

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Дмитриев Константин Сергеевич**

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

**Специальность: 2.1.5. Строительные материалы и изделия**

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
А.М. Харитонов

Санкт-Петербург – 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ПОРИЗОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ .....	13
1.1 Технологии создания высокопористых структур керамических материалов .	13
1.2 Особенности разжижения глинистых шликеров для получения поризованных керамических масс.....	45
1.3 Кинетика усадочных деформаций при сушке поризованных керамических сырцов .....	49
1.4 Дисперсное армирование в технологии пористой высокоэффективной керамики .....	59
Выводы по первой главе.....	64
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	66
2.1 Материалы исследований .....	66
2.2 Характеристика технологических особенностей подготовки образцов .....	70
2.3 Оборудование и инструменты .....	73
2.4 Методика проведения исследований .....	75
Выводы по второй главе .....	79
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ СМЕСИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРИСТОЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ КЕРАМИКИ .....	81
3.1 Влияние факторов и их комбинаций на значения воздушной усадки высокопористых керамических сырцов .....	81
3.2 Влияние факторов и их комбинаций на предел прочности при сжатии высокопористых керамических изделий .....	85
3.3 Определение рациональных составов высокопористых керамических изделий .....	89

Выводы по третьей главе.....	90
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШИХТЫ .....	92
4.1 Оценка области промышленного использования глинистого сырья по его химическому составу .....	92
4.2 Методика определения расчетного предела прочности при сжатию аэрированных высокоэффективных керамических изделий .....	94
4.3 Изучение макроструктуры изделий из аэрированной керамики .....	100
4.4 Исследование фазового и элементного анализов аэрированных керамических изделий .....	112
4.5 Метод проектирования состава сырьевой шихты для получения аэрированной керамики со средней плотностью в диапазоне от 400 до 800 кг/м <sup>3</sup> и прочностью при сжатии от 3 до 10 МПа .....	116
Выводы по четвертой главе.....	119
ГЛАВА 5. ВЫПУСК ОПЫТНО–ПРОМЫШЛЕННОЙ ПАРТИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВА .....	121
5.1 Технология изготовления пористых керамических материалов методом аэрирования и результаты опытно-промышленных испытаний .....	121
5.2 Показатели технической и экономической эффективности изготовления поризованных (аэрированных) керамических изделий .....	127
Выводы по пятой главе .....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	153
<i>Приложение А. Результаты расчета параметров уравнений регрессии для функции отклика «воздушная усадка» .....</i>	<i>153</i>
<i>Приложение Б. Результаты расчета параметров уравнений регрессии для функции отклика «предел прочности при сжатии».....</i>	<i>157</i>

<i>Приложение В.</i> Служебная записка. Тестирование аэрированных керамических образцов .....	161
<i>Приложение Г.</i> Диплом победителя конкурса «Инновации в строительстве 2019» .....	164
<i>Приложение Д.</i> Акт № 15 от 24.08.2018. О производстве опытно-промышленной партии аэрированного керамического кирпича .....	165
<i>Приложение Е.</i> Патент на изобретение РФ №2663980 «Способ изготовления аэрированных керамических изделий» .....	166
<i>Приложение Ж.</i> Свидетельство о включении в «Реестр новых научных направлений-2018.....	167

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Керамические изделия входят в число наиболее распространенных и востребованных материалов 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  $680 \text{ кг/м}^3$  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 мелкогазовых сферических пор. Использование данной технологии подразумевает необходимость модификации сырьевой смеси комплексом добавок (армирующих, отошающих, пластифицирующих, воздухоовлекающих и др.) для достижения оптимальной структуры высокопористых готовых изделий, отличающихся повышенными значениями коэффициента конструкционного качества.

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. Боженков, 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., В.А. Береговой, Л.Л. Масленникова, А.Ю. Столобушкин, 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, разработку методов определения технологических параметров при производстве керамических изделий, расширение 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 азрированной керамики.

5. Апробировать результаты исследований на производственных составах сырьевой смеси для стеновых изделий из азрированной керамики. Обосновать технико-экономическую эффективность производства высокопористых керамических изделий с заданными характеристиками.

**Объект исследования** – керамические изделия с высокопористой структурой, полученные по технологии азрирования

**Предмет исследования** – закономерности структурообразования высокопористых керамических изделий.

**Научная новизна исследования** состоит в следующем:

1. Установлено, что ключевыми факторами, определяющими формирование ячеистой структуры и стабильность азрированной 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 азрированной 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  $800 \text{ кг/м}^3$ .

**Теоретическая значимость работы** заключается в расширении представлений о структурообразовании азрированной 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** заключается в предложенном методе проектирования состава сырьевой шихты с учетом выявленных зависимостей, обеспечивающим при заданных режимах изготовления направленное регулирование свойств аэрированной керамики в диапазоне плотности от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup> и прочности от 3 до 10МПа, 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 достижения и данные исследований и экспериментальных результатов 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, характеризующейся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии до  $3,0 \div 10,0$  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 строи-тельных 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 обеспечивается применением стандартных и аналитических методов (элементного, рентгенофазового, электронно-микроскопического и термического анализов), использованием лабораторного метрологически аттестованного испытательного оборудования и поверенных средств измерений. Программа экспериментальных исследований обеспечена достаточным количеством проведённых опытов, говорящих об адекватности и воспроизводимости результатов.

Полученные результаты исследований представлены на научных мероприятиях, в числе которых I Международная конференция «Композиционные материалы и конструкции в современном строительстве FibroMix 2018» (РФ, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10-12 октября 2018 г.), 25 Международная выставка строительных и отделочных материалов «InterStroyExpo 2019» (РФ, Санкт-Петербург, КВЦ Экспофорум, 18-20 апреля 2019 г.), XVII Международная конференция огнеупорщиков и металлургов (РФ, Москва, НИТУ «МИСиС», 16-17 мая 2019 г.), а также четыре научных конференции 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 обоснованы 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, формулировки цели и задач исследований, 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  $3.0 \div 10 \text{ МПа}$ . 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 характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$  и прочность 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  $550 \text{ кг/м}^3$ , формат 1НФ) на базе предприятия ОАО «БКСМ» (Новгородская область, г. Боровичи).

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

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ПОРИЗОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

## 1.1. Технологии создания высокопористых структур керамических материалов

Анализ литературных данных показывает наличие следующих основных технологических приемов в отношении модификации физических параметров керамических материалов, в частности, снижения показателя плотности керамической массы:

- выжиг структурных элементов, добавок и компонентов, способных к выгоранию;
- введение в состав исходной смеси заполнителей пористой структуры;
- газообразование;
- вспучивание;
- пенообразование;
- аэрирование.

В процессе производства пористых керамических изделий встречаются комбинации вышеуказанных способов, позволяющие оптимизировать некоторые технологические операции и получать новые свойства готовых изделий. Вместе с тем, практические технологии производства керамических материалов и изделий пористой структуры ориентированы на способ выжигания выгорающих добавок с механическим образованием пустот или способ введения пористых заполнителей [10,22,31,56,63].

В любом случае, каждый из вышеуказанных способов снижения средней плотности керамических изделий имеет свои достоинства и недостатки. Выбор технологии поризации зависит от качества глинистого сырья конкретного месторождения, а также от требуемых физико-механических параметров получаемых керамических изделий.

Технология добавления в состав керамических масс выгорающих добавок применяется наиболее широко при изготовлении грубой строительной керамики. В процессе обжига отформованных керамических масс происходит выгорание таких добавок, а появляющиеся на их месте поры создают пористую структуру готовых изделий. Данный способ активно используется при производстве легковесных огнеупоров, керамических поризованных камней, диатомитовых теплоизоляционных изделий и др. Выжигание относится к универсальным методам снижения средней плотности при формовании изделий полусухим, литьевым и экструзионным способами.

В современной практике в качестве элементов, добавок и компонентов, способных к выгоранию, в составе смеси наиболее часто применяются следующие вещества органической структуры:

- сланцы горючие;
- уголь каменный или коксующийся;
- торф;
- продукты производства и переработки нефтегазовой отрасли;
- продукты производства и переработки деревообрабатывающей отрасли.

Эффективность применения продуктов производства и переработки деревообрабатывающей отрасли (опилки, волокна, щепа, мука и др.) зависит от вида первоначальной древесной породы: мягкие породы древесины способствуют снижению показателей технологичности и способности к формообразованию первоначальной керамической массы, а также образованию значительной неравномерности конечной пористой структуры в обожжённом керамическом черепке.

Дополнительно к структурным показателям применение опилок в качестве порообразующего компонента сопряжено с некоторыми технологическими ограничениями:

- трудность равномерного распределения в керамической массе;

- неравномерность пористой структуры черепка из-за различных размеров и формы опилок;
- относительно невысокая прочность готовых обожжённых изделий;
- ухудшение формовочных свойств керамических масс при использовании большого количества опилок, что ограничивает значение пористости изделий не более 65%;
- неравномерная усадка и увеличение количества брака в процессе сушки керамических сырцов из-за быстрого впитывание опилками влаги.

Для минимизации негативных свойств опилок и получения более мелкопористой структуры керамического черепка используется лигнин, древесная или пробковая мука.

Производственно-технологический процесс изготовления пористых керамических изделий, ориентированный на применение выгорающих добавок, подразумевает тщательный подход и особое внимание не только к содержанию выгорающих добавок в компонентном составе керамической массы, но и к гранулометрическому составу.

Максимально допустимое содержание выгорающей добавки наиболее часто ограничивается заранее установленными значениями показателей прочности и плотности керамических изделий. Вследствие этого формирование керамических изделий пористой структуры, характеризующихся такими величинами физико-механических показателей, как средняя плотность менее  $600 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии более 3,5 МПа, является весьма затруднительным при использовании способа пластического формования керамической массы.

Кроме того, пористая керамика, получаемая данным способом, ограничена правильно выстроенным режимом обжига. Частичное выжигание добавок приводит к образованию трещин, увеличению средней плотности и снижению проектной прочности изделий. Для получения бездефектных изделий требуется особый режим обжига, включая поддержание окислительной среды на начальном этапе обжига. Ряд авторов отмечает [14,71,89], что наличие большого количества

выгорающих добавок, а также их свойство воспламеняться, делает регулирование режима обжига затруднительным и не позволяет поддерживать заданную температуру в требуемых интервалах.

В технологии получения легковесных теплоизоляционных материалов, в частности шамотных, корундовых, широко используются гранулы полистирола с максимальным размером частиц не более 0,5 мм [55, 61]. После выгорания полистирол не оставляет зольных следов, не впитывает воду и не набухает в процессе формования и сушки сырца, что позволяет изготовить изделия пористостью более 75%. Но полученные таким способом изделия обладают крупнопористой структурой с большим количеством открытых пор, что снижает прочностные и теплофизические показатели керамических легковесов.

Шелковин О.Г. разработал технологию производства легковесных керамических изделий на основе смеси глины и древесной пыли методом вибрационного воздействия (прессования керамических масс). Введение в состав смеси для формования побочного продукта деревообрабатывающей отрасли (древесной муки, количеством 60 % от первоначальной керамической массы), сопровождается технологическим приемом вибрационного воздействия и прессования давлением величиной до 0,1 МПа. Рассматриваемая технология позволяет осуществить формирование легких керамических изделий пористой структуры, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $800 \div 900 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $3,1 \div 5,2 \text{ МПа}$ .

Еще один способ производства легковесных керамических изделий, ориентированный на введение выгорающих добавок из продуктов деревообрабатывающей отрасли в состав керамической массы, предложил Гольдман А.М. Рассматриваемое предложение предполагает введение комбинации выгорающих добавок из продуктов переработки твердых сортов древесины (солома, древесная кора) количеством 10 % от первоначальной керамической массы; побочных продуктов металлургического производства, включая золу гидравлического удаления, количеством 10 % от первоначальной керамической массы и раствор сапропеля  $3 \div 10$  процентной концентрации. Результатом

рассматриваемого состава первоначальной керамической массы является формирование керамических изделий пористой структуры, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $1600 \div 1650$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 15,0 МПа.

Один из технологических приемов повышения качества первоначальной керамической массы, разработанный Кузнецовым А.Н. и Народницким Д.Б., предусматривает предварительное обезвоживание выгорающих добавок из продуктов деревообрабатывающей отрасли (опилок, коры) до состояния не более 10 % влажности.

Компонентный состав керамической массы с включением обезвоженных древесных добавок представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Компонентный состав керамической массы с включением обезвоженных древесных добавок

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глина	78
Древесные опилки (выгорающая добавка)	9,3
Шамот	10
Каменный уголь	2,7

Рассматриваемый технологический прием позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $1500 \div 1550$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 15,0 МПа.

Введение в структурный состав первоначальной керамической массы комбинации выгорающих добавок: стеблей хлопчатника размерами  $5 \div 15$  мм (количеством  $5 \div 10$  % от первоначальной керамической массы), аргиллита (количеством 10 % от первоначальной керамической массы) и отработанной смазочно-охлаждающей жидкости (количеством  $0,5 \div 1,0$  % от первоначальной керамической массы), предложено коллективом авторов как способ понижения значения плотности и прочности для керамических изделий пористой структуры. Результатом рассматриваемого технологического приема является формирование

керамических изделий пористой структуры, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $1370\div 1400$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии до 10,0 МПа.

Технологический прием, ориентированный на снижение величины средней плотности керамических изделий пористой структуры, разработан в государственном университете технологии и дизайна города Санкт-Петербург [31,94].

Компонентный состав первоначальной керамической массы с включением выгорающей добавки (послеспиртовой барды) представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Компонентный состав керамической массы с включением выгорающей добавки (послеспиртовой барды)

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глина кемберийская	75,0
Песок строительный, с модулем крупности 2.0÷2.5	15,0
Послеспиртовая барда (выгорающая добавка)	10,0

Рассматриваемый технологический прием позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $1400\div 1450$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии до 10,0 МПа.

Специалисты ФГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет» разработали структурный состав и технологический процесс производства легковесных керамических изделий, предусматривающий включение в состав первоначальной керамической массы выгорающих добавок в виде модифицированного фрезерного торфа.

Модификация фрезерного торфа состоит в предварительном упрочнении структуры торфа в процессе сушки после его добычи и последующего пиролиза.

Внесение выгорающих добавок в виде модифицированного фрезерного торфа производится непосредственно перед процессом формования смеси и обеспечивает необходимые условия структурного образования керамического

изделия при его добавлении в процессе сушки и обжига подобранного состава глинистой системы [85].

Рассматриваемый технологический прием позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $850 \div 950 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $0,9 \div 1,4 \text{ МПа}$ .

Зарубежный опыт изготовления пористых керамических изделий, ориентированный на применение выгорающих добавок, представлен технологией компании «Poroton», которая широко применяется в Швеции и Германии в течение продолжительного времени [12].

Основной особенностью рассматриваемой технологии является применение в качестве добавок для выгорания гранул вспененного полистирола подобранного состава (неорганический материал).

Подытоживая вышеописанные способы снижения средней плотности керамических изделий методом выжигания добавок, необходимо отметить, что они эффективны для производства конструкционной строительной керамики, но изготовление керамических изделий средней плотности менее  $800 \text{ кг/м}^3$  с высокими прочностными показателями пластическим формованием и полусухим прессованием затруднительно.

Инновационная, нетрадиционная технология изготовления пористых керамических изделий (пониженной плотности), известная как метод «неплотной упаковки» разработана под руководством П.Б. Куксы в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете [31,50].

Основной особенностью рассматриваемой технологии является структура керамического изделия в форме лент-жгутиков (длиной  $20 \div 100 \text{ мм}$  при толщине поперечного сечения  $1 \div 2 \text{ мм}$ ), которая образуется посредством обработки первоначальной глинистой системы. Система вращающихся гофрированных валиков разных диаметров и обернутых резиновыми лентами размещается на стационарной установке и разрезает струнами пластичную керамическую

структуру на элементы установленных размеров. Далее сформированный образец сырец направляют на сушку и обжиг при температуре до 1000°C.

Керамические изделия, изготовленные методом «неплотной упаковки», представлены на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Керамические изделия, изготовленные методом «неплотной упаковки»

Рассматриваемый технологический прием позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $1000 \div 1100 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $4 \div 5 \text{ МПа}$ .

Еще одним эффективным способом понижения средней плотности керамических изделий является введение в керамическую массу высокопористых заполнителей (трепел, диатомит, вермикулит, вспученный перлит, керамзит и др.).

Известен способ изготовления перлитовых теплоизоляционных изделий, используемых для тепловой изоляции тепловых агрегатов и оборудования, работающих в диапазоне температур до 900°C. Для получения таких изделий в компонентном составе используют перлитовый песок, где в качестве связующего

выступает пластичная легкоплавкая глина. Но в силу высокой стоимости и дефицитности перлитового песка способ не получил широкого применения.

Горяиновым К.Э. и Прожогой В.Т. предложен способ получения крупноразмерной строительной керамики на основе пористых заполнителей (керамзит, аглопорит и др.) и легкоплавких глин. Технология также не получила широкого распространения в силу отсутствия необходимого промышленного оборудования и высоких энергозатрат при производстве.

Коняхиным Г.В. предложен способ применения в качестве пористого заполнителя зольные полые микросферы (до 70% по массе), которые производятся при высокотемпературном сжигании каменных углей. Данное решение способствует уменьшению средней плотности керамических изделий до 500-600 кг/м<sup>3</sup>, при этом прочность при сжатии составляет 4÷5 МПа. Предложенный способ ограничивается доступностью качественных зольных микросфер постоянного химического состава.

В итоге метод введения пористых заполнителей в технологии стеновой керамики имеет весьма ограниченное применение. Для снижения плотности необходимо использование прочного и высокопористого заполнителя, что важно, когда необходимо применять интенсивную массопереработку с последующим пластическим формованием или полусухим прессованием. Кроме того, данный способ подразумевает двойной обжиг заполнителя (непосредственно вспучивание и обжиг в изделии).

Способ химического газообразования применим к шликерному способу изготовления пористой керамики и основан на вспучивании керамической массы газом, который образуется при взаимодействии или разложении специальных компонентов [17,55].

Данный способ требует тонкого измельчения исходных сырьевых компонентов, равномерного объемного распределения газообразователя, создания специальных условия протекания реакций газообразования и вспучивания, а также закрепления поризованной структуры.

Механизм вспучивания керамического шликера зависит от типа, концентрации и дисперсности применяемого газообразователя, измельчения, плотности и водопоглощения наполнителя, тиксотропных свойств применяемой глины, а также от реологических свойств самого шликера (вязкость, влажность, температура). В каждом конкретном случае проектирование составов, режимов сушки и обжига осуществляется экспериментальным путем, при котором устанавливаются оптимальные условия для протекания газообразования шликера и достижения пластической прочности для отформованной поризованной массы. Стабилизация структуры полученной керамической массы достигается применением добавок-стабилизаторов на основе гипса, быстросхватывающегося цемента и др.

Специалисты ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» разработали оригинальный структурный состав сырьевой смеси (керамической шихты), предназначенной для изготовления пористых керамических изделий посредством химического газообразования [95].

Компонентный состав первоначальной керамической массы с включением глинистого компонента (аргиллита) и газообразователя (алюминиевой пудры) представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Компонентный состав керамической массы с включением газообразователя (алюминиевой пудры)

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Аргиллит (глинистый компонент)	69,0÷74,8
Стеклобой	9,5÷10,5
Гипс строительный	4,9÷5,1
Порода диопсидосодержащая	10÷15
Пудра алюминиевая (газообразователь)	0,58÷0,60
Натрия гидроксид, 2Н раствор (сверх 100%)	29,6÷30,0

Рассматриваемый технологический прием позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-

механических показателей: средняя плотность  $440 \div 550 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $3,7 \div 4,9 \text{ МПа}$ .

Специалистами научно-производственного предприятия «Хикома» предложены технологическая последовательность и структурный состав сырьевой смеси (керамической шихты), предназначенной для изготовления пористых керамических изделий посредством химического газообразования [78].

Структурный состав первоначальной керамической массы с включением глинистого компонента и комбинированного газообразователя (алюминиевой пудры, хромокалиевых квасцов, оксида бария) представлен в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Структурный состав керамической массы с включением комбинированного газообразователя (алюминиевой пудры, хромокалиевых квасцов, оксида бария)

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глинистый компонент	20÷60
Стекло жидкое, высокомодульное	20÷45
Добавки армирующие	1÷3
Пудра алюминиевая, квасцы хромокалиевые, бария оксид (газообразователь)	1÷5
Оксиды металлов I÷IV групп	0,5÷3,0
Вода	5÷30

Основные этапы технологической последовательности обработки первоначальной сырьевой массы включают:

- совместный помол в шаровой мельнице глины и армирующих элементов;
- подачу приготовленной смеси из глинистого компонента и армирующих компонентов в бетоносмеситель;
- подачу в бетоносмеситель комбинированного газообразователя;
- перемешивание структурной массы до формирования однородного, пластического состояния;
- нанесение готовой смеси на поверхность конструкции или заполнение ею доступного пространства (объема) конструкции.

Рассматриваемые технологическая последовательность и структурный состав сырьевой смеси позволяют осуществить формирование керамических

изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $420 \div 560 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии до 4 МПа. Пористость изготовленного керамического изделия составляет до 80%.

Способ газообразования, использующий алюминиевую пудру в качестве порообразующего агента в керамической сырьевой смеси, активно развивается [39].

Специалисты «Вниистром им. П.П. Будникова» разработали компонентный состав первоначальной сырьевой смеси и технологическую последовательность изготовления пористых керамических изделий посредством низкотемпературного газообразования [17,18]. Состав первоначальной керамической массы с включением глинистого компонента и алюминиевой суспензии для низкотемпературного газообразования сырьевой смеси представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Состав керамической массы для низкотемпературного газообразования сырьевой смеси

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глина Печерского месторождения (глинистый компонент)	40
Отходы нефелиновые	40
Добавки армирующие	0,5
Гипс	10
Суспензия алюминиевая (газообразователь)	$1,0 \div 1,5$
Вода	$5 \div 10$

Основные этапы технологической последовательности обработки первоначальной сырьевой массы включают:

- совместный помол в шаровой мельнице глины и армирующих элементов;
- перемешивание помола с добавлением воды до формирования однородного, пластического состояния;
- добавление в состав смеси газообразователя (алюминиевой суспензии) с одновременным перемешиванием;
- выгрузку подготовленной керамической массы в стальные формы стандартных размеров ( $220 \times 250 \times 350 \text{ мм}$ ) на стационарной виброплощадке;

- вибрационное воздействие на приготовленную керамическую массу вертикально ориентированными колебаниями (технологический режим вибрации предусматривает частоту воздействия 3000 колебаний/минута, при амплитуде  $0,25 \div 0,40$  мм);
- выдержку подготовленной керамической смеси на виброплощадке в течение 48 часов, при температуре  $45,0 \div 50,0$  °С;
- распалубку высушенных образцов керамических изделий и продолжение сушки при температуре  $70,0 \div 100,0$  °С до достижения требуемой влажности изготовленных керамических изделий;
- изотермическую выдержку изготовленных керамических изделий, которая производится в течение 4 часов.

Рассматриваемые технологическая последовательность и структурный состав сырьевой смеси позволяют осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $1000 \div 1060$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии до 6 МПа. Пористость изготовленного керамического изделия составляет до 80%.

В.Ф. Завадским [39] разработан технологический способ изготовления пористых керамических изделий с применением глинистого компонента из глины Барышевского и Евсинского месторождений с применением минеральных наполнителей (для обеспечения условий формирования начальной прочности) и армирующих добавок-плавней, которые предусматриваются для формирования требуемых показателей прочности межпоровых перегородок керамической смеси и изготовленных изделий.

В качестве минеральных наполнителей предусматриваются тонкодисперсные природные наполнители в количестве  $5 \div 10$  % от первоначального объема сырьевой массы (шликера).

Рассматриваемый компонентный состав сырьевой смеси (шликера) позволяет осуществить формирование керамических изделий с показателями средней плотности  $400 \div 600$  кг/м<sup>3</sup> и прочности при сжатии  $0,8 \div 1,2$  МПа.

Специалистами Института НИИСтромпроект (Узбекистан) разработан компонентный состав первоначальной сырьевой смеси и технологическая последовательность изготовления пористых керамических изделий посредством низкотемпературного газообразования вследствие организации химических реакций комбинированного газообразователя (алюминиевая пудра и щелочь натриевая) с элементами глинистого компонента (карбонаты кальция и магния). В качестве глинистого компонента предложены глины Босагинского и Ангреновского месторождений [5].

Компонентный состав первоначальной керамической массы с включением глинистого компонента и комбинированного газообразователя (алюминиевая пудра и щелочь натриевая), предназначенного для химического газообразования сырьевой смеси, представлен в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Компонентный состав керамической массы с включением комбинированного газообразователя

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глина Босагинского и Ангреновского месторождений (глинистый компонент)	60,0÷80,0
Гипс полуводный	10,0
Добавки армирующие	1,0÷3,0
Пудра алюминиевая и щелочь натриевая (газообразователь)	1,0÷1,5
Вода	15,0÷30,0

Основные этапы технологической последовательности обработки первоначальной сырьевой массы включают:

- совместный помол глинистого компонента, гипса и армирующих элементов;
- высушивание измельченного сырья;
- добавление в состав высушенной смеси газообразователя (пудры алюминиевой) с одновременным перемешиванием;
- увлажнение смеси раствором щелочи до образования однородной пластической консистенции, влажностью 55÷60%;

- выгрузку подготовленной керамической массы в стальные формы стандартных размеров на стационарной виброплощадке;
- вибрационное воздействие на приготовленную керамическую массу вертикально ориентированными колебаниями (технологический режим вибрации предусматривает частоту воздействия 3000 колебаний/минута, при амплитуде 0,45 мм);
- выдержку подготовленной керамической смеси на виброплощадке в течение 24 часов, при температуре  $45 \div 50$  °С;
- распалубку высушенных образцов керамических изделий и продолжение сушки при температуре  $75 \div 105$  °С;
- перемещение подготовленных керамических изделий в камеру печи для обжига при температуре 1100 °С;
- изотермическую выдержку изготовленных керамических изделий, которая производится в течение  $8 \div 10$  часов.

