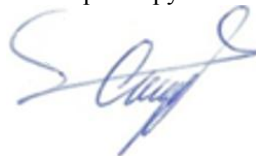


На правах рукописи



АЛЬ МАМУРИ СААД КХАЛИЛ ШАДИД

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ВЕРМИКУЛИТОВЫЙ РАСТВОР
НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

- Научный руководитель** доктор технических наук, профессор
Загороднюк Лилия Хасановна
- Официальные оппоненты** **Лукутцова Наталья Петровна,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой производства
строительных конструкций ФГБОУ ВО
«Брянский государственный инженерно-
технологический университет»
- Павленко Наталья Викторовна,**
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник ФГБУ «На-
учно-исследовательский институт строи-
тельной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук»
- Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Сибирский государствен-
ный автомобильно-дорожный универси-
тет»

Защита состоится «29» ноября 2024 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/AI%20Mamouri

Автореферат разослан «04» октября 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 плотности 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 вермику-

литового 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 – 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 КВ-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 оптимизировать 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 теплоизоля-

ционных 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, определены цели и задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности, апробации и результатах внедрения, структуре и объеме работы.

В **первой** главе рассмотрены проблемы создания теплового комфорта с жарким сухим климатом, в частности, в Ираке. Представлен обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы по вопросам теплоизоляции зданий и сооружений с использованием вермикулита, рассмотрены различные варианты снижения энергии на вентиляцию зданий за счет использования эффективных теплоизоляционных растворов.

Приведены результаты научных исследований, связанных с использованием различных составов вермикулитового заполнителя для обеспечения теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Определены пути решения задач, связанных с понижением теплопроводности и повышением теплозащитных свойств.

Для создания теплоизоляционного вермикулитового раствора предлагается использовать композиционное вяжущее (КВ) системы «ПЦ – вспученный вермикулит – СП», вспученный перлит в качестве мелкого заполнителя и комплекс добавок. В процессе получения КВ при вибрационном измельчении из

вспученного вермикулита образуются частицы пластинчатой формы, сохраняющие свою пористость, что помимо снижения плотности будет обеспечивать микроармирование структуры цементирующей матрицы. Для снижения В/Ц и, тем самым, повышения плотности цементной матрицы и нивелирования факта снижения прочности при частичной замене цемента наполнителем, в составе КВ предлагается использовать суперпластификатор (СП). Совместное действие указанных эффектов, обеспеченных КВ, а также введением вспученного вермикулита и комплекса добавок, включающих порообразователь и редиспергирующий порошок, позволит получить материал с достаточной прочностью и высокими теплозащитными свойствами. Это и явилось *рабочей гипотезой* диссертационного исследования.

Во **второй** главе приведены характеристики использованных сырьевых материалов: ЗАО «Белгородский цемент» ЦЕМ 0 42,5Н; портландцемент завода «Аль-Каим» (Ирак); в качестве аналога вермикулита месторождений Ирака, использован вспученный вермикулит Потанинского месторождения марки М100 (Челябинской области); добавки: суперпластификатор Melment F 10, порообразователь ESAPON 1214, редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 Н.

Изложены методики лабораторных исследований композиционных вяжущих, штукатурных растворов. При оценке качества вяжущих композиций, композиционных вяжущих и теплоизоляционных растворов использовали методы испытаний в соответствии с нормативной документацией: ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 310.4-81, ГОСТ 7076-99.

В **третьей** главе с целью выбора состава с наименьшей плотностью и наибольшей прочностью приведены результаты исследований различных вяжущих композиций (ВК), полученных на основе портландцемента и вермикулита с его различной дозировкой (от 10 до 30 %) и при различных режимах механоактивации в вибрационной мельнице (от 5 до 40 мин) (табл. 1).

