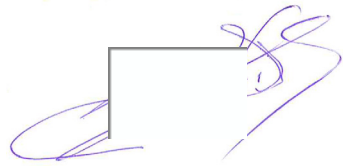


На правах рукописи



Дмитриев Константин Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ В ТЕХНОЛОГИИ
АЭРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ**

Специальность: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Харитонов Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: **Береговой Виталий Александрович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,
кафедра технологии строительных материалов
и деревообработки, заведующий;

Масленникова Людмила Леонидовна
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей сообщения
Императора Александра I», кафедра «Инженерная
химия и естествознание, профессор.

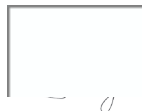
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет».**

Защита состоится «06» марта 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса). Тел./ Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/dmitriev-konstantin-sergeevich>

Автореферат разослан «22» января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Керамические изделия входят в число наиболее распространенных и востребованных в практике промышленного и гражданского строительства. Ключевыми эксплуатационными свойствами керамических материалов, определяющих повсеместное использование конструкций из них, являются долговечность, быстрое достижение равновесной сорбционной влажности в аспекте формирования благоприятного микроклимата помещений, доступность и широкая география распространения глинистого сырья на территориях регионов Российской Федерации, высокие экологические характеристики.

Традиционные технологии действующих керамических предприятий не способны обеспечивать промышленное производство керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность не более 680 кг/м^3 и коэффициент теплопроводности ниже $0,18 \text{ Вт/(м}\times\text{°C)}$. Развитие технологии изготовления изделий из аэрированной керамики (средняя плотность $400\div 800 \text{ кг/м}^3$ и прочность при сжатии не менее $3,0 \text{ МПа}$), соответствует практическим возможностям повышения эффективности индустрии строительной керамики. Аэрирование основано на принципе вовлечения воздуха в глинистую сырьевую смесь (шихту) при перемешивании. За счет этого в её структуре формируется значительный объем равномерно распределенных мелкоразмерных сферических пор.

Несмотря на многочисленные работы в области высокопористой стеновой керамики, аспекты технологии аэрирования проработаны недостаточно. В частности, не сформулированы теоретические основы проектирования рациональных составов шихты для аэрированной керамики, что определяет актуальность представленных диссертационных исследований.

Степень разработанности темы исследования. В положениях диссертационной работы произведена адаптация теоретических положений, экспериментальных и практических работ, выполненных российскими и зарубежными авторами (А.И. Августинник, С.П. Онацкий, И.И. Мороз, М.И. Роговой, Н.Н. Круглицкий, В.А. Береговой, П.И. Боженов, В.Б. Зверев, П.Б. Кукса, В.Ф. Павлов, В.И. Верицагин, Г.И. Книгина, Ю.Е. Пивинский, Д.В. Кролевецкий, Н.Б. Путро, В.Ф. Завадский, Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов, Тихонов Ю.М., Л.Л. Масленикова, А.Ю. Столбоушкин, Котляр В.Д., P.S. Mangat, W.E. Worrall, G. Morris, M. R. Pursell, S. J. Neethling и др.), посвященных изучению вопросов получения строительных керамических изделий на основе различного глинистого сырья, разработке методов определения технологических параметров при производстве керамических изделий, расширению способов снижения средней плотности изделий при сохранении высоких прочностных характеристик, применения дисперсного армирования в строительных композитах.

Цель исследования состоит в научном обосновании и разработке технических решений, которые способствуют повышению эксплуатационных характеристик изделий из высокопористой керамики.

Задачи исследования

1. На основе сравнительного анализа способов создания высокопористых керамических изделий обосновать преимущества технологии аэрирования.

2. Оценить степень влияния различных рецептурно-технологических параметров на физико-механические показатели черепка аэрированной керамики. Определить показатели и критерии эффективности в части получения высокопористой керамики.

3. Установить закономерности направленного регулирования показателей эффективности аэрированной керамики за счет изменения компонентного состава и свойств сырьевой смеси.

4. На основе выявленных закономерностей разработать метод проектирования состава сырьевой смеси для высокоэффективной аэрированной керамики.

5. Апробация результатов исследований на производственных составах сырьевой смеси для стеновых изделий из аэрированной керамики. Обоснование технико-экономической эффективности производства высокопористых керамических изделий с заданными характеристиками.

Объект исследования – керамические изделия с высокопористой структурой, полученные по технологии аэрирования.

Предмет исследования – закономерности структурообразования высокопористых керамических изделий.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Установлено, что ключевыми факторами, определяющими формирование ячеистой структуры и стабильность аэрированной глиняной массы заданной плотности, являются расход шамота и степень дисперсного армирования. Определены диапазоны варьирования значений указанных факторов, обеспечивающие снижение воздушной усадки в 1,2...1,7 раза, огневой усадки на 36...61 %.

2. Выявлена зависимость между химическим составом глинистого сырья и прочностью аэрированной керамики. Показано, что при направленном регулировании химического состава сырьевой шихты достигается повышение прочности высокопористой керамики в 1,7...2,4 раза.

3. Установлено, что содержание в шихте тугоплавких оксидов (Al_2O_3 и TiO_2) в диапазоне 30...35 % обеспечивает достижение коэффициента конструкционного качества до 13МПа при её плотности не более 800 кг/м³.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении представлений о структурообразовании аэрированной керамики в зависимости от состава сырьевой шихты, что выражается в возможности обеспечивать

получение высокопористой строительной керамики с повышенными значениями коэффициента конструкционного качества.

