

**На правах рукописи**



**ФЁДОРОВ АРТЁМ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ЛЕГКИЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА**

**Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Белгород – 2026**

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

**Научный руководитель** кандидат технических наук, доцент  
**Попов Александр Леонидович**

**Официальные оппоненты:** **Иноземцев Александр Сергеевич**,  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
доцент кафедры строительного материаловедения

**Павленко Наталья Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»,  
старший научный сотрудник

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Защита состоится «22» мая 2026 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданном на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. 214 ГК.

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/Fedorov\\_A\\_V](https://gos_att.bstu.ru/dis/Fedorov_A_V)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы.** Согласно Указу Президента о Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года одним из основных направлений реализации настоящей стратегии в Республике Саха (Якутия) является организация производства строительных материалов на базе действующих месторождений строительных материалов. Производство качественных ячеистых легких бетонов характеризуется высоким расходом портландцемента для требуемых прочностей, а также сложной и дорогостоящей технологией изготовления с использованием специализированного оборудования. В тоже время, в регионе развивается технология получения пеноцеолита – пористого заполнителя на основе местного сырья в виде природного цеолита. Анализ опыта реализации данной технологии, а также существующих способов повышения эффективности производства легкого бетона показал перспективность задачи усовершенствования данной технологии, которая может быть решена путем: снижения расхода портландцемента с сохранением физико-механических характеристик за счет применения композиционных вяжущих (КВ) со сниженной клинкерной составляющей и получения рациональной поризованной структуры композита за счет вариации параметров, оказывающих существенное влияние на плотность.

Работа выполнялась в рамках гранта программы «УМНИК-2021» Фонда содействия инновациям (Договор №17895ГУ/2022 от 20.05.2022 г.), государственных контрактов № 8319, 7633 с Академией наук РС(Я) и программы деятельности НОЦ «Север» по направлению «Технологии хозяйственной деятельности в криолитозоне и новые материалы».

**Степень разработанности темы.** Классические технологии производства легкого бетона на основе керамзита (как пористого заполнителя) и портландцемента являются распространенными, нашли свою нишу на строительном рынке и хорошо освещены в научных трудах отечественных и зарубежных ученых. Для технологии конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористых заполнителях наблюдается недостаток в прикладных исследованиях, направленных на повышение их прочности и морозостойкости. К открытым вопросам относятся: эффективность использования композиционных вяжущих для получения легкого бетона на пористом заполнителе с повышенными эксплуатационными характеристиками для применения в суровых природно-климатических условиях.

**Цель работы.** Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с применением природного цеолита.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

– обоснование возможности использования природного цеолита месторождения Хонгуруу в качестве компонента композиционного вяжущего и

разработка его рецептуры со сниженной клинкерной составляющей, обеспечивающей характеристики сопоставимые с исходным цементным камнем;

– изучение особенностей механизма структурообразования, физико-механических характеристик, фазового состава цементной системы с использованием природного цеолита; разработка состава КВ – тонкомолотого цемента (ТМЦ);

– изучение свойств пористого заполнителя (пеноцеолита) и золошлакового отхода (ЗШО) в виде микрозаполнителя для их применения в составе легких бетонов;

– выбор наиболее эффективного пенообразователя для поризации бетонной смеси;

– изучение влияния рецептурно-технологических факторов на структурообразование ячеистобетонной смеси, физико-механические и эксплуатационные характеристики легкого бетона (пеноцеолитбетона);

– разработка и изучение свойств конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на основе пористого заполнителя, композиционного вяжущего с применением природного цеолита, а также комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности цементной матрицы;

– подготовка нормативной документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Апробация работы.

**Научная новизна работы.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе – пеноцеолите, заключающееся в: замене цемента композиционным вяжущим с использованием природного цеолита (ТМЦ-85); поризации цементной матрицы введением пенообразователя; снижении плотности бетона за счет использования в качестве микрозаполнителя золошлакового отхода. Формирование рациональной плотности растворной части легкого бетона в сочетании с КВ обеспечивают снижение теплопроводности при повышении прочности и марки морозостойкости пеноцеолитбетона.

Установлен характер влияния цеолита как активного компонента КВ на процессы гидратации и свойства цементного камня с его использованием. За счет пуццолановой активности цеолита в составе КВ: происходит более полное протекание процессов структуро- и фазообразования, способствующих повышению содержания идиоморфных кристаллов новообразованных гидросиликатов различной основности и уплотнению микроструктуры цементного камня; сохраняется значение коэффициента торможения при твердении композиционного вяжущего на уровне значения соответствующего исходному портландцементу; повышается прочность цементного камня на 8,5 % при сокращении клинкерной составляющей на 15 %. Факторами качества природного цеолита, определяющими эффективность его использования как кремнеземного компонента КВ, высокую активность по отношению к СаО и

коэффициент качества ( $K_k=1,16$ ), являются: полиминеральный состав; высокая пористость; высокая размолоспособность и полифракционный состав получаемого порошка; способность обеспечивать процесс гидратации цементного камня даже после циклов замораживания и оттаивания.

Предложен механизм формирования рациональной структуры легкого бетона, обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности, при совместном использовании ТМЦ-85, пенецеолита и комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности растворной части – пенообразователя и золошлакового отхода. За счет разного уровня дисперсности пор, обеспечиваемого высокой концентрацией пенецеолита, поризацией цементной матрицы пенообразователем и наличием золошлакового отхода, создается объемная плотноупакованная пористая структура бетона. Развитая морфология поверхности пуццоланово-активных заполнителей (пенецеолита и ЗШО) служит подложкой для кристаллизации продуктов гидратации. Рациональная плотность растворной части в совокупности с прочной контактной зоной цементного камня с заполнителями, способствуют повышению прочности пенецеолитбетона.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе с использованием природного цеолита и комплекса добавок – пенообразователя и золошлаковых отходов для обеспечения рациональной плотности растворной части пенецеолитбетона. Установлены закономерности влияния состава бетонной смеси легкого бетона на физико-механические свойства.

