

На правах рукописи



ОТМАН АЗМИ С. А.

**ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ НА ОСНОВЕ
КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО
(на примере Палестины)**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2023

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

Научный руководитель: **Чернышева Наталья Васильевна**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Яковлев Григорий Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный
технический университет им. М.Т.
Калашникова», кафедра «Строительные
материалы, механизация и геотехника»,
заведующий кафедрой

Петропавловская Виктория Борисовна,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет», кафедра
«Производство строительных изделий и
конструкций», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»

Защита состоится «22» декабря 2023 г. 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/Otman

Автореферат разослан «18» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Денис Юрьевич Суслов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В динамично развивающейся строительной отрасли Палестины растет потребность в расширении спектра экологически чистых отделочных строительных материалов, соответствующих предъявляемым к ним требованиям. Для реализации этого направления, учитывая принципы рационального природопользования, потребуется значительное количество строительных материалов с преимущественным использованием для их изготовления местного сырья природного и техногенного происхождения, что позволит уменьшить негативное воздействие на окружающую среду и решить экономические проблемы в стране.

Особое место среди современных строительных материалов в Палестине занимают отделочные материалы для внутренней и наружной отделки зданий и сооружений. В стране для этих целей используют цементно-песчаную штукатурку импортного производства. Актуальной является разработка конкурентно способных отделочных материалов нового поколения – штукатурных растворов на основе композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) с использованием в качестве минеральной добавки, а также заполнителя кварцевых песков дюн и песчаной фракции отсева дробления известняка, как местного природного ресурса Палестины. Они отвечают высоким требованиям по качеству, эксплуатационным и экологическим характеристикам продукции, энергетическим затратам на их производство, смогут расширить номенклатуру отделочных материалов для улучшения среды обитания человека и создания комфортных условий для проживания, заменив импортные аналоги. Но, в связи с тем, что исследований относительно пригодности данных видов сырьевых материалов для штукатурных растворов не проводилось, это является тормозом для расширения их использования в строительстве.

Диссертационная работа выполнена в рамках программы развития и стабилизации стройиндустрии Палестины; гранта РНФ № 22-19-20115 и Правительства Белгородской области (соглашение №3 от 24.03.2022); программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова до 2030 г.

Степень разработанности темы. При работе над диссертацией был проведен анализ патентных, технических и нормативных источников, изучены научные работы российских и зарубежных ученых, показавший, что имеются теоретические основы и значительный опыт проектирования составов и технологии производства строительных растворов различного назначения. Однако теоретических и практических подходов к использованию некондиционных песков песчаных дюн и песчаной фракции отсева дробления известняка Палестины в качестве мелкого заполнителя, не проводилось. Процессы формирования структуры и свойств штукатурных

растворов на основе водостойкого КГВ для отделки зданий и сооружений Палестины требуют серьезного изучения.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение штукатурного раствора на основе композиционного гипсового вяжущего для отделочных материалов с улучшенными свойствами.

Для достижения поставленной цели решали **следующие задачи:**

- обоснование возможности использования некондиционных песков песчаных дюн Палестины в качестве минеральной добавки для КГВ и заполнителя для штукатурного раствора на его основе;
- разработка рецептуры водостойкого КГВ с минеральной добавкой из тонкодисперсных песков песчаных дюн Палестины и штукатурного раствора на его основе, с использованием заполнителя с оптимизированным гранулометрическим составом из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка, путем модификации базовой вяжущей системы комплексом полифункциональных органоминеральных добавок;
- изучение особенностей механизма структурообразования, физико-механических характеристик, фазового состава гипсоцементной системы с комплексом полифункциональных органоминеральных добавок;
- разработка состава штукатурного раствора на основе КГВ с использованием заполнителя оптимизированного гранулометрического состава из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенного песчаной фракцией отсева дробления известняка.
- выявление закономерностей влияния вида заполнителя и его зернового состава на свойства штукатурных растворов на КГВ;
- изучение влияния рецептурно-технологических факторов на реологические, физико-механические и эксплуатационные характеристики штукатурного раствора на КГВ;
- установление закономерностей влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства штукатурных смесей и затвердевших растворов, а также на коэффициент размягчения, позволяющие управлять процессом структурообразования на макро- и микроуровне.
- подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований; промышленная апробация.

Научная новизна работы. Разработаны научно обоснованные технологические решения, обеспечивающие получение КГВ и штукатурного раствора на его основе с улучшенными физико-механическими характеристиками и водостойкостью, путем модификации базовой вяжущей системы комплексом полифункциональных органоминеральных добавок, а также использования заполнителя с оптимизированным гранулометрическим составом из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка. Оптимизация

гранулометрического состава КГВ путем введения комплекса тонкодисперсных полиминеральных добавок (тонкодисперсного песка песчаных дюн, метаксаолина ВМК-45, известняковой пыли) с определенной удельной поверхностью, обеспечивает создание высокоплотной упаковки частиц вяжущего. Это в совокупности с комплексом органических добавок, включающих замедлитель сроков схватывания Plast Retard PE, суперпластификатор Melflux 5581 F, стабилизатор Mapf Forbo-Crete S 010, позволяет получать штукатурные смеси с заданными реологическими характеристиками, водоудерживающей способностью, подвижностью, скоростью схватывания и твердения.

Установлен характер влияния дозировки компонентов и гранулометрического состава КГВ, а также оптимизированной смеси заполнителей и суперпластификатора Melflux 5581 F на водопотребность штукатурного раствора, заключающийся в том, что при минимальном расходе воды в смеси требуемой подвижности обеспечивается повышение коэффициента размягчения и прочности затвердевшего штукатурного раствора в 7-ми суточном возрасте на 20%, в 28-ми суточном – на 47%, позволяющее увеличить степень гидрофобности поверхности камня за счёт создания высокоплотной упаковки на двух масштабных уровнях (КГВ и заполнитель).

Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических факторов, а именно состава и содержания КГВ и заполнителя, комплекса органических добавок, водо-вяжущего отношения на подвижность и начало схватывания штукатурной растворной смеси, прочностные характеристики, а также коэффициент размягчения затвердевшего раствора, позволяющие управлять процессом структурообразования на макро- и микроуровне.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования штукатурных растворов на основе водостойких КГВ, включающих тщательно подобранную смесь гипсовых вяжущих (β -модификации марки Г-5 БП + α -модификации марки ГВВС-16), портландцемента, полифункциональных органо-минеральных добавок, а также заполнителя из некондиционных кварцевых песков дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка оптимизированного гранулометрического состава.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения некондиционных песков песчаных дюн Палестины в качестве тонкодисперсной минеральной добавки КГВ, а также в качестве заполнителя, обогащенного песчаной фракцией отсева дробления известняка для штукатурных растворов.

Предложены рациональные составы штукатурных растворов на КГВ с комплексом полифункциональных органо-минеральных добавок и заполнителем оптимизированного гранулометрического состава из

некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка, обеспечивающих снижение их водопотребности на 12%; замедление начала схватывания в 5 раз (с 8-30 мин до 46 мин); снижение вязкости в 3,5 раза (с 26 Па·с до 7,5 Па·с) и предельного напряжения сдвига в 22 раза (с 110 Па до 5 Па); повышение предела прочности при сжатии затвердевших образцов в 7-ми суточном возрасте на 20%, в 28-ми суточном возрасте (хранившихся во влажных условиях) – на 35%, а высушенных до постоянной массы образцов – на 47%; повышение коэффициента размягчения – с 0,69 до 0,76; повышение гидрофобности поверхности, показателя водоудерживающей способности – до 97%, а также показателя прочности сцепления с бетонным основанием – до 0,8 МПа. Предложена технология производства КГВ и сухих штукатурных смесей на его основе.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертации явились результаты отечественных и зарубежных ученых в области теории и практики строительного материаловедения «состав – технология – структура – свойства», а также принцип моделирования сложных физико-химических процессов в многокомпонентных гипсоцементных системах, гарантирующих получение достоверных результатов. Свойства сырьевых материалов и разработанных штукатурных растворов определяли базовыми методами исследований, в т.ч. комплексом современных физико-химических методов анализа: лазерной гранулометрии и изотермической калориметрии, оптической и растровой электронной микроскопии, РФА, ДТА, математического аппарата структурной топологии и др.

Положения, выносимые на защиту.

– научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение КГВ и штукатурного раствора на его основе с улучшенными физико-механическими характеристиками и водостойкостью, с использованием комплекса полифункциональных органоминеральных добавок, а также заполнителя с оптимизированным гранулометрическим составом из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка;

– механизм влияния комплекса полифункциональных органоминеральных добавок на структурообразование КГВ и его характеристики;

– закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на свойства штукатурной растворной смеси и затвердевшего раствора, позволяющие управлять процессом структурообразования на макро- и микроуровне.

– математические закономерности и графоаналитические зависимости изменения технологических характеристик и строительно-эксплуатационных свойств штукатурных растворов на КГВ;

– рациональные составы, технологические параметры и характеристики штукатурных растворов на КГВ с комплексом полифункциональных органоминеральных добавок и заполнителем оптимизированного гранулометрического состава из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка. Результаты опытно-промышленной апробации.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием нормативных документов, широкого спектра методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований и воспроизводимостью результатов при большом объеме экспериментов.

Апробация результатов работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских научно-практических конференциях в Белгороде (2020, 2023), Воронеже (2022), п. Архыз Карачаево-Черкесской республики (2023), Владивостоке (2023), а также на семинарах кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова, в Белгороде (2021–2023).

Внедрение результатов исследований. Апробация разработанного технологического решения проведена в промышленных условиях на предприятии по производству товарного бетона «Harfoush Concrete» и в цехе многопрофильного предприятия по производству строительных материалов «Al-Bayaderblockfactory» в г. Рамаллах (Палестина). Внедрение выпущенной опытно-промышленной партии штукатурного раствора на КГВ произведено на объекте малоэтажного строительства при выполнении отделочных работ компанией «Al-Zaytouneh» в 2-х домах коттеджного типа в пригороде г. Рамаллах, в селе Дербзи (Палестина).

С целью внедрения результатов работы разработаны следующие нормативные документы:

- стандарт организации СТО 02066339-001-2023 «Водостойкое композиционное гипсовое вяжущее. Технические условия»;
- технологический регламент на производство водостойкого композиционного гипсового вяжущего для штукатурных растворов и сухих строительных смесей;
- технологический регламент на производство модифицированного штукатурного раствора на основе композиционного гипсового вяжущего.

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

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 9 научных публикациях, включая 4 статьи в российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 1 свидетельство о депонировании результатов интеллектуальной деятельности.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в определении цели и задач исследований, постановке и проведении научных экспериментов, обработке и интерпретации полученных данных, апробации и внедрении результатов работы.

Объем и структура работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, включающего 31 таблицу, 56 рисунков, список литературы из 149 источников, 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, определены цель и задачи; сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приводятся методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, отражены сведения о достоверности, апробации и результатах внедрения, структуре и объеме работы представлена информация об апробации результатов работы.

Первая глава посвящена анализу работ, посвященных повышению эффективности штукатурных растворов на основе гипсовых и композиционных гипсовых вяжущих, используемых для внутренней и наружной отделки зданий и сооружений, создающих комфортную среду обитания человека. Приведенный анализ технической литературы позволил сделать вывод, что использование некондиционных кварцевых песков дюн Палестины и песчаной фракции отсева дробления известняка в качестве мелкого заполнителя для штукатурных растворов является, на сегодняшний день, актуальным из-за их доступности и неограниченности сырьевого ресурса. Особенно перспективным является их использование для штукатурных растворов на основе КГВ в качестве тонкодисперсной минеральной добавки и мелкого заполнителя, с обеспечением физико-механических и эксплуатационных характеристик, что является важной народно-хозяйственной задачей в стране. Однако, в настоящее время, они практически не используются.

Сформулирована **рабочая гипотеза** диссертации, которая заключается в определении возможности получения модифицированного штукатурного раствора на основе КГВ с минеральной добавкой и мелким заполнителем из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка и органических добавок, обеспечивающих повышенную водостойкость и прочность.

