

На правах рукописи



ГХЕБРЕМЕДХИН КИДАНЕ ВЕЛДАЙ

**СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ
НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

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

Белгород – 2026

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

- Научный руководитель** доктор технических наук, доцент
Володченко Анатолий Николаевич
- Официальные оппоненты** **Логанина Валентина Ивановна,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,
заведующая кафедрой «Управление качеством»
- Панченко Юлия Федоровна,**
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доцент кафедры
«Строительные материалы»
- Ведущая организация** ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»

Защита состоится «22» мая 2026 г. в 13 час. 00 мин. 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, 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/Ghebremedhin

Автореферат разослан «__» марта 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Денис Юрьевич Суслов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Жилищная проблема имеет глобальные масштабы, остро отражаясь на экономическом развитии и демографии государств Африки, включая Государство Эритрея. Ограниченность внутреннего рынка строительных материалов является ключевым препятствием для устойчивого роста строительной отрасли страны. Значительная зависимость от импорта цемента, арматуры, керамических изделий существенно повышает стоимость строительства и снижает доступность качественного жилья для населения. Современное развитие требует кардинальных изменений подходов к строительству, за счет внедрения передовых технологий, обеспечивающих снижение себестоимости строительных материалов, использования экологически чистых материалов на основе местного сырья и диверсификации ассортимента продукции в соответствии с экономической и экологической политикой правительства.

В связи с этим разработка рецептурно-технологических параметров производства силикатных материалов плотной структуры с использованием сырьевых ресурсов Государства Эритрея является актуальной задачей, решение которой позволит расширить номенклатуру доступных для строительства строительных материалов и снизить зависимость от импорта.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень разработанности темы. Производство силикатных материалов гидротермального твердения является хорошо зарекомендовавшей себя технологией в странах с мощным промышленным потенциалом. Исследования, проведенные в последние десятилетия рядом научных школ, были направлены на улучшение эксплуатационных характеристик силикатных материалов путем введения различных добавок, а также использования нетрадиционного алюмосиликатного сырья, за счет которого ускоряется фазо-структурообразование в связующих системах, что повышает физико-механические показатели силикатных материалов. Исследования показали, что для этих целей пригодны только глины определенного минерального состава и генезиса. Однако возможно увеличение разнообразия используемых глинистых пород за счет использования в сырьевой смеси для производства силикатных материалов дополнительно вулканического пепла, большие запасы которого находятся на территории Государства Эритрея.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

– исследование химического и минерального состава песчано-глинистых отложений и вулканических пород Государства Эритрея;

– изучение процессов фазо- и структурообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ на примере вяжущего гидротермального твердения, полученного на основе песчано-глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– разработка математических моделей, описывающих влияние содержания глинистых пород и вулканического пепла на свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры для определения рациональных составов сырьевых смесей;

– разработка технологической схемы производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– разработка нормативно-технической документации для внедрения результатов научной работы.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея, заключающееся во введении в состав вяжущего на основе известки, глины и вулканического пепла (ВП). Установлено, что эффективность применения ВП повышается при использовании глинистых пород с низким содержанием SiO_2 , что связано с наличием активной аморфной фазы кремнезема в составе ВП, и, соответственно, снижением соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ менее 0,2. Такое композиционное вяжущее обеспечивает получение силикатных материалов плотной структуры с марками до М 200 (неавтоклавный) и до М 250 (автоклавный).

Выявлены особенности процессов структурообразования известково-глино-песчаной смеси с содержанием ВП в условиях пропарки и при автоклавировании, заключающиеся в том, что рентгеноаморфные фазы и минералы с дефектной кристаллической структурой, входящие в состав ВП, при взаимодействии с известью образуются гидросиликаты кальция, в том числе алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты, что способствует формированию плотной микроструктуры цементирующего вещества и обеспечивает высокие физико-механические показатели силикатных материалов плотной структуры.

Установлены закономерности влияния содержания активного CaO , глинистых пород и вулканического пепла на предел прочности при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение и коэффициент размягчения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры, что позволяет определить рациональные составы сырья для получения силикатных материалов с заданными физико-механическими показателями с учетом минимизации материальных и энергетических затрат.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о гидротермальных процессах фазо- и структурообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, протекающих в условиях твердения силикатных материалов плотной структуры. Установлено,

что алюмосиликатное сырье, представленное глинистыми породами и вулканическим пеплом, активно реагирует с известью в гидротермальных условиях, за счет чего формируются связующие вещества, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Полученные результаты исследований можно использовать для расширения поиска сырья на территории Государства Эритрея, пригодного для получения силикатных материалов.

В результате разработаны предельные составы прессованных силикатных материалов гидротермального твердения на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, позволяющие получать автоклавные и неавтоклавные силикатные кирпичи и камни с прочностью на сжатие соответственно 16–20 МПа и 18–25 МПа, соответствующие классам средней плотности 2, маркам по прочности до M250, маркам по морозостойкости до 50, водопоглощению не ниже 6 %.

Предложена технологическая схема производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, включающая подготовку вяжущего совместным помолом извести, глины и вулканического пепла, смешение с песком, гашение сырьевой смеси, получение изделий методом полусухого прессования, автоклавную обработку или пропарку.

Методология и методы исследований. Методологической основой диссертационной работы являются научные разработки в области стеновых силикатных материалов, получаемых на основе сырья различных генетических типов. Исследование алюмосиликатных пород Государства Эритрея и фазового состава продуктов гидротермального твердения заключалось в определении химического состава рентгенофлуоресцентным методом анализа (XRF) и минерального состава с использованием дифрактометра и дериватографа. Микроструктуру сырья и полученных композиционных материалов изучали с помощью растрового электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, оборудованного устройством для проведения элементного анализа методом энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС). Радиационно-защитные свойства материалов изучали с использованием радиоизотопного источника ^{60}Co . Оптимизацию составов сырьевых смесей проводили с использованием метода математического планирования эксперимента. Физико-механические испытания проводили в соответствии с нормативными документами.