Таблица 1 – Составы вяжущих композиций и их характеристики

№ п/п	Время помола, мин	Состав, %		Удельная поверхность м ² /кг	Прочность при сжатии в возрасте 7 и 28 сут, МПа		Плотность, кг/м ³
		вермикулит	цемент		7	28	
–	0	0	100	308	19,2	48,1	2200
1	0	10	90	290	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	250	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

№ п/п	Время помола, мин	Состав, %		Удельная поверх- ность м ² /кг	Прочность при сжатии в возрасте 7 и 28 сут, МПа		Плот- ность, кг/м ³
		вермикулит	цемент		7	28	
2-5	40	20	80	620	18,6	46,5	1795
3	0	30	70	246	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

Проведенный сравнительный гранулометрический анализ цемента и вяжущей композиции, активизированных в вибрационной мельнице, выявил, что тонкость помола вяжущей композиции выше тонкости помола цемента (рис. 1), что объясняется более низкой твердостью вспученного перлита по сравнению с цементом.

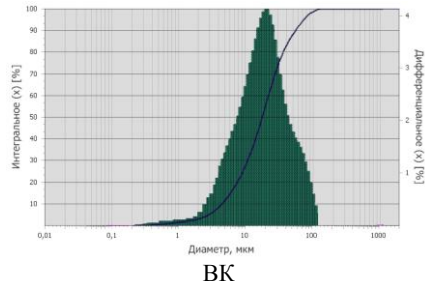
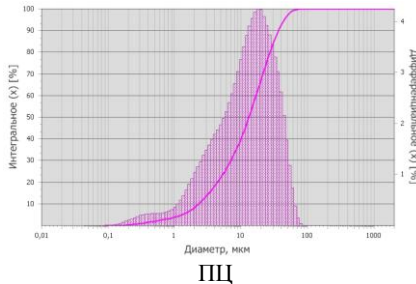


Рисунок 1 – Гранулометрический состав цемента и вяжущей композиции при соотношении компонентов 90 % : 10 %, измельченных в вибрационной мельнице

Установлено, что фракционный состав активизируемой вяжущей композиции сужается по сравнению с фракционным составом измельченного портландцемента и ВК имеет более полидисперсный состав со смещением в высокодисперсную область. При этом максимальное значение на графике распределения размеров частиц смещается на 25 % с 20 мкм до 15 мкм. Удельная поверхность измельченной вяжущей композиции составляет 650 м²/кг.

Рентгенофазовый анализ гидратированной вяжущей композиции в возрасте 28 сут состава 1-4, имеющий наилучший показатель прочности, свидетельствует о содержании в продуктах гидратации фаз, свойственных портландцементу: Ca(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; 1,84Å); 3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O(d = 9,83; 5,62; 4,69; 5,88; 3,48; 3,25; 2,72; 2,55; 2,25; 2,19Å). Отмечается, что кроме этих фаз в составе композиции присутствуют дифракционные максимумы, присущие вермикулиту: (d = 11,38; 4,54; 3,45; 2,66; 2,43; 2,19; 1,70; 1,44 Å). Новых соединений в составе не установлено, дифракционный фон имеет повышенную интенсивность, что свидетельствует о присутствии субмикроскопических кристаллических новообразований гидросиликатов кальция, образовавшихся при

аморфизации поверхности наполнителя, которые способствуют повышению прочности вяжущей композиции (рис. 2).

Вяжущая композиция представлена пакетными вермикулитовыми зернами, на которых, как на подложках, формируются гидросиликаты кальция, алюминия и железа (рис. 3).

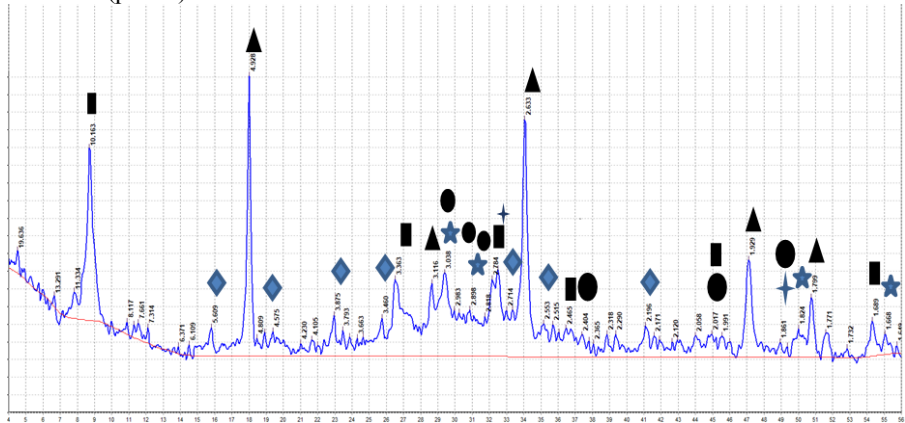
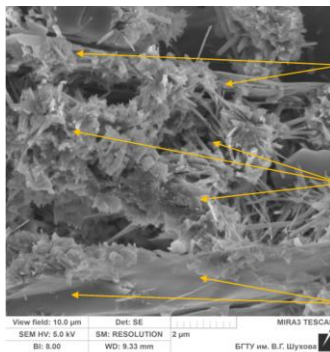
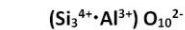
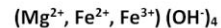
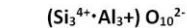