Во второй главе представлены характеристики использованных сырьевых материалов и методики проведения исследований, приведена

основная инструментальная база. Для разработки штукатурных растворов на основе КГВ использовали следующие материалы: смесь гипсовых вяжущих α -модификации с маркой ГВВС-16 и β -модификации Г-5В11 (30% ГВВС-16+70%Г5Б II), портландцемент типа ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО); в качестве минеральных компонентов – тонкомолотый кварцевый песок, высокоактивный метакраолин ВМК-45 и известняковую пыль.

В качестве мелкого заполнителя использовали местные некондиционные кварцевые пески дюн Палестины с низким модулем крупности и песчаную фракцию отсева дробления известняка.

Для модифицирования штукатурных растворов на КГВ использовали химические добавки ведущих фирм РФ и зарубежья (% от массы КГВ): замедлитель сроков схватывания Plast Retard PE (0,08%), суперпластификаторы марок Melflux 5581 F и Mapf SU 84 (0,2%), загуститель марки Mapf Forbo-Crete S 010 (0,1%).

В третьей главе рассмотрены принципы регулирования структуры и свойств КГВ. С целью подтверждения реакционной способности минеральной добавки из тонкодисперсного кварцевого песка песчаных дюн Палестины были проведены исследования по поглощению гидроксида кальция в твердеющей системе согласно ТУ 21-31-62-89 – Гипсоцементно-пущолоановое вяжущее (таблица 1).

Таблица 1 – Кинетика поглощения гидроксида кальция

№ состава	Материалы, г				Концентрации СаО в р-ре, г/л, через:	
	Гипс	ПЦ	Песок	ВМК-45	5 сут.	7сут.
Удельная поверхность тонкодисперсного кремнезема – 500 м ² /кг						
1	4	2,5	2,5	–	1,12	1,05
2	4	2,5	2,5	0,125	1,07	0,98
3	4	2,5	2,5	0,25	1,02	0,91
4	4	2,5	5,0	–	1,10	1,00
5	4	2,5	5,0	0,125	1,03	0,85
6	4	2,5	5,0	0,25	0,91	0,83

Анализ результатов исследований показал, что для обеспечения стабильности гипсоцементно-кремнеземистой композиции на требуемом уровне в качестве минеральной добавки в составе КГВ целесообразно использовать тонкодисперсный кварцевый песок дюн с удельной поверхностью 500 м²/кг при отношении «цемент : песок – 1:2» с добавлением 5% (% от массы цемента) метакраолина ВМК-45.

При изучении зернового состава компонентов КГВ с помощью прибора Microsizer 201 было выявлено, что у гипсового вяжущего основной диапазон частиц находится в интервале от 1 до 100 мкм с максимумом (90%) в области 30 мкм; 50% частиц составляет фракция размером 7,00 мкм и 10% – фракция частиц размером 0,3 мкм.

У *портландцемента*, основной диапазон частиц находится в интервале от 0,1 до 154 мкм, с максимумом (90%) в области 66,94 мкм, 50% составляет фракция частиц 19,59 мкм и 10 % – 2,27 мкм.

В тонкодисперсном *кварцевом песке* дюн (с удельной поверхностью 500 м²/кг) присутствуют частицы преимущественно кубовидной угловатой формы с развитой шероховатой поверхностью, основной диапазон находится в интервале от 1 до 150 мкм с максимумом (90%) в области 22,9 мкм; 50% составляет фракция частиц размером 7,14 мкм и 10% – фракция частиц размером 1,12 мкм.

Тонкодисперсный отсев дробления известняка (известняковая пыль) имеет прерывистую гранулометрию частиц с наличием 3-х четких пиков на интегральной кривой в области частиц 2,43 мкм, 15,16 мкм и 83,71 мкм, основной диапазон находится в интервале от 0,1 до 154 мкм, 90% составляют фракции частиц размером 77,32 мкм, 50% – 18,27 мкм и 10% – 1,62 мкм. Форма частиц угловатая, поверхность шероховатая.

У *метакаолина ВМК-45* кривая распределения частиц по размерам имеет прерывистый характер с двумя пиками в области частиц 2,75 мкм и 17,12 мкм и содержит значительное количество мелких частиц размером от 1 до 5 мкм, имеющих пластинчатую форму и слоистую шероховатую поверхность. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,09 до 136,4 мкм с максимумом (90%) в области 44,02 мкм; 50% оставляют частицы размером 12,43 мкм и 10% – размером 1,63 мкм.

При проектировании состава КГВ для создания плотной упаковки было проведено сравнение гранулометрических составов 3-х ,4-х и 5-и компонентных вяжущих путем расчетно-экспериментального моделирования по известным уравнениям «идеальных» кривых по Функу–Дингеру в сравнении с показателями плотности упаковки тонкодисперсных компонентов в отдельности (рисунок 1). Особенностью гранулометрии рекомендуемого 5-ти компонентного КГВ (рисунок 1, а) является наличие двух четко выраженных пиков на кривой распределения в области крупных и средних размеров частиц: первый пик соответствует максимальному содержанию частиц размером 106 мкм, второй – 11 мкм. Основной диапазон частиц находится в интервале от 0,07 до 409 мкм. Из всех частиц 90% составляет фракция размером 169 мкм, 50% – 29,28 мкм и 10% – 1,73 мкм.

Отклонение от «оптимальной» кривой Функа–Дингера для 5-ти компонентного КГВ составило 15,3% (рисунок 1, б), что обуславливает достаточно плотную упаковку его частиц с повышением прочностных показателей в 7-суточном возрасте на 14,5 %, в 28-суточном возрасте на 38,2% и коэффициента размягчения (Кр) на 17,7%, даже при снижении содержания гипсового вяжущего (таблица 2).

У разработанного 5-ти компонентного КГВ, включающего тонкодисперсный кварц, метакраолин ВМК-45 и известняковую пыль, после затворения водой значение скорости экзотермического эффекта выше (99,48 Дж/г·ч), чем у КГВ с минеральной добавкой тонкодисперсного кварца (96,37 Дж/г·ч).