Рассматриваемые технологическая последовательность и структурный состав сырьевой смеси позволяют осуществить формирование керамических изделий с показателями средней плотности  $720 \div 970$  кг/м<sup>3</sup> и прочности при сжатии  $2,9 \div 5,0$  МПа. Пористость изготовленного керамического изделия составляет до  $75 \div 80\%$ .

Также известен способ получения виброформованных легковесных огнеупорных изделий. В жесткие глинистые смеси, которые способны сохранять заданную форму, вводят газообразователь в виде алюминиевой пудры. Далее глиняную массу поризуют, благодаря вибрационному воздействию и способности глинистых структур к временному тиксотропному разрушению. Активное газовыделение происходит во время вибрации. После прекращения вибрирования поризованная керамическая масса восстанавливает свою структурную прочность и сохраняет приданную форму. Данным способом возможно изготовление газокерамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $300 \div 400$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии до 4 МПа.

Пористость изготовленного керамического изделия составляет до 85 %. Способ значительно сокращает сроки сушки и снижает металлоемкость производства, но ограничен сложностью технологии газообразования (узкий интервал поризации и жесткие требования к температуре самой керамической смеси для поризации).

Безусловно, к основному преимуществу газообразования относится возможность получать керамические изделия с равномерно распределенной пористой структурой. Но широкое применение данного метода сдерживает ряд недостатков:

- использование кислот в технологических процессах производства;
- применение карбонатов, щелочей, ортофосфорных кислот, сернокислых солей магния и натрия, значительно понижающее огнеупорность керамических изделий;
- высокие требования к качеству компонентного состава, в том числе к его дисперсности;
- трудоемкость получения высокопористых керамических изделий средней плотности менее  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Следующим способом повышения теплофизических показателей строительной керамики является вспучивание, которое основано на способности некоторых минеральных компонентов увеличивать при нагревании первоначальный объем в составе сырьевой смеси. Например, установлено, что быстрый нагрев халцедона и опала до температуры  $1400\div 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ , приводит к образованию высокопористой, остеклованной структуры, средней плотности менее  $500 \text{ кг/м}^3$  и пористости 70-75% [93].

Также известен способ получения легковесных керамических изделий на основе мергелистых глин. После обжига изделие обладает мелкопористой структурой вследствие термического разложения углекислого кальция, содержащегося в мергелистых глинах. Кроме того, с течением времени прочность таких изделий повышается, так как в процессе обжига образуются различные

кальциевые соединения, отвечающие за протекание реакции твердения в обожженном керамическом изделии [67].

НИЦ «Экология и промышленная энерготехнология» и Институт высоких температур РАН разработали способ получения стеклокристаллической керамики ячеистой структуры, получаемой методом вспучивания в обжиге. В основе используются легкоплавкие глины, перлиты, цеолиты, базальты и др., а также побочные продукты промышленности (стеклобой, вскрышные породы, отходы обогатительных производств, шлаки и т. д.) [8].

Такие изделия характеризуются низкими показателями свойства паропроницаемости, что значительно ограничивает область их применения в ограждающих строительных конструкциях.

Физико-механические характеристики ячеистой стеклокерамики отображены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Основные физико-механические показатели материалов, выполненных из ячеистой стеклокерамики

Наименование показателя	Вариант структурного состава	
	1	2
Плотность средняя, кг/м <sup>3</sup>	300	500
Прочности при сжатии, МПа	3÷4	10÷12
Морозостойкость, циклы	25	40÷50
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,15÷0,20	0,20÷0,30

Зарубежный опыт изготовления пористых керамических изделий (блоков и панелей), ориентированный на формирование грануловидной структуры, представлен работами «Института технологии грубой керамики под руководством К. Энгельтамера» (Чехия) [60].

Сырьевая смесь предусмотрена из отвальных пород, формирующихся при устройстве шахтных путей и проходок. Подготовка исходной керамической смеси состоит в измельчении сырья до зерен крупностью не более, чем 1 мм. Измельченная смесь доставляется на тарельчатый гранулятор, на котором производится формование гранул смеси (диаметр составляет 20÷30 мм), которые потом засыпают в стальные формы, внутренние поверхности которых

предварительно обрабатывают графитокаолиновой смазкой. Обжиг осуществляют в туннельных печах при температуре не более 1350 °С. В процессе обжига гранулы начинают вспучиваться и образовывать изделия заданной формы. Материал имеет грануловидную структуру, если обжиг проходит в окислительной среде, и пемзовидную – в восстановительной среде. Готовые изделия (размером 900×700×150 мм) характеризуются следующими физико-механическими показателями: средняя плотность 750÷870 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 6,3÷7,6 МПа.

Специалистами предприятия «Staik Ceramick» (США) разработана и применяется технология изготовления керамических изделий из структурной сырьевой смеси, включающей мелкие фракции керамзита в сочетании с глинистым компонентом (сланцевые или огнеупорные глины) местных месторождений [61].

По утверждению исследователей, способ основан на вспучивании глинистых пород и подходит для изготовления крупноразмерных керамических изделий. В компонентном составе шиты используют различные глины и сланцы (основное сырье), а также известняк, доломит, глинозем, кремнезем и кальцинированную соду (порообразующие добавки). Основные этапы данной технологии: сухое совместное измельчение компонентов, формование методом полусухого прессования, обжиг при температуре от 1110 до 1260 °С, калибровка изделий абразивными материалами. Данная технология позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность 750÷950 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 3÷6 МПа.

Автором технологии пористых керамических материалов «Zitan» Э. Судерманном разработан практический способ изготовления пористых керамических изделий, в котором исходный состав шихты состоит из оксидов алюминия 25%, оксидов кальция 10%, оксидов железа 10-12% [81]. Далее формируют гранулы с последующей сушкой в сушильном барабане. Сырцовые гранулы обжигают во вращающейся печи, затем дозируют в специальные

перфорированные огнеупорные формы, которые затем подают в компаундную камеру для обжига до температуры 1200 °С.

Готовые керамические изделия характеризуются следующими физико-механическими показателями: средняя плотность 450÷480 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 1,8÷2,0 МПа.

Широкое практическое применение имеет технология производства теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных керамических изделий методом пенообразования. Данный метод позволяет получать изделия с наибольшей пористостью до 95 % в отличие от описанных выше способов получения пористой структуры керамической матрицы.

Авторами Ю.М. Крутовым и А.Ю. Гаврилюком разработана технологическая последовательность обработки сырьевой смеси для изготовления керамических изделий (вспученной керамики) методом пенообразования, с применением глинистого компонента, вспенивающего и стабилизирующего агента (раствор силиката натрия или калия) [84].

В число основных технологических процессов входят:

- подготовка исходного глинистого компонента или смеси глинистого сырья;
- перемешивание глинистого компонента со вспучивающим и стабилизирующим форму смеси агентом;
- обработка полученной (вспененной) массы сверхвысокочастотным электромагнитным излучением, которое приводит к определенным показателям пластического состояния керамической массы;
- экструзия обработанной излучением керамической массы через отверстие установленной формы и размеров;
- отвержение экструдированной керамической массы;
- перемещение подготовленных керамических изделий в камеру печи для обжига при температуре 1000 °С.

Рассматриваемый способ позволяет получать вспученную керамику прочностью при сжатии более 7,1 МПа. При этом авторы не указывают значения средней плотности разработанного состава [84].

Определенная ограниченность сырьевой базы вспучивающихся компонентов, сложность обжига и обязательное наличие в технологии производства огнеупорных форм накладывает на данный метод ограничения в возможность получения изделий средней плотности от 600 кг/м<sup>3</sup> с показателем прочности при сжатии более 3,5 МПа.

Установлено, что пена представляет собой ячеисто-пленочную дисперсную систему, в основе которой множество пузырьков воздуха, граничащих друг с другом посредством тонкой пленки [39]. Такая система термодинамически неустойчива и стремится к самопроизвольному укрупнению (агрегированию) воздушных пузырьков, стремясь уменьшить поверхность раздела фаз «жидкость – воздух». Многочисленные исследования природы поверхностных явлений доказывают, что для существования устойчивой пены необходимо соблюдение нескольких условий:

- определенная вязкость жидкости, которая сдерживает разрыв образовавшихся пленок;
- образование тонких пленок при минимальном поверхностном натяжении на границе раздела фаз;
- появление адсорбционных явлений, т. е. концентрация пенообразующего вещества в поверхностном слое должна превосходить его концентрацию в растворе.

Учеными установлено, что стабильность пены напрямую зависит от свойств пенообразующих веществ, основная задача которых состоит в понижении поверхностного натяжения и увеличении поверхностной вязкости жидкости. Кроме того, молекулы пенообразователей несут в себе электрический заряд, концентрируясь на поверхности воздушных пузырьков, что приводит к уменьшению потерь воздуха и повышению стойкости стенок к

термодинамическим воздействиям. Стойкость и кратность пен зависят от концентрации пенообразователя в растворе, размеров воздушных ячеек и также от воздействующей на пену температуры.

Доказано, что устойчивость двухфазных пен повышается при их минерализации, т.е. с переходом к трехфазным пенам, свойства которых наиболее адаптивны для поризации керамических масс. Наличие твердой фазы приводит к значительной стабилизации пены, что позволяет регулировать технологически важнейшие параметры и снижать среднюю плотность керамического сырца до  $500 \text{ кг/м}^3$  и менее.

Сущность процесса минерализации заключается в адсорбции и удержании твердой фазы в пленках, которые образуют стенки пор поризованного керамического шликера.

Взаимодействие между полярными группами пенообразователя и поверхностными слоями твердой фазы определяют их степень насыщения и удержания в пленке, что не позволяет пенокерамической массе преждевременно оседать и разрушаться при сушке сырцов, особенно в начальный период времени после формования, когда пластическая прочность сырца наименьшая.

Анализ литературных источников показывает, что степень дисперсности твердой фазы значительно влияет как на минерализацию поверхности пузырьков, так и на их стойкость. С повышением доли покрытия поверхности пленок минеральными частицами, стойкость пены возрастает и оптимальная концентрация сырьевых компонентов керамической массы, в теории, позволит сохранять ячеистую структуру без разрушений и оседаний.

В технологии пенокерамики в роли минерализаторов выступают глины различного минерального состава, а также инертные наполнители в порошкообразном виде. Многие исследователи отмечают положительный эффект на стойкость пенокерамических масс при уменьшении дисперсности минерализаторов, но также существуют научные мнения, которые утверждают, что чрезмерно тонкое измельчение снижает устойчивость пены, так как толщина граничных пленок становится критически малой.

Традиционно пенокерамические изделия изготавливаются из тонкоизмельченной глины и наполнителя с последующим приготовлением шликера и технической пены, их смешением и формованием пенокерамической массы, сушкой и распалубкой пенокерамических сырцов, обжигом и калибровкой готовых изделий. Технологический режим трудоемок, продолжителен (5-11 дней в зависимости от типоразмера получаемых пенокерамических изделий) и требует значительного количества форм.

Специалисты ФГОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» разработали технологическую последовательность изготовления керамических изделий (вспученной керамики) методом пенообразования с применением вспенивающего агента на основе пенообразователей (ПБ–2000 или «Пеностром») [80,83].

Авторы К.В. Галаган, В.Ф. Черных, А.Ф. Маштаков разработали способ получения пенокерамических изделий, который ориентирован на обработку первоначальной компонентной смеси (перемешивание, введение пенообразователя, формование, обжиг), включающей глинистый компонент, молотое стекло, добавки из фибры (например, базальтового волокна) и вспенивающий агент в формате отдельно приготовленной пены [79].

Рассматриваемый технологический способ позволяет осуществить формирование вспененных керамических изделий, имеющих следующие физико-механические показатели: средняя плотность  $650 \div 850 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $3,5 \div 5,6 \text{ МПа}$ .

Известен также технологический способ изготовления вспененных керамических изделий, в котором вспенивающий агент (пенообразователь ПБ–2007) применяется в качестве пластифицирующей добавки, а вяжущим материалом является перлитовый песок фракции  $1,25 \div 5,0 \text{ мм}$  [72].

Состав первоначальной керамической массы с включением глинистого компонента, заполнителя, выгорающей добавки, стабилизирующей и флюсующей добавок, пенообразователя предназначенных для изготовления керамических изделий (пенокерамики) методом пенообразования, представлен в таблице 1.8.

Рассматриваемый технологический способ позволяет осуществить формирование вспененных керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $580 \div 630 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $3,7 \div 4,0 \text{ МПа}$ .

Таблица 1.8 – Компонентный состав керамической массы для изготовления пенокерамики

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глина (глинистый компонент)	20.0÷40.0
Кирпич молотый (заполнитель)	10
Опилки древесные фракции 0,25÷0,315 мм (выгорающая добавка)	10÷15
Портландцемент, стекло молотое, пудра алюминиевая, (добавки стабилизирующие и флюсующие)	1,0÷1,5
ПБ-2000 или «Пеностром» (пенообразователь)	3÷5
Вода	10÷15

Специалистами Кубанского государственного технологического университета разработан структурный состав первоначальной сырьевой смеси и технологическая последовательность изготовления пористых керамических изделий из пенокерамики. В качестве стабилизаторов пены рассматриваются сульфаты металлов [96]. Компонентный состав первоначальной керамической массы с включением глинистого компонента и порообразующего агента (отдельно приготовленная пена), предназначенной для изготовления конструкционных и теплоизоляционных изделия из пенокерамики, представлен в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Компонентный состав керамической массы для изготовления конструкционных и теплоизоляционных изделия из пенокерамики

Наименование компонента	Содержание компонента, % по объему
Глина (глинистый компонент)	40÷60
Шамот	6÷8
Стекловолокно	0,38÷0,42
Фильтрат конских каштанов (порообразователь)	0,15÷0,24
Сульфат металлов	2÷4
Вода	31,0÷38,0

Рассматриваемый технологический способ позволяет осуществить формирование вспененных керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $530 \div 650 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $4,0 \div 4,4 \text{ МПа}$ .

ООО «Керапен» располагает технологией производства стеклокристаллической пенокерамики для изготовления пористых керамических строительных изделий.

В число основных технологических процессов входят [86]:

- шликерная подготовка шихты с добавлением карбида кремния;
- обезвоживание подготовленной шихты с последующим формованием заготовок керамических изделий;
- сушка сформованных заготовок керамических изделий;
- форсированный обжиг сформованных заготовок керамических изделий;
- спекание подготовленных заготовок керамических изделий и формирование единого бруса;
- последовательное нагревание (до завершения процесса вспенивания) и охлаждение вспененного бруса;
- разделение единого бруса на отдельные фрагменты (блоки) установленных размеров;
- отжиг отдельных фрагментов (блоков) с предварительной обмазкой нижних и боковых поверхностей подготовленных заготовок огнезащитным материалом.

Рассматриваемый технологический способ позволяет осуществить формирование вспененных керамических изделий из стеклокристаллической пенокерамики, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $550 \div 600 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $11,0 \div 13,0 \text{ МПа}$ . Основным недостатком изделий, изготовленных вышеописанным способом, является его стеклокристаллическая структура, которая обуславливает низкое

водопоглощение материала (до 1%), что затрудняет его повсеместное применение при возведении ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.

Способ пенообразования активно используется для производства легковесных огнеупорных материалов. Огнеупорные теплоизоляционные материалы и изделия являются во многих отраслях промышленности эффективными инструментами по достижению оптимальных теплофизических показателей конструкций тепловых установок, которые позволяют снизить их энергопотребление с сохранением производственной мощности. На данный момент отечественная огнеупорная промышленность выпускает легковесные изделия на основе различного минерального сырья: от наиболее распространённых алюмосиликатных до изделий из чистых оксидов [46,58,103,109,113].

Структура высокопористых огнеупорных материалов является двухфазной системой, состоящей из твердой фазы межпоровых перегородок и воздуха, заполняющего поровое пространство [62,102,106,107,119]. Соотношение фаз и степень однородности структуры легковесных огнеупоров определяет их основной функциональный показатель – коэффициент теплопроводности. Также в теплоизоляционных конструктивных элементах тепловых агрегатов важной характеристикой является термическая стойкость материалов, определяющая эксплуатационный цикл огнеупоров [69,70]. Термостойкость ( $R$ ) характеризует способность материала испытывать резкие температурные изменения без признаков разрушения. Характер сопротивления внутренним напряжениям, вызванным градиентом температуры по сечению изделия, определяется формулой 1.1 и выражается следующими физико-механическими показателями: пределом прочности ( $\sigma$ ), модулем упругости ( $E$ ), коэффициентами температурного расширения ( $\alpha$ ), теплопроводности ( $\lambda$ ) и Пуассона ( $\mu$ ), температуропроводностью ( $a$ ), геометрическими параметрами и условиями температурного воздействия [47].

$$R = \frac{\sigma(1-\mu)}{\alpha E} \lambda a \quad (1.1)$$

Очевидно, что предел прочности при сжатии изделий огнеупорных теплоизоляционных кажущейся плотности от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup> имеет наибольшее

влияние на показатель их термической стойкости, но известные способы формирования пористой структуры огнеупоров не позволяют выдерживать значительное количество попеременного нагрева и охлаждения (теплосмен).

Устойчивость и несущая способность технической пены на основе поверхностно-активных веществ определяют основные технологические параметры производства и показатели готовых изделий. Благодаря снижению поверхностного натяжения воды, огнеупорный тонкодисперсный порошок способен длительное время оставаться на поверхности пенного пузырька без разрушения, формируя межпоровую перегородку в структуре вспененного шликера до достижения необходимой пластической прочности отформованного сырца. Шликер формируется на основе глины и шамота. Для получения ультралегких огнеупоров дополнительно используют в составе отошающую добавку в виде мелкозернистого вспученного перлитового песка, имеющего температуру огнеупорности около 1400 °С.

Наличие перлитового песка в составе смеси понижает огнеупорность при относительно большом значении общей усадки изделий, что устраняется введением в компонентный состав шликера технического глинозема или дистенсиллиманитового концентрата. Также известны результаты исследований по увеличению термической стойкости шамотных легковесных изделий, изготовленных данным методом, путем их армирования муллитокремнеземистыми волокнами [70]. Предел прочности при сжатии легковесных огнеупоров средней плотности 400 кг/м<sup>3</sup> с применением перлита составляет около 1,0–1,5 МПа.

Усилия многих исследователей направлены на разработку технологических решений, позволяющих получать ячеистые керамические массы пенным методом с минимально возможным водотвердым отношением и высоким показателем пластической прочности. Такие подходы позволяют минимизировать использование форм на производстве и существенно сократить общий цикл производства.

Исследования А.П. Китайцева установили, что способность отформованной пенокерамической массы сохранять свой первоначальный объем определяется

отношением ее предельного напряжения сдвига и величиной средней плотности [88]. Автор утверждает, что введение в компонентный состав глиняного шликера тонкодисперсных добавок (минерализаторов) позволяет изготавливать пенокерамические массы, которые способны сохранять заданную форму. Данный результат объясняется способностью глин при ионном обмене изменять свои реологические свойства (тиксотропия и коагуляция).

Также технология получения пористых керамических материалов для стеновых конструкций разрабатывалась В.В. Перегудовым [59]. Автор установил, что наиболее эффективным способом получения стабильной пористой структуры керамического сырца является вовлечение воздуха в процессе перемешивания в присутствии поверхностно-активных веществ. Состав исходной шихты: легкоплавкая глина, отошающая добавка крупностью не более 0,5 мм (30–40%), строительный гипс (8–10%). Добавка гипса позволяет уменьшить сроки стабилизации поризованной массы. Отформованные изделия распалубливают (через 20–30 мин) и отправляют на стадию сушки. Обжиг изделий продолжается 30÷36 часов при температурном диапазоне: 1020÷1050 °С и осуществляется без форм.

Изготовленные пенокерамические изделия (размеры 200×400×150 мм), характеризуются величинами физико-механических показателей: средняя плотность 800÷1100 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии 4÷10 МПа. Показатель водопоглощения составляет 25–40%, морозостойкость – более 25 циклов. Автор также отмечает, что тепловая обработка пористых керамических изделий, полученным таким способом, осуществляется быстрее, чем для полнотелых керамических изделий.

Специалисты «Вниистром им. П.П. Будникова» разработали заводскую технологию получения керамических блоков и камней средней плотностью 400–500 кг/м<sup>3</sup> для применения в малоэтажном строительстве. Для изготовления бездефектных изделий использовали ряд технологических приемов:

- использование технической пены кратностью 100÷120;

- введение в компонентный состав глинистого шликера коагуляционной добавки в виде цементного молочка с влажностью 50%;
- формование пенокерамической массы в деревянные формы установленных размеров, оборудованных съемной крышкой;
- переворачивание и распалубка на съемную крышку формы.

Данный способ позволяет изготавливать ячеистые керамические изделия заводской готовности, характеризующиеся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $470 \div 750 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $3,3 \div 8,0$  МПа. Показатель водопоглощения составляет 36-45%, а показатель морозостойкости – 200 циклов. Высокая морозостойкость, в частности, объясняется тем, что в ячеистой структуре присутствуют резервные поры размером до 1–2 мм. Но длительность технологического процесса и высокая усадочная деформация пенокерамических сырцов в виде поперечных трещин не позволили использовать данный способ повсеместно.

Далее снижение трещин во время сушки изделий и повышение сырцовой прочности, по утверждению автора, возможно, если использовать в составе шликера различные отошающие добавки (измельченный керамзит, опилки, шамот, асбестовую пыль) и комплексные разжижающие добавки на основе жидкого стекла (0,4%), сода (0,1%), угольно-щелочной реагент (0,05%). Данное решение снижает линейную усадку до 7–8%, а количество воды затворения с 66 до 52–56%. Полученные пенокерамические изделия достигают величин физико-механических показателей: средняя плотность  $800 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии до 10 МПа.

Способ пенообразования имеет ряд исключительных достоинств, позволяющих изготавливать ячеистые керамические материалы в различных интервалах пористости (от 45 до 90%). Использование технических пен на основе ПАВ способствует применению в компонентном составе как пластичных, так и непластичных материалов, оно регулирует величину пористости и характер ячеистой структуры.

Основные трудности применения технических пен заключаются в сложности проектирования оптимальных компонентных составов шликеров и сушкой вспененных керамических сырцов, отсутствии технологий изготовления крупноразмерных пенокерамических изделий, а также общей продолжительности всего технологического процесса производства. Кроме того, достижение величины таких физико-механических показателей, как средняя плотность  $400\div 600$  кг/м<sup>3</sup> и достаточная прочность при сжатии, например, 3,5 МПа, возможно только для пенокерамических изделий стеклокристаллической структуры, что исключает их широкое применение в стеновых конструкциях из-за крайне малых значений паропроницаемости.

Отдельным способом создания ячеистой структуры керамических материалов является аэрирование.

Общий принцип аэрирования известен давно [59] и заключается в принудительном вовлечении пузырьков воздуха в смесь при интенсивном перемешивании с использованием воздухововлекающих добавок. Способы аэрирования и пенообразования являются близкими технологиями эффективного снижения плотности керамических материалов, позволяющими получить схожую по внешним и техническим показателям поризованную керамическую массу, но принципиально различающимися технологическими узлами самого процесса приготовления сырьевой смеси и ее поризации. В обоих случаях важнейшим этапом является определение оптимальных составов глиняных шликеров, позволяющих получать поризованную керамическую массу с требуемой плотностью, вязкостью и динамикой набора пластической прочности после формования [26,33,104]. Также аэрирование и пенообразование используют шликерный (литьевой) способ приготовления сырьевой смеси, основанный на способности глин переходить в текучее состояние при добавлении разжижающих добавок (электролитов) в определенном количестве.

Аэрирование активно применяется в США в технологии производства кирпича увеличенного формата и облицовочных плит [59]. В глиняный шликер добавляют жидкое стекло и порообразователь (додециламин), затем после

поризации смеси добавляют гипс с последующим перемешиванием и укладкой в формы поризованной массы.

Рассматриваемый технологический способ позволяет осуществить формирование керамических изделий, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $860\div 930$  кг/м<sup>3</sup> прочность при изгибе  $2,6\div 3,7$  МПа и прочность при сжатии  $5,6\div 10,3$  МПа.

Способ, разработанный М. Албанком во Франции, позволяет получать пористые керамические изделия на основе аэрированной керамической шихты, состоящей из смеси измельченной глины, шамота и стекловолокна длиной 12,5 мм и диаметром 500 мкм [101]. Компоненты перемешиваются в смесителе вместе с водой и порообразователем. Готовую аэрированную керамическую массу укладывают в формы в виде плит толщиной 120 мм. Продолжительность сушки составляет не более 23 часов. По утверждению исследователя, армирование аэрокерамического сырца стекловолокном снижает воздушную усадку до 4–6%, повышает трещиностойкость и позволяет изготовить крупногабаритные плиты площадью до 2 м<sup>2</sup>. Готовые пористые изделия характеризуются величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $750\div 800$  кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии до 4,0 МПа.

Ряд патентов, полученных в США, Великобритании, Канаде, Швеции, Японии, имеет схожие технологические принципы с вышеуказанной технологией, но отличаются составами исходной шихты и режимами термической обработки [44,73–77,82].

Известна технология получения аэрированных керамических изделий путем применения в составе глинистого шликера глин с добавлением отошающих добавок (шамот, зола-уноса и др.) и порообразователя. После смешения аэрированную керамическую массу укладывают в формы, высушивают и обжигают. Полученный таким способом пористый керамический материал характеризуется величинами физико-механических показателей: средняя плотность от 600 до 1000 кг/м<sup>3</sup> и прочность при сжатии от 2 до 5 МПа. Пористость

изготовленного керамического изделия (открытая пористость) составляет от 60 до 80%.

На основании ряда исследований разработана технология аэрированных перлитокерамических изделий, заключающаяся в одновременном перемешивании и вибрировании в вибросмесителе керамической смеси, состоящей из глины, перлитового песка, полуводного гипса и воздухововлекающей добавки. По утверждению исследователей, виброперемешивание повышает гомогенность керамической массы и уменьшает водотвердое отношение. Использование в компонентном составе воздухововлекающих добавок позволяет вовлекать, удерживать и равномерно распределять воздушные пузырьки в перемешиваемой керамической массе. Наличие в составе добавки гипса позволяет осуществлять немедленную распалубку отформованной поризованной массы и дополнительно повысить ее пластическую прочность.