Практическая значимость работы состоит в разработке нового вида высокопористой керамики, получаемой на основе аэрирования сырьевой шихты, состав которой определяется с использованием предложенного метода проектирования, обеспечивающего при заданных режимах изготовления направленное регулирование свойств аэрированной керамики в диапазоне плотности от 400 до 800 кг/м³ и прочности от 3 до 10 МПа, отличающейся уменьшенным на 55...87 % количеством брака после обжига.

Сформулированные соискателем выводы и практические рекомендации могут быть использованы для организации новых или модернизации существующих производств, выпускающих керамические строительные материалы и изделия для применения их в строительстве и различных отраслях промышленности.

Методология и методы исследования. В диссертации использовались теоретические и экспериментальные результаты исследований ведущих отечественных и зарубежных ученых в области получения пористых керамических материалов и дисперсного армирования строительных материалов. В процессе диссертационного исследования физико-механические показатели пористых керамических изделий определяли по действующим нормам и регламентам. Экспериментальные исследования проводились с использованием современного научно-исследовательского оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование технологии подбора состава сырьевой шихты для получения высокопористых керамических изделий с высоким коэффициентом конструктивного качества;

2. Рациональные составы исходного сырья с использованием дисперсного армирования шихты для получения аэрированной керамики повышенной прочности;

3. Математическая модель расчета прочностных характеристик высокопористых керамических изделий с учетом химического состава сырьевых компонентов;

4. Метод проектирования состава сырьевой шихты для получения аэрированной керамики со средней плотностью в диапазоне от 400 до 800 кг/м³ и прочностью при сжатии от 3 до 10 МПа.

5. Апробация результатов лабораторных исследований в производственных условиях действующего предприятия по выпуску керамических изделий.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия: п. 6 «Научное обоснование и разработка высокопрочных, экологически безопасных, биопозитивных, энергоэффективных, природоподобных строительных материалов, обеспечивающих

строительство зданий и сооружений различного назначения, в том числе быстровозводимых и легко трансформируемых».

Степень достоверности и апробация результатов

Полученные результаты и достоверность исследования подтверждены экспериментальными данными, полученными с применением стандартных и аналитических методов (элементного, рентгенофазового и электронно-микроскопического), использованием лабораторного метрологически аттестованного испытательного оборудования и поверенных средств измерений. Программа экспериментальных исследований предусматривает достаточное количества проводимых опытов, обеспечивающих соответствие результатов критериям адекватности и воспроизводимости.

Результаты исследований представлены на научных мероприятиях, в числе которых: I-я международная конференция «Композиционные материалы и конструкции в современном строительстве FibroMix 2018» (РФ, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10-12 октября 2018г.), 25-я международная выставка строительных и отделочных материалов «InterStroyExpo 2019» (РФ, Санкт-Петербург, КВЦ Экспофорум, 18-20 апреля 2019г.), XVII-я международная конференция огнеупорщиков и металлургов (РФ, Москва, НИТУ «МИСиС»), а также 4-х научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ.

Публикации. Основные положения, результаты и выводы проведенных исследований опубликованы в 15 печатных работах общим объемом 9,375 п. л., лично автором – 7,494 п. л., из них 1 в изданиях, индексируемых в базе Scopus, и 3 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК РФ, получен 1 патент РФ на изобретение № 2663980 (20.11.2017 г.).

Личный вклад автора. Автором самостоятельно обоснована и сформулированы цель и задачи работы, проведен аналитический обзор научно-технической информации, разработаны рациональные составы и исследованы физико-механические характеристики высокопористых керамических изделий, рассчитана математическая модель, определяющая прочностные показатели изделий в зависимости от химического состава шихты, проведена апробация полученных результатов для практических условий, опубликованы основные результаты исследований.

Структура и объем диссертационной работы. Состав диссертации включает следующие основные элементы: введение, 5 глав основного материала работы, заключение, список литературы из 120 источников, 7 приложений. Общий объем диссертации составляет 167 страниц. В работу включены: 48 рисунков, 30 таблиц, 46 формул.

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведена научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования.

В первой главе рассмотрены известные технические решения получения строительной высокопористой керамики и произведен их сравнительный анализ. Рассмотрены основные кинетические принципы влагопереноса поризованных керамических сырцов, показана эффективность электролитов в составе глинистой суспензии для управления параметров коагуляции шихты. Установлена значимость применения дисперсного армирования в технологическом процессе изготовления пористых керамических изделий. Показан способ аэрирования шихты, как один из наиболее рациональных в области снижения средней плотности керамических изделий при сохранении высоких прочностных показателей.

Во второй главе обозначен принцип изготовления аэрированных керамических образцов, определен их компонентный состав, показаны основные характеристики сырьевых материалов, выбраны параметры полнофакторного эксперимента, как основного метода определения оптимальных составов аэрированных керамических изделий.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по определению рациональных составов аэрированных керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$ и прочность при сжатии $3 \div 10 \text{ МПа}$. Представлены и проанализированы уравнения регрессии для определения воздушной усадки аэрированных керамических сырцов и расчета параметров прочности готовых изделий на основе различного глинистого сырья.

В четвертой главе представлены результаты исследования макроструктуры и предложена математическая модель расчета прочности при сжатии аэрированных керамических изделий в зависимости от химического состава исходного глинистого сырья с учетом расчетного значения температуры огнеупорности. Проведен фазовый и элементный анализы и предложен критерий относительной прочности, как идентификатор в классификации керамических изделий. Разработан метод проектирования состава сырьевой шихты для получения аэрированной керамики с улучшенными эксплуатационными свойствами: средней плотностью $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$ и прочностью при сжатии $3,0 \div 10,0 \text{ МПа}$.