С целью подтверждения стабильности сформировавшихся структур затвердевших КГВ, методами ДТА, РФА и растровой электронной микроскопии были проведены исследования фазовых превращений.

На дериватограмме гидратированного КГВ кривая ДТА (рисунок 3) содержит четыре эндотермических эффекта: 1-ый – с пиком при температуре 137 °С связан с удалением связанной воды при дегидратации двухводного гипса до полуводного; 2-ой – с максимумом при температуре 428 °С может относиться к двухводному гипсу; 3-ий – при 575 °С характеризует полиморфные превращения кварца, а 4-ый – при 736 °С связан, видимо, с разложением CaCO_3 .

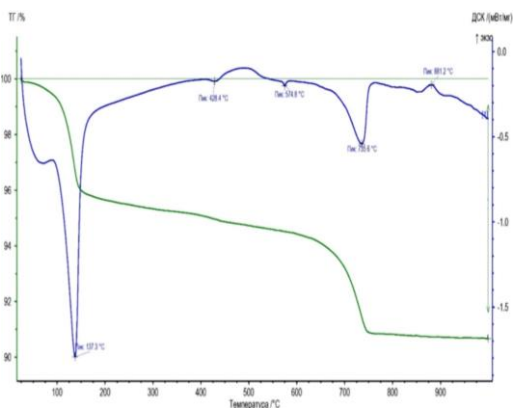


Рисунок 3 – ДТА затвердевшего КГВ с комплексом добавок (28 сут)

($d=3,07$; 2,88; 2,80; 2,4; 2,1; 1,81...Å). Видны линии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93$; 2,63; 1,93; 1,78...Å) очень слабой интенсивности, этрингит ($d=9,7$; 5,6; 4,92; 4,74...Å) – отсутствует.

Далее в работе были изучены особенности структурообразования КГВ с комплексом химических добавок: Mapf SU 84 (0,2%) + Plast Retard PE (0,08%) и Melflux 5581 F (0,2%)+PlastRetard PE (0,08%), которые позволили значительно замедлить сроки схватывания (до 45-00...46-00 мин и 47-00...48-00 мин, соответственно), с увеличением предела прочности при сжатии затвердевшего КГВ: через 2 часа с 6,9 МПа до 7,2...8,1 МПа, через 7 суток с 8,7 МПа до 14,6...15,7 МПа и через 28 суток с 12,3 МПа до 20,4 МПа, соответственно. Более эффективной является комплексная химическая

Экзотермический эффект в области 881 °С, видимо, связан с разложением $\text{CSH}(\text{B})$, также возможно взаимодействие CaO с активными минеральными добавками.

Результаты ДТА подтверждаются данными РФА. Было установлено, что основным цементирующим веществом является двухводный сульфат кальция ($d = 5,79$; 4,27; 3,06; 2,87... Å), присутствуют линии карбоната кальция ($d=3,03$; 2,49; 2,28; 2,08; 1,91; 1,87...Å) и кварца ($d=3,34$... Å), частично закристаллизованного гидросиликата кальция типа $\text{CSH}(\text{B})$

добавка Melflux 5581 F (0,2%)+PlastRetard PE (0,08%), позволяющая увеличить конечную прочность затвердевшего КГВ на 66%.

Анализ микроструктуры затвердевшего КГВ показал (рисунок 4), что при совместном применении минеральных и органических добавок в составе вяжущего на ранней стадии гидратации (через 2 часа) в основном образуются призматические кристаллы двугидрата, размер которых зависит от модификации сульфата кальция (рисунок 4, *а*). На снимке видны достаточно мелкие зародыши кристаллов β -полугидрата (размером около 0,2 мкм), а также относительно крупные кристаллы α -полугидрата (размером более 1,5...2 мкм), на формирование которых влияют химические добавки (суперпластификатор и замедлитель схватывания), образуя на поверхности кристаллов тончайшие пленки, оказывающие замедляющее действие на их рост.

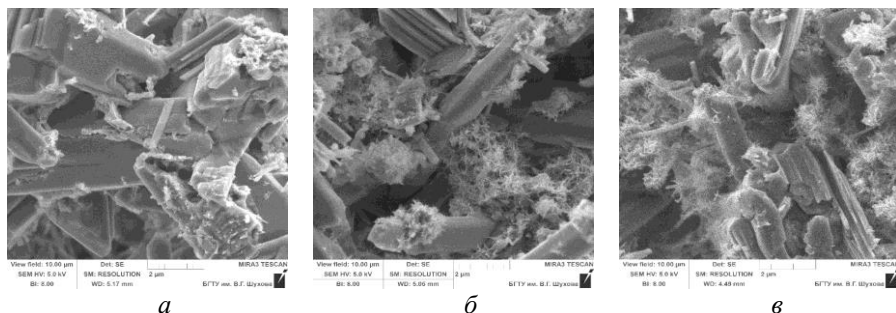


Рисунок 4 – Микроструктура затвердевшего КГВ:

а – 2 час; *б* – 7 сут.; *в* – 28 сут.

У образцов в возрасте 7 суток (рисунок 4, *б*) просматриваются микро- и нано- размерные новообразования низко-основных гидросиликатов кальция (C-S-H-гель) и др., которые уплотняют пустоты и поры между кристаллами гипса. К 28 суткам (рисунок 4, *в*) продолжается кристаллизация новообразований, в том числе низко-основных гидросиликатов кальция второй генерации, что способствует дальнейшему уплотнению твердеющей гипсоцементной системы. Таким образом, комплекс минеральных и органических добавок в составе КГВ обеспечивает формирование непрерывной мелкокристаллической структуры с упрочненными связями между кристаллами, что способствует повышению физико-механических характеристик гипсоцементного камня.

В четвертой главе представлены результаты разработки состава штукатурного раствора на водостойком КГВ с оптимальным зерновым составом заполнителя. Изучался зерновой состав двух видов песков песчаных дюн и песчаной фракции отсева дробления известняка.