Установлен рациональный состав композиционного вяжущего с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу в качестве активного компонента – ТМЦ-85, характеризующегося  $S_{уд} \sim 520 \text{ м}^2/\text{кг}$  и активностью 37,9 МПа.

Установлен рациональный уровень концентрации пористого заполнителя ( $\varphi = 0,59$ ) в составе бетонной смеси для достижения максимальной прочности легкого бетона ( $R_{сж} = 6,5 \text{ МПа}$ ) при заданной плотности (D900).

Разработаны составы и технология получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона – пенецеолитбетона, на основе пористого заполнителя, КВ ТМЦ-85, золошлакового наполнителя с использованием пенообразователя Rospena, позволяющие получить изделия с маркой по плотности D900, классом по прочности до B5,0 и маркой по морозостойкости F100.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы являлись результаты исследования отечественных и зарубежных исследователей в области строительного материаловедения, а также комплексный анализ результатов, объединённых в системе «состав (сырьё) – структура (сырьё, материал) – свойства (материал)». Свойства сырьевых материалов и разработанных составов легкого бетона определяли с помощью базовых методов исследований в соответствии с действующими нормативными документами, модельных экспериментов и комплекса современных физико-химических методов анализа: лазерной granulometрии, растровой электронной

микроскопии, РФА, ДТА и др.

**Положения, выносимые на защиту:**

– обоснованное и экспериментально подтвержденное технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе;

– характер влияния цеолита как активного компонента КВ на процессы гидратации и свойства цементного камня на его основе;

– механизм формирования рациональной структуры легкого бетона, обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности, при совместном использовании ТМЦ-85, пористого заполнителя, пенообразователя и золошлакового отхода;

– состав композиционного вяжущего с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу в качестве активного компонента;

– состав и технология получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона – пеноцеолитбетона, на основе пеноцеолита и ТМЦ-85. Апробация результатов работы.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается использованием широкого спектра регламентированных методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования с выполнением многократных измерений для необходимого уровня точности и сходимости теоретических и экспериментальных исследований; апробацией результатов в промышленных условиях; получением результатов, непротиворечащих классическим положениям строительного материаловедения, а также работам других авторов.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах: «Эрэл-2021» (Якутск, 2021); «Полимерные и композиционные материалы в условиях Севера» (Якутск, 2021); «Научные достижения 2022: естественные, точные и технические науки» (Москва, 2022); XXIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Якутск, 2023); XI Евразийский симпозиум по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур «EURASTRENCOLD-2023» (Якутск, 2023); X Международная конф. по математическому моделированию, посвященная 30-летию академии наук Республики Саха (Якутия) (Якутск, 2023); «Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (ТЭГУА-2023)» (Якутск, 2023), «Строительное материаловедение: настоящее и будущее» (Москва, 2023) и др.

**Внедрение результатов исследований.** Промышленная апробация производства и применения разработанных составов легких бетонов проводилась на базе ООО «Сунтарцеолит» (с. Сунтар). С целью внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативно-технические документы:

– СТО 02066339-080-2024 «Легкий бетон на композиционном вяжущем с

применением природного цеолита»;

– технологический регламент на производство блоков из легкого бетона напористом заполнителе с применением природного цеолита.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 «Строительство» и магистров – 08.04.01 «Строительством».

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 12 публикациях, в том числе: 3 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК РФ; 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Получен патент РФ на изобретение.

**Личный вклад.** Автором теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность использования природного цеолита месторождения Хонгуруу Республики Саха (Якутия) в качестве компонента композиционного вяжущего, а также возможность получения конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе легкого заполнителя с применением разработанного КВ, золошлакового наполнителя и пенообразователя. Проведен комплекс экспериментальных исследований с последующей обработкой результатов, проведена апробация результатов работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 217 страницах машинописного текста, включающего 60 таблиц, 66 рисунков, список литературы из 278 источников, 4 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В Республике Саха (Якутия) строительные материалы должны сочетать в себе высокие показатели теплозащиты и прочности для обеспечения комфортности проживания на территориях, характеризующихся суровыми природно-климатическими условиями. При этом согласно Указу Президента о Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года, в частности для Республики Саха (Якутия), предъявляются требования к выполнению задач в сфере экономического развития Арктической зоны, а именно созданию новых и модернизации действующих производств, развитию наукоемких и высокотехнологичных производств, которые отличаются повышенными технико-экономическими показателями и надежностью в условиях суровой зимы.

В то же время в Якутии хорошо зарекомендовала себя технология легкого бетона на пористом гравии – пеноцеолите, которая позволяет эффективно применять местные природные цеолиты месторождения Хонгуруу, учтенные запасы которых составляют 11,3 млн т. Пеноцеолит получают путем обжига в диапазоне температур 700–900°C вспучивающихся гранул, предварительно полученных из сырьевой смеси, в составе которой измельченная цеолитовая порода и водный раствор гидроксида натрия. Таким образом, получаемый пористый гравий фракции 5–20 мм, насыпной плотностью 190–260 кг/м<sup>3</sup>, применяется в качестве крупного заполнителя в легких бетонах. Однако, опыт

производства легкого бетона выявил ряд проблем, связанных с необходимостью корректировки поризованной структуры, низкими прочностными и теплозащитными показателями и высоким расходом цемента.

В связи с этим *рабочей гипотезой* исследования стало предположение о том, что повышение эффективности технологии производства легкого бетона возможно за счет применения композиционного вяжущего, полученного с использованием природного цеолита алюмосиликатного состава, что позволит сократить расход цемента, и введения пенообразователя и золошлакового наполнителя для обеспечения рациональной плотности растворной части.