Рассматриваемая технология позволяет осуществить формирование керамических изделий в виде плит и кирпичей, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $200 \div 350 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $0,4 \div 0,8 \text{ МПа}$ .

Ячеистая структура готовых изделий имеет равномерно распределённые по всему объёму воздушные поры, а также за счет немедленной распалубки технологический цикл производства сокращен до 24 часов, но главным сдерживающим фактором для повсеместного внедрения является перлитовый песок, который значительно снижает температуру эксплуатации изделий, а также имеет относительно высокую стоимость, так как его содержание в шихте доходит до 60% по массе.

Существующие методы аэрирования керамических масс не позволяют получать изделия средней плотностью от 400 до  $800 \text{ кг/м}^3$  с высокой прочностью при сжатии от 3,5 МПа и выше, что ограничивает их широкое применение и не позволяет конкурировать с изделиями из автоклавного газобетона.

Способ аэрирования в отличие от пенного способа позволяет совместить приготовление поризованной керамической массы в одной смесительной

установке, значительно сокращая расход воздухововлекающей добавки. Кроме того, по мере роста воздушных пузырьков в процессе аэрирования создается наиболее гомогенизированная ячеистая структура, стенки пор которой равномерно заполняются минералами твердой фазы, повышая структурную прочность отформованной керамической массы. 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 его эффективность применения повышается (формула 1.2).

$$к.к.к. = \frac{R_{сж}}{d_o} \quad (1.2)$$

где:  $R_{сж}$  – прочность при сжатии, МПа;  $d_o$  – относительная средняя плотность.

Для систематизации и сравнения различных способов снижения средней плотности керамических материалов их эффективность выражена через к.к.к. (таблица 1.10).

Из таблицы 1.10 следует, что наименее эффективным способом является выжигание выгорающих добавок, наиболее эффективным – пенообразование и аэрирование.

Таблица 1.10 – Характеристики существующих способов снижения средней плотности керамических изделий

Наименование технологических приемов	Плотность средняя, кг/м <sup>3</sup>	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

Оба способа используют в своей основе шликерный способ приготовления глинистой массы, где одним из важнейших реологических параметров является вязкость при наименьшем водотвердом отношении.

## **1.2. Особенности разжижения глинистых шликеров для получения поризованных керамических масс**

Формирование глинистых шликеров является одним из технологических процессов, которые в значительной мере оказывают влияние на функциональное качество и величины физико-механических показателей, применяемых для получения поризованных керамических масс.

Современные технологии предусматривают получение глинистого шликера посредством отдельного, совместного или комбинированного мокрого помола исходных компонентов структурного состава смеси: глинистого компонента (глин различного химического и минералогического состава: легкоплавкие, тугоплавкие и огнеупорные глины), пластичных и отошающих добавок, плавней.

На рисунке 1.2 представлена принципиальная технологическая схема изготовления поризованных керамических изделий с применением глинистого шликера.

Функциональные особенности глинистых шликеров характеризуются рядом параметров: влажностью, плотностью, текучестью, способностью к тиксотропному расжижению, устойчивостью и дисперсностью частиц твердой фазы. Оптимальный формат глинистого шликера подразумевает минимальную вязкость при максимальном содержании твердой фазы в образуемой системе вида «глина – вода» [11,63,88,99].

Наиболее эффективным способом разжижения глинистого шликера, осуществляемого с целью стабилизации свойств первоначальных сырьевых материалов и регулирования баланса твердой и жидкой фаз, является добавление электролитов. В качестве разжижающих электролитов (дефлокулянтов) глинистого шликера применяются силикаты и карбонаты натрия, натриевые соли карбоновых кислот и другие материалы, способные оказывать влияние на влажность и разжижаемость шликера.

Влияние электролитов распространяется и на формирование показателей прочности керамических изделий, вследствие тиксотропных свойств глинистого

компонента и его склонности к активной коагуляции при влиянии электролитов. [28,29].

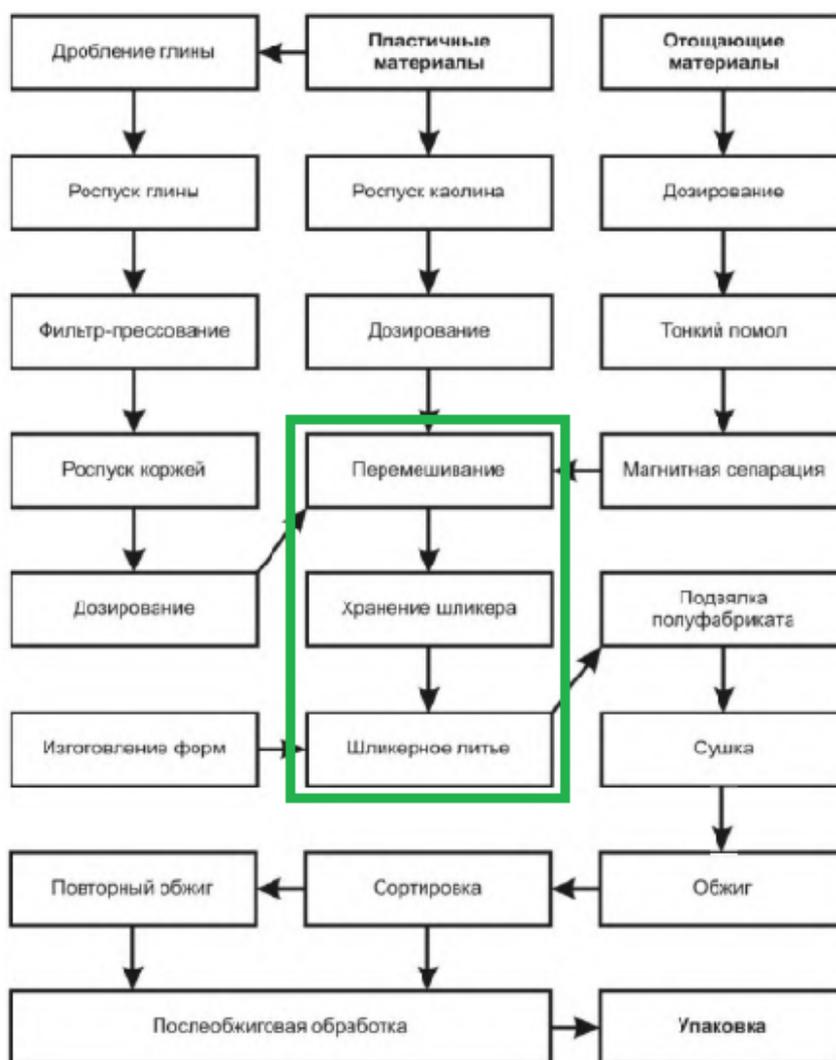


Рисунок 1.2 – Принципиальная технологическая схема изготовления керамических изделий с применением глинистого шликера

Разжижающее действие органических дефлокулянтов предопределяется их адсорбцией на поверхности минеральных частиц и приданием им отрицательного заряда (катиона). Адсорбированные катионы образуют внешнюю оболочку двойного электрического слоя, располагаясь на поверхности глинистого элемента. Некоторая часть катионов располагается на дистанции от поверхности слоя и образует структуру из сорбированных катионов.

В самом общем случае, добавление электролитов в состав глинистого шликера направлено на осуществление следующих воздействий:

- ускорение химических процессов (реакций) разложения агрегатных единиц глинистого компонента (глины) на элементарные частицы;
- регулирование показателей вязкости и текучести глинистого шликера.

Эффективность рассматриваемых видов воздействий на функциональные показатели и состояние глинистого шликера зависят от качественного и количественного состава электролитов. Количество электролитов обычно составляет  $0,1 \div 0,3$  % от первоначальной массы глинистых компонентов [63,88].

На рисунке 1.3 представлены экспериментальные данные исследований в отношении формирования показателей функционального качества глинистого шликера («условная вязкость»), полученные при добавлении в состав разжижаемой смеси традиционного вида электролита – жидкого стекла.

На рисунке 1.4 представлены экспериментальные данные исследований в отношении формирования показателей функционального качества глинистого шликера («условная вязкость»), полученные при добавлении в состав разжижаемой смеси комплексного электролита.

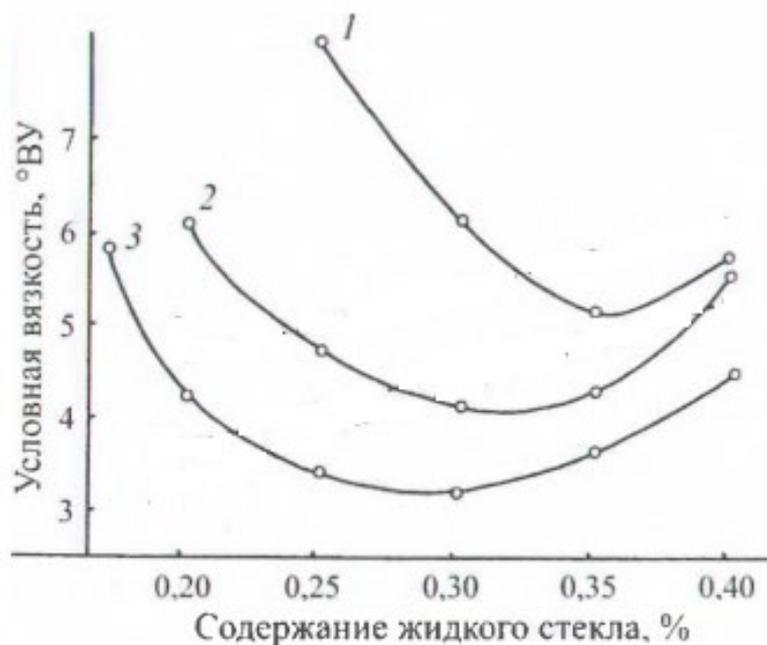


Рисунок 1.3 – Зависимости влияния электролита (жидкого стекла) на показатель вязкости глинистого шликера

1 – жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), характеризуемое силикатным модулем 1.0; 2 – жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), характеризуемое силикатным модулем 2.6; 3 – жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), характеризуемое силикатным модулем 2.8.

Полученные результаты (рисунок 1.3, где предусматривается применение только жидкого стекла) указывают на то, что более эффективным для разжижения глинистого шликера является применение жидкого стекла с повышенным значением силикатного модуля.

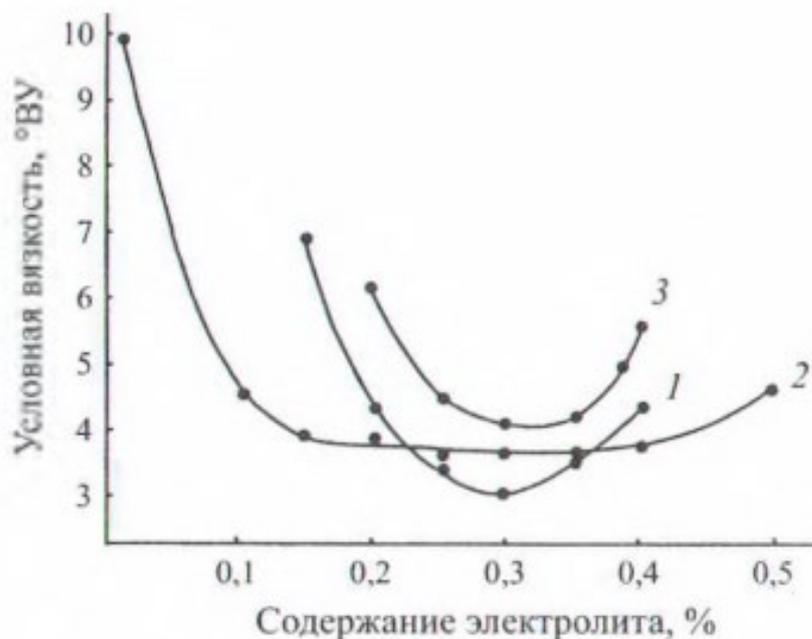


Рисунок 1.4 – Зависимости влияния комплексного электролита (включая жидкое стекло) на показатель вязкости глинистого шликера

1 – жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ); 2 – жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и триполифосфат натрия ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ); 3 – жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и сода ( $\text{NaHCO}_3$ ).

При добавлении комплексного состава электролитов (рисунок 1.4) становится возможным управление показателями эффективности дефлокуляции:

- наименьшей вязкостью характеризуется глинистый шликер с добавлением 0,3 % жидкого стекла;
- наибольшей вязкостью характеризуется глинистый шликер с добавлением комплексного электролита вида: жидкое стекло + триполифосфат натрия;
- наименее эффективное разжижения наблюдается при добавлении комплексного электролита вида: жидкое стекло + сода.

Вне зависимости от количественного и качественного состава электролитов, добавление их в состав системы «глина – вода» приводит к высвобождению

значительного количества диффузионной воды и перевод ее в состояние «свободной» воды с одновременным повышением показателей подвижности и текучести глинистого шликера.

Разжижающие добавки позволяют достигнуть определенной вязкости шликера при наименьшем количестве воды, что позволяет создать поризованную керамическую массу требуемой плотности и равномерно распределить сырьевые компоненты в объеме смеси. Оптимальное содержание в компонентном составе разжижающих добавок также оказывает большое влияние на кинетику усадочных деформаций при сушке поризованных керамических сырцов.

Прежде всего, степень разжижения глинистых шликеров значительно определяет их способность к коагуляции. Согласно результатам исследования, прямую связь между химическим, минералогическим, гранулометрическим составами глинистого сырья установить сложно, т. к. коагуляция глинистой суспензии зависит от ее компонентного состава и может изменяться даже от введения в состав незначительного количества элементов дисперсной фазы. В силу того, что глинистое сырье различных месторождений значительно отличается, и оптимальное содержание электролитов осуществляется эмпирическим путем [63,88].

Правильно подобранный компонентный состав глинистого шликера определяется минимальным водотвердым отношением, при котором коагуляционные процессы начинаются и заканчиваются в определенном технологическом интервале. Данный интервал позволяет осуществить формование поризованной керамической массы без прерывания и в полном объеме с последующим набором пластической прочности до значений, позволяющих осуществить распалубку и сушку сырцов в кратчайшие сроки.

### **1.3. Кинетика усадочных деформаций при сушке поризованных керамических сырцов**

Под сушкой поризованных керамических сырцов (сформованной структурной смеси с применением глинистого компонента) подразумевается технологическая операция, при проведении которой происходит удаление части свободной влаги из сформованного образца посредством ее испарения. Сушка является обязательным элементом каждой технологической последовательности обработки сырьевой смеси при изготовлении большинства видов поризованных керамических изделий (см. рисунок 1.2).

Удалению избыточной влаги подготовленных керамических сырцов способствуют следующие основные виды сушки [23,34]:

- контактная;
- радиационная:
  - с применением ИК-излучения;
  - с применением СВЧ-излучения.
- посредством пропускания переменного электрического тока.

Наиболее распространенным способом удаления влаги является конвективная сушка, которая предусматривает передачу тепла керамическому сырцу теплоносителем (горячим воздухом, дымовым газом или их смеси).

Эффективность удаления влаги из керамического сырца (сушки) зависит от значительного числа факторов, которые определяют конкретные параметры технологического режима: скорость или продолжительность сушки, термическая эффективность и снижение производственных потерь и затрат.

На рисунке 1.5 представлена принципиальная схема развития технологической операции сушки по основным периодам и состояниям [34,63]. Общая продолжительность технологической операции сушки поризованного керамического сырца определяется значениями начальной и конечной влажности материала; физическими размерами и формой материала; видом и параметрами теплоносителя.

Период нагрева (см. рисунок 1.5) характеризуется последовательным влагонасыщением теплоносителя вследствие испарения влаги, содержащейся в

сырце. В результате сушки испарения влаги и, соответственно, уменьшения влагосодержания сырца, скорость диффузии воды из глубинных слоев к поверхности материала уменьшается и стабилизируется. Установившаяся разница между температурами первоначального (сухого) и влагонасыщенного теплоносителя определяет интенсивность сушки (период постоянной скорости сушки, рисунок 1.5). Скорость сушки для рассматриваемого периода зависит от разницы парциальных давлений водяных паров на поверхности материала и в окружающем пространстве.

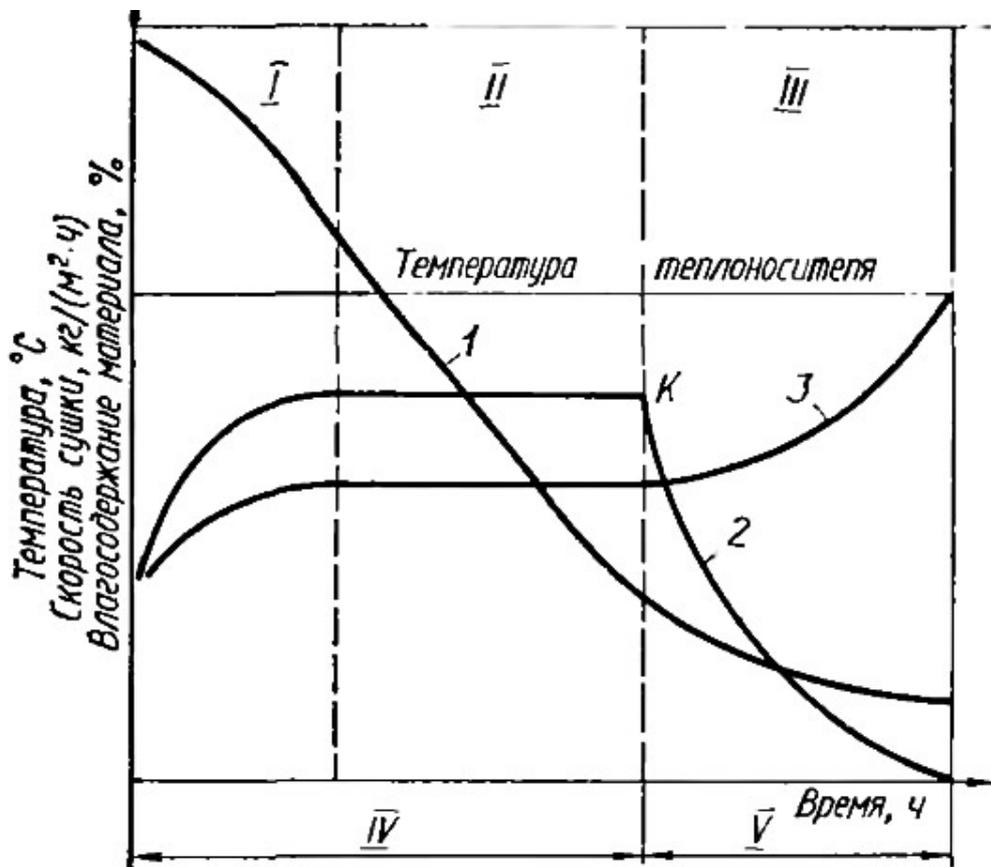


Рисунок 1.5 – Характеристика основных технологических периодов сушки поризованного керамического сырца

I – период нагрева (увеличения скорости сушки); II – период постоянной скорости сушки; III – период снижения скорости сушки; IV – влажное состояние материала; V – гигроскопичное состояние материала.

1 – кривая, отображающая последовательное снижение влагосодержания материала в процессе его сушки; 2 – кривая, отображающая изменения скорости процесса сушки; 3 – кривая, отображающая изменения температуры поверхности материала в процессе сушки.

Данный аспект отображён соответствующим переломом в точке К на кривых сушки (см. рисунок 1.5). Перелом отображает формализованное завершение периода постоянной скорости сушки и одновременно начало периода снижения скорости сушки.

Период снижения скорости сушки (см. рисунок 1.5) включает следующие фазы:

Фаза 1. Снижение объема испаряемой влаги, главным образом вследствие уменьшения площади поверхности испарения. Температура поверхности материала (сырца) становится выше температуры влагонасыщенного теплоносителя, но ниже температуры сухого теплоносителя.

Фаза 2. Снижение объема испаряемой влаги, главным образом вследствие перемещения площади поверхности испарения вглубь массива сырца. Температура поверхности материала продолжает повышаться.

Фаза 3. Прекращение испарения влаги и падение скорости сушки до нуля. Температура поверхности материала (сырца) устанавливается равной текущей температуре теплоносителя. Влажность материала становится равной или равновесной влажности теплоносителя.

Остановка технологической операции сушки керамического сырца производится в момент времени, соответствующий показателю состояния материала меньше критической влажности, но больше или равному значению равновесной влажности. Достигнутое состояние сырца характеризуется как «воздушная усадка», составляющая  $5 \div 13$  % от объема сырца.

На рисунке 1.6 представлены схематические изображения закономерностей распределения влаги для керамического сырца прямоугольной формы, характерные для периода постоянной скорости сушки. Состояние  $U_0$  (см. рисунок 1.6) характеризует начальное состояние сушки поризованного керамического сырца, при котором влагосодержание материала одинаково для всего сечения образца (прямоугольной формы). С течением времени и воздействием теплоносителя происходит значительное и резкое снижение влагосодержания на поверхности образца (состояние  $U_n$ ), а влагосодержание образца в центральной его

части остается сравнительно высоким (состояние  $U_{ц}$ ). Уменьшение первоначальных размеров образца (от значения  $L_0$  до  $L_1$ ) соответствует изменениям показателя влагосодержания в момент соответствия максимальному значению влагосодержания (состояние  $U_{ц}$ ). Если гипотетически допустить возможность изменения собственных размеров каждым элементарным слоем образца поризованного керамического сырца ( $S_1, S_2$ , см. рисунок 1.6) независимо от смежных с ним слоев, то итоговая форма образца по итогам сушки приобрела очертания, соответствующие кривой АБВ, приведенной на рисунке 1.6.

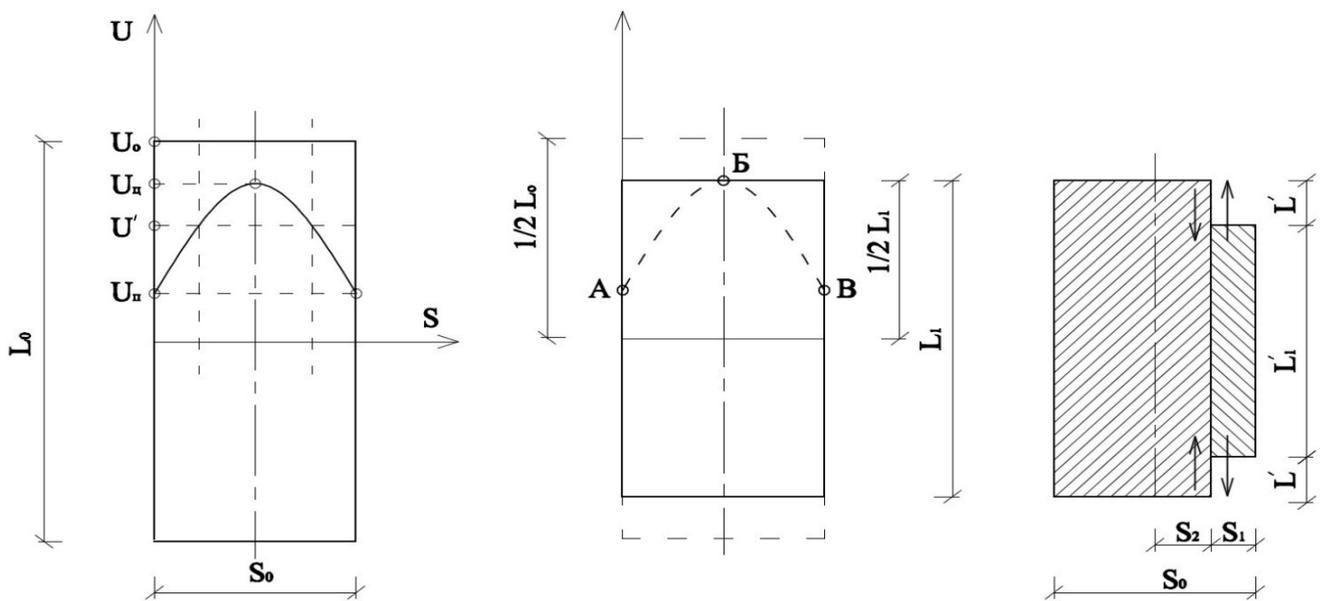


Рисунок 1.6 – Схема распределения влагосодержания для периода постоянной скорости сушки поризованного керамического сырца

$S$  – толщина образца (по оси абсцисс);  $U$  – влагосодержание материала (по оси ординат).

В реальности, стабильность первоначальной, прямоугольной формы образца является результатом воздействий со стороны внутренних слоев, направленных на снижение последствий высушивания поверхностных или внешних слоев материала.

Рассматриваемый результат можно охарактеризовать как «недопущенную усадку», которая могла бы состояться при возможности свободного перемещения поверхностного элементарного слоя (например, при уменьшении первоначальной

длины образца  $L_1$  до некоторой величины  $L'_1$ ) вследствие действия растягивающих сил. Однако именно наличие связей взаимодействия со смежным, внутренним элементарным слоем  $S_2$  позволяет поверхностному слою принимать по результатам сушки размеры связанного с ним внутреннего слоя.

Воздействие внутреннего слоя  $S_2$  на состояние и размеры внешнего (поверхностного) слоя  $S_1$  в процессе «недопущенной усадки» приводят одновременно к формированию:

- растягивающих напряжений в поверхностном (внешнем) слое  $S_1$  и изменениям первоначального размера  $L_1$  до некоторого установившегося значения размера  $L'_1$ ;
- сжимающих напряжений во внутреннем слое  $S_2$ , связанным взаимодействием с внешним слоем  $S_1$ .

При формировании растягивающих напряжений в поверхностном (внешнем) слое  $S_1$ , превышающих фактическое значение соответствующего предела прочности материала поризованного керамического сырца, появляются условия, способствующие образованию трещин на гранях образца.

Рассматриваемый тип трещин получил название специальное название: «сушильные трещины». Схема возможного образования сушильных трещин в процессе «недопущенной усадки» представлена на рисунке 1.7.