Положения, выносимые на защиту:

– обоснованное и экспериментально подтвержденное технологическое решение получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея;

– особенности процессов структурообразования известково-глино-песчаной смеси с вулканическим пеплом при автоклавировании и в условиях пропарки;

– закономерности влияния состава формовочного сырья на эксплуатационные свойства силикатных материалов плотной структуры, полученных в условиях автоклавной обработки и пропарки;

– составы и свойства прессованных силикатных материалов гидротермального твердения (автоклавные и неавтоклавные) на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея;

– технология производства автоклавных и неавтоклавных стеновых материалов плотной структуры на основе сырья Государства Эритрея.

Степень достоверности результатов обеспечена применением комплекса современных взаимодополняющих методов исследования сырьевых и синтезированных материалов, статистической обработкой экспериментальных данных, согласованностью полученных данных с фундаментальными положениями строительного материаловедения и научными результатами других исследователей.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: XIII и XIV Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2021, 2024); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 300-летию Российской академии наук (Белгород, 2022); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, 2023); Международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве» (Брянск, 2023, 2024, 2025); VI Международной (XIX Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2023); XI Международной научно-практической конференции, приуроченной к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева (Омск, 2024).

Внедрение результатов исследований. Результаты экспериментальных исследований планируется использовать при выполнении комплексной целевой программы по развитию строительной отрасли в Государстве Эритрея.

Для внедрения результатов диссертационной работы разработаны следующие нормативные документы:

– рекомендации по использованию алюмосиликатных пород Государства Эритрея для производства автоклавных и пропаренных силикатных материалов;

– технологический регламент на организацию производства автоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– технологический регламент на организацию производства пропаренного силикатного кирпича с использованием, вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– планируется строительство завода по производству силикатного кир-

пича на основе глинистых пород и вулканического пепла.

Теоретические и экспериментальные результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке: бакалавров и магистров по направлениям 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», магистров по направлению 28.04.03 «Наноматериалы» в БГТУ им. В.Г. Шухова (Российская Федерация), а также при подготовке инженеров по специальности «Гражданские инженеры» в Государстве Эритрея.

Публикации. Основные положения работы изложены в 9 научных публикациях, в том числе: в 3 статьях в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ (К1).

Личный вклад автора. Автором проведен сбор и анализ литературных источников, исследованы состав и свойства алюмосиликатных пород Государства Эритрея как сырья для производства стеновых материалов гидротермального твердения, изучены процессы фазообразования в системах при гидротермальной обработке. На основе данных расчетов по уравнениям регрессии определены составы сырьевых смесей с использованием сырья Государства Эритрея. Проведен комплекс исследований физико-механических свойств силикатных материалов плотной структуры, последующая обработка и анализ полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста, включающего 16 таблиц, 58 рисунков, список литературы из 124 наименований, 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор литературы по проблемам модернизации методов строительства за счет совершенствования производственных технологий, использования местного сырья и диверсификации ассортимента продукции. Показано, что каждое из традиционных архитектурных сооружений именуемое свою уникальную эстетическую привлекательность нуждается в модернизации в соответствии с требованиями экологической безопасности и социально-экономическими потребностями Государства Эритрея. Решение жилищной проблемы возможно за счет производства материалов гидротермального твердения на основе местного алюмосиликатного сырья, в частности широко распространенных глинистых пород. Для получения силикатных материалов пригодны глинистые породы определенного состава и генезиса.

Повысить эффективность использования глинистого сырья в составе вяжущего можно за счет дополнительного использования вулканического пепла, который, обладая высокой активностью, ускорит в гидротермальных условиях процессы фазообразования и формирование цементирующего ве-

щества, обеспечивающего высокие эксплуатационные показатели силикатных материалов, что явилось *рабочей гипотезой* данного исследования.

Во **второй главе** представлены характеристики использованных в работе сырьевых материалов: известь АО «Стройматериалы», песок стандартный полифракционный (наиболее приближенный по составу и гранулометрии к пескам Эритреи), глинистые породы, вулканический пепел и песок месторождений Эритреи. Изучение вещественного состава сырья и полученных материалов проводили с использованием рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового (РФА), дифференциально-термического (ДТА) методов анализа. Микроструктуру изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, оборудованного устройством ЭДС. Изложены методики лабораторных исследований силикатных материалов гидротермального твердения. Для изучения свойств силикатных материалов плотной структуры использовали метод планирования экспериментов. Испытания проводили в соответствии с нормативными документами.

В **третьей главе** приведена характеристика сырьевой базы силикатных материалов Государства Эритрея. Почвы Государства Эритрея в большинстве своем являются алюмосиликатными породами, образовавшимися непосредственно в результате выветривания нижележащих коренных пород. Наиболее распространенной породой являются латериты, покрывающие около 33 % суши. В районе вулкана Алид находятся большие залежи вулканического пепла, образовавшиеся сотни тысяч лет назад.

Исследованы состав и свойства алюмосиликатных пород, представленных: глинистыми породами месторождения Дэбуб, Маэкель; песком месторождения Дэбуб; латеритом месторождения Маэкель; вулканическим пеплом. Глина Дэбуб отличается большим содержанием кварца (67,15 мас. %) и минимальным содержанием Fe_2O_3 (3,1 мас. %) (табл. 1). В глине Маэкель содержание SiO_2 составляет 55,49 мас. %, Al_2O_3 – 30,17 мас. %, что свидетельствует о высоком содержании глинистых минералов. Содержание Fe_2O_3 в латерите составляет 48,40 мас. %, что в 1,5 раза выше, чем содержание SiO_2 (31,66 мас. %), что связано, вероятно, с существованием вторичных минералов, таких как гематит, гётит и слюдистые минералы.

Таблица 1. Химический состав алюмосиликатных пород

Порода	Содержание оксидов, мас. %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	Na_2O	K_2O	Σ
Глина месторождения Дэбуб	67,15	19,41	3,10	0,42	1,56	2,00	0,03	0,18	2,61	3,34	99,80
Глина месторождения Маэкель	55,49	30,17	8,42	0,57	1,27	1,24	0,05	0,21	0,43	1,88	99,73
Латерит	31,66	17,34	48,40	0,37	0,10	0,26	0,40	0,08	–	0,35	98,96
Вулканический пепел	68,82	15,49	2,56	0,21	2,22	0,72	0,12	0,05	5,04	4,23	99,73
Песок месторождения Дэбуб	74,10	15,42	1,26	0,15	1,18	0,60	–	0,04	3,37	3,70	99,82

Глина Дэбуб в основном состоит из песчано-пылеватых частиц размером до 25 мкм, которые связаны глинистыми частицами (рис. 1, *а*). Глина Маэфель представляет собой рыхлый композит матричной микроструктуры, характеризующийся наличием сплошной глинистой матрицы (рис. 1, *б*), наблюдаются пакеты минерала каолинита. Латерит – рыхлый композит (рис. 1, *в*) турбулентной микроструктуры, сложенный микроагрегатами размером до 40 мкм и состоящий из скопления кристаллов хлорита, слюды и каолинита.