**В качестве основных сырьевых компонентов** были использованы: пеноцеолит ООО «Сунтарцеолит»; природный цеолит месторождения Хонгуруу Сунтарского улуса; цемент завода «Якутцемент» (пгт. Мохсоголлох) марки ЦЕМ I 42,5Н; золошлаковая смесь (ЗШС) котлового завода ООО «Якутский котловой завод»; пенообразователи (ПО) – ПБ-2000, Rospena, FoamCem.

**Оценка состава и свойств природного цеолита.** Кристаллическая составляющая исходного природного цеолита характеризуется наличием отражений клиноптилолита ( $\text{Ca}_{3,16}\text{Si}_{36}\text{O}_{72}(\text{H}_2\text{O})_{21,80}$ ), содержание которого составляет порядка 45 %, кварца – 31% и кристобалита – 23 % (рис. 1).

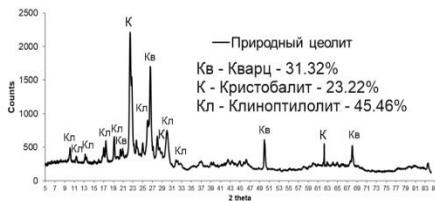


Рис. 1. Рентгенограмма цеолита

Клиноптилолит представлен в виде хорошо ограненных пластинчатых кристаллов с совершенной спайностью и таблитчатым габитусом (рис. 2 а). Помимо этого, микроструктура цеолита характеризуется наличием частиц с раковистым изломом (рис. 2 б), чешуйчато-зернистыми и игольчатыми агрегатами (рис. 2 в), что говорит о высокой степени полиминеральности породы и структурной неоднородности.

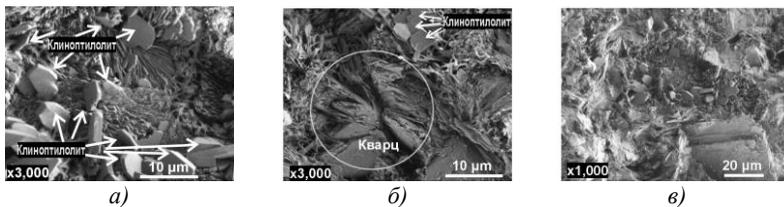


Рис. 2. Микроструктура природного цеолита

Неоднородное строение цеолита в совокупности с низкой твердостью преобладающего в породе минерала – клиноптилолита, обеспечивает ее относительно высокую истинную плотность ( $2730 \text{ кг/м}^3$ ), низкую среднюю плотность ( $1660 \text{ кг/м}^3$ ), высокую пористость (30 %) и высокую размолоспособность: для сравнения она примерно в 2 раза выше, чем у полиминерального речного песка и более чем в 5 раз выше, чем у кварцевого песка (рис. 3).

При помоле природного цеолита до удельной поверхности 520–550 м<sup>2</sup>/кг формируется полидисперсный порошок с тремя пиками в области размеров 3, 15 и 65 мкм, тогда как у речного песка — лишь два пика (2 и 17 мкм) и плато 30–50 мкм. Такое распределение частиц порошка потенциально способствует более плотной упаковке зерен в структуре вяжущего.

Дополнительным преимуществом является то, что помол природного цеолита обеспечивает сравнительно высокий показатель сорбционной способности по отношению к СаО (табл. 1) и коэффициент качества ( $K_K$ ) как компонента композиционного вяжущего – 1,16 в сравнении с кварцевыми песками.

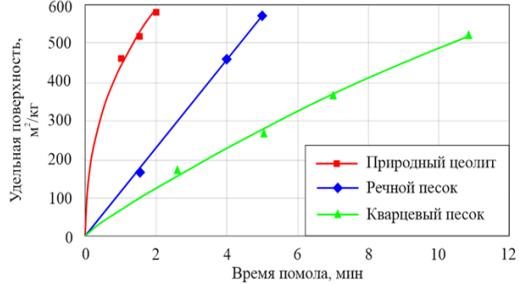


Рис. 3. Размолоспособность минерального сырья

Таблица 1. Свойства сырья как компонента КВ

Вид сырья	Количество поглощенного СаО, мг/г	Коэффициент качества <sup>1</sup>
Природный цеолит	76,6	1,16
Стандартный монофракционный песок	58,9	1

**Разработка состава и оценка свойств КВ.** На начальном этапе был проведен анализ влияния добавки тонкомолотого природного цеолита (ТПЦ) на свойства цементного камня, для чего его вводили взамен цемента от 10 до 50 % с шагом 20 %. Введение ТПЦ в состав цементной смеси приводит к снижению средней плотности и прочности цементного камня, увеличению естественной влажности и водопоглощения (табл. 2).

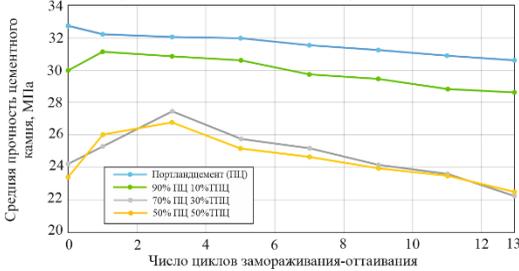
Таблица 2. Физико-механические характеристики цементного камня в зависимости от состава

Состав смеси	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Естественная влажность, %	Водопоглощение, %	Средняя прочность на сжатие, МПа	Число циклов замораживания-оттаивания	Марка по морозостойкости
Портландцемент (ПЦ)	2093	2,7	4,4	32,7	5	F <sub>300</sub>
90% ПЦ 10% ТПЦ	2017	2,9	5,8	29,9	5	F <sub>300</sub>
70% ПЦ 30% ТПЦ	1883	3,6	7,7	24,2	8	F <sub>400</sub>
50% ПЦ 50% ТПЦ	1875	3,6	8,1	23,4	8	F <sub>400</sub>