Сушильные трещины способны образовываться как на поверхностях образца (при этом не пересекая граней), так и внутри керамического сырца. По этой причине для всех периодов технологической операции сушки (см. рисунок 1.5), за исключением длительных и мягких режимов сушки, требуется постоянный контроль производственных параметров: скорости нагревания, режима циркуляции теплоносителя, температуры и влажности в рабочей зоне (сушильной камере). Возможные нарушения технологических режимов способны привести к формированию избыточно хрупкой структуры, которая становится неспособной выдерживать различные виды механических воздействий [23,34,63,99].

Неравномерная величина усадки (состояние «воздушной усадки») после окончания технологической операции сушки поризованного керамического сырца

способствует формированию дополнительных поверхностных и/или внутренних (массивных) напряжений, которые приводят к формированию различных видов деформаций, искривлений и трещин.

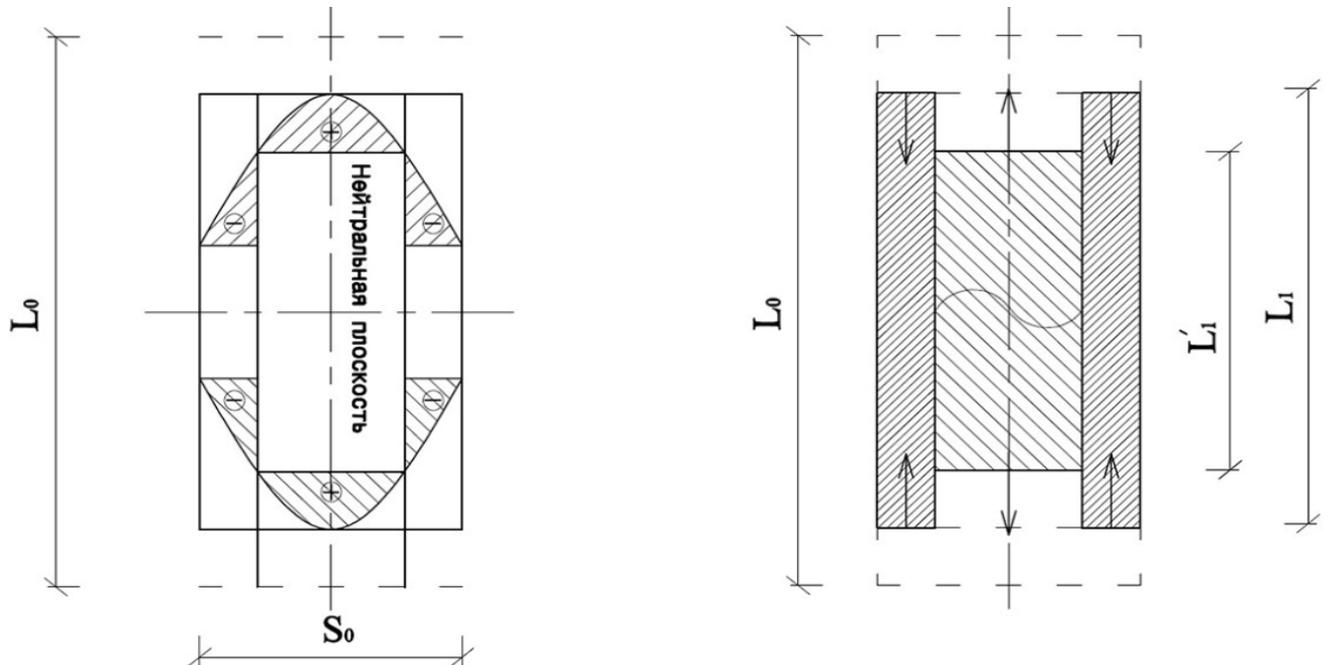


Рисунок 1.7 – Схема возникновения «недопущенной усадки» и трещин при сушке керамических сырцов

В случае неодинакового испарения влаги (например, с правой стороны образца интенсивнее, чем с левой стороны), высыхающей с большей скоростью, элементарный поверхностный (внешний) слой стремится, испытывая соответствующие сжимающие усилия со стороны смежного внутреннего слоя, к более быстрому уменьшению первоначальных размеров и становится способным искривлению формы образца.

Аналогично, в случае превышения скорости испарения влаги с продольных граней образца, по отношению к торцевым граням формируются условия, способствующие искривлению «запаздывающих», торцевых граней и искривление формы образца по этим направлениям.

Технологическая операция сушки поризованных (например, способом пенообразования или аэрирования) керамических сырцов характеризуется рядом

отличительных особенностей по сравнению с сушкой полнотелых керамических образцов, свойства которых принято считать соответствующими классической теоретической системе для сушки вида: «твердая фаза (частицы) – жидкая фаза (вода) – газовая фаза (газ)».

Испарение влаги в процессе сушки поризованных керамических сырцов отличается от аналогичной процедуры со сплошной поверхности, поскольку область (зона) испарения удалена на некоторую глубину от внешней поверхности, а поризованный образец керамической массы включает некоторое количество пузырьков воздуха, которые в первоначальный момент сушки являются замкнутыми и неразрушенными.

Целостность первоначальной структуры поризованного керамического материала определяется сравнительно небольшой величиной пластической прочности, которая ограничивает начальную температуру сушки величиной 40 °С.

Повышение температуры сушки (например, до величины 50 °С) приводит к увеличению растягивающих напряжений элементарного слоя и разрушению пузырьков воздуха, что приводит к изменению расположения глубины плоскости испарения влаги, прогреву материала и росту показателей теплообмена между внешним (поверхностным) и внутренним элементарными слоями. Повышение температуры приводит к соответствующему повышению давления и росту размеров воздушных пузырьков в составе поризованного керамического сырца и заканчивается формированием искривления первоначальной формы в виде «горбушки» (рисунок 1.8).

Анализ особенностей технологической операции сушки поризованных керамических масс на основе глинистого сырья различных месторождений показывают различие в получаемых результатах (параметрах) для каждого состава, что всегда требует дополнительных опытных исследований.

Из рассмотренных выше данных прямо следует, что одним из наиболее очевидных и показательных признаков правильности проектных решений по составу структурной смеси, и сушке керамических сырцов, и назначению

технологических регламентов и режимов сушки может быть признано отсутствие сушильных трещин.

На рисунке 1.9 представлена фотография керамического изделия, характеризующаяся отсутствием сушильных трещин.



Рисунок 1.8 – Фотография поризованных (аэрированных) керамических сырцов, имеющих нарушения структурной сплошности (при их сушке)

Причинами формирования сушильных трещин в составе поризованного (аэрированного) керамического сырца являются:

1. Фактор перемещения границы испарения и внешних (поверхностных) элементарных слоев к центру керамического массива, который способствует

образованию усадки изделия, потере первоначальной формы и формированию трещин.

2. Неравномерность последствий проявления усадочных процессов по глубине (толщине) и направлениям распространения в керамической массе. Формирование растягивающих напряжений вследствие испарения влаги с открытой поверхности внешнего слоя образует около основания поризованного керамического сырца зоны (или области) с наибольшим значением влагосодержания и наименьшей величиной осадки. В рассматриваемых областях происходит формирование сжимающих напряжений, провоцирующих условия образования необратимых деформаций: искривлений, короблений, трещин.



Рисунок 1.9 – Фотография аэрированного керамического сырца после сушки — отсутствие дефектов формы и поверхностей

Одним из возможных проектно-технологических приемов, направленных на снижение опасностей проявлений или значительного уменьшения сушильных деформаций, является добавлений в структурный состав поризованного (аэрированного) керамического сырца армирующих компонентов.

#### **1.4. Дисперсное армирование в технологии пористой высокоэффективной керамики**

Добавление армирующих компонентов в компонентный состав смеси (дисперсное армирование) является эффективным инструментом улучшения эксплуатационных и прочностных свойств различных искусственных композитных образований и строительных материалов на их основе. Экспериментальные исследования свойств модифицированных строительных материалов, образованных добавлением в их состав волокон различного размера и степени модульности (например, для материалов на цементной основе с добавлением органических и неорганических волокон (фибр) с образованием фибробетонов или фибропенобетонов), способны привести к заметному повышению показателей прочности, трещиностойкости, долговечности, а также значительно улучшить эффективность, качество и производительность технологических операций при их изготовлении [37,91,114].

Изучение моделей поведения различных фибр в процессе перемешивания смесей, их формования и набора проектной прочности основывается на результатах испытаний ведущих ученых и исследователей в данной области. Работы Ю.В. Пухаренко, И.О. Суворова [91,114], позволяют предположить, что использование в составе поризованной керамической массы армирующих волокон приведет к укреплению ее межпоровых перегородок, увеличению пластической прочности, снизит внутренние напряжения в поризованном керамическом сырце при его сушке и последующем обжиге.

Агрегативная устойчивость пено- и аэрокерамических структур в процессе формования и сушки зависит от толщины водной пленки на поверхности раздела твердой и газообразной фаз. С увеличением толщины водных пленок сцепление между минеральными частицами, которые создают основу ячеистого каркаса сырца, уменьшается. Нормальные напряжения, возникающие в поризованном сырце от действия верхних слоев на нижние, возрастают с течением времени по направлению сверху вниз. В момент времени, когда нормальные напряжения

достигают определенного значения, превышающего прочность сцепления между частицами твердой фазы, происходит мгновенное разрушение (расслоение) ячеистой структуры.

Согласно данным [37], использование в компонентном составе пенокерамической смеси дополнительных частиц твердой фазы в виде волокон, длина которых существенно превышает их поперечное сечение (от 100 до 2000 раз), позволяет регулировать пластическую прочность отформованных сырцов. Установлено, что структурная прочность увеличивается в 5-6 раз при использовании оптимального количества фибр по сравнению с неармированными керамическими массами. Полученный результат обусловлен качественным изменением прочности сцепления между минеральными элементами твердой фазы межпоровой перегородки поризованной ячеистой смеси.

Также выявлено, что силы сцепления между частицами шарообразной и вытянутой форм выше, чем между двумя шарообразными. Следовательно, для разрушения ячеистой структуры, в межпоровых перегородках которой содержатся армирующие волокна, требуется приложить большую нагрузку. Создание наиболее сбалансированной ячеистой структуры с требуемой пластической прочностью на этапе формования сырцов зависит от равномерности распределения фибры по всему объему поризованной керамической смеси, а также от длины, диаметра и реологических параметров шликера.

Традиционно для увеличения сопротивляемости керамических изделий возникновению и распространению трещин керамическую матрицу армируют различными видами волокон (металлическими, стекловидными и др.) в виде как непрерывных нитей, так и коротких стержней.

Армирование волокнами или нитями позволяет усилить те области керамического материала, которые подвергаются высоким растягивающим напряжениям. Но положительный эффект от использования волокон с высокой прочностью на растяжение наблюдается при условии, если армирующие волокна обладают более высоким модулем упругости, чем керамическая матрица. В противном случае армируемая керамическая структура будет разрушаться прежде,

чем растягивающие усилия будут переданы волокнам, особенно когда их объемное содержание ниже оптимального значения. Также всегда при выборе типа армирующего волокна необходимо учитывать фактор относительного удлинения при нагревании, т. е. данный показатель у волокон не должен превышать показатель у армируемого керамического материала.

Согласно результатам исследований [101,107], при температурном воздействии во время обжига в керамическом материале могут возникать структурные напряжения в различных направлениях. В таком случае заметную роль в минимизации последствий температурных деформаций используют относительно короткие волокна. В процессе поризации керамической смеси такие волокна будут расположены в структуре хаотично, что позволяет им принимать растягивающие усилия во всех направлениях.

Применение в технологии керамики различных по своей природе армирующих волокон позволяет использовать их свойства в различных температурных пределах. Так, армирующие волокна на основе минеральной ваты или асбеста эффективно работают до температуры 600 °С, так как из-за невысокой температуростойкости начинают терять свои упругие свойства и разрушаться при непрерывном воздействии температур свыше 600 °С. Некоторые исследователи отмечают [102,115], что применение базальтовых волокон ограничено их высокой хрупкостью и жесткостью, что может вызывать деструкцию ячеистой матрицы при изготовлении пористых керамических изделий.

В производстве пористой керамики теплоизоляционного назначения наиболее распространёнными армирующими волокнами являются волокна каолинового состава. По утверждению ряда авторов [47,69,109], изделия на основе каолинового волокна имеют высокие показатели температуростойкости, устойчивости к механическим нагрузкам, а также могут применяться в качестве теплоизоляции различного теплового оборудования и установок с температурой эксплуатации до 1200 °С. Данный тип волокна позволяет изготавливать различные теплоизоляционные керамические изделия (включая крупноразмерные) с широким

диапазоном средней плотности при невысокой чувствительности пористого сырца к сушке и обжигу, а также с высокими показателями по трещиностойкости.

При увеличении концентрации армирующего волокна в составе керамической массы, после обжига изделие имеет высокопористую структуру, поры которой имеют неопределенную форму и состоят из сообщающихся воздушных ячеек. Такой волокнисто-пористый каркас позволяет понизить среднюю плотность, но при этом прочностные показатели таких изделий сильно понижаются по сравнению с изделиями, где количество армирующих волокон находится в диапазоне оптимума, т.е. при котором они занимают свое положение только в межпоровых перегородках и окружены достаточным количеством связующего вещества (глинистого шликера) еще на этапе поризации керамической смеси.

Также стоит учитывать, что процесс теплопереноса, наблюдаемый в волокнисто-пористых керамических материалах, отличается от аналогичных процессов для материалов с ячеистой структурой. Расположение самих волокон в керамической матрице также влияет на теплотехнические показатели изделий: структура с хаотично расположенными армирующими волокнами обладает меньшим коэффициентом теплопроводности.

Известно, что площадь поперечного сечения армирующего волокна также влияет на коэффициент теплопроводности у пористых керамических изделий с одинаковой средней плотностью. С уменьшением толщины волокна уменьшается площадь контакта между волокнами, что позволяет такой керамической структуре меньше рассеивать тепловой поток, повышая сопротивление теплопередаче керамического материала.

Результаты некоторых работ подтверждают эффективность применения дисперсного армирования на основе базальтового волокна именно в период формования, сушки и начальный период обжига поризованного керамического сырца, полученного способом аэрирования. На начальном этапе, сразу после формования поризованной керамической массы, равномерно распределенное по массе волокно служит дополнительным пространственным каркасом, препятствуя

разрушению образованной ячеистой структуры и повышая их пластическую прочность. Далее, с ростом массопереноса и увеличением температуры теплоносителя, пористый керамический сырец подвергается воздушной усадке, при которой армирующие волокна не препятствуют сближению глинистых частиц, их окончательное пространственное расположение корректируется и после окончания сушки принимает окончательное объемное положение. В итоге формируется естественный дисперсно-армированный ячеистый каркас поризованного сырца, в котором отсутствуют остаточные напряжения (рисунок 1.10).

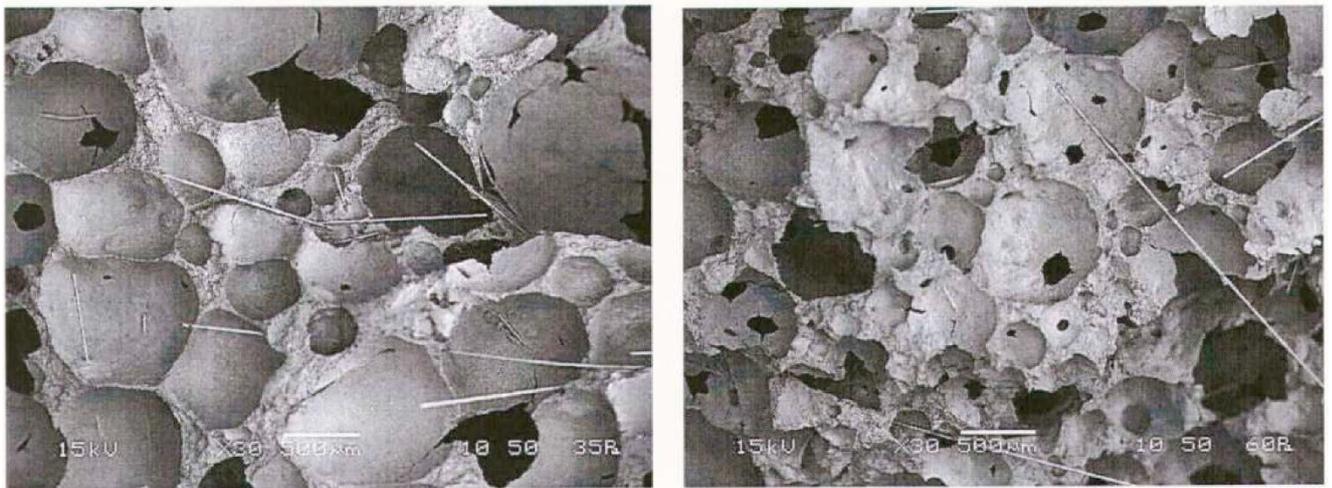


Рисунок 1.10 – Фотография макроструктуры аэрированных керамических сырцов с распределенной по объему базальтовой фиброй (длина волокон 13 мм)

Далее с ростом температуры обжига, межпоровые перегородки керамической матрицы равномерно воспринимают деформации огневой усадки и сохраняют стабильное положение как в период изотермической выдержки, так и в период охлаждения.

Последующий макроскопический анализ таких образцов показывает отсутствие базальтового волокна в ячеистой структуре, что свидетельствует о его оплавлении и участии в конечном формировании максимально плотной керамической матрицы межпоровых перегородок обожжённых изделий.

Таким образом, установлено, что применение в составе пористых керамических масс дисперсных армирующих волокон позволяет увеличить

агрегативную устойчивость поризованных масс, полученных пенным или аэрированными методами.

Длина, диаметр и количество волокон, а также водотвердое отношение исходного шликера определяют пластическую прочность отформованных поризованных масс. В зависимости от типа волокон возможно получать изделия с контролируемой средней плотностью в широком диапазоне значений, что позволяет изготавливать также крупногабаритные изделия с минимальным трещинообразованием после обжига и с достаточной прочностью при сжатии.

Использование волокон с минимальным поперечным сечением увеличивает прочность при изгибе пористых тонкостенных керамических изделий (плиты, оболочки и пр.).

### **Выводы по первой главе**

1. На основе проведенного литературного анализа определены основные способы снижения средней плотности в технологии керамики. Известные технические решения по созданию пористых керамических материалов позволяют изготавливать изделия, характеризующиеся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $350 \div 1650 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии  $0,8 \div 15,0 \text{ МПа}$ . Установлено, что способ аэрирования керамических масс является одним из наиболее рациональных способов снижения средней плотности керамических изделий при сохранении высоких прочностных показателей.

2. Компонентный состав и начальная вязкость керамических масс влияет на кинетику их влагосодержания во время сушки. Также содержание электролитов в глинистой суспензии позволяет контролировать скорость набора пластической прочности отформованных поризованных масс через показатель коагуляции шликера.

3. Применение дисперсного армирования, в частности базальтового волокна, при поризации керамической массы позволяет скомпенсировать растягивающие

напряжения при воздушной усадке сырцов, а также способствует сохранению бездефектной структуры в период термической обработки и охлаждения изделий.

4. Сохранение пористой структуры свежесформованной азрированной керамической массы обеспечивается за счет способности глинистого шликера создавать устойчивые суспензии в дисперсионной среде, а затем коагулировать, образуя прочные пространственные связи.

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Материалы исследований

Для проведения исследований образцов поризованных (аэрированных) керамических масс (АКМ) применены смеси и составы, включающие следующие основные компоненты:

- глинистое сырье;
- вода;
- добавки:
  - отошающие;
  - воздухововлекающие;
  - армирующие;
  - разжижающие.

Для исследования диапазона применения технологии АКМ в работе используется глинистый компонент (глинистое сырье) различных месторождений с отличным друг от друга химическим и минеральным составами. Глина предварительно измельчалась до порошкообразного состояния с максимальным размером частиц не более 0,16 мм. Особенности химического состава глинистого компонента (глинистого сырья) приведены в таблице 2.1.

Кембрийская глина Чекаловского месторождения относится к легкоплавкому среднепластичному, тонкодисперсному сырью. Число пластичности находится в районе от 15,5 до 17,6%. Глина имеет низкое содержание крупнозернистых включений, в качестве примесей в глине присутствует свободный кварц. Воздушная усадка оставляет от 6,2 до 6,7%, общая усадка достигает значений 7,2-8,2%.

Показатели прочности лабораторных образцов составили (температура обжига – 1000 °С):

- значение прочности при сжатии: 18,1÷22,1 МПа;

- значение прочности при изгибе:  $1,5 \div 1,8$  МПа.

Боровичско-любыйтинская глина разрабатывается в карьере АО «БКСМ» в черте г. Боровичи и относится к легкоплавкому среднепластичному глинистому сырью. Число пластичности – от 17,8 до 22,6, в составе присутствуют карбонатные включения размером 10–15 мм. Карьерная влажность – от 15,6 до 23%. Воздушная усадка составляет от 7,9 до 8,8%, а величина общей усадки приближается к 10,5%.

Таблица 2.1 – Особенности химического состава глинистого компонента

Наименование глинистого компонента (наименование месторождение)	Наименование химических элементов глинистого сырья						
	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	MgO	п.п.п
Глина каолиновая (Новгородская область)	2,13	0,85	48,35	1,24	33,60	0,47	13,36
Глина Боровичско-любыйтинская (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

Показатели прочности лабораторных образцов составили (температура обжига – 1000 °С):

- значение прочности при сжатии:  $15,1 \div 19,4$  МПа;
- значение прочности при изгибе:  $1,2 \div 1,6$  МПа.

Каолиновая глина Окладневского месторождения относится к огнеупорному высокопластичному сырью. Пластичность находится в диапазоне от 30,4 до 32,1, характеризуется низким содержанием крупнозернистых включений и красящих оксидов, по гранулометрическому составу относится к высокодисперсному сырью. Воздушная усадка составляет 5,9–6,2%, общая усадка находится в диапазоне значений от 6,5% до 7,6%. Прочность образцов при сжатии – 25,3–30,7 МПа, при изгибе – 1,9–2,2 МПа (температура обжига – 1000 °С).

Кирпичные суглинки Второго Шабердинского месторождения относятся к легкоплавкому среднепластичному сырью. Пластичность колеблется от 15,1 до 19,8, суглинок имеет низкое содержание крупнозернистых включений,

присутствуют карбонатные и кварцевые включения. Воздушная усадка составляет от 7,1 до 9,0%, общая – от 7,2 до 10,4%. Карьерная влажность находится в диапазоне от 21,5 до 22%.

Показатели прочности лабораторных образцов составили (температура обжига – 1000 °С):

- значение прочности при сжатии: 20,9÷22,5 МПа;
- значение прочности при изгибе: 1,3÷1,5 МПа.

Разжижающая добавка, проектируемая для компонентного состава смеси лабораторных образцов, представлена жидким (натриевым) стеклом (по ГОСТ 13078).

Воздухововлекающая добавка, представлена синтетическим (углеводородным) пенообразователем марки «ПБ – Формула 2012» (по ТУ 2481-008-80824910-2012).

Физико-химические свойства воздухововлекающей добавки сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Физико-химические показатели «ПБ – Формула 2012»

Наименование показателя	Значение показателя
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,100÷0,115
Водородный показатель (рН)	7,5÷11,0
Усадка от первоначального объема, %	≤ 5

Армирующая добавка, входящая в компонентный состав лабораторных образцов, представлена базальтовой фиброй (по ТУ 5952-036-05328981).

Основные физико-химические свойства армирующей добавки (базальтовой фибры) сведены в таблицу 2.3. Фотография образцов армирующей добавки (базальтовой фибры, длиной 13 мм) представлена на рисунке 2.1.

Данный вид фибры является наиболее предпочтительным к использованию в технологии пористой керамики, т.к. имеет минеральную основу с температурой применения не менее 700 °С, малый диаметр элементарного волокна широко распространен на рынке, обладает конкурентоспособной ценой. Оптимальная

длина армирующего волокна составляет от 12 до 14 мм. По результатам экспериментальных исследований такой диапазон линейных размеров позволяет фибре эффективно занять пространственное положение в межпоровых перегородках, сохраняя замкнутую пористость АКМ. Применение фибры большей длины не позволит провести высокоскоростное аэрирование в смесителе без разрушения ячеистой структуры [49].

Таблица 2.3 – Основные физико-химические свойства армирующей добавки

№ п.п.	Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя
1	Плотность	г/см <sup>3</sup>	2,6
2	Модуль упругости	кг/мм <sup>2</sup>	9100÷11000
3	Прочность на растяжение	МПа	1600÷3600
4	Удлинение образца материала при разрыве,	%	1,4÷3,6
5	Размер (длина) волокна	мм	13÷15
6	Размер (диаметр) волокна	мм	0,009÷0,011



Рисунок 2.1 – Фотография армирующей добавки (базальтовая фибра)

Использование волокон менее 8 мм снижает эффективность их работы на компенсацию растягивающих усилий при сушке АКМ, а также увеличивается

вероятность разрушения сплошности вновь образуемых при аэрировании АКМ воздушных пор.

Отощающая добавка представлена материалом на основе шамота марки ПШБМ (по ТУ 1522-009-00190495-99). Отощающие добавки в составе керамической сырьевой смеси применялись в измельченном состоянии (максимальный размер частиц не превышал 0,16 мм) для снижения пластичности глинистого компонента и значения воздушной усадки аэрированных керамических сырцов (АКС), а также для создания родственного термостабильного каркаса, позволяющего увеличить структурную прочность межпоровых перегородок в обожженной керамической матрице. Шамот данной марки является готовым продуктом АО «БКО» (Боровичский комбинат огнеупоров) и недефицитным сырьем, готовым после предварительного отсева к использованию.

## **2.2. Характеристика технологических особенностей подготовки образцов**

Технологическая последовательность изготовления лабораторного образца поризованного (аэрированного) керамического изделия начинается с перемешивания подготовленных компонентов, в которой учтены определенные пропорции компонентов сырьевой смеси таким образом, чтобы обеспечить достижение однородности глиняного шликера и стабилизации значения его вязкости.

Комбинации содержания поверхностно-активных веществ (ПАВ), воды и натриевого жидкого стекла в глинистом шликере определяли опытным путем с учетом его минимальной влажности при значениях. Показатель относительной вязкости принимал значения: от 1,48 до 1,79.