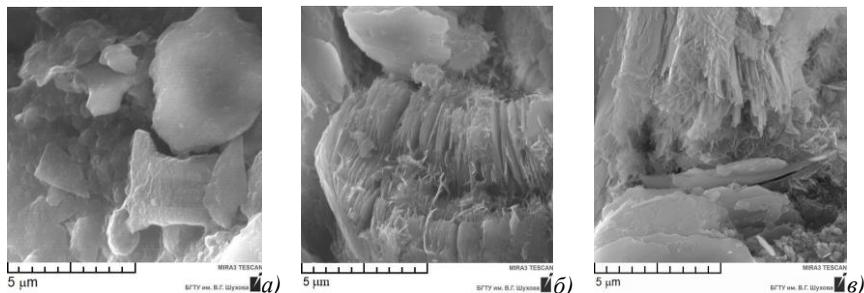


Рис. 1. Микроструктура глинистых пород (изображение SE), РЭМ: $\times 1000$;
а – глина Дэбуб; *б* – глина Маэфель; *в* – латерит

По данным РФА, ДТА, электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии основными породообразующими минералами глины Дэбуб являются кварц и полевые шпаты. В меньшем количестве содержатся гематит, ильменит, апатит, иллит и каолинит. Глины Маэфель содержат преимущественно кварц, каолинит и гётит, в меньшем количестве содержатся ильменит, иллит, монтмориллонит и микроклин. Основными породообразующими минералами латерита являются каолинит, кварц и лимонит.

Вулканический пепел состоит преимущественно из рентгеноаморфной фазы и полевого шпата. В меньшем количестве содержатся кварц, слюда, гематит, ильменит и роговая обманка.

Песок месторождения Дебуб по химическому, гранулометрическому и минеральному составу соответствует ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения».

Проведена оценка пригодности алюмосиликатных пород по химическому составу в качестве сырья для производства силикатных материалов с использованием диаграммы Августиника. Установлено, что глина месторождения Дэбуб, для которой соотношение Al_2O_3/SiO_2 составляет 0,17, пригодна для производства автоклавных силикатных материалов плотной структуры. Латерит и глина месторождения Маэфель обладают повышенным значением соотношения Al_2O_3/SiO_2 (соответственно 0,320 и 0,319) и не пригодны в качестве сырья для получения силикатных материалов. Снизить соотношение Al_2O_3/SiO_2 в этих породах можно за счет добавки вулканического пепла, имеющего существенно меньшее значение Al_2O_3/SiO_2 (0,133).

Кроме этого, вулканический пепел содержит аморфную фазу, что окажет положительное влияние на процесс фазообразования в сырьевой смеси.

В четвертой главе приведены результаты изучения свойств силикатных материалов гидротермального твердения плотной структуры и процессов фазообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ на основе алюмосиликатных пород – глин месторождения Дэбуб, Маэфель, латерита и вулканического пепла.

Сравнительная оценка влияния алюмосиликатных пород на прочность силикатных материалов проводилась при одинаковом содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 8 % (рис. 2). Анализ показал, что положительное влияние на прочностные показатели автоклавных силикатных материалов плотной структуры оказывает только глина Дэбуб и вулканический пепел. Прочность при рациональном содержании алюмосиликатных пород увеличивается с 17,7 МПа (для материала на основе кварцевого песка) до 25,86 (при введении глины) и 25,0 МПа (при введении ВП). Глина Маэфель снижает прочность образцов до 16 МПа. При содержании латерита 40 мас. % прочность составляет 18 МПа.

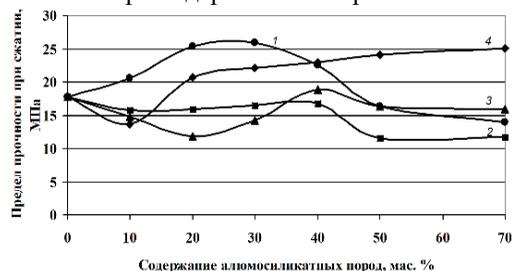


Рис. 2. Предел прочности при сжатии силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания алюмосиликатных пород:

1 – глина Дэбуб; 2 – глина Маэфель;
3 – латерит; 4 – вулканический пепел

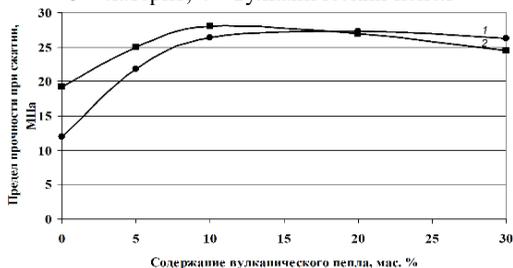


Рис. 3. Предел прочности при сжатии силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания латерита и вулканического пепла: содержание латерита, мас. %: 1 – 20; 2 – 40

Для образцов с содержанием латерита 40 мас. % вулканический пепел в количестве 10 мас. % повышает прочность с 19,24 до 28 МПа. Средняя

Автоклавные образцы на основе глины Дэбуб, латерита и вулканического пепла обладают высокой водостойкостью, коэффициент размягчения составляет 0,8–0,92. Для образцов на основе глины Маэфель коэффициент размягчения составляет 0,66–0,72.

Для выбора параметров математического планирования проведены исследования бинарной системы, для получения которой в качестве компонентов вяжущего использовались одновременно латерит и вулканический пепел (рис. 3).

В наибольшей степени вулканический пепел повышает прочность образцов с содержанием латерита 20 мас. %. При этом прочность повышается с 11,9 до 27,25 МПа при содержании вулканического пепла 20 мас. %.

