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стройтехнология»

А.В. Свинарев

«16» ноября 2021



**«СУХИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СМЕСИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА»**

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ТУ 23.64.10-002-10410443-2021

(вводятся впервые)

Дата введения

Без ограничения срока действия

РАЗРАБОТАНО:

БГТУ им. В.Г. Шухова

ст. научный сотрудник

Л.Х. Загороднюк

инженер

С.К.Ш. Аль Мамури

Белгород 2021

Приложение Ж. Технологический регламент производства сухих теплоизоляционных смесей с использованием вермикулита

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стройтехнология»

А.В. Свиначев

«16» ноября 2021



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ
ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРМИКУЛИТА**

(вводятся впервые)

Дата введения _____

Без ограничения срока действия

РАЗРАБОТАНО:

БГТУ им. В.Г. Шухова

ст. научный сотрудник

Л.Х. Загороднюк

инженер

С.К.Ш. Аль Мамури

Белгород 2021

**Приложение 3. Акт о внедрении результатов научной работы
«Композиционные вяжущие для теплоизоляционных растворов
с использованием вермикулита» компании
«Alaghar Company for General Contracting Ltd»**



العدد /
التاريخ ٢٠ / /
УТВЕРЖДАЮ
Директор компании
«Аль-Агар»
Аль-Джубури Али
« 22 » 04 2022

Акт

о современных штукатурных теплоизоляционных смесях для фасадов .

г. Кербела

« 22 » 04 2022

Мы, нижеподписавшиеся, Начальник опытно-экспериментального цеха компании «Аль-Агар»: Аль-Мусави Аббас Камал, инженерной лаборатории Аль-Хиндия : Аль-Тайе Ахмед Хассан и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: научный руководитель д-р. техн. наук, профессор Загороднюк Л.Х. исполнитель: Аль Мамури Саад Кхалил Шадид. Поддерживаем, что в рамках проекта реабилитации рынка Аль-Хиндия в городе Кербела в Ираке был изготовлен и применение вспученного вермикулита совместно с кварцевым песком в теплоизоляционных растворах который использовался на фасадах некоторых продовольственных складов и аптек для преодоления высоких летних температур ,особенно при частых отключениях электроэнергии, так как в этих хранилищах требуется постоянно низкая температура. Смесь готовилась непосредственно на строительной площадке, поскольку они были испытаны в лаборатории Аль-Хиндия в возрасте 28 дней. приведены результаты физико-механических испытаний свидетельствует о возможности создания теплоизоляционные штукатурные составы с соотношением: цемент 90% и вермикулит 10% .На основе разработанного композиционного вяжущего с использованием вермикулита и суперпластификатора Melment F10 . Мы получены эффективные теплоизоляционные штукатурные растворы с коэффициентом теплопроводности 0,051-0,059 Вт/(м•°C), с плотностью 250-300 кг/м3 при прочности 1,3-1,5 МПа, что удовлетворяет требованиям теплоизоляционных штукатурных растворов.

Начальник опытно-экспериментального цеха

А.К. Аль-Мусави

Начальник лаборатории

А.Х. Аль-Тайе

Научный руководитель

Загороднюк Л.Х.

Исполнитель

С.К.Ш.Аль Мамури



Приложение II. Акт о внедрении результатов научной работы губернатора город Кербела

العدد :
التاريخ :



محافظة كربلاء المقدسة
الإدارة المحلية
مكتب معاون المحافظ لشؤون التنمية والاعمار
قسم البلديات
مشروع تأهيل وتطوير سوق الهندية
المرحلة الثانية

УТВЕРЖДАЮ
провинции Кербела
Местная администрация
Канцелярия помощника губернатора
по развитию и реконструкции
Инженер Халед Хассан Аббас
« 12 » 02 2022

Акт

О КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ.

г. Кербела

« 12 » 02 2022

Мы, нижеподписавшиеся, представитель канцелярии заместителя губернатора Кербела: инженер Халед Хассан Аббас, инженерной лаборатории Кербела: Аль-Шемари Сами и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: научный руководитель д-р. техн. наук, профессор Загороднюк Л.Х. исполнитель: Аль Мамури Саад Кхалил Шахид свидетельствуем, что при выполнении теплоизоляционных работ для обеспечения теплозащиты некоторых жилых комплексов в городе Кербела в жаркое летнее время были использованы разработанные рецептуры теплоизоляционных растворов на основе вспученного вермикулита и портландцемента различных составов, разработанные и предложенные учеными университета БГТУ им. В.Г. Шухова. Было установлено, что при смешении этих составов в соотношении 90% цемента и 10% вермикулита возможно получить плотность теплоизоляционного раствора 958-1094 кг/м³ с обеспечением его прочности 0,99-1,73 МПа. Эта низкая плотность и приемлемая прочность на сжатие раствора явно способствовали улучшению теплоизоляционных свойств и, таким образом, улучшению теплового комфорта жильцов.

Представитель канцелярии заместителя губернатора Кербела:  Халед Хассан Аббас

Начальник лаборатории

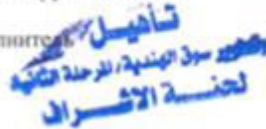
 Аль-Шемари Сами

Научный руководитель

 Загороднюк Л.Х.

Исполнитель

 С.К.Ш.Аль Мамури


مجلس المهندسين
للمحافظة
لجنة الاشراف


المهندس
خالد حسن عباس
ر. لجنة الاشراف

نسخة منه الى :-

قسم البلديات للعلم رجاء

Приложение К. Рекомендации по устройству теплозащитных покрытий

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Стройтехнология»

А.В. Свинарев

«17» января 2022



РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО УСТРОЙСТВУ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Разработано

БГТУ им. В.Г. Шухова

Руководитель разработки

д-р техн. наук

Л.Х. Загороднюк

Исполнитель

С.К.Ш. Аль Мамури

Белгород 2022