Следующая технологическая операция включала добавление в состав подготовленной шликерной смеси воздухововлекающей добавки с целью проведения операции аэрирования. Этап аэрирования проводился с использованием лабораторной пропеллерной мешалки. Частота вращения лопастей мешалки составляла 1100÷1500 оборотов/минуту, что достаточно для образования

АКМ установленной величины плотности. Полученная АКМ укладывалась в специальные формы с размерами 290×140×75 мм.

Результат технологической операции (формование АКМ) показан на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Фотография АКМ на основе каолиновой глины после формования керамического сырья с применением воздухововлекающей добавки

Перед размещением сформованного лабораторного образца АКМ в сушильную камеру была произведена его предварительная выдержка в условиях температурно-влажностного режима:

- температура: не выше 30 °С;
- влажность: 40 %.

Фотография на рисунке 2.3 иллюстрирует характерный след градиента влагосодержания в процессе сушки АКС (следующая после предварительной выдержки технологическая операция), где площадь поверхности испарения ограничена стенками формы.



Рисунок 2.3 – Фотография АКС на основе каолиновой глины после распалубки

Сушка сформованного образца (после его распалубки) производилась в сушильной камере до состояния остаточной влажности 5%.

Основная процедура по термической обработке (обжигу) высушенных лабораторных образцов АКС включала следующую последовательность технологических операций и режимов воздействий:

- период нагрева, продолжавшийся в течение 240 минут – до момента достижения температуры обжига;
- период изотермической выдержки образца, продолжавшийся в течение 150 минут – при выдерживании температуры обжига, равной 1000 °С;
- период естественного охлаждения после окончания обжига при нахождении лабораторных образцов в камере лабораторной печи.

Данный режим технологической операции обжига является оптимальным и определялся опытным путем с учетом габаритов печи и заданными геометрическими размерами АКС.

Обжиг при максимальной температуре до 1100 °С не повлиял на изменение прочностных показателей готовых изделий, но требовал существенно большие

энергетические и временные затраты по сравнению с оптимальным режимом обжига.

Затем охлажденные аэрированные керамические изделия (АКИ) подвергались механической обработке с целью доведения АКИ до установленных размеров величиной  $250 \times 120 \times 65$  мм, соответствующих форме стандартного кирпича.

На рисунке 2.4 представлена фотография изготовленных аэрированных лабораторных изделий, обработанных до размеров и формы стандартного кирпича и плитки.



Рисунок 2.4 – Фотография АКИ на основе исследуемых глин в формате плитки и сплошных кирпичей

### 2.3. Оборудование и инструменты

Экспериментальная часть данной диссертационной работы включает разработку лабораторных образцов, проведение программы экспериментальных

исследований и анализа полученных данных с применением следующих основных видов оборудования и инструментов:

- пресса, двухдиапазонного марки «Matest», модели C040PN132, включающего электронный измеритель воздействий «CYBER-PLUS EVOLUTION» (таблица 2.4);

Таблица 2.4 – Основные технические показатели и характеристики испытательного пресса

Наименование показателя или характеристики	Величина показателя или характеристики
Габариты	630×350×1260 мм
Класс точности	1
Предел нагружения	1500/250 кН
Скорость перемещения поршня	от 0 до 55 мм/мин

- печи электрической лабораторной, марки «АГНИ Мастер 75» (рисунок 2.5);



Рисунок 2.5 – Фотография лабораторной электрической печи «АГНИ Мастер 75»

Основные технические характеристики печи электрической лабораторной, марки «АГНИ Мастер 75» сведены в таблицу 2.5

Таблица 2.5 – Электрическая лабораторная печь. Основные технические показатели и характеристики

Наименование показателя или характеристики	Величина показателя или характеристики
Максимальная воспроизводимая температура	1250°C
Мощность	5,5 кВт, 220 В
Терморегулятор-измеритель	программируемый типа ТП703
Пределы допускаемой основной приведенной погрешности	$\pm 0,25\%$
Общий полезный объем	75 л

- шкафа сушильного, марки ШС-80-01СПУ;

Диапазон поддерживаемых температур (от 5°C 0 до 350°C). Погрешность при: 50°C  $\pm 2^\circ\text{C}$ ; 150°C  $\pm 3,5^\circ\text{C}$ ; 300°C  $\pm 4,5^\circ\text{C}$ ; 350°C  $0 \pm 5,5^\circ\text{C}$ .

- весов электронных, лабораторных, марки ВК-300.1;

Предел взвешивания от 0,1 до 300 г. Класс точности II.

- весов электронных, лабораторных, марки ВК-1500.1;

Предел взвешивания от 1 до 1500 г. Класс точности II.

- весов электронных, лабораторных, марки К-15.2–А21;

Предел взвешивания от 4 до 15000 г. Класс точности III.

- штангенциркуля электронного;

Диапазон измерений от 0 до 150 мм. Класс точности I.

- набора сит диаметром 300 мм, марки КП-109;

Диапазон размеров ячеек: 0,16÷70.

- измерителя влажности электронного, марки ВГ4-У.

Диапазон измерений влажности, %: бетон, раствор, кирпич – от 1 до 45; сыпучие материалы – от 1 до 25.

## 2.4. Методика проведения исследований

Методика построения и планирование эксперимента определялись исходя из опытных и теоретических данных, необходимых для получения аэрированных

керамических изделий с наибольшим значением коэффициента конструктивного качества.

С целью обоснования оптимальных показателей функционального качества АКИ, изготавливаемых из компонентных составов разных плотностей, предусматривается эксперимент, включающий анализ соответствующих трехфакторных моделей. Каждый из рассматриваемых факторов изменяет значения на двух уровнях. Главной задачей данного эксперимента является формирование аналитических зависимостей или уравнений регрессии в отношении следующих параметров оптимизации:

- воздушная усадка ( $\Delta l_v$ );
- предел прочности при сжатии ( $R_{сж}$ ).

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) позволяет определить заданные значения параметров оптимизации при всех возможных комбинациях уровней варьирования факторов. Планирование, проведение и обработка результатов ПФЭ включает в себя следующие основные этапы:

- определение уровня варьирования изучаемых факторов;
- составление исходной матрицы планирования;
- экспериментальное получение значений отклика;
- кодирование факторов;
- расчет коэффициентов уравнения регрессии;
- проверка значимости вычисленных коэффициентов;
- составление уравнения регрессии в кодированных переменных;
- проверка полученного уравнения на адекватность;
- составление уравнения регрессии в натуральных переменных.

Лабораторные образцы АКИ были изготовлены из глинистых компонентов (глинистого сырья) различных видов и месторождений в номерных составах структурной смеси:

- состав № 1 — из шабердинового суглинка месторождения, расположенного в Удмуртской республике;

- состав № 2 — из каолиновой глины месторождения, расположенного в Новгородской области;
- состав № 3 — из боровичско-люббытинской глины месторождения, расположенного в Новгородской области;
- состав № 4 — из кембрийской глины месторождения, расположенного в Ленинградской области.

Для установления общей значимости армирующих волокон при введении их в компонентный состав АКМ, а также для выявления интервалов оптимальных составов были проведены предварительные исследования.

Характеристика и предварительные результаты исследований АКИ приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Предварительные результаты исследований АКИ

Наименование компонента / показателя	Содержание компонента, % по массе / величина показателя							
	Состав №1		Состав №2		Состав №3		Состав №4	
Глинистый компонент (глинистое сырье)	52,87		48,25		50,52		43,25	
Жидкое стекло	0,69		0,88		0,76		0,49	
Шамот	11,50		6,89		16,39		12,43	
Базальтовая фибра, (сверх 100%)	–	–	–	–	–			
Вода	34,48		43,28		31,70		42,56	
ПАВ	0,46		0,47		0,63		0,63	
Предел прочности при сжатии, МПа	5,52	7,46	3,95	4,02	4,02	4,32	4,02	4,18
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	695	779	567	507	507	541	507	478
Общая усадка, %	12,09	13,41	12,23	12,84	12,84	9,41	12,84	9,73

Анализ предварительных результатов исследований АКИ (см. таблицу 2.6) позволяет утверждать следующую закономерность: добавление армирующей добавки (дисперсного армирования) приводит к снижению усадочных деформаций, образующихся при сушке лабораторных образцов. Дополнительно можно отметить также и повышение показателей структурной прочности АКИ. Полученная информация может быть признана достаточной для обоснования

компонентного состава керамической массы, предназначенной для изготовления АКИ.

Предварительные результаты исследований по подбору компонентных составов АКМ на основе различных глин в интервале значений средней плотности АКИ ( $\Delta\rho_{cp}$ ) 400–800 кг/м<sup>3</sup> позволили определить уровни варьирования для заданных переменных:  $z_1$  ( $x_1$ ) – содержание фибры,  $z_2$  ( $x_2$ ) – содержание шамота,  $z_3$  ( $x_3$ ) – плотность АКМ.

Исходные данные для проведения полного факторного эксперимента представлены в Таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Исходные данные для проведения ПФЭ

Интервал значений $\Delta\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр плана $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$
400–500	$z_1$	0,9	0,5	0,7	0,2
	$z_2$	75	25	50	25
	$z_3$	0,602	0,494	0,548	0,054
500–600	$z_1$	1,5	0,9	1,2	0,3
	$z_2$	145	75	110	35
	$z_3$	0,714	0,602	0,658	0,056
600–700	$z_1$	1,9	1,5	1,7	0,2
	$z_2$	205	145	175	30
	$z_3$	0,828	0,714	0,771	0,057
700–800	$z_1$	2,3	1,9	2,1	0,2
	$z_2$	255	205	230	25
	$z_3$	0,944	0,828	0,886	0,058

Далее полученные значения прочностных показателей, характеризующие особенности формирования оптимального состава АКИ (средняя плотность составляет: 400–800 кг/м<sup>3</sup>), рассматриваются при построении соответствующих зависимостей (сглаживающих кривых) методом наименьших квадратов.

Интерпретация математической модели в кодированных переменных позволяет по величине коэффициентов определить степень влияния заданных факторов как по отдельности, так и с учетом их парного и тройного взаимодействий. Чем больше абсолютная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор на функцию отклика (параметр оптимизации). Расчет

уравнений регрессии осуществляется с помощью автоматического алгоритма вычисления программы Microsoft Excel и представлен в виде соответствующих протоколов расчета на примере кембрийской глины Ленинградской области. (Приложения А, Б).

Так как технология получения пористых керамических изделий методом аэрирования является продолжительной и требует значительного числа единичных испытаний, то для установления взаимосвязи основных рецептурно-технологических параметров на физико-механические показатели АКИ необходимо выбрать простой и быстрый метод. Анализ данных после проведения полного факторного эксперимента позволит построить математические зависимости для АКИ на основе глинистого сырья, выбранного для исследования.

Полученные уравнения оптимальных прямых  $R_{сж} = f(\rho_{ср})$  используются для выявления эмпирических и расчетных зависимостей для первоначального химического состава принятого глинистого компонента (глинистого сырья) и величины предела прочности на сжатие изготовленного АКИ. За основной показатель, связывающий содержание тугоплавких и легкоплавких оксидов в шихте и механическую прочность готовых АКИ, принята расчетная температура огнеупорности керамических материалов [40].

Состав показателей и значений физико-механических параметров АКИ определяется по требованиям и рекомендациям нормативного документа ГОСТ 530 – 2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия», а также с использованием электронномикроскопического (сканирующий электронный микроскоп «Тескан») и термического (электропечь камерная лабораторная типа СНОЛ) анализов.

### **Выводы по второй главе**

1. Установлена технология изготовления аэрированных керамических образцов, определен их компонентный состав, показаны основные характеристики сырьевых материалов.

2. Выбран метод выявления показателей и признаков оптимизации структурного состава смеси для изготовления АКИ, включающий трехфакторный эксперимент, в ходе которого производятся изменения значений каждого рассматриваемого фактора на двух уровнях. По результатам предварительных исследований установлены исходные данные для проведения ПФЭ, а также определено, что наличие в компонентном составе аэрированной керамической массы базальтовой фибры уменьшает значение общей усадки АКС в среднем на 20–25% по сравнению с образцами без применения армирующих волокон.

3. Предложена оригинальная методика, устанавливающая зависимость валового химического состава исходного глинистого шликера на основе сырья различных месторождений и механической прочности аэрированных керамических изделий. В качестве основного показателя, связывающего химический состав аэрированной керамической массы, выбрано расчетное значение температуры огнеупорности керамической шихты.

**ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ  
КОМПОНЕНТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ СМЕСИ НА ФИЗИКО-  
МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРИСТОЙ  
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ КЕРАМИКИ**

**3.1. Влияние факторов и их комбинаций на значения воздушной усадки  
высокопористых керамических сырцов**

Значения коэффициентов уравнений регрессии  $y = \Delta l_v(x)$  для определения воздушной усадки АКС сведены в таблицу 3.1. Глинистое сырье обозначено следующим образом: №1 – кембрийская глина, №2 – боровичско-любытинская глина, №3 – каолиновая глина, №4 – шабердинский суглинок.

Таблица 3.1 – Сводная ведомость коэффициентов уравнений регрессии для определения воздушной усадки АКС

Глина	Коэффициенты уравнения регрессии						
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
	$\Delta \rho_{cp} = 400-500$						
1	-0,216	-0,094	0,037	-0,055	0,032	0,015	0,040
2	-0,209	-0,099	0,042	-0,053	0,025	0,007	0,039
3	-0,222	-0,080	0,049	-0,053	0,022	0,014	0,043
4	-0,205	-0,123	0,050	-0,050	0,035	0,015	0,028
	$\Delta \rho_{cp} = 500-600$						
1	-0,175	-0,066	0,069	-0,006	0,009	0,013	0,010
2	-0,172	-0,076	0,054	-0,007	0,013	0,017	0,007
3	-0,185	-0,040	0,073	0	0,015	0,026	0,008
4	-0,136	-0,083	0,034	-0,013	0,033	0,024	0,010
	$\Delta \rho_{cp} = 600-700$						
1	-0,106	-0,116	0,067	-0,010	0,059	-0,064	-0,015
2	-0,102	-0,113	0,078	-0,010	0,057	-0,054	-0,010
3	-0,110	-0,105	0,055	-0,015	0,060	-0,090	-0,020
4	-0,089	-0,105	0,073	-0,028	0,013	-0,046	-0,025
	$\Delta \rho_{cp} = 700-800$						
1	-0,075	-0,189	0,155	-0,014	-0,028	-0,009	0,011
2	-0,070	-0,192	0,163	-0,009	-0,025	-0,025	0,011
3	-0,082	-0,211	0,144	-0,030	-0,032	-0,016	0,005
4	-0,088	-0,178	0,168	-0,029	-0,012	-0,027	0,023

Рисунок 3.1 иллюстрирует динамику изменения значимости факторов компонентного состава и их комбинаций на значения воздушной усадки АКС, позволяя зафиксировать максимальные и минимальные значения, а также моменты изменения значимости на противоположные в исследуемом диапазоне средней плотности.

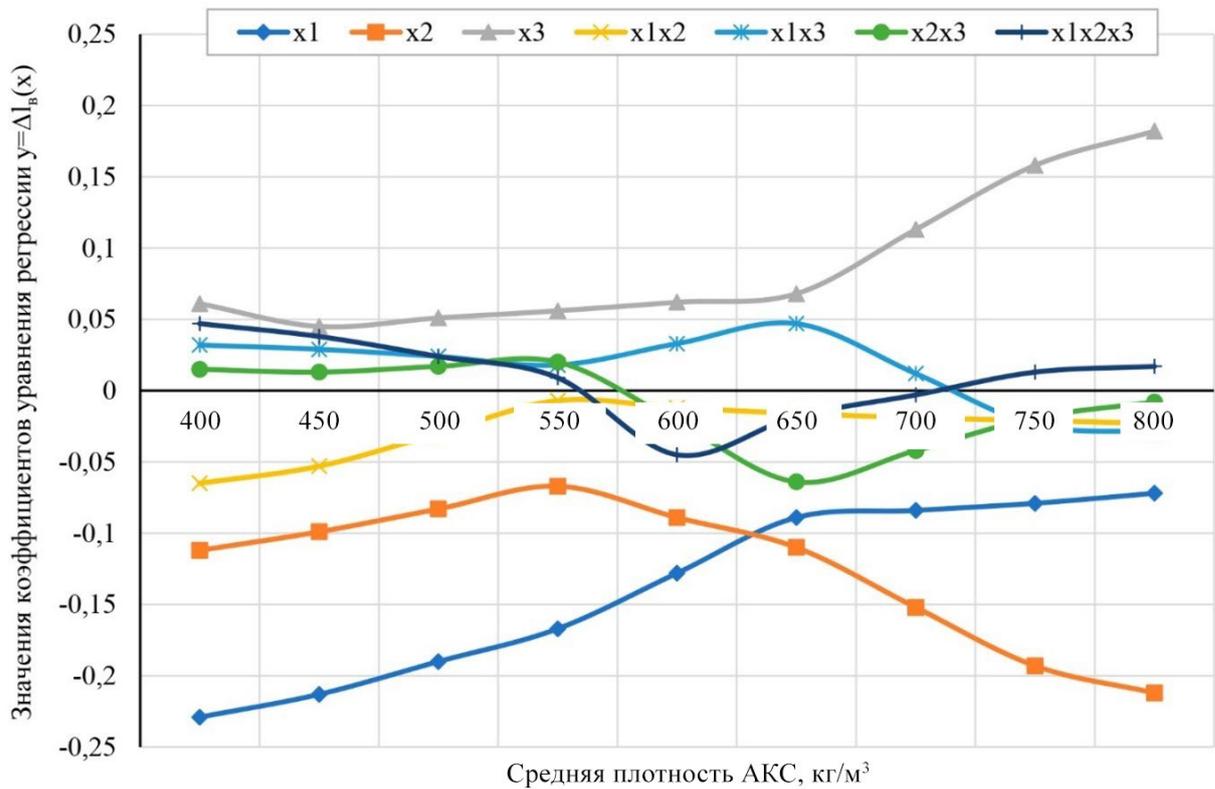


Рисунок 3.1 – График распределения значимости факторов и их комбинаций на значения воздушной усадки АКС

Снижение воздушной усадки АКС достигается двумя определяющими факторами: наличие в составе сырьевой смеси АКМ фибры и шамота, а также их парным взаимодействием.

Наиболее сильное влияние на функцию отклика  $y=\Delta I_B(x)$  оказывает содержание фибры в АКИ, имеющей значения средней плотности от 400 до 600 кг/м<sup>3</sup>, что свидетельствует об эффективной совместной работе армирующих волокон и глинистых частиц в тонкой межпоровой перегородке АКС. С возрастанием средней плотности до 650 кг/м<sup>3</sup> происходит изменение в порядке значимости факторов, и преобладающую роль теперь играет наличие шамота.

Данный факт объясняется уменьшением среднего диаметра пор в АКИ, что позволяет вводить в его состав большее количество шамота, при этом значимость влияния фибры фиксируется на определенном уровне. Плотность АКМ устойчиво повышает воздушную усадку АКС, но при средней плотности АКИ равной 650 кг/м<sup>3</sup> и выше наблюдается значительное повышение значимости данного фактора при достижении равного влияния содержания шамота. Комбинации факторов также оказывают действие на изучаемый параметр оптимизации, приобретая наибольшие свои значения в диапазоне средней плотности 600–700 кг/м<sup>3</sup>.

Уравнения регрессии, характеризующие особенности состояния АКС, составляются для каждого из четырех видов структурных смесей, принятых для исследований.

Уравнения регрессии в натуральных переменных для воздушной усадки АКС, в составе которой предусматривается кембрийская глина (глинистый компонент структурной смеси), представлены в формулах 3.1–3.4 (приложение А).

$$\Delta I_g^{400-500} = 6,63 + 1,86z_1 + 0,05z_2 + 0,003z_3 - 0,09z_1z_2 - 0,004z_1z_3 \quad (3.1)$$

$$\Delta I_g^{500-600} = 7,39 + 0,35z_1 + 0,008z_2 + 2,08z_3 - 0,01z_1z_2 - 1,33z_1z_3 - 0,01z_2z_3 + 0,02z_1z_2z_3 \quad (3.2)$$

$$\Delta I_g^{600-700} = 19,82 - 10,01z_1 - 0,03z_2 - 13,87z_3 + 0,03z_1z_2 + 12,69z_1z_3 + 0,04z_2z_3 - 0,04z_1z_2z_3 \quad (3.3)$$

$$\Delta I_g^{700-800} = -15,3 + 10,3z_1 + 0,08z_2 + 27,98z_3 - 0,04z_1z_2 - 11,33z_1z_3 - 0,09z_2z_3 + 0,04z_1z_2z_3 \quad (3.4)$$

где  $\Delta I_g^{400-500}$ ,  $\Delta I_g^{500-600}$ ,  $\Delta I_g^{600-700}$ ,  $\Delta I_g^{700-800}$  – значения воздушной усадки АКС в интервалах средней плотности (400–500), (500–600), (600–700), (700–800) кг/м<sup>3</sup> соответственно, %.

Уравнения регрессии в натуральных переменных для воздушной усадки АКС, в составе которой предусматривается боровичско-любытинская глина (глинистый компонент структурной смеси), представлены в формулах 3.5–3.8.

$$\Delta I_g^{400-500} = 5,86 + 2,12z_1 + 0,06z_2 + 0,004z_3 - 0,09z_1z_2 - 0,005z_1z_3 \quad (3.5)$$

$$\Delta I_g^{500-600} = 7,94 - 0,16z_1 + 0,002z_2 + 0,64z_3 - 0,01z_1z_2 - 0,5z_1z_3 - 0,005z_2z_3 + 0,01z_1z_2z_3 \quad (3.6)$$

$$\Delta I_g^{600-700} = 16,36 - 7,85z_1 - 0,01z_2 - 9,98z_3 + 0,02z_1z_2 + 9,91z_1z_3 + 0,02z_2z_3 - 0,03z_1z_2z_3 \quad (3.7)$$

$$\Delta I_g^{700-800} = -17,18 + 9,9z_1 + 0,08z_2 + 30,18z_3 - 0,04z_1z_2 - 11,11z_1z_3 - 0,1z_2z_3 + 0,04z_1z_2z_3 \quad (3.8)$$

Уравнения регрессии в натуральных переменных для воздушной усадки АКС, в составе которой предусматривается каолиновая глина (глинистый компонент структурной смеси), представлены в формулах 3.9–3.12.

$$\Delta I_g^{400-500} = 6,01 + 2,65z_1 + 0,06z_2 + 0,005z_3 - 0,1z_1z_2 - 0,006z_1z_3 \quad (3.9)$$

$$\Delta I_g^{500-600} = 8,55 - 0,22z_1 + 0,001z_2 + 0,56z_3 - 0,01z_1z_2 - 0,61z_1z_3 - 0,003z_2z_3 + 0,01z_1z_2z_3 \quad (3.10)$$

$$\Delta I_g^{600-700} = 21,77 - 12,27z_1 - 0,04z_2 - 16,54z_3 + 0,04z_1z_2 + 15,75z_1z_3 + 0,05z_2z_3 - 0,06z_1z_2z_3 \quad (3.11)$$

$$\Delta I_g^{700-800} = -8,14 + 6,66z_1 + 0,04z_2 + 18,49z_3 - 0,02z_1z_2 - 6,4z_1z_3 - 0,04z_2z_3 + 0,02z_1z_2z_3 \quad (3.12)$$

Уравнения регрессии в натуральных переменных для воздушной усадки АКС, в составе которой предусматривается шабердинский суглинок (глинистый компонент структурной смеси), представлены в формулах 3.13–3.16.

$$\Delta I_g^{400-500} = 7,22 + 0,52z_1 + 0,04z_2 + 1,67z_3 - 0,07z_1z_2 - 1,89z_1z_3 - 0,06z_2z_3 + 0,1z_1z_2z_3 \quad (3.13)$$

$$\Delta I_g^{500-600} = 8,84 - 0,39z_1 + 0,004z_2 - 0,001z_3 - 0,01z_1z_2 \quad (3.14)$$

$$\Delta I_g^{600-700} = 21,43 - 10,41z_1 - 0,07z_2 - 17,77z_3 + 0,05z_1z_2 + 13,96z_1z_3 + 0,1z_2z_3 - 0,07z_1z_2z_3 \quad (3.15)$$

$$\Delta I_g^{700-800} = -35,03 + 18,19z_1 + 0,17z_2 + 48,22z_3 - 0,08z_1z_2 - 19,51z_1z_3 - 0,19z_2z_3 + 0,08z_1z_2z_3 \quad (3.16)$$

Полученные уравнения регрессии для воздушной усадки АКС на основе исследуемого глинистого сырья являются адекватными, следовательно, с их

помощью возможно определение  $\Delta I_v$  для АКИ различной средней плотности без эксперимента в рамках значений факторов в заданном интервале варьирования.

### **3.2. Влияние факторов и их комбинаций на предел прочности при сжатии высокопористых керамических изделий**

Предел прочности при сжатии АКИ является одним из главных показателей качества изделий, определяющих область их применения. Получение объективных данных о распределении прочности с ростом средней прочности АКИ позволит установить общие закономерности для шихт на основе различного глинистого сырья.

В таблице 3.2 представлены данные значений коэффициентов уравнений регрессии для определения предела прочности при сжатии АКИ.

Ожидаемо величина плотности АКМ оказывает наибольшее влияние на предел прочности при сжатии АКИ, превосходя более чем в 3–6 раза сравнимо одинаковую значимость содержания фибры и шамота в сырьевой смеси. Общее взаимодействие всех факторов также оказывает воздействие на функцию отклика  $y=R_{сж}(x)$ , но много меньшее, чем каждый фактор по отдельности. Стоит отметить, что при средней плотности АКИ от 650 кг/м<sup>3</sup> и выше, наблюдается смена значимости парного «шамот – плотность АКМ» и тройного взаимодействий «фибра – шамот – плотность АКМ».

Смена парного взаимодействия объясняется тем, что с повышением средней плотности АКИ до определенного предела толщина межпоровой перегородки становится достаточной для равномерного распределения шамота в большем количестве глинистого вещества, что повышает структурную прочность готовых изделий. Факт изменения тройного взаимодействия факторов определяется преобладанием негативного влияния шамота в сырьевой смеси при ее дисперсном армировании т.к. целевое назначение шамота в составе АКИ – снижение усадочных деформаций при сушке АКМ для сокращения общего производственного цикла.