В пятой главе изложены результаты опытно-промышленных испытаний разработанных составов аэрированных керамических изделий, представлена принципиальная схема их производства, произведен расчет экономической эффективности технологии изготовления аэрированных керамических изделий (средняя плотность 550 кг/м^3 , формат 1НФ) на базе предприятия ОАО «БКСМ» (Новгородская область, г. Боровичи).

В заключении представлены выводы, полученные при решении установленных задач диссертации, изложены основные результаты проведенных исследований, а также сформулированы предложения в отношении возможных направлений продолжения работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обоснование технологии подбора состава сырьевой шихты для получения высокопористых керамических изделий с высоким коэффициентом конструктивного качества

В результате анализа существующих способов создания пористых структур строительных керамических материалов можно выделить следующие основные пути снижения средней плотности керамического черепка:

- выжигание выгорающих добавок;
- введение пористых заполнителей;
- газообразование;
- вспучивание;
- пенообразование;
- аэрирование.

Каждый из вышеуказанных способов снижения средней плотности керамических изделий характеризуется наличием определенных преимуществ и недостатков. Выбор технологии поризации зависит от качества глинистого сырья конкретного месторождения, а также от требуемых физико-механических параметров получаемых керамических изделий.

Одним из показателей строительных материалов, условно характеризующих их эксплуатационные качества, является коэффициент конструктивного качества (К.К.К.). Чем выше К.К.К. используемого материала, тем эффективность применения материала повышается. Для систематизации и сравнения различных способов снижения средней плотности керамических материалов их эффективность выражена через К.К.К. и представлена таблице 1.

Таблица 1. Характеристики существующих способов снижения средней плотности керамических изделий

Наименование технологических приемов	Плотность средняя, кг/м ³	Показатель прочности при сжатии, МПа	К.К.К., МПа
Выжигание выгорающих добавок	800–1650	0,9–15,0	1,06–9,67
Введение пористых заполнителей	500–600	2,6–5,0	5,20–8,33
Газообразование	300–1000	1,0–6,0	3,33–9,52
Вспучивание	450–950	2,0–7,6	4,00–8,74
Пенообразование	400–750	1,5–8,0	3,75–10,66
Аэрирование	350–860	0,8–10,3	2,29–11,98

Из таблицы 1 следует, что наименее эффективным способом снижения плотности является выжигание выгорающих добавок, наиболее эффективным – пенообразование и аэрирование. Оба способа используют в своей основе шликерную технологию приготовления глинистой массы, где одним из важнейших реологических параметров является вязкость при наименьшем водотвердом отношении.

Способ аэрирования позволяет равномерно распределить армирующие волокна в аэрированной керамической массе (АКМ) при ступенчатом регулировании ее плотности, что, в значительной мере, способствует формированию бездефектной структуры аэрированных керамических сырцов (АКС) и готовых аэрированных керамических изделий (АКИ).

Согласно проведенному литературному анализу и результатам предварительных исследований для установления закономерности формирования структуры АКМ использовались смеси и составы, включающие следующие основные компоненты: глинистое сырье; вода; отошающая добавка (шамот марки ПШБМ), воздухововлекающая добавка (ПАВ «ПБ – Формула 2012») армирующий (базальтовая фибра, длина волокна 13 мм) и разжижающий (натриевое жидкое стекло) компоненты.

Применение фибры большей длины не позволяет провести высокоскоростное аэрирование в смесителе без разрушения ячеистой структуры (рисунок 1). Использование волокон менее 8 мм снижает эффективность их работы на компенсацию растягивающих усилий при сушке АКМ, а также увеличивается вероятность разрушения сплошности образуемых при аэрировании АКМ пористой структуры.

В работе использовано глинистое сырье различных месторождений с отличающимся химическим и минеральным составами (таблица 2). Глину предварительно измельчали до порошкообразного состояния с максимальным размером частиц не более 0,16 мм.

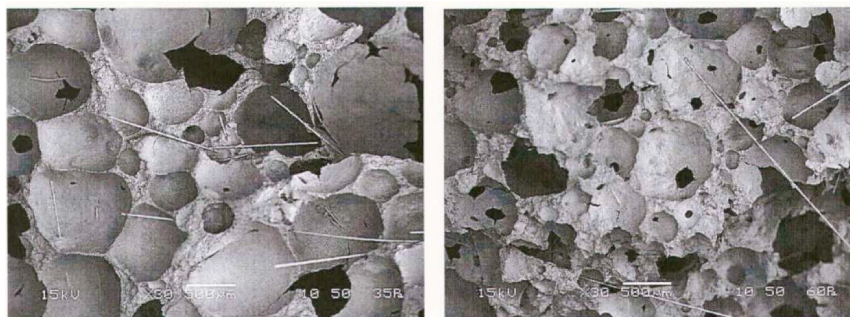


Рисунок 1 – Фотография макроструктуры АКС с распределенной по объему базальтовой фиброй (×30)

Таблица 2 – Химический состав глинистых компонентов

Наименование глинистого компонента (наименование месторождение)	Наименование химических элементов глинистого сырья						
	Na ₂ O+K ₂ O	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	MgO	п.п.п
Глина каолиновая (Новгородская область)	2,13	0,85	48,35	1,24	33,60	0,47	13,36
Глина Боровичско-Любытинская (Новгородская область)	4,32	4,53	55,34	7,29	17,70	2,42	8,40
Суглинок Шабердинский (Удмуртская республика)	4,45	1,41	66,32	5,36	13,85	2,64	5,97
Глина кембрийская (Ленинградская область)	5,43	1,38	61,95	4,82	18,02	3,67	4,73

Режим термической обработки АКС в настоящей работе принят неизменным. Параметры обработки (240 мин. – подъем до температуры обжига 1000 °С, 150 мин. – изотермическая выдержка при 1000 °С, далее – естественное охлаждение в камере печи до 80 °С) выбраны на основе предварительных исследований. Для оценки свойств черепка использовались образцы АКИ размером 250×120×65 мм, соответствующих форме стандартного кирпича.