Рисунок 2 – Дифрактограмма гидратированной вяжущей композиции состава 1-4 в возрасте 28 сут:

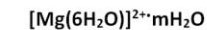
- ▲ – Ca(OH)_2 ($d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79$); ★ – CSH-I ($d=3,04; 2,88; 1,83; 2,78; 1,66$);
- – CSH-II ($d=9,8; 3,04; 2,88; 2,81; 1,84$); + – $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$ ($2,75; 1,89$);
- ◆ – Этtringит ($9,83; 5,62; 4,69; 5,88; 3,48; 3,25; 2,72; 2,55; 2,25; 2,19$);
- – вермикулит ($d=11,38;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



Слюдяной пакет



Гидратный слой,
заполняемый
кристаллическими
новообразованиями



Слюдяной пакет

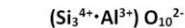
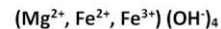
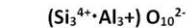


Рисунок 3 – Схематическое изображение структурных элементов вермикулита

За счет механоактивации мельчайшие зерна вермикулита создают дополнительные подложки для формирования мелкозернистой структуры гидросиликатов различного генезиса. Вследствие равномерного распределения мелкодисперсных частиц вермикулита и цемента в общей массе пористого заполнителя формируется объемная пористая структура с равномерно распределенными зер-

нами наполнителя и вяжущего, что определяет формирование пористого материала с гарантированной прочностью, так на всех вермикулитовых поверхностях формируются гидросиликаты кальция, которые прорастают и объединяют в единый пористый конгломерат создаваемый материал.

Микроструктура всех синтезированных составов вяжущих композиций имеет характерную особенность: на объемно-ориентированных слюдяных пакетах – вермикулитовом наполнителе, как на подложках формируется мелкозернистая структура разноориентированных кристаллических новообразований (рис. 4) в реликтовых межпакетных слоях алюмосиликатного наполнителя.

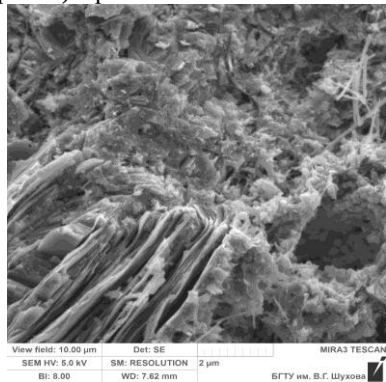


Рисунок 4 – Микроструктура цементного камня из вяжущей композиции состава 1-4 в возрасте 28 сут

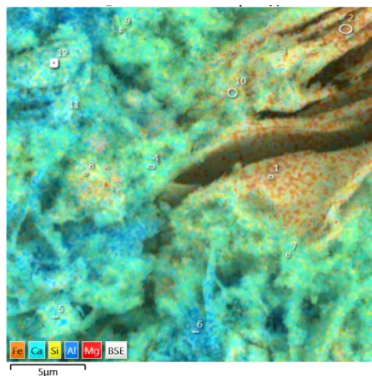


Рисунок 5 – Многослойная карта распределения элементного состава типичного участка вяжущей композиции

На сканирующем электронном микроскопе, оснащенный электродисперсным спектрометром, были проведены исследования по распределению элементного состава вяжущих композиций с целью установления особенностей формирования структуры создаваемых в наиболее типичных участках образцов вяжущих композиций, формирование вяжущей композиции и контактной зоны: вяжущее – минеральный наполнитель.