Таблица 3.2 – Сводная ведомость коэффициентов уравнений регрессии для определения предела прочности при сжатии АКИ

Глина	Коэффициенты уравнения регрессии						
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>
	Δρ <sub>ср</sub> = 400–500						
1	0,098	-0,070	0,604	0,011	0,026	-0,016	0,000
2	0,086	-0,061	0,549	0,008	0,015	-0,013	0,000
3	0,090	-0,063	0,723	0,000	0,018	-0,021	0,000
4	0,096	-0,063	0,560	0,011	0,024	-0,017	0,000
	Δρ <sub>ср</sub> = 500–600						
1	0,141	-0,095	0,660	0,027	0,017	-0,009	0,011
2	0,110	-0,092	0,615	0,015	0,009	-0,018	0,014
3	0,147	-0,101	0,675	0,032	0,040	-0,017	0,026
4	0,143	-0,092	0,627	0,023	0,023	-0,012	0,009
	Δρ <sub>ср</sub> = 600–700						
1	0,170	-0,135	0,662	0,091	0,012	-0,032	0,053
2	0,132	-0,119	0,732	0,045	0,014	-0,009	0,016
3	0,201	-0,153	0,677	0,091	0,014	-0,035	0,033
4	0,174	-0,127	0,710	0,088	0,009	-0,023	0,056
	Δρ <sub>ср</sub> = 700–800						
1	0,192	-0,136	0,658	0,066	0,009	0,032	-0,078
2	0,154	-0,118	0,667	0,022	0,008	0,009	-0,039
3	0,232	-0,147	0,657	0,058	0,017	0,041	-0,065
4	0,195	-0,124	0,549	0,081	0,012	0,026	-0,062

На рисунке 3.2 отражена динамика изменения значимости факторов компонентного состава и их комбинаций на предел прочности при сжатии АКИ.

Значения предела прочности при сжатии, определяемые посредством уравнений регрессии в натуральных переменных, приведены в формулах 3.17–3.20 (приложение Б) — для АКИ из кембрийской глины.

$$R_{сж}^{400-500} = -1,7 - 0,96z_1 + 0,002z_2 + 10,08z_3 + 0,002z_1z_2 + 2,43z_1z_3 - 0,01z_2z_3$$

(3.17)

$$R_{сж}^{500-600} = -3,65 + 0,9z_1 + 0,01z_2 + 13,59z_3 - 0,01z_1z_2 - 1,09z_1z_3 - 0,03z_2z_3 + 0,02z_1z_2z_3$$

(3.18)

$$R_{сж}^{600-700} = -35,18 + 18,25z_1 + 0,19z_2 + 59,13z_3 - 0,1z_1z_2 - 26,02z_1z_3 - 0,28z_2z_3 + 0,16z_1z_2z_3$$

(3.19)

$$R_{сж}^{700-800} = 124,92 - 57,81z_1 - 0,56z_2 - 125,81z_3 + 0,25z_1z_2 + 62,92z_1z_3 + 0,59z_2z_3 - 0,27z_1z_2z_3 \quad (3.20)$$

где  $R_{сж}^{400-500}$ ,  $R_{сж}^{500-600}$ ,  $R_{сж}^{600-700}$ ,  $R_{сж}^{700-800}$  – значения предела прочности при сжатии АКИ в интервалах средней плотности (400–500), (500–600), (600–700), (700–800) кг/м<sup>3</sup> соответственно, МПа.

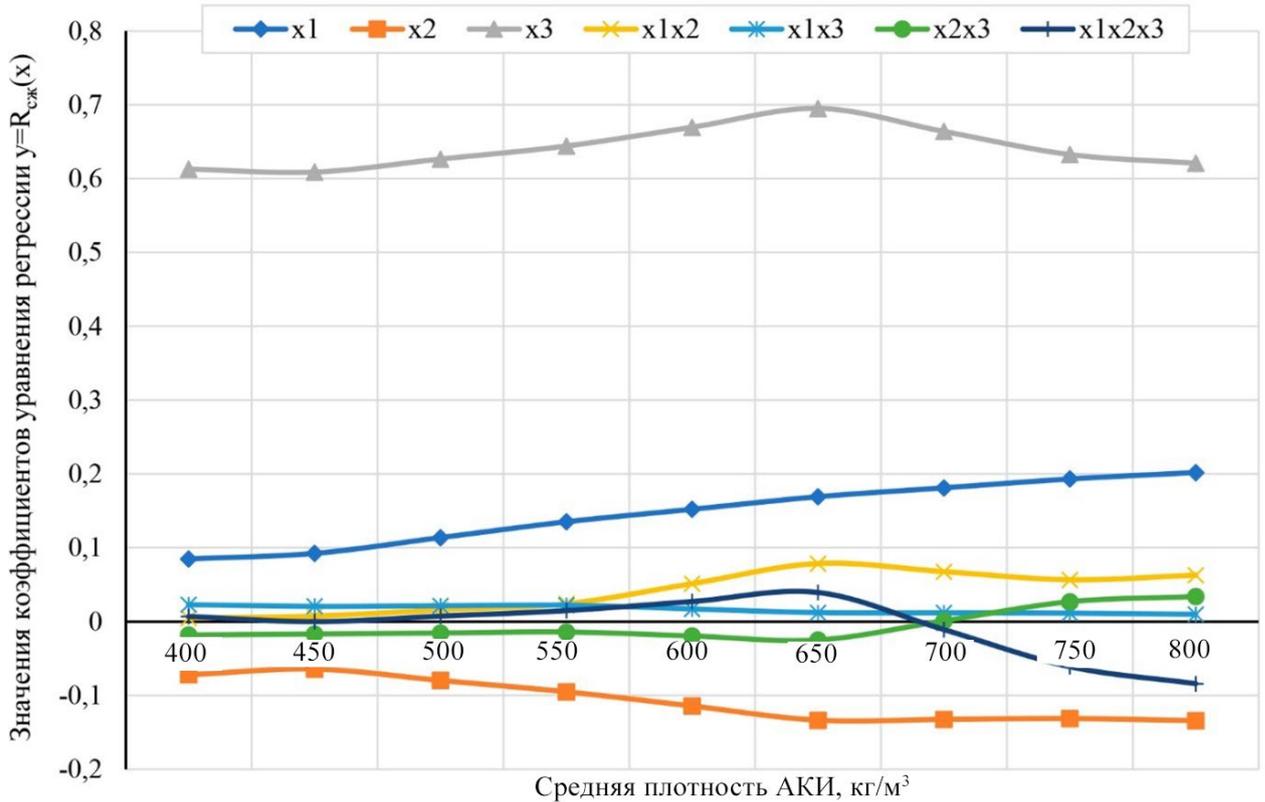


Рисунок 3.2 – График распределения значимости факторов и их комбинаций на предел прочности при сжатии АКИ

Значения предела прочности при сжатии, определяемые посредством уравнений регрессии в натуральных переменных, приведены в формулах 3.21–3.24 — для АКИ из боровичско-любытинской глины.

$$R_{сж}^{400-500} = -1,98 - 0,42z_1 + 0,002z_2 + 9,69z_3 + 0,002z_1z_2 + 1,39z_1z_3 - 0,01z_2z_3 \quad (3.21)$$

$$R_{сж}^{500-600} = -4,86 + 1,56z_1 + 0,02z_2 + 14,46z_3 - 0,01z_1z_2 - 2,05z_1z_3 - 0,04z_2z_3 + 0,02z_1z_2z_3 \quad (3.22)$$

$$R_{сж}^{600-700} = -12,17 + 4,84z_1 + 0,05z_2 + 25,82z_3 - 0,03z_1z_2 - 7,11z_1z_3 - 0,09z_2z_3 + 0,05z_1z_2z_3 \quad (3.23)$$

$$R_{сж}^{700-800} = 59,16 - 28,38z_1 - 0,27z_2 - 56,7z_3 + 0,12z_1z_2 + 31,78z_1z_3 + 0,29z_2z_3 - 0,14z_1z_2z_3 \quad (3.24)$$

Значения предела прочности при сжатии, определяемые посредством уравнений регрессии в натуральных переменных, приведены в формулах 3.25–3.28 — для АКИ из каолиновой глины.

$$R_{сж}^{400-500} = -2,09 - 0,46z_1 + 0,006z_2 + 13,01z_3 + 1,66z_1z_3 - 0,02z_2z_3 \quad (3.25)$$

$$R_{сж}^{500-600} = -3,82 + 1,84z_1 + 0,03z_2 + 16,07z_3 - 0,03z_1z_2 - 2,56z_1z_3 - 0,06z_2z_3 + 0,05z_1z_2z_3 \quad (3.26)$$

$$R_{сж}^{600-700} = -20,42 + 10,22z_1 + 0,11z_2 + 41,61z_3 - 0,06z_1z_2 - 15,39z_1z_3 - 0,18z_2z_3 + 0,09z_1z_2z_3 \quad (3.27)$$

$$R_{сж}^{700-800} = 108,85 - 48,78z_1 - 0,48z_2 - 107,26z_3 + 0,21z_1z_2 + 53,36z_1z_3 + 0,50z_2z_3 - 0,23z_1z_2z_3 \quad (3.28)$$

Значения предела прочности при сжатии, определяемые посредством уравнений регрессии в натуральных переменных, приведены в формулах 3.29–3.32 — для АКИ из шебердинского суглинка.

$$R_{сж}^{400-500} = -1,58 - 0,86z_1 + 0,003z_2 + 9,42z_3 + 0,002z_1z_2 + 2,24z_1z_3 - 0,01z_2z_3 \quad (3.29)$$

$$R_{сж}^{500-600} = -3,18 + 0,49z_1 + 0,01z_2 + 12,3z_3 - 0,01z_1z_2 - 0,38z_1z_3 - 0,03z_2z_3 + 0,02z_1z_2z_3 \quad (3.30)$$

$$R_{сж}^{600-700} = -37,99 + 19,73z_1 + 0,2z_2 + 62,05z_3 - 0,11z_1z_2 - 27,77z_1z_3 - 0,29z_2z_3 + 0,16z_1z_2z_3 \quad (3.31)$$

$$R_{сж}^{700-800} = 103,3 - 47,31z_1 - 0,45z_2 - 100,29z_3 + 0,21z_1z_2 + 50,28z_1z_3 + 0,47z_2z_3 - 0,21z_1z_2z_3 \quad (3.32)$$

Математические модели, позволяющие определить предел прочности при сжатии АКИ на основе исследуемого глинистого сырья, являются адекватными, поэтому могут быть приняты для расчета  $R_{сж}$  при условии соблюдения заданного интервала варьирования.

### 3.3. Определение рациональных составов высокопористых керамических изделий

Комплексный анализ уравнений регрессии в натуральных переменных для определения значений предела прочности при сжатии АКИ и воздушной усадки АКС ориентирован на определение рационального состава АКИ с применением глиняного сырья из кембрийской, боровичско-любытинской, каолиновой глин и шабердинского суглинка. Пределы 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 суглинка соответственно представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Прочностные показатели АКИ рациональных составов

$z_1$ , кг	$z_2$ , кг	$z_3$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{ср}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}^1$ , МПа	$R_{сж}^2$ , МПа	$R_{сж}^3$ , МПа	$R_{сж}^4$ , МПа
215,7–222,9	2,16–2,21	0,877–0,909	776,7	8,51	8,05	9,96	7,99
		0,910–0,944	789,5	8,62	8,23	10,16	8,28
205,0–212,1	2,24–2,30	0,829–0,858	718,8	7,67	7,18	9,15	7,27
		0,859–0,877	742,9	7,89	7,56	9,52	7,65
157,9–166,4	1,76–1,81	0,760–0,794	661,3	6,85	6,48	8,29	6,55
		0,795–0,828	694,5	7,36	6,84	8,81	7,11
145,0–153,6	1,84–1,90	0,715–0,733	604,2	6,07	5,65	7,61	5,84
		0,734–0,759	629,1	6,47	6,14	7,98	6,08
85,1–95,0	1,33–1,40	0,662–0,684	558,9	5,71	5,09	6,84	5,22
		0,685–0,714	586,3	5,92	5,37	7,32	5,71
75,0–85,0	1,41–1,50	0,603–0,628	504,5	4,83	4,29	6,22	4,58
		0,629–0,661	532,2	5,15	4,73	6,47	4,92
35,7–46,4	0,73–0,81	0,541–0,572	456,0	4,08	3,61	5,45	3,92
		0,573–0,602	485,7	4,49	4,12	5,94	4,28
25,0–32,1	0,84–0,90	0,494–0,502	408,3	3,54	3,02	4,68	3,32
		0,503–0,540	438,1	3,88	3,37	5,18	3,74

Средняя плотность рассматриваемого состава АКИ находится в диапазоне возможных значений:  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$ . Графическое представление выявленных закономерностей рассматриваемых параметров (предела прочности при сжатии) для АКИ рациональных составов представлена на рисунке 3.3.

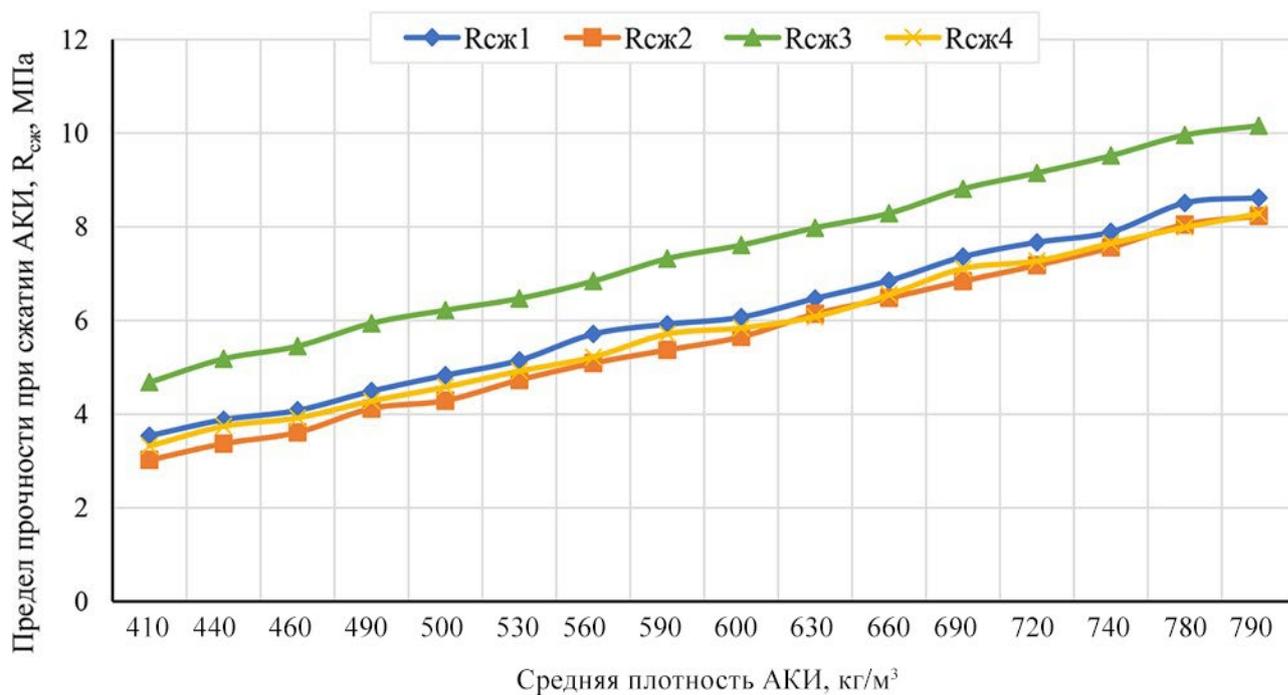


Рисунок 3.3 – Графики зависимости предела прочности при сжатии АКИ рационального состава от их средней плотности

Из полученных результатов исследований (см. таблицу 3.3 и рисунок 3.3) следует, что изменения величин предела прочности при сжатии  $R_{сж}^1$ ,  $R_{сж}^2$ ,  $R_{сж}^3$ ,  $R_{сж}^4$ , выявленных для рациональных составов АКИ с применением глинистого компонента (глиняного сырья) из кембрийской, боровичско-любытинской, каолиновой глин и шабердинского суглинка соответствуют линейному закону для всех возможных значений средней плотности структурной смеси:  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$ .

### Выводы по третьей главе

1. Исследована динамика изменения значимости факторов и их комбинаций на исследуемые параметры оптимизации ( $\Delta I_B$  и  $R_{сж}$ ). Содержание фибры в составе

АКИ имеет наибольшее влияние на функцию отклика  $y=\Delta I_v(x)$  в диапазоне средней плотности 400–600 кг/м<sup>3</sup>, далее с ростом средней плотности происходит смена значимости факторов и наличие шамота определяет в большей степени значение воздушной усадки АКС. Предел прочности при сжатии АКИ в первую очередь определяется значением плотности АКМ, затем по значимости следует вклад армирующих волокон. Наличие шамота в сырьевой смеси имеет равную по модулю значимость содержанию фибры, но является негативным фактором в формировании прочной керамической матрицы межпоровой перегородки АКИ.

2. Разработаны уравнения регрессии в натуральных переменных для определения воздушной усадки АКС и предела прочности при сжатии АКИ на основе исследуемого глинистого сырья. Установлена адекватность полученных зависимостей.

3. Определены рациональные составы армированных АКИ на основе исследуемого глинистого сырья с помощью математических моделей, построенных при проведении полного факторного эксперимента.

4. Установлены прочностные показатели АКИ рациональных составов, характеризующихся величинами физико-механических показателей: средняя плотность 400÷800 кг/м<sup>3</sup> прочность при сжатии 3,02÷10,16 МПа.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШИХТЫ

### 4.1. Оценка области промышленного использования глинистого сырья по его химическому составу

Глины характеризуют вещественным, минералогическим, гранулометрическим и химическим составами. Содержание тугоплавких и легкоплавких оксидов в глинистом сырье с точки зрения изготовления определенных видов керамических изделий определяет их физико-механические показатели, а также такие значимые производственные параметры, как режим сушки и обжига. Химический анализ позволяет определить технологические свойства глин и разработать рациональные составы керамических масс [1, 15, 16, 51, 54].

В соответствии с положениями нормативно-технического документа (раздел 5.1 ГОСТ 9169-2021 Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация) глинистое сырье АКИ характеризуется следующими признаками группы огнеупорности в зависимости от температуры воздействия.

В таблице 4.1 представлены характеристики и признаки классификации глинистого сырья по огнеупорности.

Таблица 4.1 – Характеристики и признаки классификации глинистого сырья по свойству огнеупорности

Признак огнеупорности по температуре, °С	Наименование группы по огнеупорности
более, чем 1580	огнеупорная
от 1350 до 1580	тугоплавкая
менее, чем 1350	легкоплавкая

В таблице 4.2 приведены интервалы содержания оксидов в глинах в зависимости от их огнеупорности [1].

Анализируя данные химического анализа, можно сгруппировать глины в соответствии с их техническим назначением. Такая группировка приведена на соответствующей диаграмме (рисунок 4.1).

Таблица 4.2 – Классификация химического состава глинистого сырья по огнеупорности

Показатели глинистого сырья	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	п.п.п
Легкоплавкие	1–5	0,5–3,0	0,5–15	3–12	7–21	55–80	3–15
Тугоплавкие	0,7–3,2	0,3–2,6	0,5–2,0	1–9	16–29	53–73	4–12
Огнеупорные	0,3–3,0	0,2–1,0	0,2–0,9	0,4–2,7	25–39	46–62	8–18

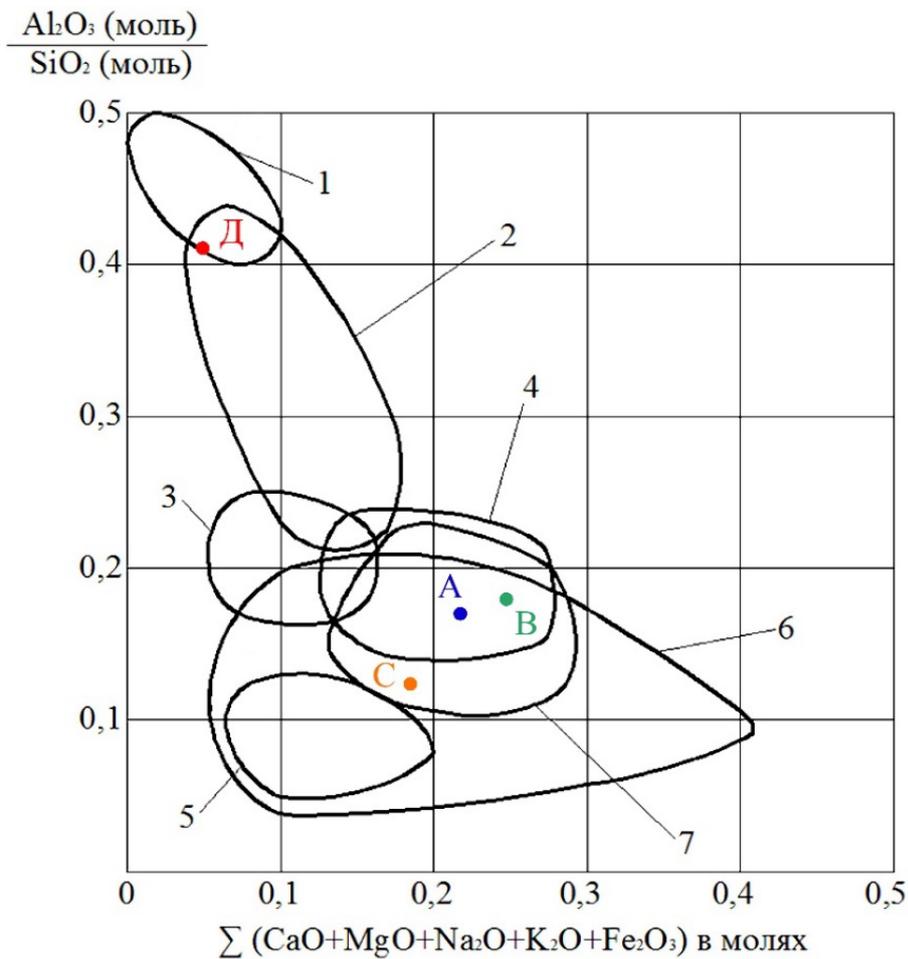


Рисунок 4.1 – Диаграмма областей промышленного назначения различных глин (диаграмма А.И. Августинника)

Область промышленного применения глинистого компонента (сырья):

- 1 – огнеупорные (шамотные) керамические изделия; 2 – керамическая плитка для чистовой отделки пола, трубы канализационные, изделия керамические, кислотоупорные, товар каменный; 3 – изделия терракотовые и гончарные; 4 – черепица керамическая кровельная; 5 – клинкер мостовой; 6 – кирпич полнотелый и с пустотами; 7 – керамзит насыпной.

Согласно существующей классификации ГОСТ 9169 по содержанию в ней  $Al_2O_3$  более 45% глины считаются высокоглиноземистыми, от 38 до 45% – высокоосновными, от 28 до 38% – основными, от 14 до 28% – полукислыми и менее 14% – кислыми.

Предварительный расчет содержания основных оксидов исследуемого глинистого сырья в мольных долях представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Химический состав исследуемого глинистого сырья

Наименование глинистого компонента (сырья)	SiO <sub>2</sub> , %/моль	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %/моль	CaO, %/моль	MgO, %/моль	Na <sub>2</sub> O, %/моль	K <sub>2</sub> O, %/моль	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %/моль
Кембрийская глина	1,033	0,177	0,024	0,091	0,048	0,026	0,034
Боровичско-любытинская глина	0,922	0,174	0,08	0,06	0,048	0,014	0,05
Каолиновая глина	0,806	0,329	0,015	0,012	0,016	0,012	0,001
Шабердинский суглинок	1,105	0,136	0,025	0,065	0,048	0,015	0,037

Кембрийская, боровичско-любытинская глины и шабердинский суглинок после деления количества оксидов на соответствующие молекулярные веса позволяет отнести их к группе для производства кирпича и черепицы (точки А, В и С на рисунке 4.1 соответственно), а каолиновая глина относится к области изготовления огнеупорных изделий (точка Д на Рисунке 4.1).

Стоит заметить, что химический анализ глин высокого качества, имеющих мало примесей, показателен в большей степени, нежели оценка кирпичных глин, так как вследствие невысокой температуры обжига изделий (до 1000°С) в малой степени проявляют себя минералы-плавни [40, 51].

#### **4.2 Методика определения расчетного предела прочности при сжатии аэрированных высокоэффективных керамических изделий**

Определение зависимостей физико-механических характеристик в виде показателя предела прочности при сжатии АКИ от химического состава глинистого сырья является развитием положений методики выявления расчетной температуры

огнеупорности АКС в зависимости от показателя валового химического состава шихты. Расчетные формулы данного подхода представлены в научном труде Зверева В.Б. [41], а в данном диссертационном исследовании приведены их логические продолжения, отображаемые посредством аналитических зависимостей вида:

$$T_{\text{огн}}^{\text{расч}} = \left( \frac{2,92}{1 + 1,156K_{\text{нл}}} - 1 \right) \times 798 \pm \Delta t \quad (4.1)$$

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

$$K_{\text{нл}} = \frac{a_1 n_1 + a_2 n_2 + a_3 n_3 + a_4 n_4 + a_5 n_5}{b_1 m_1 + b_2 m_2} \quad (4.2)$$

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.

$$\Delta t = 833,3e - 100 \quad (4.3)$$

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

$$e = \frac{M_1}{M_2 + M_3 + M_4} \quad (4.4)$$

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

Алгоритм расчета показателя огнеупорности по расчетной температуре представлен в качестве примера для варианта компонентного состава с применением боровичско-любытинской глины. Для остальных вариантов

компонентных глиняных смесей (см. таблицу 4.3) определение расчетных показателей производится аналогично.

$$K_{пл} = \frac{0,8 \times 7,29 + 0,5 \times 4,53 + 0,6 \times 2,42 + 1 \times 2,15 + 1 \times 2,17}{1 \times 55,34 + 1,2 \times 17,7} = 0,181$$

$$e = \frac{\frac{17,70}{102}}{\frac{55,34}{60} + \frac{2,15}{94,2} + \frac{2,17}{62}} = 0,177$$

$$\Delta t = 833,3 \times 0,177 - 100 \approx 47,5^\circ\text{C}$$

$$T_{огн}^{расч} = \left( \frac{2,92}{1 + 1,156 \times 0,181} - 1 \right) \times 798 + 47,5 \approx 1177^\circ\text{C}$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов показателей огнеупорности принятых вариантов глинистого сырья

Наименование глинистого компонента (сырья)	e	$K_{пл}$	$\Delta t$ , °C	$T_{огн}^{расч}$ , °C
Кембрийская глина	0,156	0,146	34,0	1227
Боровичско-любытинская 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

Из анализа приведенных в таблице 4.4 расчетных данных следует логичный вывод о наличии связи между особенностями химического состава глинистого сырья керамической шихты и показателем предела прочности при сжатии АКИ.