Было установлено, что исследуемые пески согласно требованиям ГОСТ 8736-93* относятся: *по зерновому составу* – ко II классу; *по крупности*: мелкий – с $M_{кр}=1,59$ (кварцевый песок П₁), очень мелкий – с $M_{кр}=1,34$ (кварцевый песок П₂) и средний – с $M_{кр}=2,13$ (песчаная фракция отсева дробления известняка П₃), и не вписываются по гранулометрическому составу в график с областью нормируемого зернового состава (рисунок 5).

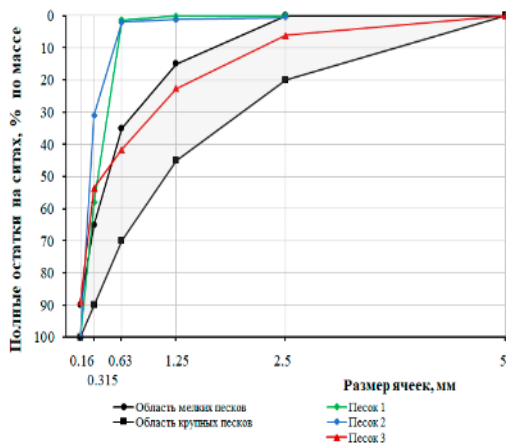


Рисунок 5 – Гранулометрические кривые используемых песков и область нормируемого зернового состава «качественных» песков

Далее, для получения оптимального гранулометрического состава заполнителя, приближенного к «идеальной» кривой Фуллера и обеспечивающего наиболее плотную упаковку в штукатурном растворе на КГВ, была рассмотрена возможность его обогащения путем смешивания двух видов песков. С этой целью для каждого вида заполнителя рассчитывали гранулометрический состав его частиц с помощью уравнения «оптимальной» кривой Фуллера, а затем строили кривые рассеивания

(по полному проходу частиц через сита и по частным остаткам), и проводили сравнение с «оптимизированным» составом.

Полученные расчетные данные вводились в программу «Granlab», предназначенную для автоматизированного расчета оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей, в сравнении к «идеальной» кривой распределения Фуллера по полному проходу через каждое сито.

Было предложено, не выходя из норм зернового состава, расширить диапазон для «идеальной» кривой Фуллера со сдвигом на каждом сите влево и вправо на 5%, что обеспечит более гибкое регулирование зернового состава смеси заполнителей. С помощью программы «Granlab» исследуемые заполнители были разделены на 5 частей: П₁ – песок оставлен без изменения; П₂ – песок разделен на две части: первая часть (П₂₋₁) с размером ячеек от 2,5 до 0,63 мм; вторая часть (П₂₋₂) с размером ячеек 0,16 мм; П₃ – песок разделен также на две части: первая часть (П₃₋₁) – с размером ячеек 2,5...1,25 мм; вторая часть (П₃₋₂) с размером ячеек – от 0,315 мм до 0,16 мм. Результаты расчета количественного содержания разделенных заполнителей «оптимального» гранулометрического состава представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Содержание частиц заполнителей «оптимального» гранулометрического состава

№	Вид песка	Содержание, %	Размер ячеек сит, мм				
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
1	П ₁₋₁	39,5	39,5	39,5	39,0	16,6	0,1
2	П ₂₋₂	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	0,0
3	П ₃₋₁	54,4	46,4	24,8	0,0	0,0	0,0

Рассчитанный с помощью программы «Granlab» гранулометрический состав заполнителя полностью соответствует выделенной области нормируемого зернового состава «качественных» песков (рисунок 6).

С учетом величины истинной плотности кварцевого песка (2540 кг/м³) и истинной плотности известняка (2600 кг/м³), расчетная пустотность для П₁, П₂, П₃ и «оптимизированной» смеси заполнителей составила – 39,5%; 41,1%, 38,5% и 31,7%, а снижение пустотности по отношению к исходным пескам – 24,6%, 29,7% и 21,5%, соответственно (таблица 4).

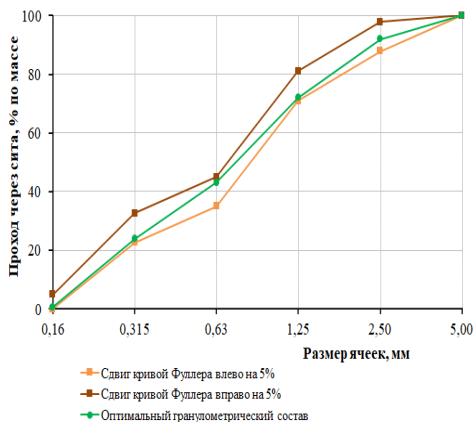


Рисунок 6 – Графическое изображение «идеальной» области гранулометрии частиц оптимизированной смеси заполнителей

Таблица 4 – Насыпная плотность и пустотность заполнителей

Вид песка	Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %
П ₁	1540	39,5
П ₂	1501	41,1
П ₃	1600	38,5
Оптим. состав	1635	31,7

Таким образом, за счет рационального гранулометрического состава КГВ и «оптимизированной» смеси заполнителей с достаточно плотной упаковкой частиц, а также суперпластификатора Melflux 5581 F и стабилизатора MAPF Forbo-Crete S 010, достигнута минимальная водопотребность штукатурной смеси при требуемой подвижности и повышена прочность хранившихся во влажных условиях образцов затвердевшего раствора в 28-ми суточном возрасте – на 35 %, сухих образцов – на 47 %, коэффициент размягчения – с 0,69 до 0,72 (таблица 5).

Таблица 5 – Состав и свойства штукатурных растворов на КГВ

№	Доля КГВ к заполнителю	В/Вяз	Начало схват., мин	Подвиж., мм	R _{сж} , МПа, через			K _p
					2 час	7 сут	28 сут (вл/сух)	
1	1:2	0,50	52	150	2,9	9,5	10,2/12,1	0,69
2	1:2*	0,49	51	150	3,0	10	13,8/17,8	0,72

Примечание: * – состав штукатурных растворов с заполнителем «оптимальной» гранулометрии. В исследуемых составах использовали замедлитель сроков схватывания Plast Retard PE (0,08 %) и СП Melflux 1461 F (0,2%).