Ускоренным ультразвуковым методом определения морозостойкости цементного камня показано, что введение ТПЦ приводит к увеличению числа

<sup>1</sup> Рассчитывается по методике, разработанной на каф. СМИК БГТУ им. В.Г. Шухова:

циклов замораживания-оттаивания, после которого происходит резкое увеличение времени распространения ультразвука в образце и соответственно повышению показателя марки по морозостойкости (рис. 4). При этом, как показывают данные, изменение прочности образцов во время циклов замораживания и оттаивания происходит за счет пролонгации гидратационных процессов, что и приводит к частичному восстановлению прочности цементного камня, поврежденного от попеременного замораживания и оттаивания.



**Рис. 4.** Прочность цементного камня разного состава в зависимости от циклов замораживания и оттаивания

Так, при добавлении 10 % добавки тонкомолотого природного цеолита после 1-го цикла замораживания-оттаивания происходит прирост прочности не смотря на деструктивное морозно-солевое воздействие, а при добавлении 30 % и 50 % прирост прочности продолжался до 3-го цикла.

С учетом выявленных закономерностей изменения прочности цементного камня от содержания добавки ТПЦ, было получено 2 вида композиционных вяжущих – ТМЦ–70 и ТМЦ–85, анализ основных характеристик которых (табл. 3) показал снижение прочности, коррелирующей с увеличением минеральной добавки в виде природного цеолита. Однако следует отметить, что клинкерная составляющая в вяжущем ТМЦ–85 сокращена на 15 %, а полученная разница в прочности составила 8,5 %, что говорит о вкладе кремнеземистого компонент вяжущего в набор прочности.

**Таблица 3.** Свойства вяжущих в зависимости от состава

Вяжущее	НГ	Схватывание, мин		Активность, МПа
		начало	конец	
ЦЕМ I 42,5Н	26	140	210	41,4
ТМЦ–70	34	170	250	19,9
ТМЦ–85	28	160	230	37,9

По расчету кинетики твердения композиционных вяжущих на длительный период с применением полулогарифмического закона и теории переноса на основе экспериментальных данных (рис. 5) установлено, что вяжущие ТМЦ–70 и ТМЦ–85 характеризуются сниженными начальными скоростями твердения по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5, составившими соответственно 14,38 и 12,91 против 24,75.

При этом у ТМЦ–70 увеличивается и коэффициент торможения в 2 раза по сравнению с цементом – с 0,0236 до 0,0483, из-за существенной нехватки клинкерной составляющей, что и предопределяет сниженную прочность данного вяжущего по сравнению с цементом и практически отсутствием набора прочности после 28 суток твердения.

Согласно данным рентгенофазового анализа композиционное вяжущее

ТМЦ-85 (рис. 6) характеризуется снижением количества портландита и кальцита и небольшим увеличением кристаллической фазы в виде низкоосновного гидросиликата – йеннита.

Дополнительное подтверждение снижения количества кальцита получено методом дифференциальной сканирующей калориметрии, где на дифференциальных кривых нагревания (рис. 7) в интервале декарбонизации кальцита (550–800 °С) заметно существенное снижение пика эндотермического эффекта и потери массы образца (табл. 4). Таким образом наиболее эффективным вяжущим является ТМЦ-85.

**Обоснование выбора пористого заполнителя и ЗШС.** В качестве крупного пористого заполнителя были рассмотрены – пеноцеолит, пеностекло, керамзит. Как показали квалификационные испытания, пеноцеолит обладает промежуточными свойствами между пеностеклом и керамзитом (табл. 5), что делает его более подходящим материалом исходя из цели исследования.

Известно, что прочность бетона зависит от прочности составляющих его материалов и от прочности сцепления их друг с другом, в связи с этим была проведена оценка активности поверхности пористых заполнителей по отношению к цементному раствору. Поверхность пеноцеолита показала наиболее высокий показатель сорбционной способности по отношению к CaO (табл. 6), что также сопровождалось повышением массы, вероятно, связанным с формированием новообразований в виде игольчатых кристаллов на его поверхности (рис. 8).

Таким образом, на основе полученных данных отмечена перспективность использования пеноцеолита в качестве пористого заполнителя для легких бетонов.