плотность образцов с содержанием латерита 20 и 40 мас. % составляет соответственно 1960 кг/м^3 и 1895 кг/м^3 . Все образцы с содержанием латерита и вулканического пепла являются водостойкими.

Для определения совместного влияния содержания глинистых пород, вулканического пепла и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ на свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры применяли метод математического планирования эксперимента (табл. 2).

Таблица 2. Условия планирования эксперимента

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
Содержание глинистой породы, мас. % (x_1)	10	25	40	15
Содержание вулканического пепла, мас. % (x_2)	5	15	25	10
Содержание $\text{CaO}_{\text{акт}}$ (x_3)	6	8	10	2

Для автоклавных материалов плотной структуры на основе различных видов глинистых пород рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии (1–3) влияния состава формовочной смеси на предел прочности при сжатии ($R_{\text{сж}}$), среднюю плотность (ρ), водопоглощение (ω) и коэффициент размягчения ($K_{\text{раз}}$) и построены соответствующие графики (рис. 4).

Глина месторождения Дзэбуб

$$R_{\text{сж}} = 15,49 + 1,26x_1 + 4,11x_2 + 0,024x_3 - 1,4056x_1^2 + 0,09x_2^2 - 0,616x_3^2 - (1) \\ - 0,867x_1x_2 - 0,41x_1x_3 - 0,235x_2x_3$$

Глина месторождения Маэфель

$$R_{\text{сж}} = 23,62 + 0,296x_1 + 2,895x_2 + 0,286x_3 - 0,518x_1x_2 + 0,605x_1x_3 (2)$$

Латерит

$$R_{\text{сж}} = 21,883 + 0,025x_1 + 3,23x_2 - 0,085x_3 - 0,316x_1^2 - 1,411x_2^2 - (3) \\ 2,186x_3^2 - 2,014x_1x_2 - 0,966x_1x_3 + 0,519x_2x_3$$

Анализ полученных результатов показал, что минимальным пределом прочности при сжатии 12,1–16,83 МПа обладают образцы с содержанием изучаемых глинистых пород 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % (рис. 4, а). Повышение содержания глинистых пород и ВП увеличивает прочность, причем на ее прирост в наибольшей степени влияет вулканический пепел. При содержании ВП 25 мас. % и глинистой породы 10 мас. % прочность достигает 21,56–25,15 МПа.

Средняя плотность для образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 и 8 % выше, чем у образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % (рис. 4, б). Средняя плотность образцов с содержанием глины Дзэбуб 10 %, вулканического пепла 5 мас. % и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6–10 % составляет в пределах 1942–1950 кг/м^3 . Для глины Маэфель и латерита эти величины составляют, соответственно, 1865–1883 кг/м^3 и 1887–1920 кг/м^3 . Увеличение содержания вулканического пепла и глины приводит к снижению средней плотности образцов.

Водопоглощение силикатных материалов (рис. 4, в) зависит от средней плотности (рис. 4, б), с уменьшением которой водопоглощение увеличивается. В зависимости от состава сырьевой смеси водопоглощение составляет в пределах 7,78–10,35 %.

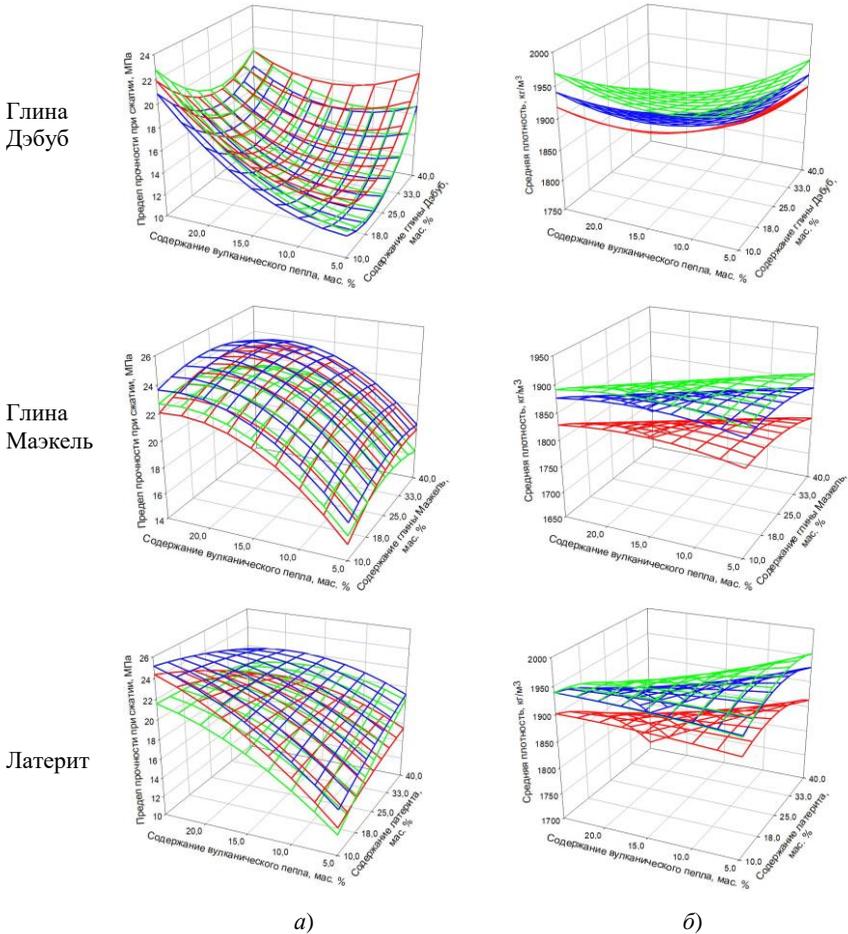


Рис. 4. Свойства автоклавных силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания глинистой породы, вулканического пепла и $\text{CaO}_{\text{акт}}$:

$a - R_{\text{сж}}$; $b - \rho$; $\square - 6\% \text{CaO}_{\text{акт}}$; $\square - 8\% \text{CaO}_{\text{акт}}$; $\square - 10\% \text{CaO}_{\text{акт}}$

Полученные силикатные материалы плотной структуры всех составов обладают высокой водостойкостью. Значения коэффициента размягчения превышают 0,8.