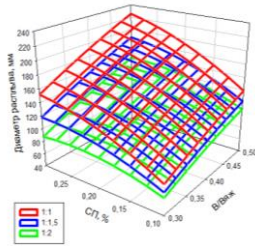
С использованием математического аппарата получены модели влияния рецептурно-технологических факторов на свойства штукатурных смесей и затвердевших растворов на КГВ. Был запланирован активный 3-х факторный эксперимент. Значения показателей факторов варьирования представлены в таблице 6. В качестве отклика выбраны: подвижность Р (Y₁); начало сроков схватывания – Т (Y₂); пределы прочности при изгибе: через 2 часа – R_{из}²(Y₃), в 7 суток – R_{из}⁷(Y₄) и в 28 суток – R_{из}²⁸(Y₅); пределы прочности при сжатии: через 2 часа – R_{сж}²(Y₆), в 7 суток – R_{сж}⁷(Y₇) и в 28 суток – R_{сж}²⁸(Y₈); K_p⁷ в 7 суток (Y₉).

Таблица 6 – Значения показателей факторов варьирования

Факторы варьирования		Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Доля заполнителя, частей	X ₁	1	1,5	2	10
В/Вяз отношение	X ₂	0,3	0,4	0,5	0,1
Расход суперпластификатора, %	X ₃	0,1	0,2	0,3	0,1

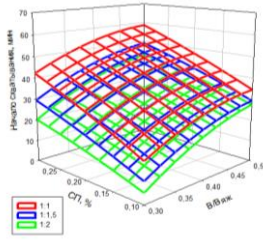
Выявленные закономерности изменения свойств штукатурных растворов и полученные зависимости позволяют оценить влияние каждого фактора с качественной и количественной стороны, и могут быть использованы для прогнозирования рецептур (рисунок 7).

В работе с помощью конического пластометра типа КП-3 установлено, что при сохранении высокого пластифицирующего эффекта суперпластификатора Melflux 5581 F (0,2% от массы КГВ), при оптимальной дозировке замедлителя схватывания Plast Retard PE (0.08 %, от массы КГВ) и стабилизатора MAPF Forbo-Crete S 010 (0,1% от воды затворения) период формирования структуры удлиняется до 45 минут, что позволяет регулировать реологические свойства штукатурного раствора на КГВ на начальном этапе с повышением пластической прочности в 17 раз – с 208 кПа до 3523 кПа.



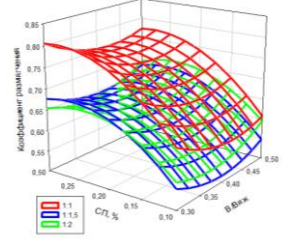
подвижность

$$Y_1 = 138,4 - 23,5X_1 + 29,5X_2 + 27X_3 + 1,9 \cdot (X_1)^2 - 3,0 \cdot X_2^2 - 10,5X_3^2 - 2,5X_1X_2 - 11,3X_1X_3 + 5X_2 \cdot X_3.$$



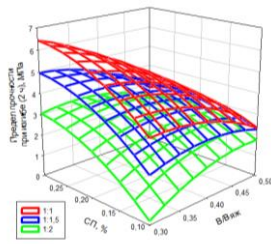
начало схватывания.

$$Y_2 = 3,5 - 7,3X_1 + 9,7X_2 + 9,8 X_3 + 1,7 (X_1)^2 - 3,3(X_2)^2 - 0,8(X_3)^2 + 1,5 X_1X_2 - 2,3X_1X_3.$$



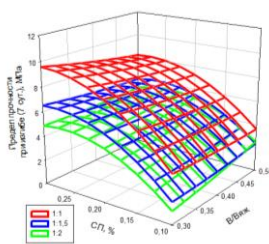
коэффициент размягчения

$$Y_3 = 0,63 - 4,1X_1 + 0,1X_3 + 5,3(X_1)^2 + 3,3(X_2)^2 - 0,1 (X_3)^2 + 0,02X_1X_2 - 0,02X_1X_3$$



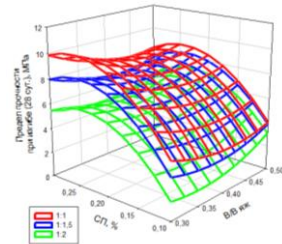
предел прочности при изгибе через 2 часа

$$Y_4 = 4,1 - X_1 - 0,5X_2 + 0,8X_3 - 0,2(X_1)^2 - 0,5(X_2)^2 - 0,6(X_3)^2 + 0,7 X_1X_2 + 0,04X_1X_3 - 0,6 X_2X_3.$$



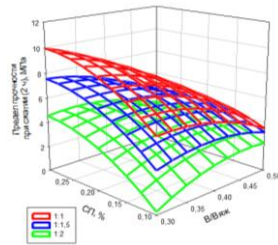
предел прочности при изгибе через 7 суток

$$Y_5 = 5,4 - 1,5X_1 + 2,1X_3 + 0,7(X_1)^2 + 0,1(X_2)^2 - 1,4(X_3)^2 + 0,4X_1X_2 - 0,5X_1X_3 - 0,3 X_2X_3$$



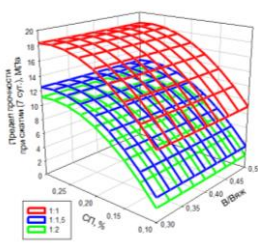
предел прочности при изгибе через 28 суток

$$Y_6 = 7,2 - 1,3 X_1 + 2,0X_3 - 0,3(X_1)^2 + 0,9(X_2)^2 - 2,4(X_3)^2 + 0,5X_1X_2 - 0,4X_1X_3 - 0,3 X_2X_3$$



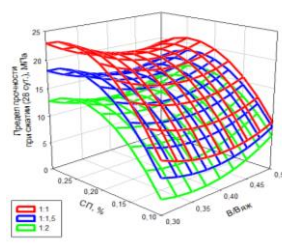
предел прочности при сжатии через 2 часа