Исходя из вышесказанного, сформулирована *рабочая гипотеза*, заключающаяся в том, что повышение эффективности и качества стеновых изделий из высокопористой керамики с улучшенными характеристиками достигается применением технологии аэрирования и сырьевых смесей, полученных с учетом научно обоснованных принципов и разработанного метода проектирования рационального компонентного состава.

2. Рациональные составы исходного сырья с использованием дисперсного армирования шихты для получения аэрированной керамики повышенной прочности

Для установления закономерности получения АКИ, изготавливаемых из компонентных составов разных плотностей произведен полный трехфакторный эксперимент, включающий анализ получаемых математических

моделей. Каждый из рассматриваемых факторов принимал значения на двух уровнях. Задача эксперимента состояла в построении уравнений регрессии для следующих параметров оптимизации: воздушная усадка (Δl_v), предел прочности при сжатии ($R_{сж}$). Результатом эксперимента явилось определение рациональных составов АКИ и математическое описание связи между величиной средней плотности и расчетным значением предела прочности при сжатии для каждого типа исследуемого глинистого сырья.

Прочностные показатели (предел прочности при сжатии $R_{сж}^1$, $R_{сж}^2$, $R_{сж}^3$, $R_{сж}^4$), АКИ на основе кембрийской, Боровичско-Любытинской, каолиновой глин и шабердинского суглинки, соответственно, изготовленных из рациональных составов, представлены в таблице 3.

Расход шамота может варьироваться в пределах 1,6 кг, базальтовой фибры — в пределах 0,02 кг, относительно значений, указанных в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства АКМ и АКИ рациональных составов

Расход шамота на 1 м ³ АКМ, кг	Расход базальтовой фибры на 1 м ³ АКМ, кг	Среднее значение плотности АКМ, кг/м ³	Плотность АКИ	Прочность при сжатии АКИ			
				$\rho_{ср}$, кг/м ³	$R_{сж}^1$, МПа	$R_{сж}^2$, МПа	$R_{сж}^3$, МПа
26,2	0,74	459	408	3,5	3,0	4,7	3,3
30,4	0,79	481	438	3,9	3,4	5,2	3,7
37,3	0,85	510	456	4,1	3,61	5,5	3,9
44,2	0,90	543	486	4,5	4,1	5,9	4,3
76,5	1,33	561	505	4,8	4,3	6,2	4,6
82,6	1,40	582	532	5,6	4,7	6,5	4,9
88,3	1,42	614	559	5,7	5,1	6,8	5,2
94,1	1,48	639	586	5,9	5,4	7,3	5,7
147,8	1,76	661	604	6,1	5,7	7,6	5,8
150,7	1,81	690	629	6,5	6,1	7,9	6,1
158,9	1,84	728	661	6,8	6,4	8,3	6,6
165,4	1,89	754	695	7,4	6,8	8,8	7,1
205,2	2,16	784	719	7,7	7,2	9,1	7,3
210,4	2,20	805	743	7,9	7,6	9,5	7,7
216,9	2,25	832	776	8,5	8,1	9,9	7,9
221,3	2,30	850	790	8,6	8,2	10,2	8,3

Величина показателя предела прочности при сжатии имеет линейный характер изменения в зависимости от величины средней плотности и увеличивается от 3 до 10 МПа.

3. Математическая модель расчета прочностных характеристик высокопористых керамических изделий с учетом химического состава сырьевых компонентов

Расчетное значение предела прочности при сжатии АКИ предложено определять на основе зависимости расчетной температуры огнеупорности компонентного состава АКМ от его химического состава, установленной В.Б. Зверевым:

$$T_{\text{огн}}^{\text{расч}} = \left(\frac{2,92}{1 + 1,156K_{\text{пл}}} - 1 \right) \times 798 \pm \Delta t, \quad (1)$$

где $T_{\text{огн}}^{\text{расч}}$ – расчетная температура глинистого компонента по признаку огнеупорности, °С; Δt – поправка по температуре плавления; $K_{\text{пл}}$ – число плавкости глины.

$$K_{\text{пл}} = \frac{a_1 n_1 + a_2 n_2 + a_3 n_3 + a_4 n_4 + a_5 n_5}{b_1 m_1 + b_2 m_2}, \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – постоянные значения показателя плавкости для оксидов железа, кальция, магния, калия и натрия соответственно ($a_1 = 0,8, a_2 = 0,5, a_3 = 0,6, a_4 = a_5 = 0,8$); n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 – показатели содержания оксидов железа, кальция, магния, калия и натрия соответственно, % по массе шихты; b_1, b_2 – постоянные значения показателя плавкости для оксидов кремния и алюминия соответственно ($b_1 = 1, b_2 = 1,2$); m_1, m_2 – показатели содержания оксидов кремния и алюминия соответственно, % по массе шихты.

$$\Delta t = 833,3e - 100, \quad (3)$$

где e – значения для глиноземисто-щелочного модуля глинистого компонента.

$$e = \frac{M_1}{M_2 + M_3 + M_4}, \quad (4)$$

где M_1, M_2, M_3, M_4 – показатель содержания оксидов алюминия, кремния, калия и натрия соответственно, %/моль.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов показателей огнеупорности принятых вариантов глинистого сырья

Наименование глинистого компонента (сырья)	e	$K_{пл}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$T_{огн}^{расч}, ^\circ\text{C}$
Кембрийская глина	0,156	0,146	34,0	1227
Боровичско-любыйтинская глина	0,177	0,181	47,5	1177
Каолиновая глина	0,395	0,043	230	1651
Шабердинский суглинок	0,116	0,133	-3,3	1220

Графическая интерпретация полученных результатов (таблица 3) отображена в виде соответствующих графиков на рисунке 2.