С целью снижения энергозатрат изучена возможность получения силикатных материалов плотной структуры на основе сырья Эритреи с исполь-

зованием гидротермальной обработки в условиях пропарки при 95 °С. Рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии (4–6) влияния состава сырьевой смеси на свойства неавтоклавных материалов.

$$R_{сж} = 13,24 + 1,639x_1 + 4,176x_2 - 0,083x_3 + 0,793x_1^2 + 0,138x_2^2 - 0,457x_3^2 - 0,143x_1x_2 - 0,265x_1x_3 - 0,672x_2x_3 \quad (4)$$

$$R_{сж} = 14,31 + 0,451x_1 + 4,8446x_2 - 0,032x_3 - 1,2295x_1^2 + 0,315x_2^2 - 0,434x_3^2 - 0,963x_1x_2 + 0,742x_1x_3 - 0,972x_2x_3 \quad (5)$$

$$R_{сж} = 15,49 + 1,26x_1 + 4,11x_2 + 0,024x_3 - 1,405x_1^2 + 0,090x_2^2 - 0,615x_3^2 - 0,867x_1x_2 - 0,41x_1x_3 - 0,235x_2x_3 \quad (6)$$

Характер влияния изучаемых пород на предел прочности при сжатии неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры (рис. 5, а) практически не отличается от влияния на образцы, полученные автоклавным способом (рис. 4, а). Однако прочность для неавтоклавных образцов ниже, чем автоклавных. Наименьшую прочность 6,5–8 МПа имеют образцы с содержанием исследуемых глин 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. %. Наибольшей прочностью 20 МПа обладают образцы с содержанием глины 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, СаО_{акт} 6 %.

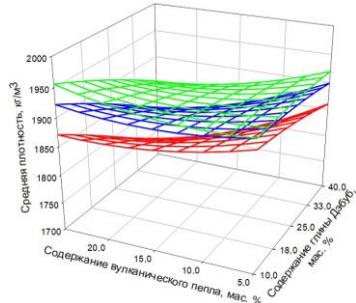
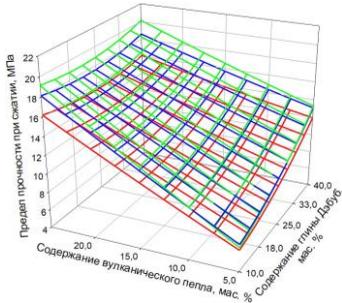
Влияние изучаемого сырья на среднюю плотность неавтоклавных материалов также совпадает с автоклавными материалами. При содержании вулканического пепла 25 мас. % средняя плотность повышается в зависимости от активности сырьевой смеси с 1720 до 1960 кг/м³ с увеличением содержания глинистых пород с 10 до 40 мас. % (рис. 5, б).

Наименьшее значение водопоглощения 6,0–8,54 % соответствует содержанию глины 10 мас. % и вулканического пепла 25 мас. %. С увеличением содержания глины водопоглощение повышается.

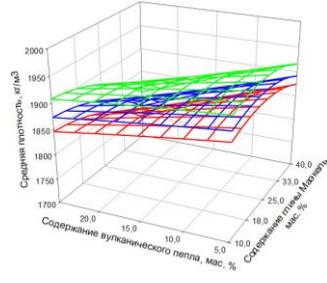
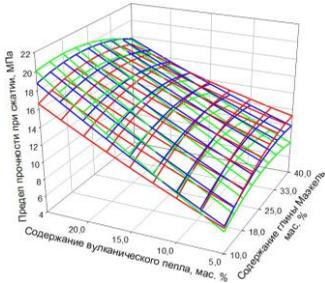
Водостойкость неавтоклавных материалов плотной структуры ниже, чем автоклавных. Материалы на основе глины Дэбуб являются водостойкими ($K_{раз} > 0,8$). Для получения водостойких неавтоклавных материалов на основе глины Маэгель содержание ВП должно составлять более 15 мас. %. Водостойкие материалы на основе латерита должны содержать более 25 мас. % породы и более 15 мас. % вулканического пепла.

Таким образом, установлены рациональные составы сырьевых смесей с использованием сырья Государства Эритрея для получения автоклавных и неавтоклавных материалов плотной структуры с прочностью на сжатие соответственно 18–25 МПа и 16–20 МПа. Результаты испытаний силикатных материалов на основе песка Дэбуб подтверждают данные, полученные с использованием полифракционного песка.

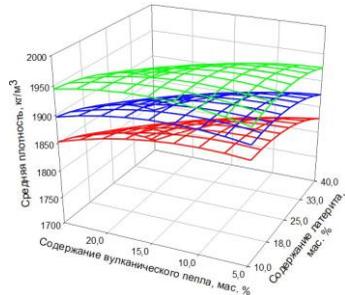
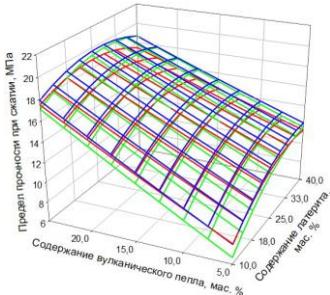
Глина
Дэбуб



Глина
Мазкель



Латерит



а)

б)

Рис. 5. Свойства неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания глинистой породы, вулканического пепла и $\text{CaO}_{\text{акт}}$:
а – $R_{\text{сж}}$; б – ρ ; \square – 6 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$; \square – 8 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$; \square – 10 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$

Установлено, что как при автоклавной обработке, так и в условиях пропарки при 95 °С образуются низкоосновные гидросиликаты кальция CSH(V) , алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты.

Так по данным РФА (рис. 6, на примере глины Дебуб) установлены пики реликтовых пороодообразующих минералов глинистых пород – кварца (4,258; 3,346 Å) и полевого шпата (3,246; 3,202 Å). Рефлекс 11,422 Å свидетельствует о синтезе глиноземсодержащего тоберморита $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$; рефлекс 3,038 Å – об образовании низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(V) ;

рефлекс 2,625 Å совпадает с отражением CaCO_3 , который образуется при карбонизации гидроксида кальция.