Таким образом, выявление зависимостей и влияния химического состава глинистого сырья на температуру огнеупорности можно рассматривать в качестве значимого производственного фактора, определяющего физико-механические характеристики АКИ [27, 29, 38, 49, 118].

Управление итоговыми (ожидаемыми) величинами физико-механических характеристик АКИ становится возможным посредством регулирования пропорциональным качественным и количественным составами оксидов компонентов шихты, характеризующихся показателями огнеупорности, тугоплавкости и легкоплавкости [66, 68, 90, 100, 109].

Расчетные данные, приведенные в таблице 4.4, обработаны методом наименьших квадратов для графической интерпретации полученных результатов посредством представления соответствующих видов сглаживающих прямых (рисунок 4.2).

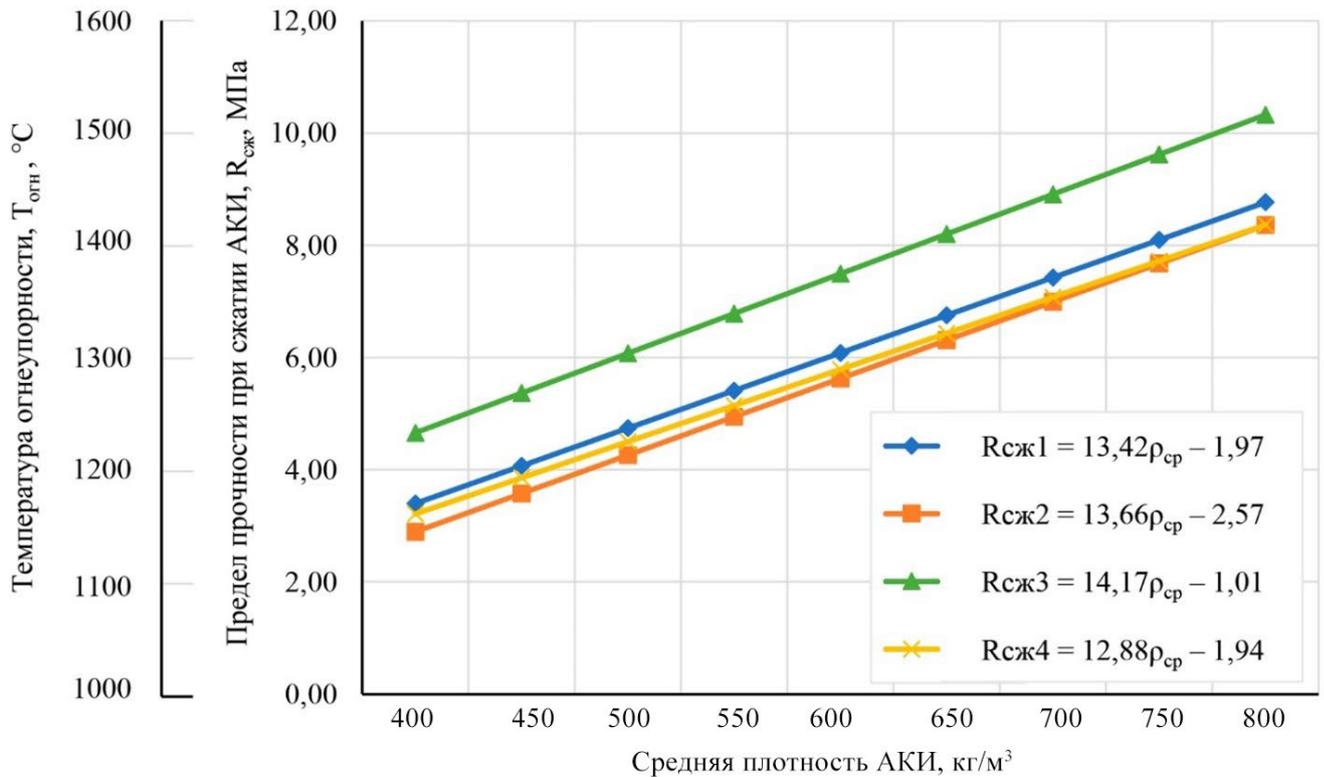


Рисунок 4.2 – Графическая интерпретация выявленных зависимостей показателей средней плотности АКИ от предела прочности при сжатии и температуры огнеупорности

В соответствии с данными, представленными на рисунке 4.2, связь между пределом прочности при сжатии и температурой огнеупорности можно отобразить аналитической зависимостью вида:

$$R_{сж} = 0,02T_{огн} - 20 \quad (4.5)$$

Аналитическая зависимость вида (4.5) может быть модифицирована добавлением расчетных параметров, характеризуемых как коэффициент общий ( $k_0$ ) и коэффициент температурного соответствия ( $k_t$ ). Добавление рассматриваемых коэффициентов позволяет отобразить индивидуальный характер особенностей

конкретного месторождения глинистого компонента (глинистого сырья), при взятии за методическую основу результатов расчета, полученных для кембрийской глины.

Модификация аналитической зависимости вида (4.5) с применением коэффициента вида  $k_o$  представлена расчетной формулой:

$$k_o = \frac{T_{огн}}{T_{расч}} = \frac{50R_{сж} + 1000}{T_{расч}} = \frac{50 \times (13,42\rho_{ср} - 1,97) + 1000}{1227} = 0,547\rho_{ср} + 0,735 \quad (4.6)$$

Коэффициент температурного соответствия ( $k_t$ ) предусмотрен для отображения индивидуальных особенностей предела прочности при сжатии АКИ от расчетной температуры огнеупорности структурной смеси (шихты) из конкретного глинистого материала (глинистого сырья).

Модификация аналитической зависимости вида (4.5) с применением коэффициента вида  $k_t$  осуществляется применением метода наименьших квадратов для обработки функции вида  $k_t = f(T_{огн}^{расч})$  и представляется расчетной формулой:

$$k_t = 1,627 - \frac{T_{огн}^{расч}}{1955,72} \quad (4.7)$$

Величины коэффициента температурного соответствия ( $k_t^1, k_t^2, k_t^3, k_t^4$ ), выявленные для принятых к рассмотрению видов и месторождений глинистого компонента, приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Коэффициенты температурного соответствия глинистого сырья

$k_t^1$	$k_t^2$	$k_t^3$	$k_t^4$
0,9996	1,0253	0,7827	1,0033

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

$$R_{сж} = 0,02k_t(0,547\rho_{ср} + 0,735)T_{огн}^{расч} - 20 \quad (4.8)$$

Графическое отображение особенностей распределения погрешностей предела прочности при сжатии АКИ (в зависимости от средней плотности АКИ) приведено на рисунке 4.3.

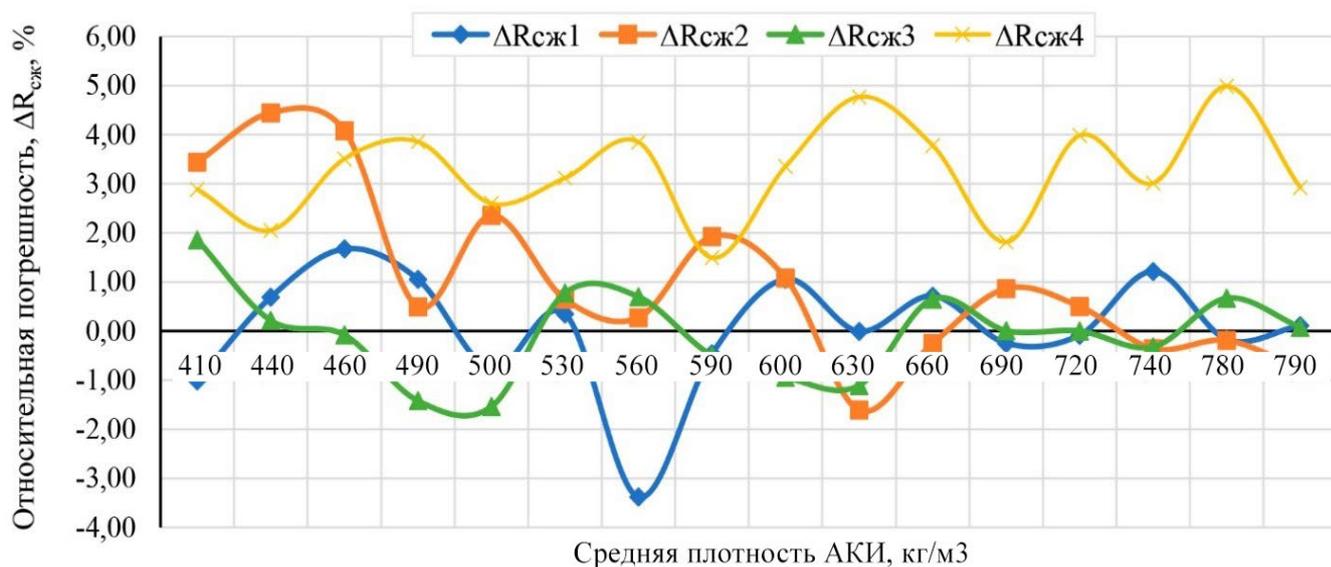


Рисунок 4.3 – Графическое отображение величин распределения относительной погрешности, выявленных при определении показателя предела прочности при сжатии АКИ (в зависимости от средней плотности АКИ)

$\Delta R_{сж}^1, \Delta R_{сж}^2, \Delta R_{сж}^3, \Delta R_{сж}^4$  – значение погрешности для АКИ, изготовленных из кембрийской, боровичско-любыйтинской, каолиновой глины и шабердинского суглинка соответственно.

Сравнительный анализ результатов расчетов значений предела прочности при сжатии, приведенных в таблице 4.4, и значений полученных расчетов по аналитической формуле (4.8) показывает, что величина относительной погрешности не превышает 5 %.

В данном исследовании для систематизации АКИ различной прочности необходимо ввести специальный показатель функционального качества, а именно критерий относительной прочности АКИ ( $R_{сж}^{отн}$ ). Критерий  $R_{сж}^{отн}$  характеризует расчетное значение предела прочности при сжатии АКИ при их средней плотности 500 кг/м³.

Классификация керамических изделий с применением критерием относительной прочности изготовленных АКИ ( $R_{сж}^{отн}$ ) приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Классификация керамических изделий, в соответствии с предложенным критерием относительной прочности АКИ ( $R_{сж}^{отн}$ )

Величина предела прочности при сжатии, $R_{сж}^{отн}$ , МПа	Категория (класс) АКИ	Наименование группы АКИ по показателю предела прочности при сжатии
1,1÷1,7	R 15	низкая прочность
1,7÷2,4	R 20	
2,4÷3,0	R 25	стандартная прочность
3,0÷3,8	R 35	
3,8÷4,4	R 40	повышенная прочность
4,4÷5,1	R 45	
5,1÷5,7	R 55	высокая прочность
5,7÷6,5	R 60	
6,5 и более	R 65	особо высокая прочность

Категория АКИ позволит ввести в технологию аэрированной керамики понятие классификации по прочности и упрощает общее понимание видов АКИ с точки зрения прочностных характеристик.

### 4.3 Изучение макроструктуры изделий из аэрированной керамики

Известно, что прочность керамических материалов ячеистой структуры зависит, в первую очередь, от характера структурных связей (сплошность стенок, взаимное расположения и размеры пор). Химический и минералогический составы керамической шихты и фазовый состав готовых АКИ также являются значимыми и регулируются при проектировании сырьевой смеси, но определяющее значение имеют технологические параметры формования, сушки и обжига АКИ, которые определяются, исходя из коагуляционных и тиксотропных свойств глинистого компонента.

Помимо прочности, характер расположения пор влияет на другой немаловажный параметр, определяющий долговечность строительной конструкции – морозостойкость. Многие авторы в своих исследованиях выделяют следующие группы материалов с открытыми порами [99,102,115]:

- материалы с открытыми порами первой группы характеризуются присутствием пор, диаметр которых составляет от  $0,1 \div 0,3$  до  $10 \div 50$  мкм. Отличительной особенностью материалов рассматриваемой группы является заполнение влагой пор при капиллярном подсосывании и формировании при последующем замерзании растягивающих усилий (величиной более 100 МПа) в стенках пор;
- материалы с открытыми порами второй группы характеризуются присутствием пор, диаметр которых составляет от  $10 \div 50$  до  $100 \div 200$  мкм. Такой диапазон пор практически не способствует негативным последствиям при замерзании, поскольку полного заполнения пор влагой не происходит. Соответственно образующийся при замерзании влаги лед просто вытесняется в свободное от влаги пространство поры;
- материалы с открытыми порами третьей группы характеризуются присутствием пор, диаметр которых составляет более 200 мкм. Поры такого размера практически не способны к задержанию влаги, не формируют скоплений воды и льда и отличаются повышенной (близкой к максимальному значению) морозостойкостью;
- материалы с открытыми порами четвертой группы характеризуются присутствием пор, диаметр которых составляет менее 0,1 мкм. Сравнительно небольшие размеры пор способствуют замерзанию находящейся в ней влаги, начиная с величины отрицательной температуры, равной  $-25$  °С. Однако в значительном большинстве случаев поступающая влага не способна полностью заполнить доступный объем порового пространства.

Из анализа работ исследователей [4,6,18,66,71] известно, что для создания высококачественных керамических изделий ячеистой структуры необходимо учитывать несколько положений:

- достижение максимальной прочности при минимальной капиллярной пористости межпоровых перегородок керамического черепка;
- равномерное распределение всех сырьевых компонентов по всему объему керамической матрицы;

– создание макропористой структуры со сферическими порами, имеющими кубическую и гексагональную сингонию;

– преобладание в более 7 раз объемов макропор перед микропорами.

На рисунках 4.4 – 4.9 представлены фотографии макропористой структуры поверхности АКИ на основе кембрийской глины (средняя плотность – от 560 до 580 кг/м<sup>3</sup>).

На рисунках 4.10–4.12 представлена макропористая структура поверхности АКИ, для изготовления которого применялась боровичско-любытинская глина (средняя плотность – от 610 до 630 кг/м<sup>3</sup>).

На рисунках 4.13–4.16 представлена макропористая структура поверхности АКИ на основе каолиновой глины (средняя плотность – от 460 до 480 кг/м<sup>3</sup>).

На рисунках 4.17–4.21 представлена макропористая структура поверхности АКИ на основе шабердинского суглинка (средняя плотность – от 510 до 530 кг/м<sup>3</sup>).

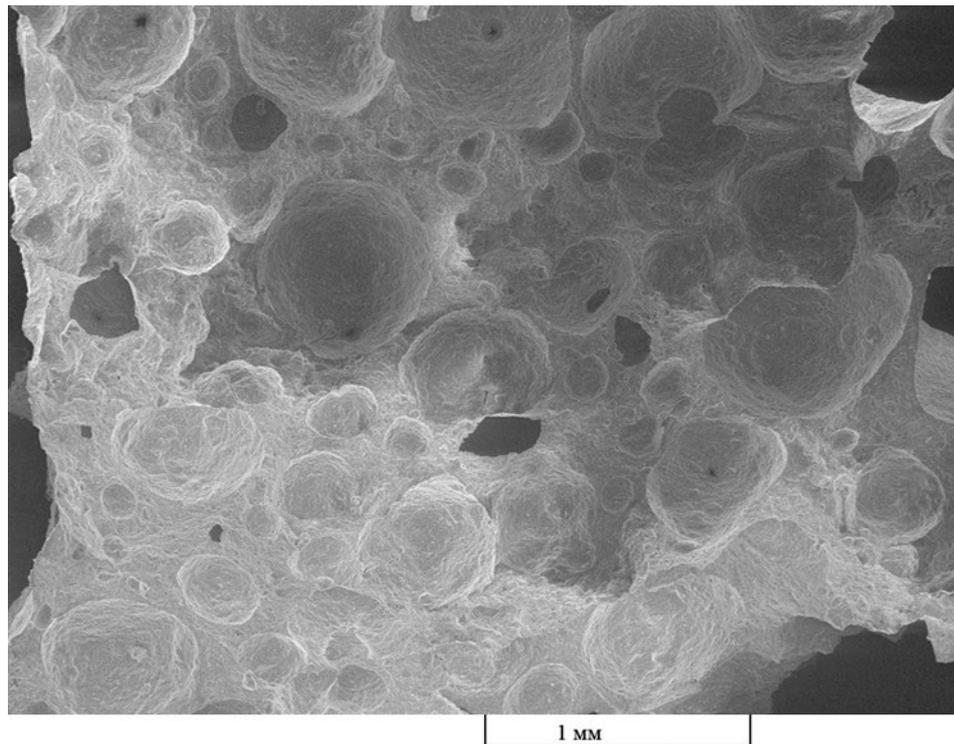


Рисунок 4.4 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 1 мм.

Глинистый компонент – кембрийская глина

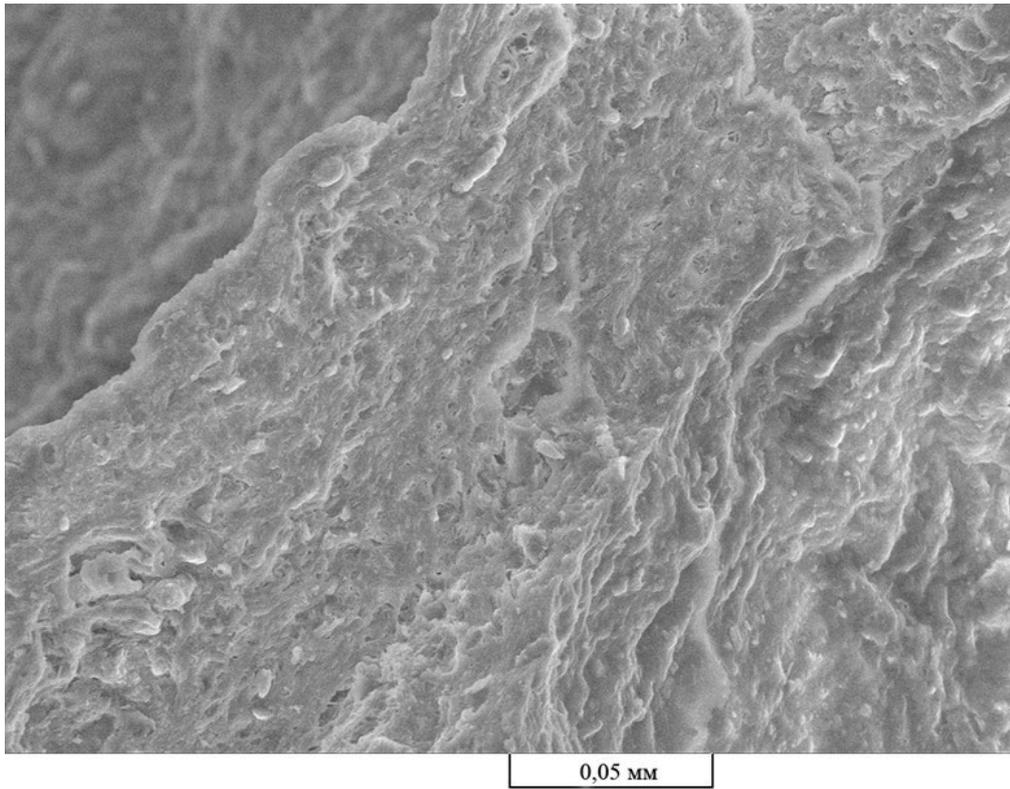


Рисунок 4.5 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,05 мм. Глинистый компонент – кембрийская глина

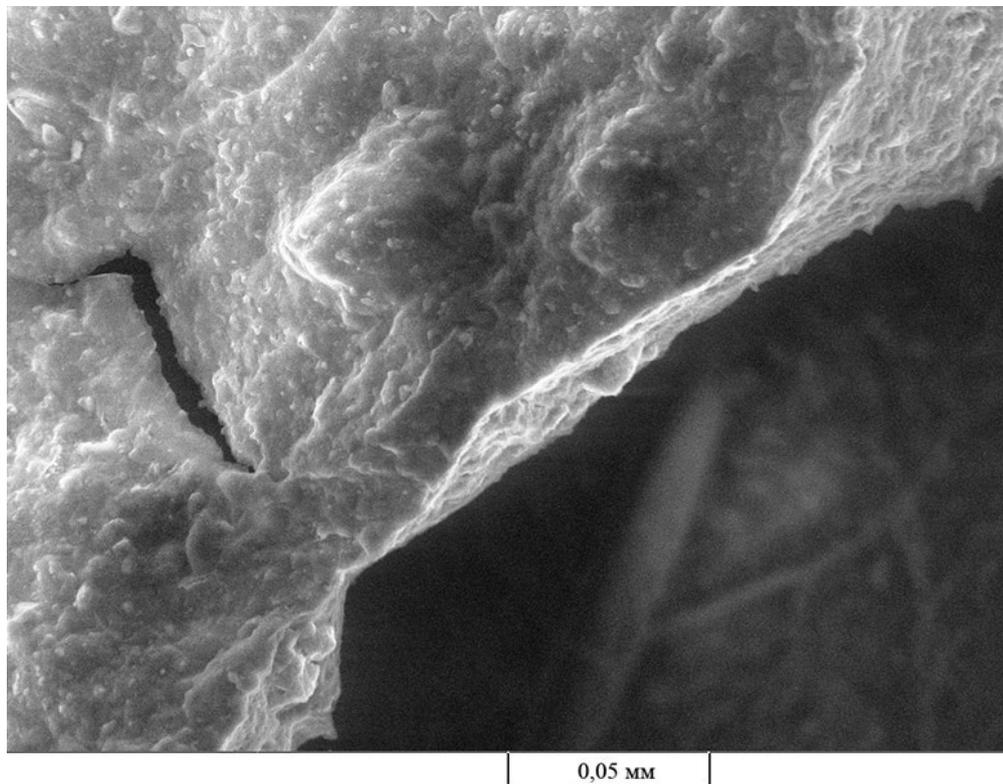


Рисунок 4.6 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,05 мм. Глинистый компонент – кембрийская глина

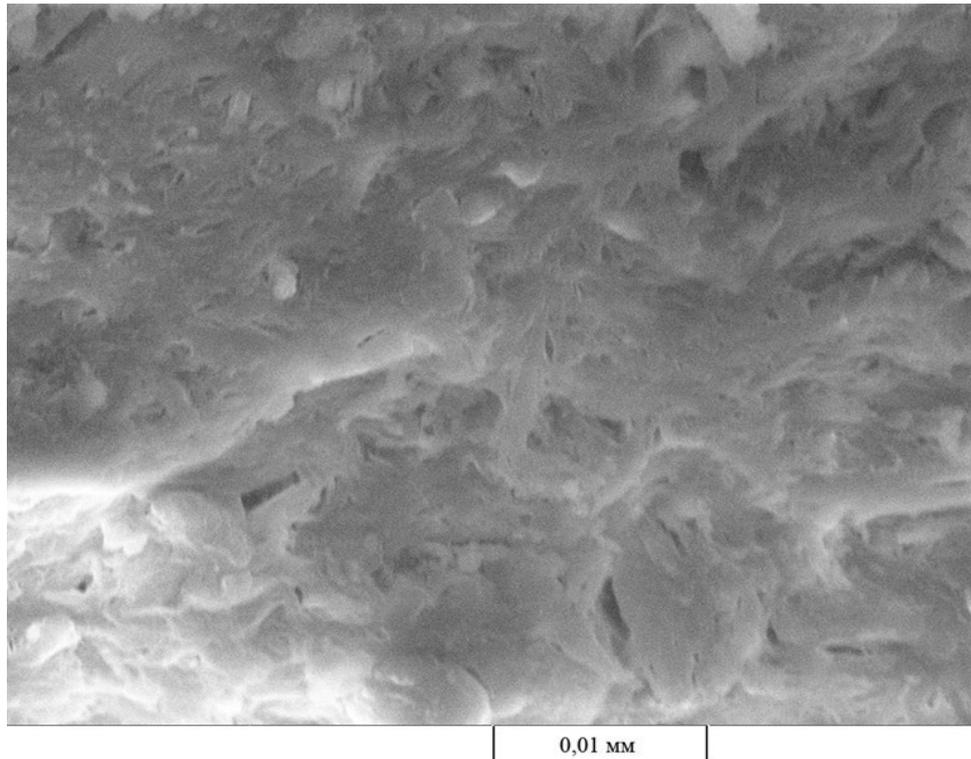


Рисунок 4.7 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,01 мм. Глинистый компонент – кембрийская глина