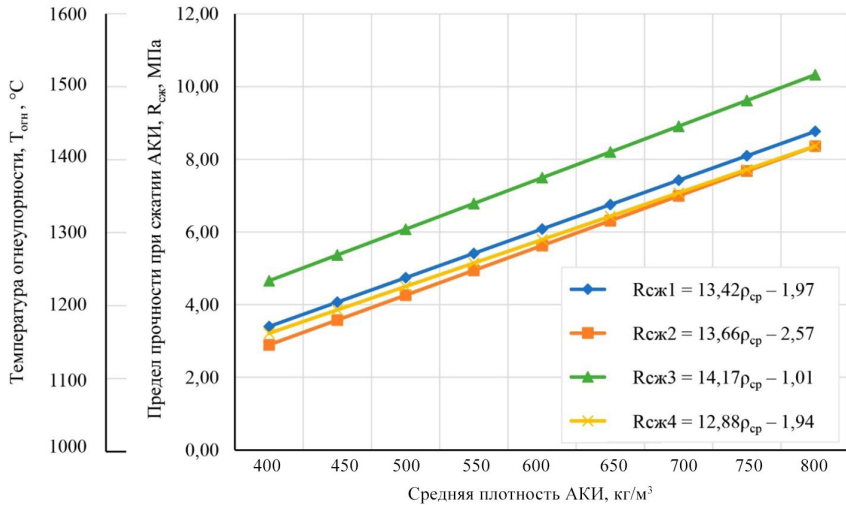


Рисунок 2 – Графическая интерпретация выявленных зависимостей показателей средней плотности АКИ от предела прочности при сжатии и температуры огнеупорности

В соответствии с данными, представленными на рисунке 2, связь между пределом прочности при сжатии и температурой огнеупорности можно отобразить аналитической зависимостью вида:

$$R_{сж} = 0,02T_{огн} - 20. \quad (5)$$

Аналитическая зависимость вида (5) может быть модифицирована введением общего коэффициента (k_0) и коэффициента температурного

соответствия (k_i). Добавление указанных коэффициентов позволяет учесть особенности конкретного месторождения глинистого компонента. По результатам расчета, полученных для кембрийской глины (формулы 6 и 7 соответственно), коэффициенты k_o и k_i равны:

$$k_o = \frac{T_{\text{огн}}}{T_{\text{огн}}^{\text{расч}}} = \frac{50R_{\text{сж}} + 1000}{T_{\text{огн}}^{\text{расч}}} = \frac{50 \times (13,42\rho_{\text{ср}} - 1,97) + 1000}{1227} = 0,547\rho_{\text{ср}} + 0,735. \quad (6)$$

Величины коэффициентов температурного соответствия (k_i^1 , k_i^2 , k_i^3 , k_i^4), для исследуемых глинистых компонентов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Величина коэффициентов температурного соответствия для принятых к рассмотрению видов и месторождений глинистого компонента

k_i^1	k_i^2	k_i^3	k_i^4
0,9996	1,0252	0,7828	1,0042

Окончательный вид аналитической зависимости между пределом прочности при сжатии и расчетной температурой огнеупорности, с учетом конкретных особенностей глинистого компонента, имеет следующий вид:

$$R_{\text{сж}} = 0,02k_i(0,547\rho_{\text{ср}} + 0,735)T_{\text{огн}}^{\text{расч}} - 20. \quad (8)$$

Сравнение величин показателя пределов прочности при сжатии АКИ, рассчитанных в соответствии с зависимостью (8), и экспериментальных данных (таблица 4), свидетельствует о высокой сходимости результатов: отклонения не превышают 5 %.

Таким образом, формула (8) позволяет определять рациональный компонентный состав АКМ без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований и осуществить экспресс-оценку местного глинистого сырья на предмет возможности производства АКИ повышенной прочности.

4. Метод проектирования состава сырьевой шихты для получения азрированной керамики со средней плотностью в диапазоне от 400 до 800 кг/м³ и прочностью при сжатии от 3 до 10 МПа.

Для получения азрированной керамики необходимой средней плотности и прочности при сжатии используются следующие этапы проектирования состава сырьевой шихты:

Этап 1. Формирование проектных характеристик азрированной керамики

Начальный этап проектирования состоит в определении требуемых значений средней плотности и прочности при сжатии аэрированной керамики и расчете К.К.К. по заданным параметрам. Формула 8 позволяет определить численное значение $T_{\text{огн}}^{\text{расч}}$, которое необходимо получить для достижения требуемых параметров.