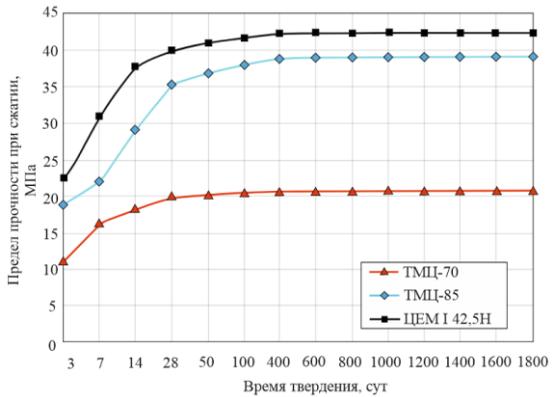


Рис. 5. Кинетика твердения КВ в длительный период

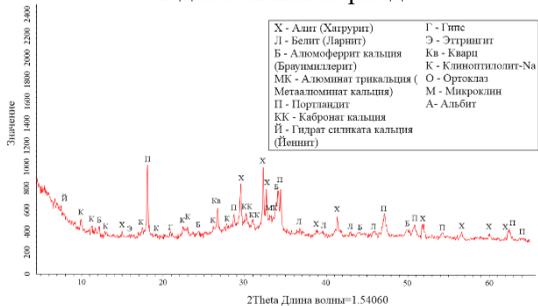


Рис. 6. Минеральный состав ТМЦ-85

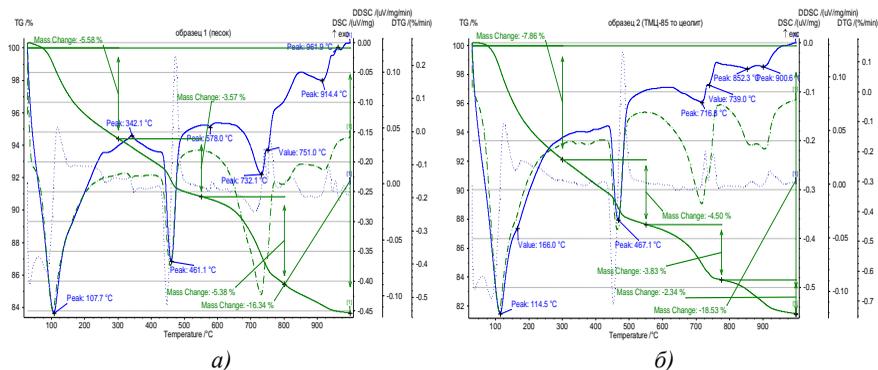


Рис. 7. Дифференциальные кривых нагревания DSC для образцов вяжущих:  
а – ЦЕМ I 42,5Н; б – ТМЦ-85

Таблица 4. Характер термических эффектов образцов вяжущих

Эндотермические эффекты	ЦЕМ I 42,5Н		ТМЦ-85	
	Максимальная температура, °С	Потеря массы, %	Максимальная температура, °С	Потеря массы, %
I эффект	107,7	5,58	114,5	7,86
II эффект	461,1	3,57	467,1	4,50
III эффект	732,1	5,38	716,8	3,83

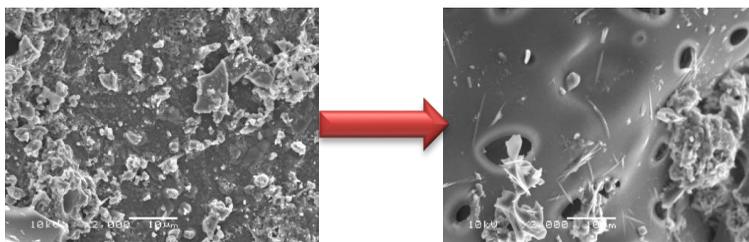
Таблица 5. Физико-механические свойства пористых заполнителей

Материал	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Прочность на сдвливание, МПа
Пеностекло	150	2,09	28,23	0,08	0,52
Пеноцеолит	240	2,02	22,78	0,1	0,86
Керамзит	502	2,03	14,8	0,12	1,75

Таблица 6. Активность поверхности пористых заполнителей по отношению к СаО

Вид пористого заполнителя	Масса до выдержки, г	Кол-во поглощенного СаО, г/мл.	Масса после выдержки, г	Изменение массы, %
Пеностекло	4,35	0,115	4,3	-1
Пеноцеолит		0,311	4,45	+2,3
Керамзит		0,050	4,3	-1

Золошлаковая смесь (ЗШС), являющаяся отходом ООО «Якутский котлово́й завод», образуется в результате совместного удаления золы и шлака механическим способом в процессе сжигания бурого угля Кангаласского месторождения (г. Якутск) (табл. 7). По содержанию СаО – 20,8 % и SiO<sub>2</sub> – 35,1 %, ЗШС согласно ГОСТ 25592–2019 относится к основным, по минеральному составу – является активной минеральной добавкой (АМД), при этом за счет рыхлой структуры и высокой пористости в смеси бетона ЗШС выполняет роль микрозаполнителя, способного обеспечить снижение плотности растворной части пеноцеолитбетона.



до взаимодействия с цементным раствором

после взаимодействия с цементным раствором

Рис. 8. Микроструктура поверхности пеноцеолита при увеличении  $\times 2000$

**Выбор пенообразователя (ПО)** был осуществлен на следующем этапе работы. Комплексная оценка свойств пенообразователей проводилась по критериям: кратность, стойкость пены во времени, стойкость пены в растворе и в легком бетоне, стойкость (рис. 9).

На основе полученных данных видно, что синтетический пенообразователь ПБ-2000 обладает весомым преимуществом по кратности получаемых пен и почти отсутствующей стойкостью во времени по сравнению с пенами на основе белковых пенообразователей Rospena и FoamСem. Если сравнивать белковые пенообразователи, то пена на основе ПО Rospena по всем критериям обладает преимуществом над пеной на основе ПО FoamСem. При этом преимущество в таких критериях как стойкость пены во времени, в растворе и в легком бетоне являются решающими в выборе пенообразователя для дальнейшей работы.

Таблица 7. Технические характеристики ЗШС-МОПо-1

Показатель	Значение
Вид ЗШС по виду сжигаемого угля	Буроугольный (Б)
Вид ЗШС по химич. составу	Основные (О)
Вид ЗШС по способу удаления	Сухой (С)
Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1028
Модуль крупности, Мк	0,789
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	175
Остаток на сите № 008	20,4
Зольная составл-я ( $< 0,315$ мм)	84,2
Шлаковая составл-я (0,315–5 мм)	15,8
Потеря массы при прокаливании, %	16,3
Вяжущая активность АМД, МПа	4,5
Кол-во поглощенного СаО, мг СаО/г	30,3