В условиях пропарки с известью реагируют преимущественно глинистые минералы и вулканический пепел, кварц практически не взаимодействует. Поэтому в условиях пропарки для полного связывания гидроксида кальция необходимо достаточное для фазообразования количество глинистой породы и ВП. На рентгенограмме фиксируется наличие CSH(B) и гидрогранатов, рефлекс тоберморита практически не выделяется.

Наличие гидрогранатов подтверждает эндоэффект на кривой ДТА при 322 °С, который отчетливо выделяется в автоклавных образцах (рис. 7, на примере глины Мазкель). Эндотермический эффект при 674–707 °С принадлежит, вероятно, к карбосиликату кальция. В автоклавных образцах этот эффект выражен слабее, так как в условиях автоклавной обработки формируются хорошо окристаллизованные гидросиликаты кальция, в частности, тоберморит.

В независимости от условий твердения силикатные материалы характеризуются матричной микроструктурой – наличием плотных агрегатов размером 10–20 мкм, между которыми преимущественно находится связующее вещество (рис. 8, а, б).

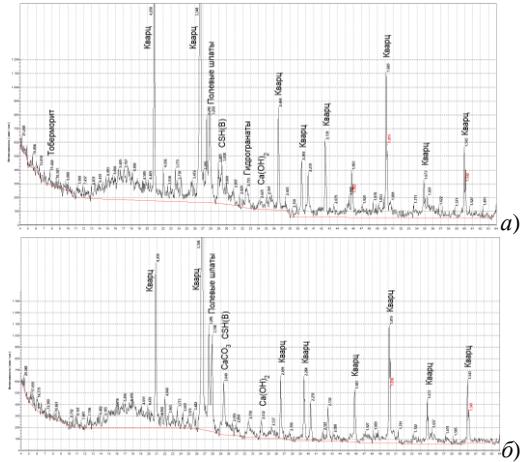


Рис. 6. Рентгенограмма образцов с содержанием глины Дэбуб 40 мас.%, ВП 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %:
а – автоклавные; б – неавтоклавные

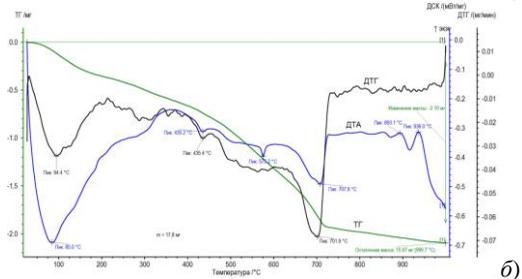
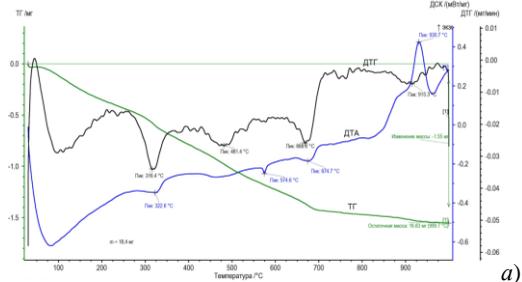


Рис. 7. Дериватограмма образцов с содержанием глины Мазкель 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %:
а – автоклавные;
б – неавтоклавные

Рис. 8, а, б).

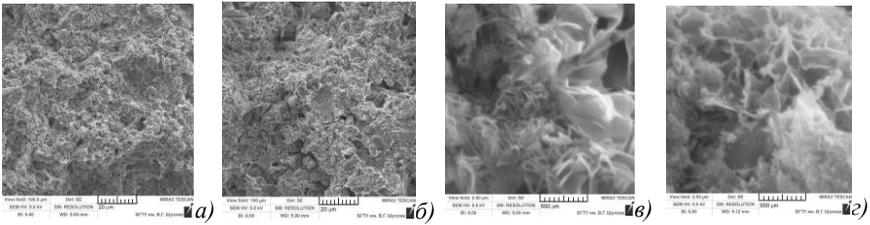


Рис. 8. Микроструктура автоклавных (*а, в*) и неавтоклавных (*б, г*) образцов с содержанием глины Дебуб 40 мас.%, ВП 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %; РЭМ: *а, б* – $\times 1000$; *в, г* – $\times 50000$

Цементирующее вещество в автоклавных материалах плотной структуры представлено крупными и мелкими хорошо окристаллизованными пластинками изогнутой формы, контактирующими между собой и местами образующими пространственную сетку (рис. 8, *в*). Эти сетки связывают между собой частицы песка и агрегаты, представляющие собой продукты взаимодействия между компонентами сырьевой смеси. Синтезированные новообразования являются низкоосновными гидросиликатами кальция, в частности алюминийсодержащим тоберморитом. Размеры пластинок новообразований составляют 100–500 нм, толщина – 10–20 нм.

В пропаренных материалах наблюдается сплошная пространственная сетка из новообразований, представляющая собой тоберморит (рис. 8, *г*). Однако в отличие от автоклавных материалов эти новообразования менее окристаллизованы и местами имеют гелеобразную форму, что затрудняет определение тоберморита на рентгенограмме. Образование тоберморита в условиях пропарки свидетельствует о высокой реакционной способности сырья на основе глин и вулканического пепла.

На микрофотографиях, полученных в режиме фиксации обратно рассеянных электронов (BSE) (рис. 9) наблюдаются глобулы, имеющие высокую плотность. Данные объекты по результатам ЭДС анализа (рис. 10) содержат преимущественно O, Si, Al и Ca. Очевидно, глобулы представляют собой смесь аморфных силикатов и алюминатов кальция и являются промежуточными соединениями, из которых формируются новообразования.

Новообразования также содержат O, Si, Al и Ca. Это подтверждает данные об образовании алюминийсодержащего тоберморита и гидрогранатов. В глобулах и в области новообразований как автоклавных, так и пропаренных материалов присутствует железо, которое, вероятно, также участвует в процессах фазообразования и формировании цементирующих соединений, входя в их состав.