Установлено, что по составу исследуемые образцы представлены преимущественно силикатами и алюмосиликатами кальция, а также присутствуют силикаты магния, алюминия и железа, что четко прослеживается на всех исследуемых спектрах, начиная со спектра 1-3 ВК.1 и до 1-3 ВК.12 (табл. 2). 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 (рис. 5) распределения элементного состава вяжущей композиции показало, что она характеризуется высокой дисперсностью и однородностью, что свидетельствует о гомогенности смеси.

Таблица 2 – Сравнение элементного состава вяжущей композиции

Название спектра, вес. %	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1-3ВК. 1	4,57	50,69		7,27	4,61	14,28		3,49	7,00	1,28	6,82
1-3ВК. 2	4,50	44,79	0,32	7,74	5,28	16,42		4,13	6,47	1,34	9,00
1-3ВК. 3	6,35	55,50		4,65	3,33	11,11	0,41	2,06	11,18	0,82	4,60
1-3ВК. 4	6,22	55,66	0,34	0,91	1,65	8,59	1,00	0,58	23,76		1,29
1-3ВК. 5	4,57	51,50		0,78	3,61	4,70	0,82	0,30	23,34	0,66	9,72
1-3ВК. 6	6,32	60,26			6,46	2,71	1,41	0,27	22,57		
1-3ВК. 7	6,53	56,49	0,31	0,69	1,58	9,08	0,92	0,55	22,68		1,16
1-3ВК. 8	6,44	49,77	0,34	4,29	3,54	11,81	0,67	2,64	15,62	0,67	4,21
1-3ВК. 9	7,19	53,86	0,32	1,58	2,82	9,26	0,97	1,34	19,10	0,49	3,08
1-3ВК. 10	8,44	52,45		3,70	3,02	11,40	0,54	2,14	13,54	0,75	4,03
1-3ВК. 11	5,72	53,23			10,20	13,41	0,20	0,37	12,93		3,94
1-3ВК. 12	5,09	54,01		0,63	3,88	5,46	0,91	0,29	22,89		6,84

Таким образом, по совокупности оценки фазового состава и активности вяжущего, показана эффективность использования вспученного перлита как компонента вяжущей композиции. Рациональной с точки зрения технологии является дозировка вспученного вермикулита 10 %; время помола в вибрационной мельнице ВК 30 минут. Данные параметры были приняты для разработки состава композиционного вяжущего (КВ).

Для снижения водопотребности и, как следствие, повышения плотности цементной матрицы, что позволит нивелировать снижение прочности от использования наполнителя, проведена оптимизация вяжущей композиции суперпластификатором в диапазоне от 0,2 до 1,4 %, что позволило получить композиционное вяжущее системы «ПЦ – вспученный вермикулит – СП». Снижение В/Ц позволило повысить активность от 7 до 20 % в зависимости дозировки Melment F10 (табл. 3).

Таблица 3 – Влияние суперпластификатора Melment F10 на свойства КВ

№ п/п	Дозировка СП, %	Интервал варьирования	Определяемые параметры			
			ρ , г/см ³	Кол-во воды, мл	НГ, %	R _{сж.ср.} 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

Для изучения особенностей процесса гидратации композиционных вяжущих проведены сравнительные исследования по кинетике тепловыделения портланд-цемента, вяжущих композиций и композиционных вяжущих (рис. 6). Установлено смещение и снижение кривой тепловыделения у композиционного вяжущего, что обусловлено высокой удельной поверхностью и присутствием высокодисперсного вермикулитового наполнителя по сравнению с вяжущей композицией.

В качестве рационального для дальнейших исследований при получении

теплоизоляционного вермикулитового раствора принят состав КВ (дозировка СП 0,8 %) с активностью КВ 70,1 МПа.

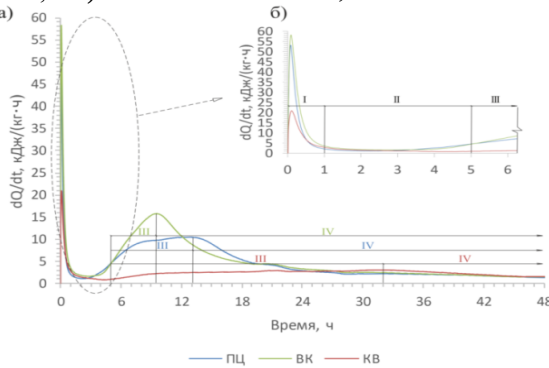


Рисунок 6 – Кинетика тепловыделения рядового портландцемента (ПЦ, $S_{\text{уд}}=308 \text{ м}^2/\text{кг}$), вяжущей композиции (ВК, $S_{\text{уд}}=612 \text{ м}^2/\text{кг}$) и композиционных вяжущих (КВ, $S_{\text{уд}}=612 \text{ м}^2/\text{кг}$)

соотношении композиционного вяжущего и вермикулитового песка 1:11.