При К.К.К. от 7,36 до 10,77 используется формула 9:

$$T_{\text{огн}}^{\text{расч}} = 1479 - 909 \times \sqrt{2,65 - 0,19 \times \frac{R_{\text{сж}} + 20}{\rho_{\text{ср}} + 1,34}}. \quad (9)$$

При К.К.К. от 10,78 до 11,52 используется формула 10:

$$T_{\text{огн}}^{\text{расч}} = 1479 + 909 \times \sqrt{0,19 \times \frac{R_{\text{сж}} + 20}{\rho_{\text{ср}} + 1,34} - 2,65}. \quad (10)$$

Этап 2. Определение химического состава сырьевой шихты

Расчетное значение огнеупорности сырьевой шихты $T_{\text{огн}}^{\text{расч}}$ формируется на основе химического состава глинистого компонента. Формула 1 позволяет произвести расчет $T_{\text{огн}}^{\text{расч}}$ и выбрать тип используемого глинистого компонента или смесь из нескольких глинистых компонентов.

Этап 3. Определение компонентного состава сырьевой шихты – определение оптимального количества разжижающих добавок

Данный этап позволяет найти оптимальное соотношение воды, глинистого компонента и разжижающих добавок, при котором достигается требуемое значение относительной вязкости при минимальном содержании воды.

Величина относительной вязкости определяется с использованием вискозиметра Энглера по формуле:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (11)$$

где T_1 , T_2 – время истечения глинистого шликера и воды равного объема соответственно, с.

Проектное значение относительной вязкости глинистого шликера находится в диапазоне значений от 1,2 до 1,3. Оптимальное содержание разжижающих добавок составляет от 0,8 до 1,2 % от массы глинистого компонента.

– определение оптимального количества отошающих добавок.

Количество отошающей добавки на начальном этапе подбора принимается исходя из данных таблицы 4. Предельное содержание отошающей добавки в составе шликера характеризуется достижением значений его относительной вязкости не более 1,8.

Далее перед этапом аэрирования сырьевой шихты ее итоговая относительная вязкость уменьшается до диапазона значений 1,4÷1,5, путем

добавления необходимого количества воды. Водотвердое отношение готовой сырьевой шихты перед аэрированием должно находиться в значениях от 0,45 до 0,55.

– *определение коэффициента коагуляции готовой сырьевой шихты.*

Скорость коагуляции глиняных шликеров в технологии аэрированной керамики определяет интенсивность набора начальной структурной прочности отформованных сырцов. Коэффициент коагуляции определяется по формуле 12:

$$K = \frac{\eta_{\text{отн}}}{\eta_{\text{отн}}^5}, \quad (12)$$

где $\eta_{\text{отн}}$ – относительная вязкость сырьевой шихты в начальный момент изменения после перемешивания, $\eta_{\text{отн}}^5$ – относительная вязкость сырьевой шихты после 5 минут без перемешивания.

Оптимальное значение коэффициента коагуляции должно находиться в диапазоне значений от 0,67 до 0,78. В случае, если проектируемый компонентный состав шихты не достигает указанного интервала значений, необходимо осуществить пересмотр количества используемой отошающей добавки.

– *определение оптимального количества воздуховлекающих и армирующих добавок.*

Перед началом процесса аэрирования в готовую сырьевую шихту добавляются воздуховлекающая и армирующая добавки. Расход армирующей добавки принимается исходя из данных таблицы 4.

Содержание воздуховлекающей добавки варьируется исходя из заданной средней плотности аэрированной керамической массы и находится в диапазоне значений 1,2÷1,6 % от количества воды в готовой шихте.

Процесс аэрирования останавливается при достижении заданной плотности керамической массы с последующим ее формованием в бортовые формы требуемых геометрических размеров.

Этап 4. Испытание опытной партии аэрированной керамики и корректировка состава

Спроектированный компонентный состав является основой для изготовления изделий опытной партии. На основе анализа полученных физико-механических показателей необходимо внести корректировку в исходный компонентный состав сырьевой шихты. В случае изменения значений средней плотности и/или прочности при сжатии необходимо произвести корректировку химического состава сырьевой шихты.

5. Апробация результатов лабораторных исследований в производственных условиях действующего предприятия по выпуску керамических изделий.

Апробацию экспериментальных результатов производили на территории Боровичского комбината строительных материалов (АО «БКСМ», 174409, Новгородская обл., г. Боровичи, ул. Загородная, д. 38). Выпуск опытно-промышленной партии АКИ осуществляли в виде кирпичей с размерами 250×120×65 мм средней плотностью 400–800 кг/м³ в количестве 8000 шт. на основе Боровичско-Любытинской глины. Для получения аэрированной керамики заданной средней плотности и прочности использовали разработанный выше метод проектирования состава сырьевой шихты. Физико-механические показатели АКИ, сведены в таблицу 6. Внешний вид АКИ продемонстрирован на рисунке 3.

Таблица 6 – Физико-механические показатели опытной-промышленной партии АКИ

Наименование характеристики (показателя)	Величина характеристик (показателя)				
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5
Плотность средняя, кг/м ³	432	511	592	674	754
Пористость общая, % по массе	82,3	78,5	76,6	72,2	68,9
Коэффициент паропроницаемости материала, мг/м·ч·Па	0,252	0,224	0,186	0,153	0,133
Коэффициент теплопроводности материала в сухом состоянии, Вт/м·°С	0,112	0,132	0,154	0,171	0,192
Предел прочности при изгибе, МПа	1,11	1,62	2,24	2,81	3,22
Предел прочности при сжатии, МПа	3,23	4,25	5,23	6,13	7,45
Группа горючести	НГ				
Марка по морозостойкости, не менее	F50				
Коэффициент конструктивного качества (К.К.К), МПа	7,42	8,20	8,81	9,39	9,97



Рисунок 3 – Вид АКИ различной средней плотности
на основе исследованных глин

Величина средних отклонений фактических значений предела прочности при сжатии опытных промышленных образцов АКИ от лабораторных АКИ составляет около 5%, что подтверждает высокий уровень сходимости результатов. Значения коэффициента конструктивного качества изделий составляет от 7,42 до 9,97 МПа. Себестоимость сырьевой составляющей (в структуре общей себестоимости), необходимой для производства 1 м³ АКИ составляет 1123 рубля 80 копеек.