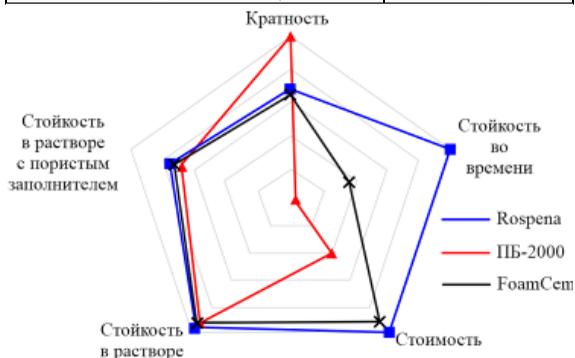


Рис. 9. Сравнительная оценка пенообразователей по критериям эффективности

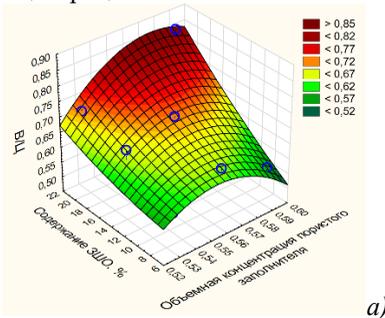
При этом преимущество в таких критериях как стойкость пены во времени, в растворе и в легком бетоне являются решающими в выборе пенообразователя для дальнейшей работы.

Для разработки рациональных составов пеноцеолитбетона (ПЦБ) проведено двухфакторное математическое планирование эксперимента. В качестве варьируемых параметров выступали объемная концентрация пористого заполнителя – пеноцеолита, и содержание золошлакового отхода (табл. 8). При этом оба параметра влияли на расчетную плотность растворной матрицы и содержание пены.

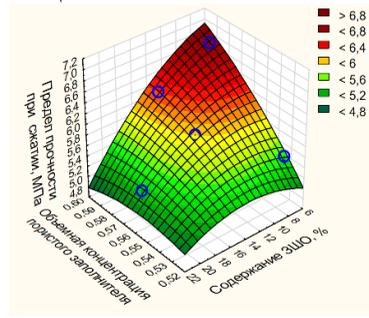
**Таблица 8.** Составы и свойства пеноцеолитбетона согласно матрице планирования

№ п/п	Объемная конц-я пеноцеолита	ЗШО, %	Плотность матрицы	ТМЦ–85, кг	Пена, л	В/Ц	Предел прочности при сжатии, МПа
1	0,59	21	1580	450	65	0,85	4,92
2	0,59	14	1520		76	0,65	6,25
3	0,59	7	1460		87	0,58	6,75
4	0,56	21	1480		109	0,80	5,34
5	0,56	14	1420		120	0,72	5,91
6	0,56	7	1360		131	0,65	5,95
7	0,53	21	1380		143	0,71	5,05
8	0,53	14	1320		154	5,35	
9	0,53	7	1260		165	0,58	5,52

В ходе проведения эксперимента установлено, что снижение массового содержания ЗШО и увеличение расхода пены в составе бетонной смеси приводит к снижению В/Ц (рис. 10 а). Рациональные прочностные характеристики достигаются при увеличении концентрации пеноцеолита и увеличении плотности матрицы (рис. 10 б), пик прочности достигается при увеличении концентрации заполнителя и понижении В/Ц.



$$f(B / Ц) = -15,3 + 58,4X_1 - 0,087X_2 - 53,7X_1^2 + 0,17X_1X_2 + 0,0002X_2^2$$

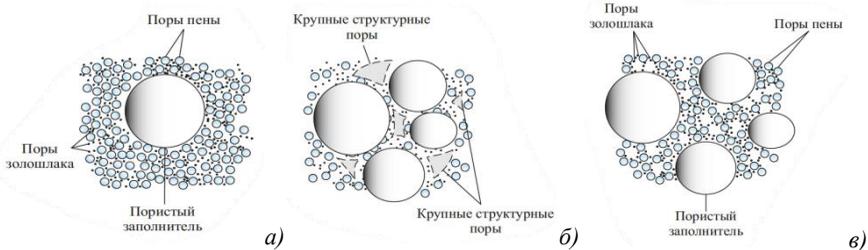


$$f(R_{сж}) = -45,56 + 149,9X_1 + 0,98X_2 - 103,7X_1^2 - 1,62X_1X_2 - 0,005X_2^2$$

**Рис. 10.** Зависимость В/Ц (а) и прочности на сжатие (б) ПЦБ от объемной концентрации пеноцеолита и плотности растворной части

Таким образом, предложена модель формирования рациональной структуры лёгкого бетона на крупном пористом заполнителе (кПЗ), обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности (рис. 11). Недостаточно высокая концентрация кПЗ (пеноцеолита) в лёгком бетоне приводит

к тому, что для достижения целевой плотности необходимо увеличивать объем растворной части, что в условиях заданной плотности легкого бетона достигается снижением плотности растворной части с помощью пеноагента, вследствие чего создаются концентраторы напряжений и снижается прочность. Недостаточная поризация растворной части будет приводить к перерасходу вяжущего и, тем самым, к повышению плотности, либо, при дефиците вяжущего, к формированию более крупных структурных пор, что вызывает еще более сильные концентраторы напряжений. Рациональное снижение плотности растворной части достигается не только поризацией пеноагентом, но и введением микропористого компонента – ЗШО, что позволяет повысить пористость цементирующей матрицы при уменьшении количества концентраторов напряжений. При этом введение микропористого компонента регулируется его влиянием на В/Ц. Таким образом, для достижения наилучшей прочности легкого бетона с заданной плотностью необходимо закладывать высокую концентрацию кПЗ (пеноцеолита) и рационально подобрать количества пеноагента и микропористого компонента (ЗШО).