Для оптимизации использовали следующие химические добавки: порообразователь Esaron 1214, редиспергирующий порошок Vinnapas LL 4042 Н. Функциональные добавки вводились в дозировках, рекомендуемых производителем с определенным интервалом варьирования. Оптимизацию состава функциональными добавками и исследование влияния отдельных компонентов на технологические и физико-механические свойства проводили методом математического планирования эксперимента с выходными параметрами по плотности и прочности (табл. 4, рис. 7-8). При этом для уточнения количества суперпластификатора, вводимого в состав КВ, в рамках данного планирования третьим фактором планирования являлся Melment F10.

Таблица 4 – Условия планирования эксперимента

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

Уравнение регрессии для плотности имеет вид:

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

Уравнение регрессии для прочности имеет вид:

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

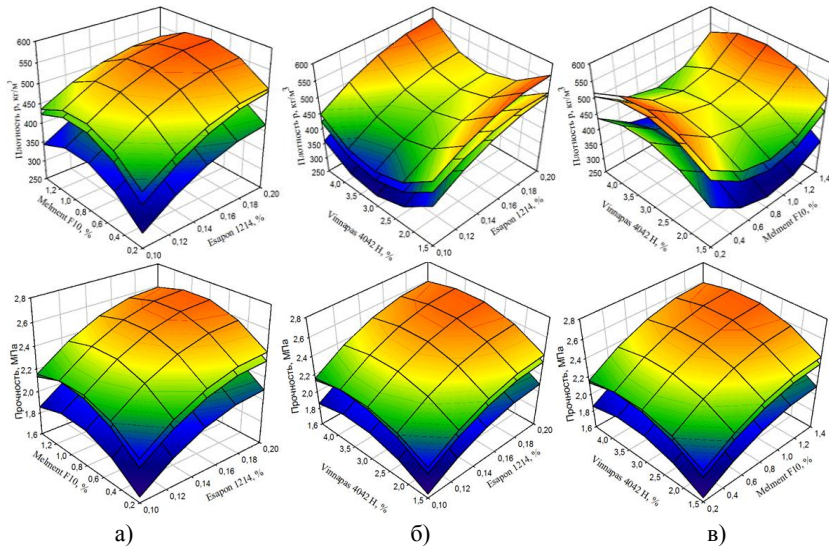


Рисунок 7 – Номограммы зависимости плотности и прочности затвердевшего теплоизоляционного раствора от концентрации Esapon 1214 и Melment F10 (а), Esapon 1214 и Vinnapas LL 4042 H (б), Melment F10 и Vinnapas LL 4042 H (в)

Оптимальные расчетные значения плотности и прочности теплоизоляционного раствора составили $482,11 \text{ кг/м}^3$ и $2,37 \text{ МПа}$, соответственно.

В пятой главе приведены результаты исследований по подбору смесителя для приготовления теплоизоляционных растворов.

Использование метода математического планирования эксперимента позволило провести минимальное количество опытов с получением максимальных выходных параметров, изучить влияние на плотность теплоизоляционного раствора изменения коэффициента загрузки, времени смешивания и давления в пневматическом смесителе (табл. 5, рис. 9-10).