Для определения минерального состава образцов выполнен рентгенофазовый анализ (рисунок 3). Съемка проводилась в угловом диапазоне 2 Θ между 20 и 80° с помощью порошкового дифрактометра D2 PHASER Bruker. Идентификация пиков на дифрактограмме проводилась с помощью программного комплекса TOPAS.

С использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH выполнен рентгеноспектральный микроанализ (таблица 7).

Таблица 7 – Элементный состав образцов АКИ

№ п/п	Содержание элемента, %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
max	14,06	59,65	1,29	1,61	8,91	23,22	2,91	2,45	0,00	5,36
min	0,00	54,19	1,29	1,01	6,43	17,13	1,85	1,52	0,00	3,72

Образцы АКИ на основе боровичско-любывинской глины имеют следующий количественный состав: кварц – 38,55 %, гематит – 10,33 %, альбит – 9,79 %, мусковит – 7,65 %, микроклин промежуточный 1 – 8,19 %, микроклин промежуточный 2 – 9,65 %, олигоклаз An25 – 15,84 %. Присутствие минералов гематита обуславливает темно-красный цвет керамического черепка АКИ.

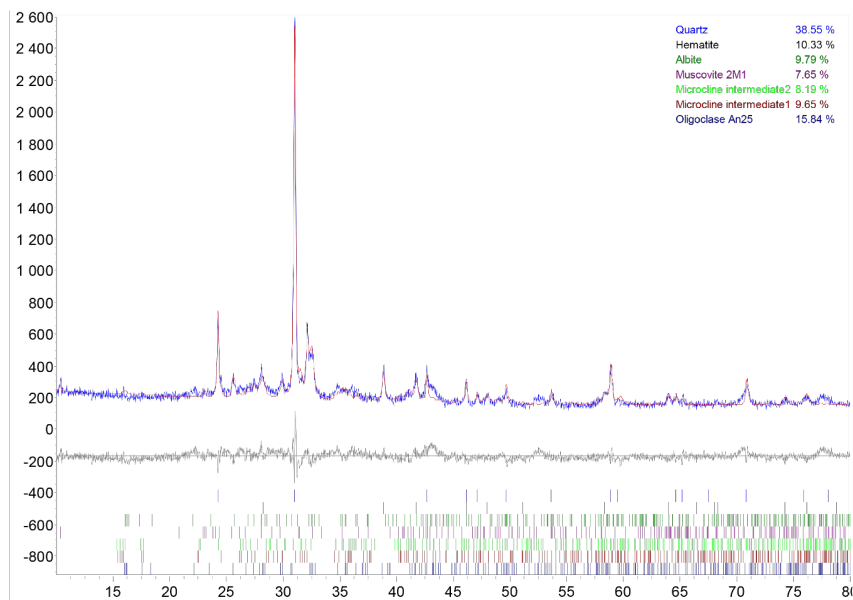


Рисунок 4 – Рентгенограмма АКИ на основе боровичско-любывинской глины

Значительное суммарное содержание микроклина (около 18 %), который образовался в результате твердо-фазовых посткристаллизационных превращений ранее образованного моноклинного калиевого полевого шпата, способствует формированию плотной структуры межпоровых перегородок. Наличие около 16 % олигоклаза указывает на то, что при установленном в исследовании режиме обжига, олигоклаз не успел полностью преобразоваться в альбит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам литературного обзора и анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации установлена эффективность метода аэрирования керамических масс для получения высокопрочных изделий пониженной плотности, а также рациональность использования в компонентном составе АКМ базальтовой фибры для снижения общей усадки (на 20 ± 25 %).

2. На основании полнофакторного эксперимента определены рациональные составы АКИ с требуемыми физико-механическими свойствами. Исследована динамика влияния факторов и их комбинаций в зависимости от средней плотности глинистого сырья (в интервале значений от 400 до 800 кг/м³) на такие параметры оптимизации, как воздушная усадка и предел прочности при сжатии.

3. Выявлены зависимости между значением показателя предела прочности при сжатии АКИ и химическим составом керамической шихты, которые позволяют прогнозировать эффективность использования глинистого сырья различных месторождений при проектировании компонентного состава шихты для производства пористых керамических изделий по технологии принудительного азирования. Исследована макроструктура полученных АКИ на основе различного глинистого сырья и установлено, что базальтовая фибра, используемая в компонентном составе АКМ, после термической обработки превращается в расплав и участвует в формировании структуры межпоровой керамической матрицы АКИ.

4. Разработан метод проектирования компонентного состава шихты для получения АКИ, основанный на использовании расчетного значения температуры огнеупорности сырьевой шихты, и позволяющий получать бездефектные изделия с заданными величинами физико-механических показателей: средняя плотность 400÷800 кг/м³ и прочность при сжатии: 3÷10 МПа.