Таким образом, вулканический пепел, являясь продуктом, образовавшимся при извержении вулкана, обладает высокой активностью, как в условиях автоклавной обработки, так и в условиях пропарки. При этом ускоряются процессы фазообразования в сырьевой смеси на основе изучаемых пород Государства Эритрея. В результате взаимодействия глинистых пород и вулканического пепла с известью образуются гидросиликаты кальция,

алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты, формирующие микроструктуру цементирующего вещества, обеспечивающую высокие эксплуатационные свойства как автоклавных, так и пропаренных силикатных материалов плотной структуры. Т.е. эффективность применения ВП в составе известково-глинистого вяжущего повышается при использовании глинистых пород с низким содержанием SiO_2 , что связано с наличием активной аморфной фазы кремнезема в составе ВП, и, соответственно, снижением соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ менее 0,2.

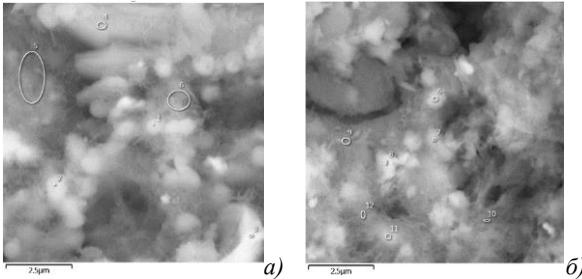


Рис. 9. Микроструктура глобулярной массы автоклавных (а) и неавтоклавных (б) силикатных материалов с содержанием латерита 40 мас.%, ВП 25 мас.%; РЭМ: $\times 10000$

В результате разработаны предельные составы прессованных автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, позволяющие получать силикатные кирпичи и камни с прочностью на сжатие 16–20 МПа и 18–25 МПа соответственно, соответствующие классам средней плотности 2, маркам по прочности до М250, маркам по морозостойкости до F50, водопоглощению не ниже 6 % (табл. 3). Материалы на основе латерита обладают повышенными радиационно-защитными свойствами. Для автоклавных и неавтоклавных материалов линейные коэффициенты ослабления, в зависимости от состава сырья, увеличиваются соответственно на 19,6–20,5 % и 20,8–24,1 %.

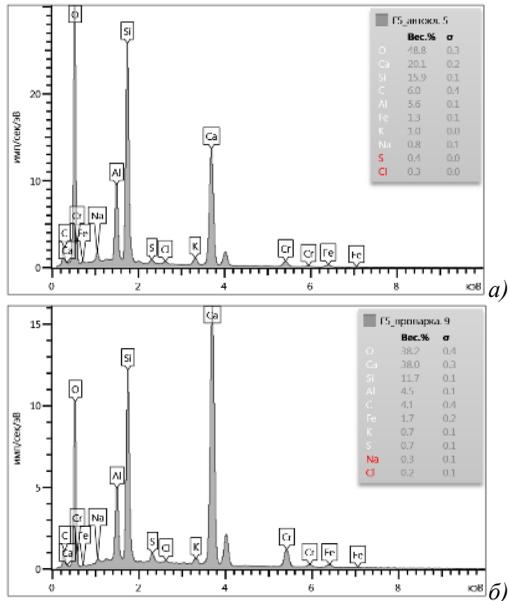


Рис. 10. Спектры ЭДС автоклавных (а) и неавтоклавных (б) силикатных материалов плотной структуры

Таблица 3. Рациональные составы силикатных материалов

№ сорта	Состав сырьевой смеси, мас. %			R _{ож} , МПа	Р, кг/м ³	ω, %	K _{раз}	Воздухосто-йкость, % потери прочности	Соответствие ГОСТ 379–2015		
	СаО _{акт}	Вязущее	Заполнитель						Класс средней плотности	Марка по прочности	Марка по морозостойкости
Автоклавные											
<i>Месторождение Дзуб</i>											
1	6	10	25	22,80	1970	6,31	0,91	13,8	2,0	200	35
2	8	10	25	18,20	1835	11,23	0,92	12,4	2,0	150	35
3	10	10	25	19,70	1765	11,53	0,91	11,3	1,8	150	50
<i>Месторождение Маэжель</i>											
4	6	10	25	22,70	1890	7,27	0,81	15,4	2,0	200	35
5	8	10	25	23,70	1875	8,39	0,81	14,2	2,0	200	35
6	10	10	25	22,00	1830	11,24	0,81	12,1	2,0	200	50
<i>Лагерит</i>											
7	6	10	25	21,50	1940	7,93	0,96	13,1	2,0	200	35
8	8	10	25	25,15	1940	8,11	0,90	12,7	2,0	250	50
9	10	10	25	24,30	1900	9,81	0,97	10,9	2,0	200	50
Неавтоклавные											
<i>Месторождение Дзуб</i>											
10	6	40	25	20,15	1850	8,60	0,95	21,3	2,0	200	1
11	8	40	25	18,60	1795	10,50	0,93	20,3	1,8	150	25
12	10	10	25	16,15	1870	7,50	0,89	17,5	2,0	150	25
<i>Месторождение Маэжель</i>											
13	6	10	25	20,10	1910	8,15	0,89	19,3	2,0	200	15
14	10	10	25	16,55	1845	7,80	0,99	17,1	2,0	150	25
15	8	25	25	19,50	1845	8,65	0,90	19,1	2,0	150	25
<i>Лагерит</i>											
16	6	25	25	19,30	1915	7,50	0,92	21,1	2,0	150	15
17	8	25	25	19,70	1860	7,90	0,92	19,6	2,0	150	25
18	10	25	25	18,85	1805	9,40	0,93	17,8	2,0	150	25

В пятой главе приведены технико-экономическое обоснование и технология производства силикатных материалов на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея. Предложена технологическая схема производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов на основе алюмосиликатного сырья, включающая подготовку вяжущего совместным помолом извести, глины и вулканического пепла, смешение с песком, гашение сырьевой смеси, получение изделий методом полусухого прессования, автоклавную обработку или пропарку. За счет природной окраски глинистых пород можно получать окрашенные силикатные материалы. Общие энергетические затраты при производстве неавтоклавных материалов сокращаются на 20 %, материальные затраты на 13 % и 15 % соответственно для автоклавного и неавтоклавного кирпича.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические предположения о гидротермальных процессах фазо- и структурообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, протекающих в условиях твердения силикатных материалов плотной структуры. Установлено, что алюмосиликатное сырье, представленное глинистыми породами и вулканическим пеплом, активно реагирует с известью в гидротермальных условиях, за счет чего формируются связующие вещества, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Полученные результаты исследований можно использовать для расширения поиска сырья на территории Государства Эритрея, пригодного для получения силикатных материалов.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея, заключающееся во введении в состав вяжущего на основе извести, глины и вулканического пепла (ВП). Установлено, что эффективность применения ВП повышается при использовании глинистых пород с низким содержанием SiO_2 , что связано с наличием активной аморфной фазы кремнезема в составе ВП, и, соответственно, снижением соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ менее 0,2. Такое композиционное вяжущее обеспечивает получение силикатных материалов плотной структуры с марками до М 200 (неавтоклавный) и до М 250 (автоклавный).