$$Y_7 = 6,2 - 1,7X_1 - 0,9 X_2 + 1,3X_3 - 0,3(X_1)^2 - 0,7(X_2)^2 - 0,9(X_3)^2 + 1,1 X_1X_2 - 0,01X_1X_3 - 0,9 X_2X_3$$



предел прочности при сжатии через 7 суток

$$Y_8 = 10,7 - 3,6 X_1 + 4,6X_3 + 2,3(X_1)^2 + 0,05(X_2)^2 - 2,9 (X_3)^2$$



предел прочности при сжатии через 28 суток

$$Y_9 = 15,59 - 3,19 X_1 + 5,08X_3 - 0,34(X_1)^2 + 2,37(X_2)^2 - 5,79(X_3)^2 + 0,98 X_1X_2 - 0,95X_1X_3 - 0,09 X_2X_3.$$

Рисунок 7 – Номограммы и уравнения регрессии, иллюстрирующие влияние факторов варьирования на свойства штукатурного раствора на КГВ: подвижность, время начала схватывания, коэффициент размягчения, прочность при изгибе через 2 час, 7 сут и 28 сут; прочность при сжатии через 2 час 7 сут и 28 сут

Исследовано влияние комплекса химических добавок на реологические свойства раствора. Установлено, что при введении в штукатурную смесь комплексной химической добавки Mellflux 5581 F (0,2%) + Plast Retard PE (0,08%)+Mapf Forbo Crete S010 (0,1%), по сравнению с контрольным составом только с замедлителем сроков схватывания, снижаются вязкость в 3,5 раза (с 26 Па·с до 7,5 Па·с) и предельное напряжение сдвига в 22 раза (с 110 Па до 5 Па), что способствует уменьшению нагрузки на электродвигатель смесителя при машинном нанесении.

Далее была проведена оценка степени смачиваемости поверхности затвердевшего штукатурного раствора на КГВ с помощью системы KRUSS серии DSA30, Германия (рисунок 8). Было установлено, что поверхность исследуемого штукатурного раствора на водостойком КГВ является гидрофобной, т.к. при попадании капли воды на его поверхность угол смачивания превышает 90° , что позволяет его использовать для наружной отделки фасадов зданий и сооружений.



Рисунок 8 – Изображения капли дистиллированной воды на поверхности затвердевшего штукатурного раствора на КГВ

Установлены высокие показатели водоудерживающей способности штукатурного раствора на КГВ (96,5 %) и прочности сцепления с бетонным основанием (0,8 МПа).

Таким образом, в результате выполненных исследований был разработан состав штукатурного раствора на основе КГВ с повышенными характеристиками (таблица 7).

Таблица 7 – Основные показатели качества штукатурного раствора на КГВ

Наименование показателей	Значение показателей	
	Результаты испытаний	Требования ГОСТ Р 58279 – 2018
Подвижность, мм: при производстве работ вручную при механизированном производстве работ	150 160	150±10 160±10
Начало схватывания с момента затворения водой не менее, мин.: при производстве работ вручную при механизированном. производстве работ	45 60	30 60
Водоудерживающая способность, %	97	не менее 95
Предел прочности (7 сут), МПа, не менее: - на растяжение при изгибе - при сжатии	5 - 6 9 - 13	1 2
Прочность сцепления с основанием, МПа, не менее	0,8	0,3

В пятой главе предложена технологическая схема приготовления КГВ и сухой смеси для штукатурных растворов на его основе. Технико-экономическая эффективность разработанного штукатурного раствора на основе КГВ обусловлена использованием некондиционных кварцевых песков песчаных дюн в качестве минеральной добавки и заполнителя, обогащенного песчаной фракцией отсева дробления известняка, с комплексом химических добавок и достижением повышенных физико-механических характеристик и водостойкости.

Для внедрения предложенных технологических решений разработан пакет документов. Внедрение было осуществлено на предприятиях по производству товарного бетона «HarfoushConcrete» и строительных материалов «Al-Bayaderblockfactory» в г. Рамаллах (Палестина). Опытное апробирование разработанного состава штукатурного раствора осуществлено в компании «Al-Zaytouneh» при выполнении отделочных работ в 2-х домах коттеджного типа (площадь 500 м² при толщине отделочного слоя 10 мм) в пригороде г. Рамаллах, в селе Дербзи, в Палестине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования штукатурных растворов на основе водостойких КГВ, включающих тщательно подобранную смесь гипсовых вяжущих (β -модификации марки Г-5 БП + α -модификации марки ГВВС-16), портландцемента, полифункциональных органо-минеральных добавок, а также заполнителя из некондиционных кварцевых песков дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка оптимизированного гранулометрического состава, обеспечивающие повышенные физико-механические характеристики и водостойкость.

Обоснованы и экспериментально подтверждены технологические решения, обеспечивающие получение композиционного гипсового вяжущего и штукатурного раствора на его основе, с повышенными физико-механическими характеристиками и водостойкостью, путем модификации базовой вяжущей системы комплексом полифункциональных органо-минеральных добавок, а также использования заполнителя с оптимизированным гранулометрическим составом из некондиционных песков песчаных дюн Палестины, обогащенных песчаной фракцией отсева дробления известняка.

Выявлено совокупное влияние дозировки компонентов, гранулометрического состава КГВ и оптимизированной смеси заполнителей на водопотребность штукатурного раствора, что позволило при минимальном расходе воды в смеси для требуемой подвижности достичь повышения коэффициента размягчения и прочности затвердевшего штукатурного раствора в 7-ми суточном возрасте – на 20%,

в 28-ми суточном возрасте – на 47%, обеспечить увеличение степени гидрофобности поверхности камня за счёт создания высокоплотной упаковки на двух масштабных уровнях (КГВ и заполнитель), а также использования суперпластификатора Melflux 5581 F, позволяющие управлять процессом структурообразования на макро- и микроуровне.