5. В опытно-промышленной партии изделий АКИ в виде полнотелого кирпича 1 НФ получена продукция с диапазоном значений физико-механических показателей: средняя плотность 431÷752 кг/м³ и прочность при сжатии до 3,2÷7,5 МПа. Фактические значения характеристик опытно-промышленных образцов в сравнении с лабораторными образцами, изготовленными из сырьевой шихты по разработанному методу проектирования азированной керамики, отличаются не более чем на 5%.

6. Определена общая (с учетом производственной и сырьевой составляющих) себестоимость производства АКИ средней плотности 550 кг/м³, которая составила 2079 рублей/м³ или 4,06 рубля/единица условного изделия (кирпича). Общая себестоимость производства АКИ средней плотности 550 кг/м³ сопоставима с величиной общей себестоимости изготовления традиционных видов (например, глиняного полнотелого кирпича) керамических изделий. Одновременно с этим, величина расхода глинистого сырья, необходимого для АКИ средней плотности 550 кг/м³ значительно меньше, по сравнению с расходом для изготовления традиционного керамического кирпича.

Перспективы дальнейших исследований:

Планируется дальнейшее проведение комплексных научно-исследовательских работ с целью разработки обобщенной методики проектирования и испытаний АКИ на основе глинистых пород различных месторождений

с использованием технологической операции принудительного аэрирования и применения дисперсного армирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus

1. **Dmitriev, K.** Foundations for designing of aerated ceramic mixtures [электронный ресурс] / K. Dmitriev, A. Kharitonov // Urbanism. Architecture. Constructions. 2022. – Vol. 13, No. 2, URL: <https://uac.incd.ro/Art/v13n2a6.pdf> (дата обращения: 20.02.2023) (0,625/1,25 п. л.).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. **Дмитриев, К.С.** Особенности проектирования состава пенокерамических изделий [текст] / К.С. Дмитриев // Вестник гражданских инженеров. – СПбГАСУ. – 2015. – №4(51) – С. 112–116 (0,625 п. л.).

3. **Дмитриев, К.С.** Способ аэрирования керамических масс в технологии легковесных огнеупоров [текст] / К.С. Дмитриев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2018. – № 3 – С. 36–44 (1,0 п. л.).

4. **Дмитриев, К.С.** Методика расчета предела прочности при сжатии аэрированных керамических изделий по химическому составу шихты [текст] / К.С. Дмитриев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42) – С. 16–24 (1,0 п. л.).

Патенты

5. Патент № 2663980 РФ, МПК С04В 38/10, С04В 33/13. Способ изготовления аэрированных керамических изделий / **Дмитриев К.С.**; опубл. 14.08.2018, Бюл. № 23.

Публикации в других изданиях

6. **Дмитриев, К.С.** Зависимость области использования керамического сырья от его химического состава [Текст] / К. С. Дмитриев, В. Б. Зверев // Актуальные проблемы современного строительства: 64-я международная научно-техническая конференция молодых ученых / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – В 3 ч. Ч. II. СПб., 2011. – С. 214–216 (0,375/0,188 п. л.).

7. **Дмитриев, К.С.** Разработка состава керамических шихт с использованием побочных продуктов промышленности для Боровичского комбината строительных материалов (БКМ) [Текст] / К.С. Дмитриев, В.Б. Зверев // Научно-исследовательская работа студентов СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов победителей конкурса грантов 2010 – 2011 г. Вып. 7. / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., 2011. – С. 96–109 (1,75/0,88 п. л.).

8. **Дмитриев, К.С.** Особенности возникновения усадочных деформаций при сушке керамических изделий [текст] / К.С. Дмитриев, О.А. Григораш, Ю.А. Сучкова // Актуальные проблемы строительства: материалы Международной

научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., 2013. С. 160–162 (0,375/0,125 п. л.).

9. **Дмитриев, К.С.** Усадочные деформации при сушке пенокерамических изделий [электронный ресурс] / К.С. Дмитриев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21031> (дата обращения: 08.03.2018) (1,0 п. л.).

10. **Дмитриев, К.С.** Пептизация глинистых суспензий в технологии пенокерамики [текст] / К.С. Дмитриев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10–2 – С. 249–253 (0,625 п. л.).

11. **Дмитриев, К.С.** Пористая керамика: современное состояние и перспективы [текст] / К.С. Дмитриев // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – №7. – С. 152–154 (0,375 п. л.).

12. **Дмитриев, К.С.** Моделирование процессов разжижения глиняных масс [текст] / К.С. Дмитриев // Российско-китайский научный журнал «Содружество». – 2016. – №2 (1). – С. 7–10 (0,5 п. л.).

13. **Дмитриев, К.С.** Современные технологии эффективных ограждающих конструкций [текст] / К.С. Дмитриев // Сборник статей ЦНС «Международные научные исследования» по материалам VII международной научно-практической конференции: «Проблемы и перспективы современной науки», Часть 2. – Москва. – 2016. – №7 – С. 120–122 (0,375 п. л.).

14. **Дмитриев, К.С.** Аэрированная керамика – инновационный материал для энергоэффективного строительства [текст] / К.С. Дмитриев, В.Б. Зверев // Архитектура – строительство – транспорт: материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. 4–6 октября 2017 г.: [в 3 ч.]. Архитектура и строительство. – СПбГАСУ. – 2017. – Ч. I. – С. 98–103 (0,75/0,375 п. л.).

15. **Dmitriev, K.S.** Innovative construction material based on aerated ceramics [текст] / K.S. Dmitriev, V.B. Zverev // Architecture and Engineering. 2017. – Vol. 2, No. 4. p. 9–13 (0,625/1,25 п. л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 22.12.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 189.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.