Выявлены особенности процессов структурообразования известково-глино-песчаной смеси с содержанием ВП в условиях пропарки и при автоклавировании, заключающиеся в том, что рентгеноаморфные фазы и минералы с дефектной кристаллической структурой, входящие в состав ВП, при взаимодействии с известью образуются гидросиликаты кальция, в том числе алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты, что способствует формированию плотной микроструктуры цементирующего вещества и обеспечивает высокие физико-механические показатели силикатных материалов.

Установлены закономерности влияния содержания активного СаО, глинистых пород и вулканического пепла на предел прочности при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение и коэффициент размягчения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры, что позволяет определить рациональные составы сырья для получения силикатных материалов с заданными физико-механическими показателями с учетом минимизации материальных и энергетических затрат.

Разработаны предельные составы прессованных силикатных материалов гидротермального твердения на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, позволяющие получать пропаренные и автоклавные силикатные кирпичи и камни с прочностью на сжатие соответственно 16–20 МПа и 18–25 МПа, соответствующие классам средней плотности 2, маркам по прочности до М250, маркам по морозостойкости до 50, водопоглощению не ниже 6 %.

Предложена технологическая схема производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, включающая подготовку вяжущего совместным помолом извести, глины и вулканического пепла, смешение с песком, гашение сырьевой смеси, получение изделий методом полусухого прессования, автоклавную обработку или пропарку. Общие энергетические затраты при производстве неавтоклавных материалов сокращаются на 20 %. Общие материальные затраты сокращаются на 13 % и 15 % соответственно для автоклавного и неавтоклавного кирпича.

За счет природной окраски глинистых пород можно получать окрашенные силикатные материалы плотной структуры. Получены силикатные материалы на основе латерита и вулканического пепла, обладающие повышенными радиационно-защитными свойствами.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** при строительстве предприятий по производству автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов на территории Государства Эритрея, а также для использования в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и магистров по направлению 28.04.03 «Нanomатериалы» в Российской Федерации и при подготовке инженеров по специальности «Гражданские инженеры» в Государстве Эритрея.

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении расширения спектра природного сырья Государства Эритрея, пригодного для производства силикатных материалов гидротермального твердения, а также изучения влияния параметров гидротермальной обработки на свойства силикатных материалов.

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

1. **Гхебремедхин, К.В.** Алюмосиликатное сырье государства Эритрея для производства силикатных материалов / К.В. Гхебремедхин, А.Н. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23 (**К1, УБС 2**)

2. **Гхебремедхин, К.В.** Влияние алюмосиликатного сырья на повышение качества автоклавных силикатных материалов / К.В. Гхебремедхин, А.Н. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-6-8-18 (**К1, УБС 2**)

3. Володченко, А.А. Неавтоклавные силикатные материалы на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея / А.А. Володченко, В.С. Лесовик, **К.В. Гхебремедхин** // Известия вузов. Строительство. 2025. № 9. С. 28–41. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-801-9-28-41 (**К1, УБС 2, RSCI**)

В сборниках трудов конференций

4. **Кидане (Гхебремедхин), В.Г.** Перспективы использования латеритов для получения силикатных материалов / В.Г. Кидане, А.Н. Володченко // Инновации в строительстве – 2023: материалы международной научно-практической конференции (Брянск, 6-8 апреля 2023 г.) / Брянский государственный инженерно-технологический университет, Строительный институт ; редакционная коллегия: Н.П. Лукутцова [и др.]. – Брянск : [б. и.], 2023. – С. 35-40.

5. **Гхебремедхин, К.В.** Повышение качества силикатных материалов на основе латеритов Государства Эритрея / К.В. Гхебремедхин, А.А. Володченко, В.Г. Клименко, А.Н. Володченко // Инновации в строительстве – 2024: материалы международной научно-практической конференции (Брянск, 3-6 апреля 2024 г.) / Брянский государственный инженерно-технологический университет, Строительный институт ; редакционная коллегия: Н.П. Лукутцова [и др.]. – Брянск, 2024. – С. 47-52.

6. **Kidane (Гхебремедхин), W.G.** Modern trends in composition optimization methods for radiation-shielding concretes based on heavy aggregates / W.G. Kidane, A.N. Volodchenko, V.I. Pavlenko // Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докладов VI Междунар. (XIX Региональной) научной конференции. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 8-10.

7. **Гхебремедхин, К.В.** Задачи реформирования строительного сектора с акцентом на местные строительные материалы в Государстве Эритрея [Электронный ресурс] / К.В. Гхебремедхин // XVI Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство». – Белгород, 2024.

8. **Гхебремедхин, К.В.** Влияние вулканического пепла и глинистых пород субгумидного тропического климата на качество автоклавных силикатных материалов / К.В. Гхебремедхин, А.Н. Володченко // Архитектурно-

строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: XI Междунар. научн.-практ. конф., приуроченная к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева 21-22 ноября 2024 года. – Омск 2024. – С. 390-394.

9. *Гхебремедхин, К.В.* Алюмосиликатные породы Государства Эритрея как сырье для производства силикатных материалов / К.В. Гхебремедхин, А.Н. Володченко // Инновации в строительстве – 2025: материалы международной научно-практической конференции (Брянск, 15-17 мая 2025 г.) / Брянский государственный инженерно-технологический университет, Строительный институт ; редакционная коллегия: Н.П. Лукутцова [и др.]. – Брянск : [б. и.], 2025. – С. 25–28.

ГХЕБРЕМЕДХИН КИДАНЕ ВЕЛДАЙ

**СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ
НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 06.03.2026. Формат 60×84/16

Усл.-печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ № 35

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