Уравнение регрессии для плотности имеет вид:

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

Уравнение регрессии для прочности имеет вид:

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

В результате определены рациональные режимы смешения сухой теплоизоляционной смеси в пневматическом смесителе со спиральной эргонесущей трубкой, при этом установлено, что наилучшим режимом является режим при давлении сжатого воздуха $P=144-150 \text{ кПа}$; при коэффициенте загрузки материала в смеситель 48% и времени смешения $40-51 \text{ с}$. Теплоизоляционные смеси, приготовленные в пневматическом смесителе со спиральной эргонесущей трубкой, обеспечивают получение теплоизоляционных растворов со стабильными показателями по плотности $\sim 437 \text{ кг/м}^3$, имеющие

достаточные показатели при сжатии $\sim 3,1$ МПа и гарантируют высокие теплозащитные свойства ($\lambda=0,064-0,070$ Вт/(м·К)) строительным конструкциям, что свидетельствует об эффективном смешении сырьевых компонентов и позволяют рекомендовать пневматический смеситель со спиральной энерго-несущей трубкой для приготовления теплоизоляционных растворов с использованием легких заполнителей.

Таблица 5 – Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
Коэффициент загрузки	X_1	0,4	0,5	0,6	0,1
Время смешивания, с	X_2	30	50	70	20
Давление в пневматическом смесителе, кПа	X_3	50	150	250	100

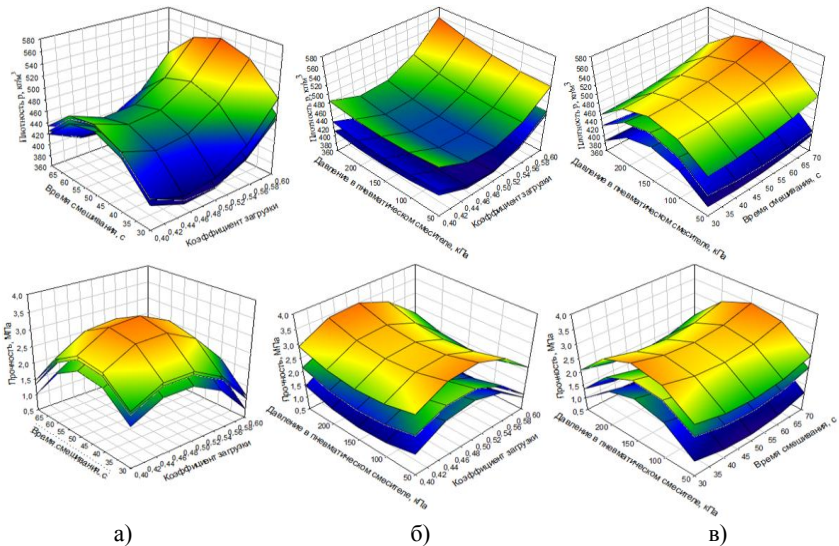
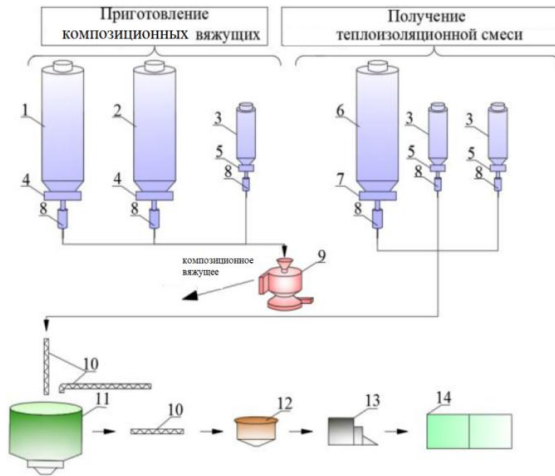


Рисунок 8 – Номограммы зависимости плотности и прочности затвердевшего теплоизоляционного раствора от значений коэффициента загрузки и времени смешения (а), коэффициента загрузки и давления в пневматическом смесителе (б), времени смешения и давления в пневматическом смесителе (в)

Предложена технологическая схема изготовления сухой смеси для получения теплоизоляционного вермикулитового раствора пониженной плотности, включающая следующие этапы: получение композиционного вяжущего совместным помолот портландцемента, вермикулита и суперпластификатора в вибрационной мельнице; смешение КВ с функциональными добавками и вспученным вермикулитовым песком М100 в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой; фасовка и складирование сухой смеси (рис. 9).