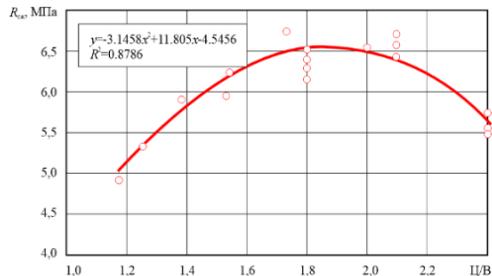


**Рис. 11.** Модель формирования рациональной структуры легкого бетона на кПЗ:

- a* – низкая плотность растворной части с низкой концентрацией кПЗ;
- б* – повышенная плотность растворной части с высокой концентрацией кПЗ;
- в* – рациональная плотность растворной части с высокой концентрацией кПЗ

Проведен подбор состава бетона, где за варьируемый параметр взято цементно-водное отношение (Ц/В) (рис. 12).

Результаты по зависимости прочности легкого бетона от Ц/В также подтверждают предложенную модель рационального структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе. Установлено значение Ц/В, при котором достигается рациональная плотность растворной части легкого бетона, при увеличении Ц/В повышается плотность цементного теста, что, по всей видимости, приводит к неэффективному распределению пористости.



**Рис. 12.** Зависимость прочности легкого бетона на пористом заполнителе от Ц/В

Разработанный пеноцеолитбетон на композиционном вяжущем с использованием природного цеолита удовлетворяет требованиям ГОСТ 25820-2021 для конструкционно-теплоизоляционных изделий: марке по плотности D900, классу по прочности до B5,0 и марке по морозостойкости F100 (табл. 9).

**Таблица 9.** Состав и свойства легкого бетона на пористом заполнителе

Состав смеси	Вяжущее	ТМЦ-85
	Вода, кг	225
	Ц/В	2
	Пеноцеолит /ЗШО, кг	265/30
	Пена, л	83
Физико-механические свойства бетона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	861
	Предел прочности при сжатии, МПа	6,49
	Марка по морозостойкости	F100
	Теплопроводность, Вт/(м °С)	0,18

$\lambda=0,038$  Вт/(м·°С). Установлено, что ограждающая конструкция из пеноцеолитбетона обеспечивает максимальную продолжительность сохранения допустимой температуры в помещении до начала образования конденсации влаги со стороны внутренних стен за счет повышенной теплоаккумулирующей способности, что подтверждает ее потенциал для повышения надежности зданий по сравнению с другими техническими решениями.

Предложена модернизация технологической линии по производству стеновых блоков из легкого бетона на композиционном вяжущем на базе производства ООО «Сунтарцеолит» с. Сунтар.

Экономическая эффективность производства и применения легкого бетона на основе пеноцеолита и композиционного вяжущего с использованием цеолита, а также комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности растворной части легкого бетона обусловлена следующими факторами: использование КВ позволяет снизить себестоимость за счет уменьшения доли цемента; введение ЗШС и пены позволяет создать рациональную структуру лёгкого бетона, обеспечивая получение поризованного бетона взамен крупнопористого с улучшенными характеристиками по прочности и плотности, что расширяет области применения получаемого бетона; получение изделий более высокого класса по прочности с более низким коэффициентом теплопроводности при сохранении марки по плотности.

Тепловая эффективность стеновых ограждений из пеноцеолитбетона для малоэтажного строительства в случае аварийной остановки системы теплоснабжения оценивалась двумя методами: теоретическим (расчет теплоустойчивости) расчетом; методом конечных элементов с помощью программы ANSYS Transient Thermal Рассмотрены два варианта ограждающей конструкции – неутепленный вариант наружных стен из бетонных блоков  $\delta=300$  мм и утепленный вариант с дополнительным утеплением минеральной ватой с плотностью  $\rho=150$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе с использованием природного цеолита и комплекса добавок – пенообразователя и золошлаковых отходов для обеспечения рациональной плотности растворной части пеноцеолитбетона. Установлены закономерности влияния состава бетонной смеси легкого бетона на физико-механические свойства.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе – пеноцеолите, заключающееся в: замене цемента композиционным вяжущим с использованием природного цеолита (ТМЦ-85); поризации цементной матрицы введением пенообразователя; снижении плотности бетона за счет использования в качестве микронаполнителя золошлакового отхода. Формирование рациональной плотности растворной части легкого бетона в сочетании с КВ обеспечивают снижение теплопроводности при повышении прочности и марки морозостойкости пеноцеолитбетона.

Установлен характер влияния цеолита как активного компонента КВ на процессы гидратации и свойства цементного камня с его использованием. За счет пуццолановой активности цеолита в составе КВ: происходит более полное протекание процессов структуро- и фазообразования, способствующих повышению содержания идиоморфных кристаллов новообразованных гидросиликатов различной основности и уплотнению микроструктуры цементного камня; сохраняется значение коэффициента торможения при твердении композиционного вяжущего на уровне значения соответствующего исходному поргладцементу; повышается прочность цементного камня на 8,5 % при сокращении клинкерной составляющей на 15 %. Факторами качества природного цеолита, определяющими эффективность его использования как кремнеземного компонента КВ, высокую активность по отношению к СаО и коэффициент качества ( $K_k=1,16$ ), являются: полиминеральный состав; высокая пористость; высокая размолоспособность и полифракционный состав получаемого порошка; способность обеспечивать процесс гидратации цементного камня даже после циклов замораживания и оттаивания.

Предложен механизм формирования рациональной структуры легкого бетона, обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности, при совместном использовании ТМЦ-85, пеноцеолита и комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности растворной части – пенообразователя и золошлакового отхода. За счет разного уровня дисперсности пор, обеспечиваемого высокой концентрацией пеноцеолита, поризацией цементной матрицы пенообразователем и наличием золошлакового отхода, создается объемная плотноупакованная пористая структура бетона. Развитая морфология поверхности пуццоланово-активных заполнителей (пеноцеолита и ЗШО) служит подложкой для кристаллизации продуктов гидратации. Рациональная плотность растворной части в совокупности с прочной

контактной зоной цементного камня с заполнителями, способствуют повышению прочности пеноцеолитбетона.