Установлена эффективность использования тонкодисперсного кварцевого песка дюн с удельной поверхностью $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ при отношении «цемент : песок – 1:2» с дополнительным введением метакаолина ВМК-45 – 0,5%, и известняковой пыли – 1,5% (от массы КГВ) в качестве минеральных добавок. Аморфная фаза SiO_2 в их составе способствует связыванию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющемуся при гидратации C_3S с устранением условий роста высокоосновных гидроалюминатов кальция, этtringита, вызывающих саморазрушение структуры за счет кристаллизационного давления. Более крупные частицы кварцевого песка и известняковой пыли выполняют роль микрозаполнителя, а также являются центрами кристаллизации для новообразований, обеспечивая быстрый набор прочности КГВ при твердении.

Выявлено, что комплексные химические добавки, включающие Mapf SU 84 (0,2%) + Plast Retard PE (0,08%) и Melflux 5581 F (0,2%) + Plast Retard PE (0,08%), позволяют замедлить начало схватывания гипсоцементных вяжущих более чем в 5 раз (с 8-30 до 46-00 мин). Более эффективной является комплексная химическая добавка Melflux 5581 F (0,2%)+Plast Retard PE (0,08%), позволяющая повысить прочность затвердевшего КГВ на 66 % (до 20,4 МПа).

В результате совокупного влияния оптимального гранулометрического состава заполнителя из обогащенных некондиционных песков дюн песчаной фракцией отсева дробления известняка и частиц КГВ, а также органических добавок – суперпластификатора Melflux 5581 F, замедлителя схватывания Plast Retard PE и стабилизатора MAPF Forbo-Crete S 010 на свойства штукатурного раствора при требуемой подвижности смеси была реализована плотная упаковка зерен минерального скелета.

При уменьшении на 12 % водопотребности штукатурного раствора на КГВ вязкость снижается в 3,5 раза (с 26 Па·с до 7,5 Па·с), предельное напряжение сдвига в 22 раза (с 110 Па до 5 Па; предел прочности при сжатии затвердевших образцов в 7-ми суточном возрасте повышается на 20%, в 28-ми суточном возрасте (хранившихся во влажных условиях) – на 35%, высушенных до постоянной массы образцов – на 47%; коэффициент размягчения повышается с 0,69 до 0,72...0,76; повышается гидрофобность поверхности затвердевшего штукатурного раствора на КГВ, показатель водоудерживающей способности до 97 % и показатель прочности сцепления с бетонным основанием до 0,8 МПа.

Предложена технологическая схема приготовления КГВ и сухой смеси для штукатурных растворов на его основе.

Разработанный штукатурный раствор на основе КГВ прошел промышленное внедрение при выполнении отделочных работ в 2-х домах коттеджного типа в пригороде г. Рамаллах, в селе Дербзи (Палестина).

Теоретические и экспериментальные результаты работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству сухих строительных смесей, а также для использования в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований. Исследования целесообразно продолжить в направлении изучения особенностей протекания процессов структурообразования экономичных КГВ и композитов на основе доступных компонентов природного и техногенного происхождения с целью повышения их долговечности, разработки широкой гаммы рецептур различного назначения (стеновых, отделочных и др.) на основе разработанной минеральной системы, исследования их свойств, внедрения в повседневную строительную практику.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. **Отман, Азми С.А.** Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости / С.А. Азми Отман, Н.В. Чернышева, М.Ю. Дребезгова, Е.В. Коваленко // Строительные материалы. – 2023. – №5. – С. 73–80. (RSCI)

2. **Отман, Азми С.А.** Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок / С.А. Азми Отман, Н.В. Чернышева, М.Ю. Дребезгова, Е.В. Коваленко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – №4. – С. 24–33.

3. **Отман, Азми С.А.** Влияние гранулометрического состава композиционного гипсового вяжущего на его свойства / С.А. Азми Отман, Н.В. Чернышева, М.Ю. Дребезгова, Б.И. Марголис, Т.Б. Новиченкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – №6. – С. 8–16.

4. **Отман, Азми С.А.** Влияние зернового состава заполнителя на свойства штукатурных растворов на основе композиционного гипсового вяжущего // С.А. Азми Отман, Н.В. Чернышева, В.П. Денисов, М.Ю. Дребезгова // Строительные материалы. – 2023. – №8. – С. 35–41. (RSCI)

В рецензируемых российских изданиях, включенных в базу РИНЦ

5. **Чернышева, Н.В.** Бетоны на композиционном гипсовом вяжущем с использованием отходов дробления известняка / Н.В. Чернышева, **С. А. Азми Отман**, Д.А. Моторькин, А.Л. Бочарников // Университетская наука. – 2021. – №1(11). – С. 87–90.

В сборниках трудов конференций

6. **Отман, Азми С.А.** Разработка состава композиционного гипсового вяжущего для сухой штукатурной смеси / С.А. Азми Отман, Е.В. Коваленко, Д.В. Шпаковская // Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – С. 114–117.

7. **Чернышева, Н.В.** К вопросу об использовании отходов камнепереработки известняка в бетоне на КГВ / Н.В. Чернышева, **С.А. Азми Отман**, Д.А. Моторыкин // Сб. материалов X Междунар. науч.-практич. конф. «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий» г. Воронеж, 8-9 сентября 2021 г. Москва: Изд-во МИСИ-МГСУ. – 2021. – С. 164–170.

8. **Чернышева, Н.В.** Штукатурные растворы на основе КГВ с оптимальным зерновым составом заполнителя / Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик, **С.А. Азми Отман**, М.Ю. Дребезгова // Сб. материалов XI Междунар. конф. по гипсу «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий» п. Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, 2023 г. Москва: Изд-во МИСИ-МГСУ. – 2023. – С.182–193.

9. **Отман, Азми С.А.** Определение водоотталкивающих свойств штукатурных растворов на КГВ, модифицированных органическими добавками. / С.А. Азми Отман, Н.В. Чернышева // Сб. материалов V111 Всероссийской науч.-практич. конф. «Инженерное дело на Дальнем Востоке России». – Владивосток. – 2023. – С. 152–156.

Объекты интеллектуальной собственности

10. Программа для ЭВМ (свидетельство о депонировании результата интеллектуальной деятельности №223.018.52В8). Название разработки: sand (02.05.2023 г.).

Отман Азми С.А.

**ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО
ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО (на примере Палестины)**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.10.2023 г. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 1,28
Тираж 120 экз. Заказ № 125

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 4