- 1 – бункер цемента;
 2, 6 – бункера вспученного вермикулита;
 3 – бункера функциональных добавок;
 4, 5, 7, 13 – дозаторы материалов;
 8 – пневмонасосы;
 9 – вибравальцовочная мельница;
 10 – шнековый транспортер;
 11 – пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубой;
 12 – бункер сухой теплоизоляционной смеси;
 14 – склад готовой продукции

Рисунок 9 – Технологическая схема производства сухой теплоизоляционной смеси

Разработан пакет нормативных документов для внедрения «композиционных вяжущих для теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита» и «сухих теплоизоляционных смесей с использованием вермикулита», разработаны рекомендации по устройству теплозащитных покрытий.

В ряду современных штукатурных смесей для теплоизоляционных растворов разработанные составы характеризуются улучшенными теплотехническими свойствами при оптимальных технико-экономических показателях (табл. 6).

Таблица 6 – 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 при сжатии, 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	0,073-0,078
Стойкость к образованию трещин	Не допускается	Трещин нет

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. При организации производства и внедрении разработанных теплоизоляционных растворов с использованием вермикулита в сфере жилищного комплекса будет обеспечена значительная экономия электроэнергии на создание комфортных условий для жизнедеятельности людей.

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 КВ-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.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Загороднюк, Л.Х. Теплоизоляционные растворы с использованием вермикулита и их оптимизация [Текст] / Л.Х. Загороднюк, **С.К.Ш. Аль Мамури**, Д.А. Сумской, А.Л. Бочарников // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2023. – № 1. – С. 90–101. (К 2)
2. Аль Мамури, С.К.Ш. Смешение теплоизоляционных смесей в пневма-

тическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой [Текст] / **С.К.Ш. Аль Мамури**, О.М. Шеметова, Л.Х. Загороднюк, А.Л. Бочарников // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». – 2023. – № 1. – С. 126–137. (К 2)

3. **Аль Мамури, С.К.Ш.** Вяжущие композиции с использованием вермикулита для теплозащитных растворов [Текст] / **С.К.Ш. Аль Мамури**, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Сумской, А.Л. Бочарников, О.М. Шеметова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 2. – С. 8–19. (К 1)

4. **Аль Мамури, С.К.Ш.** Проблемы теплового комфорта зданий в сухом жарком климате Ирака / **С.К.Ш. Аль Мамури**, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Сумской // Системные технологии. – 2024. – №2 (51). – С.28–39. (К 3)

В сборниках трудов конференций:

5. Стаценко А.Ю. Механохимическая активация композиционных вяжущих [Электронный ресурс] / А.Ю. Стаценко, Е.Н. Кикалишвили, **С.К.Ш. Аль Мамури** // Сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума 24 ноября 2022, г. Белгород. С.291–294.

6. Шеметова О.М. Проведение лабораторных исследований по определению неоднородности смеси в пневматическом смесителе // О.М. Шеметова, Ю.М. Фадин, С.И. Анциферов, Л.Х. Загороднюк, **С.К.Ш. Аль Мамури** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17–1. – С. 144–149.

7. Фадин, Ю.М. Существующие методики расчета пневматических смесителей [Текст] / Ю.М. Фадин, О.М. Шеметова, Л.Х. Загороднюк, **С.К.Ш. Аль Мамури** // Механизация и автоматизация строительства. – 2022. – С. 8–13.

8. **Аль Мамури, С.К.Ш.** Пути создания теплового комфорта в странах Ближнего Востока [Текст] / **С.К.Ш. Аль Мамури**, Г.А. Сытов // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова 16–17 мая 2023, г. Белгород. – С. 21–26.

9. **Аль Мамури, С.К.Ш.** Покрытие растворов вермикулитом. /Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова 20–24 мая 2024 г. Белгород. – С. 227–232.

Объекты интеллектуальной собственности:

10. Пат. 214199 Российская Федерация МПК В01F 23/60 (2022.01), В01F 25/10 (2022.01), В01F 33/40 (2022.01). Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов // Ю.М. Фадин, О.М. Шеметова, Е.Г. Шеметов, Л.Х. Загороднюк, **С.К.Ш. Аль Мамури**; заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – № 2022119114. Заявл. 13.07.2022. Оpubл. 14.10.22. – Бюл. № 29.

АЛЬ МАМУРИ СААД КХАЛИЛ ШАДИД

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ВЕРМИКУЛИТОВЫЙ РАСТВОР
НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.09.2024 Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16.
Тираж 100 экз. Заказ № 133

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46