Установлен рациональный уровень концентрации пористого заполнителя ( $\varphi = 0,59$ ) в составе бетонной смеси для достижения максимальной прочности легкого бетона ( $R_{сж} = 6,5$  МПа) при заданной плотности (D900).

Разработаны составы и технология получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона – пеноцеолитбетона, на основе пористого заполнителя, КВ ТМЦ-85, золошлакового наполнителя с использованием пенообразователя Rospena, позволяющие получить изделия с маркой по плотности D900, классом по прочности до B5,0 и маркой по морозостойкости F100.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству легких бетонов на пористых заполнителях в регионах Крайнего Севера и Арктики, а также в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении: снижения плотности легкого бетона на пористых заполнителях с КВ в целях расширения номенклатуры изделий; расширения спектра используемых местных сырьевых материалов для получения КВ; анализа снижения температуры внутреннего воздуха в жилых помещениях зданий, возводимых на основе стенового материала из легкого бетона, до уровня критической при аварии системы теплоснабжения в условиях низких температур.

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

1. Петров, А.А. Легкий бетон на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с использованием природного цеолита / А. А. Петров, А. Л. Попов, **А. В. Фёдоров** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 3. – С. 17-29. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29

2. Попов, А.Л. Исследование отходов пеностеклового производства как компонента композиционного вяжущего / А. Л. Попов, **А. В. Фёдоров** // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. – № 1(73). – С. 60-68. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.73.1.005

3. Матвеева, О.И. Легкий пористый заполнитель из модифицированной цеолитшечной шихты / О. И. Матвеева, Н. К. Баишев, **А. В. Фёдоров** [и др.] // Строительные материалы. – 2023. – № 7. – С. 17-24. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-17-24

**В изданиях, индексируемом в базе данных Scopus**

4. **Fedorov, A.V.** Peculiarities of production of light concretes with the use of granulated foamed aggregate on the basis of natural zeolite / **A.V. Fedorov**, V.A. Yadrikhinsky, A.L. Popov // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2758. – 020006.

**В сборниках трудов конференций**

5. Попов, А.Л. Энергоэффективные решения в ограждающих конструкциях малоэтажных зданий с применением легкобетонных изделий в условиях Якутии / А. Л.

Попов, А. В. **Фёдоров**, Н. А. Григорьев // Строительное материаловедение: настоящее и будущее: Сборник материалов III Всероссийской научной конференции, посвящённой девяностолетию кафедры Строительного материаловедения, НИУ МГСУ, 16 ноября 2023 года. – М.: НИУ МГСУ, 2023. – С. 244-249.

6. **Фёдоров, А.В.** Моделирование удельных потерь теплоты шва кладки из легкого бетона на пористом заполнителе, в условиях низких температур / **А. В. Фёдоров**, А. Л. Попов // Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (с международным участием), посвященной памяти первого Президента Республики (Саха) Якутия М.Е. Николаева: Материалы конференции, Якутск, 26–28 октября 2023 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2023. – С. 87-91.

7. Попов, А.Л. Легкие бетоны с повышенной морозостойкостью на основе использования природного цеолита / А. Л. Попов, **А. В. Фёдоров** // EURASTRENCOLD-2023: Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, Якутск, 11–15 сентября 2023 года. – Киров: МЦИТО, 2023. – С. 489-492.

8. Попов, А.Л. Морозостойкость бетонов с низкой прочностью / А. Л. Попов, **А. В. Фёдоров** // X международная конференция по математическому моделированию, посвященная 30-летию Академии наук Республики Саха (Якутия) и памяти первого Президента Академии наук РС(Я), член-корреспондента РАН В.В. Филиппова: Тезисы докладов, Якутск, 17–20 июля 2023 года. – Якутск: СВФУ, 2023. – С. 186.

9. **Фёдоров, А.В.** Перспективы использования цеолитовых пород Хонгуриинского месторождения для строительного производства в климатических условиях Севера / **А. В. Фёдоров** // Научные достижения 2022: естественные, точные и технические науки: Сборник материалов XII-ой международной очно-заочной научно-практической конференции, Москва, 05 декабря 2022 года. Том 1. – М.: Научно-издательский центр "Империум", 2022. – С. 87-88.

10. Ядрихинский, В.А. Особенности композиционных вяжущих на основе природного цеолита и отходов производства пористого заполнителя / В. А. Ядрихинский, **А. В. Фёдоров**, А. Л. Попов // Полимерные и композиционные материалы в условиях Севера: Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Якутск, 12–14 октября 2021 года. – Киров: МЦИТО, 2021. – С. 122-124.

11. **Фёдоров, А.В.** Испытание минерального сырья Якутии для получения морозостойких легких бетонов / **А. В. Фёдоров** // Эрэл-2021: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Якутск, 17–19 февраля 2021 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2021. – С. 74-78.

12. **Фёдоров, А.В.** Исследование возможности использования пористых заполнителей из местного минерального сырья Якутии для получения морозостойких легких бетонов / **А. В. Фёдоров** // Аммосов-2021: Сборник материалов научно-практической конференции студентов СВФУ, Якутск, 12 апреля 2021 года. – Якутск: СВФУ, 2021. – С. 838-842.

#### Объекты интеллектуальной собственности

13. Патент №2803754 РФ МПК С04В 7/13 Вяжущее для производства легкого бетона / Попов А.Л., **Фёдоров А.В.** // №2023105155; заявл. 07.03.2023; опубл. 19.09.2023, Бюл. №26. 6 с.

**ФЁДОРОВ АРТЁМ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ЛЕГКИЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 16.03.2026 г. Формат 60x84/16  
Печать цифровая. Печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ №47  
Издательский дом Северо-Восточного федерального университета  
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5.  
Отпечатано в типографии ИД СВФУ