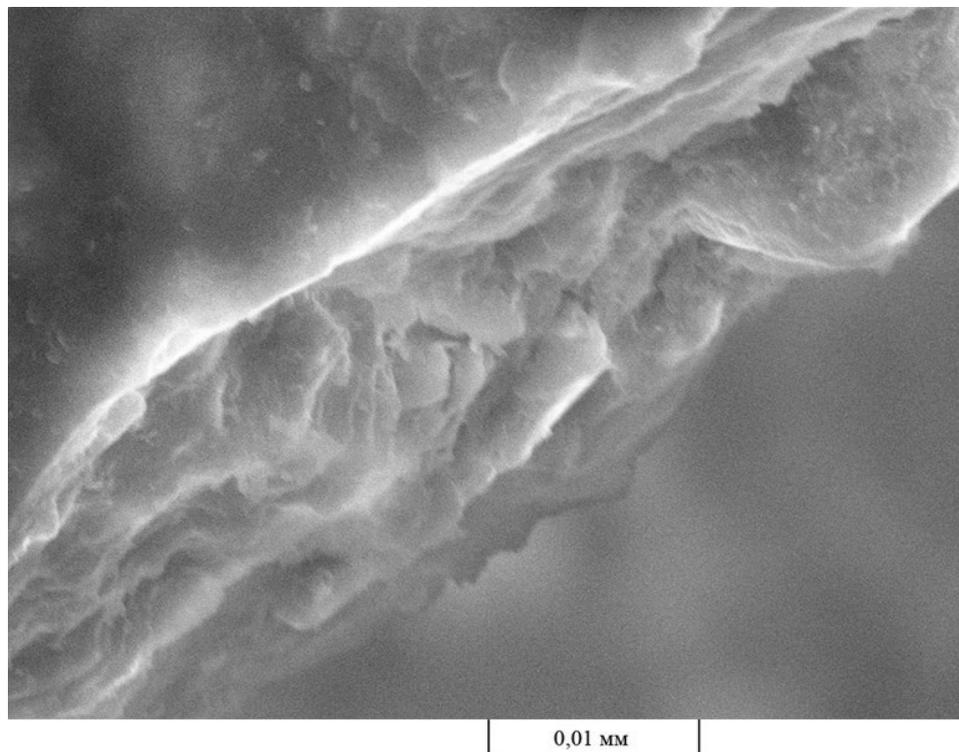


Рисунок 4.8 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,01 мм. Глинистый компонент – кембрийская глина

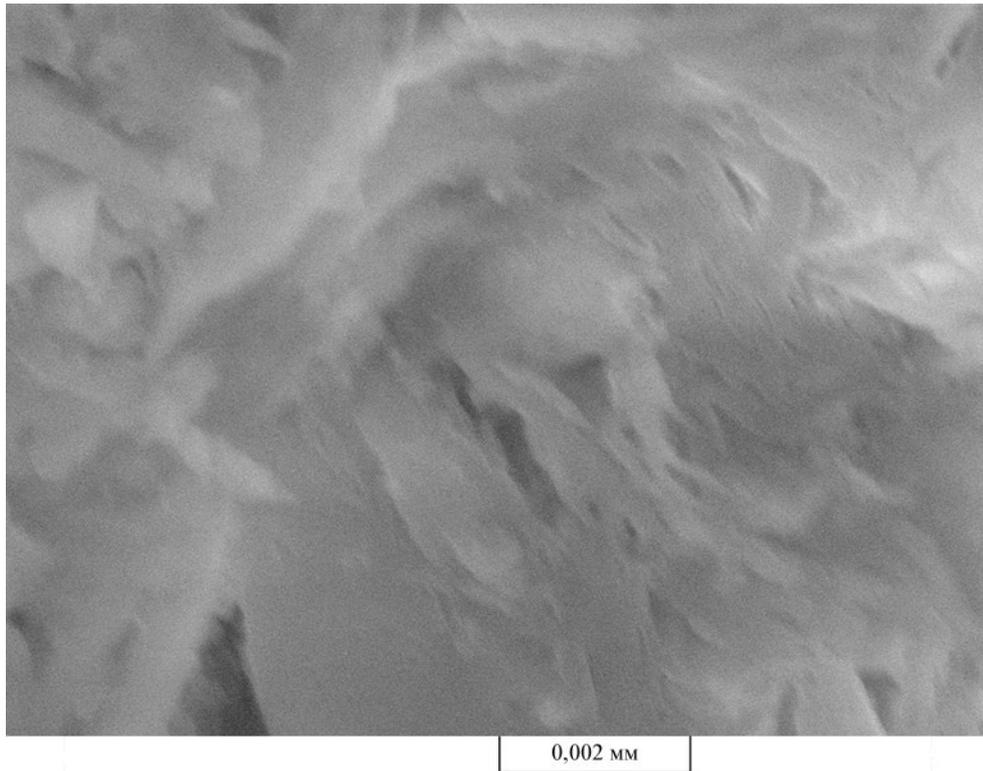


Рисунок 4.9 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,002 мм. Глинистый компонент – кембрийская глина

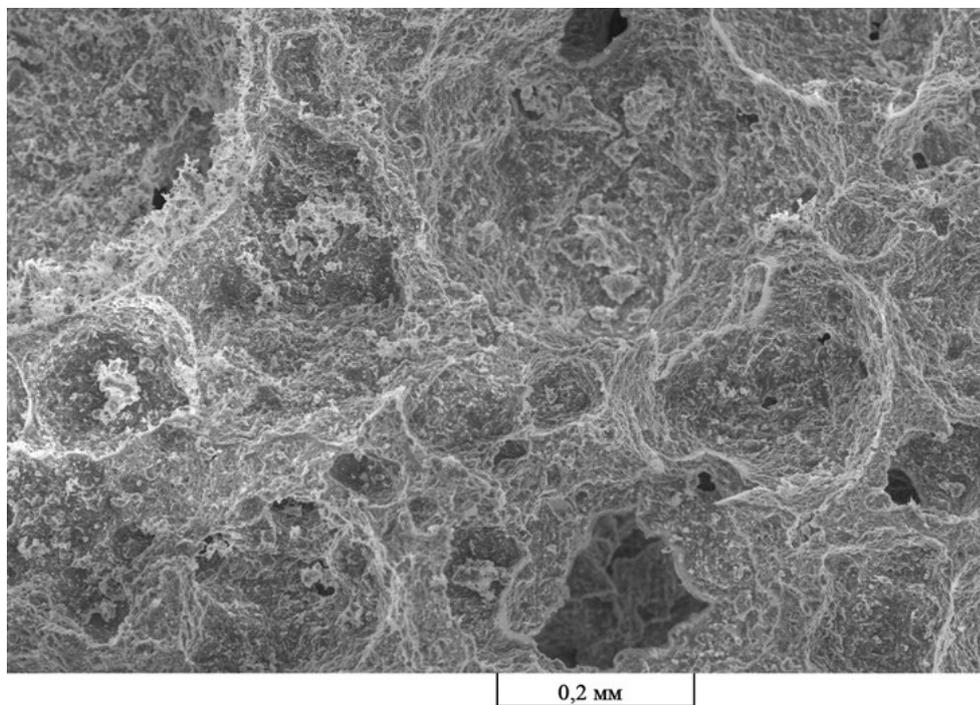


Рисунок 4.10 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,2 мм. Глинистый компонент – боровичско-любытинская глина

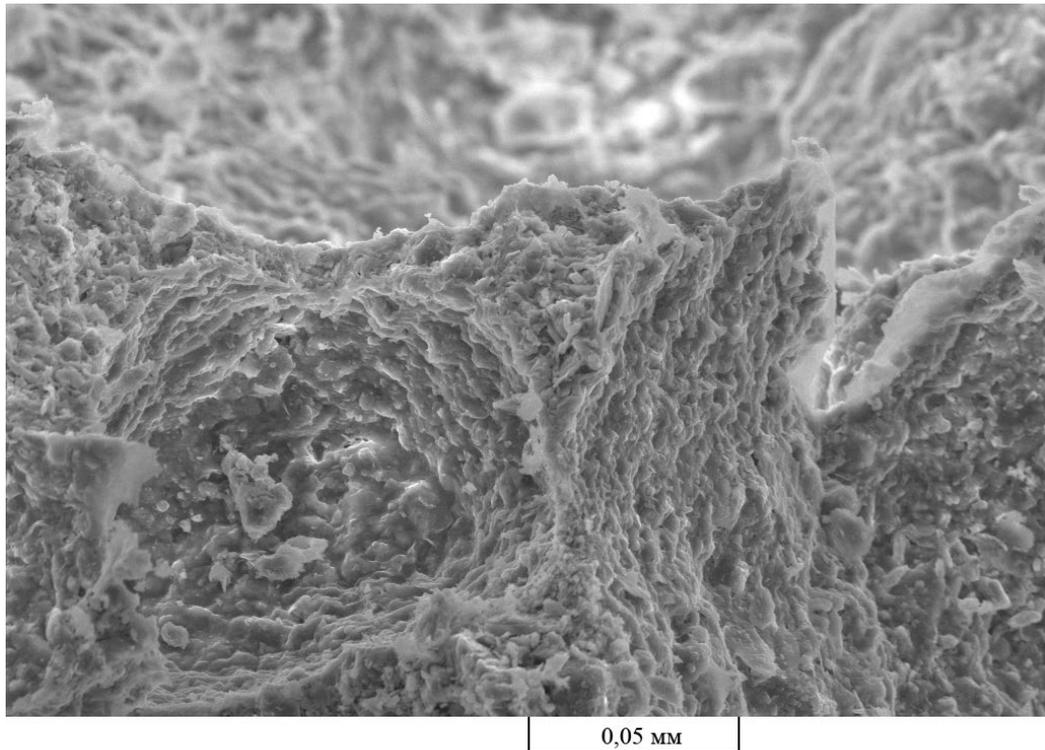


Рисунок 4.11 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,05 мм. Глинистый компонент – боровичско-любыйтинская глина

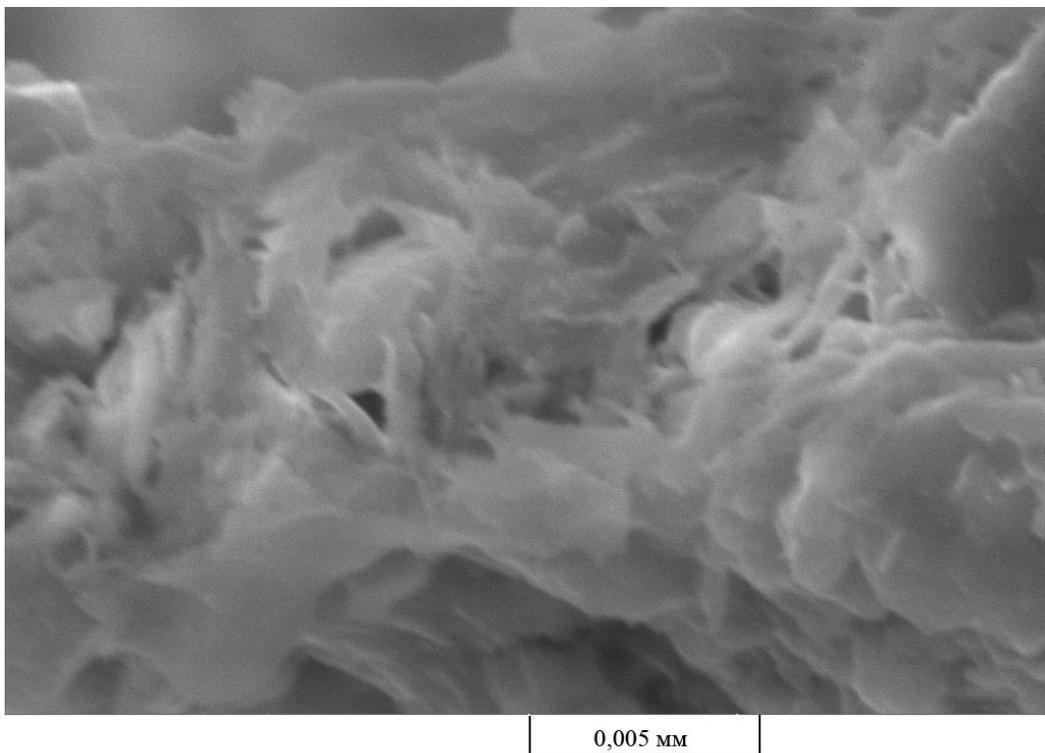


Рисунок 4.12 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,005 мм. Глинистый компонент – боровичско-любыйтинская глина

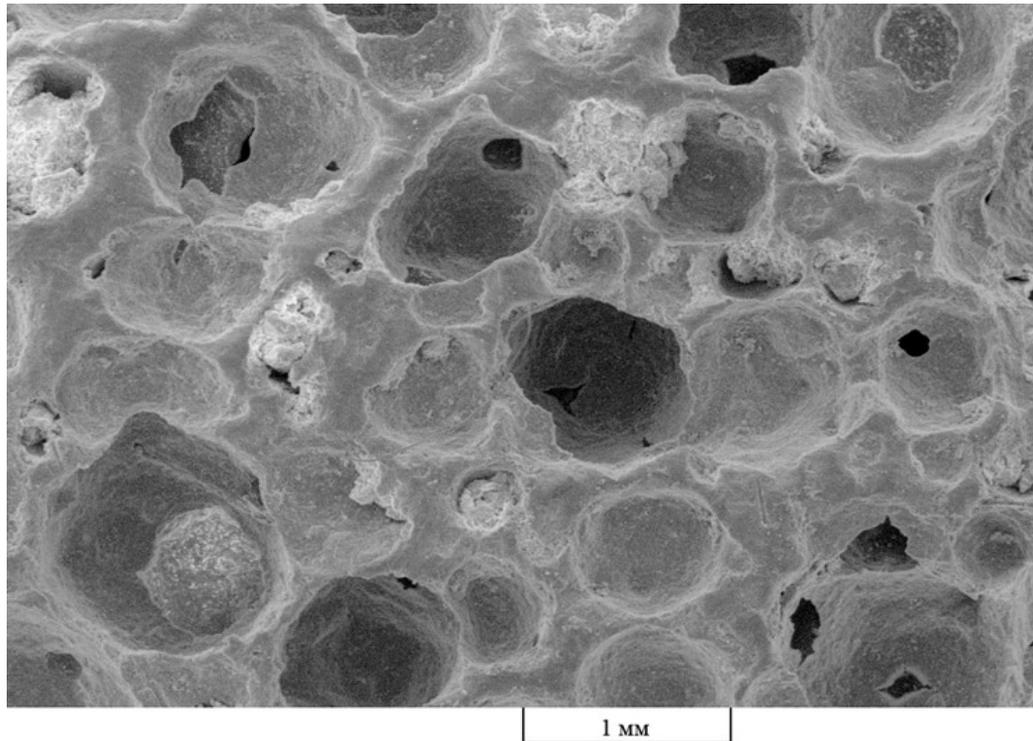


Рисунок 4.13 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 1 мм.

Глинистый компонент – каолиновая глина

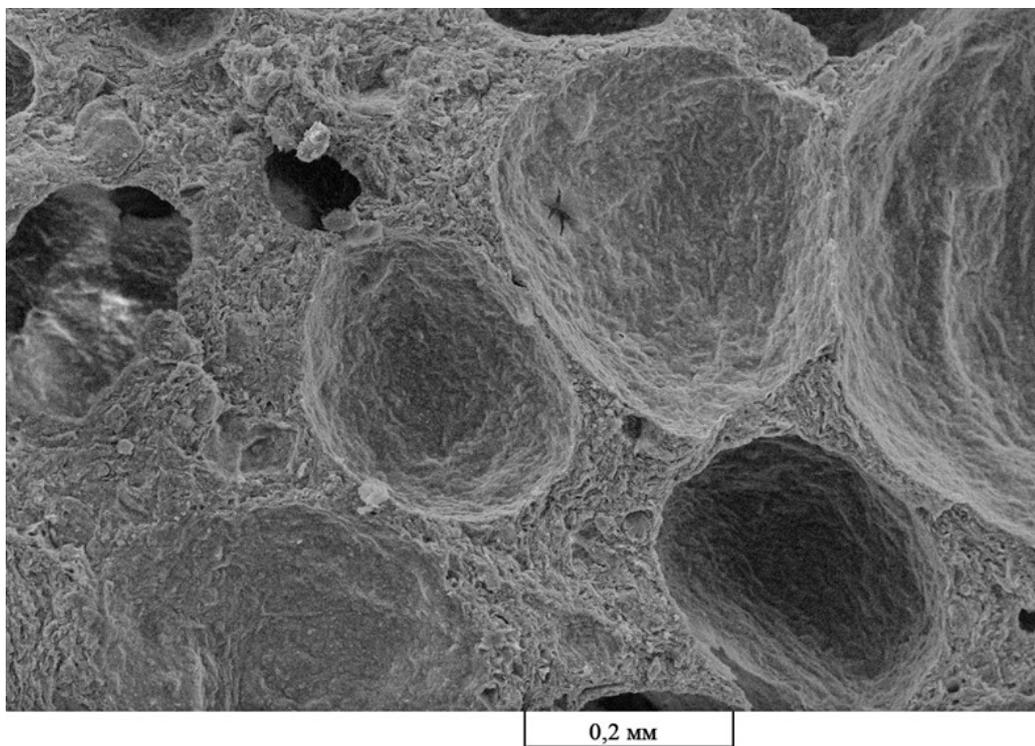


Рисунок 4.14 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,2

мм. Глинистый компонент – каолиновая глина

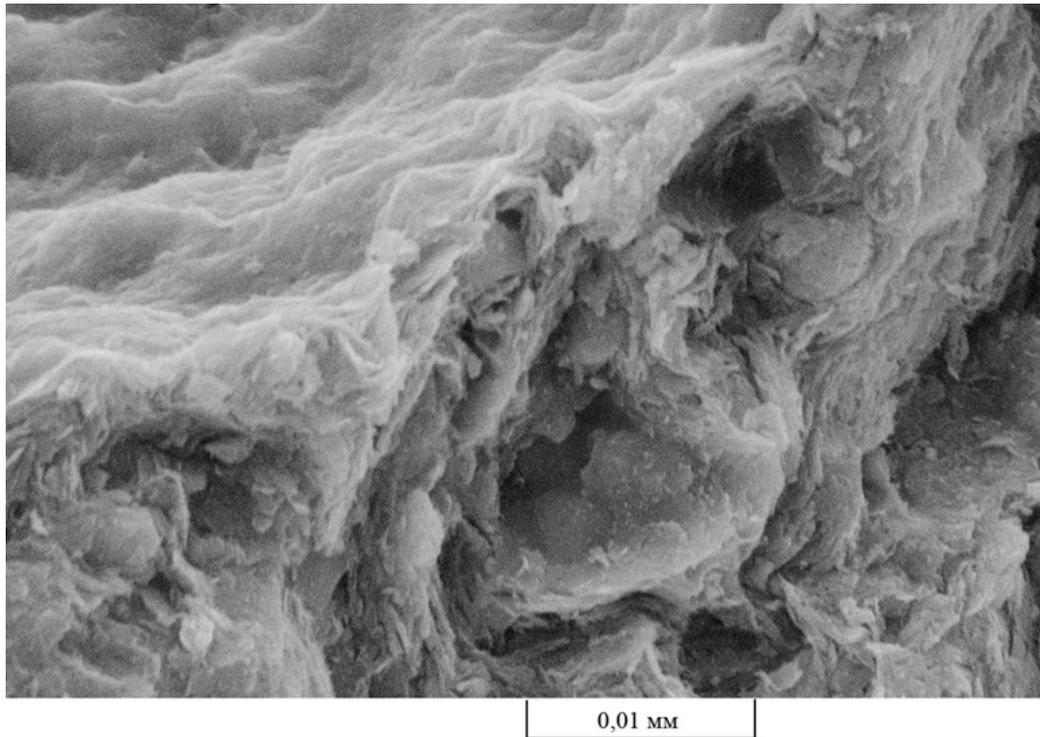


Рисунок 4.15 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,01 мм. Глинистый компонент – каолиновая глина

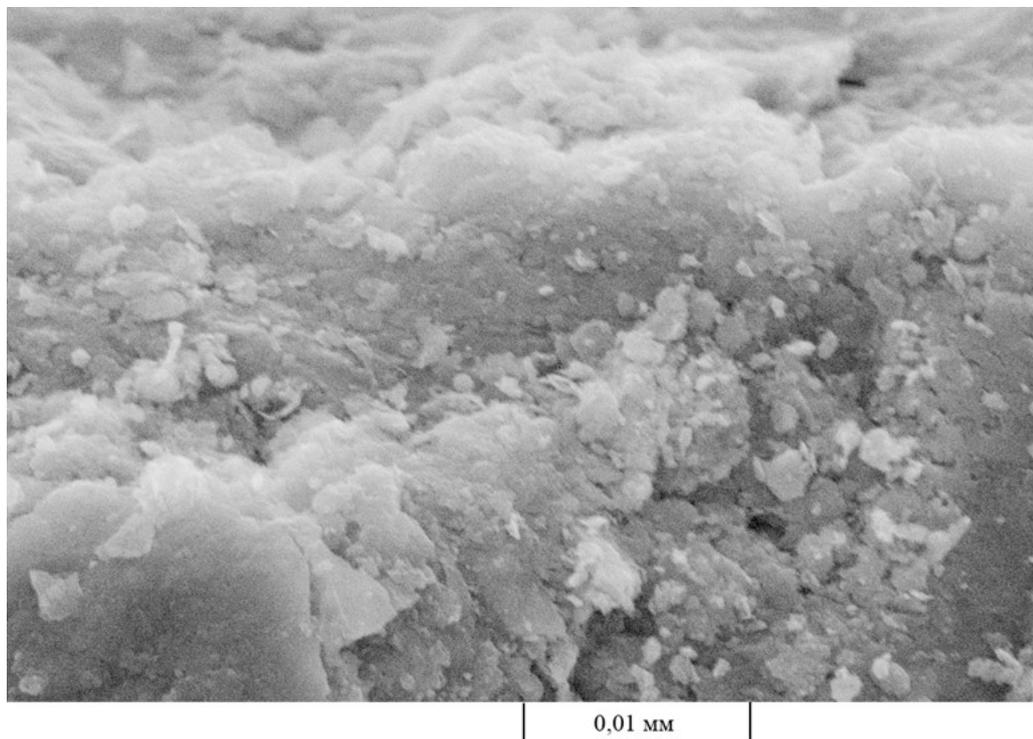


Рисунок 4.16 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,01 мм. Глинистый компонент – каолиновая глина

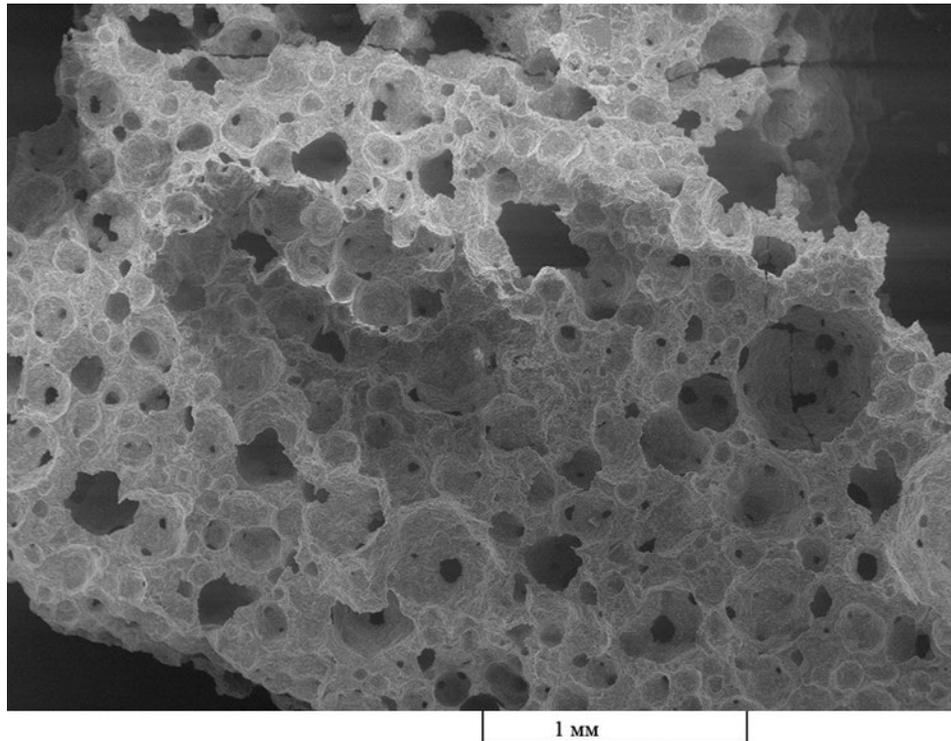


Рисунок 4.17 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 1 мм.  
Глинистый компонент – шабердинский суглинок

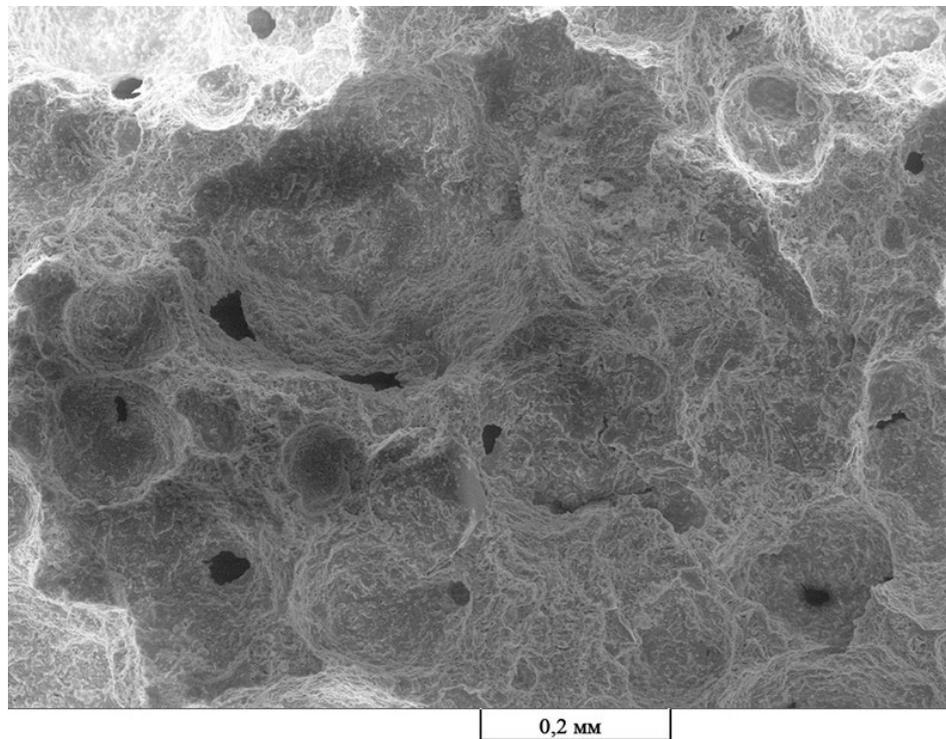


Рисунок 4.18 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,2 мм. Глинистый компонент – шабердинский суглинок

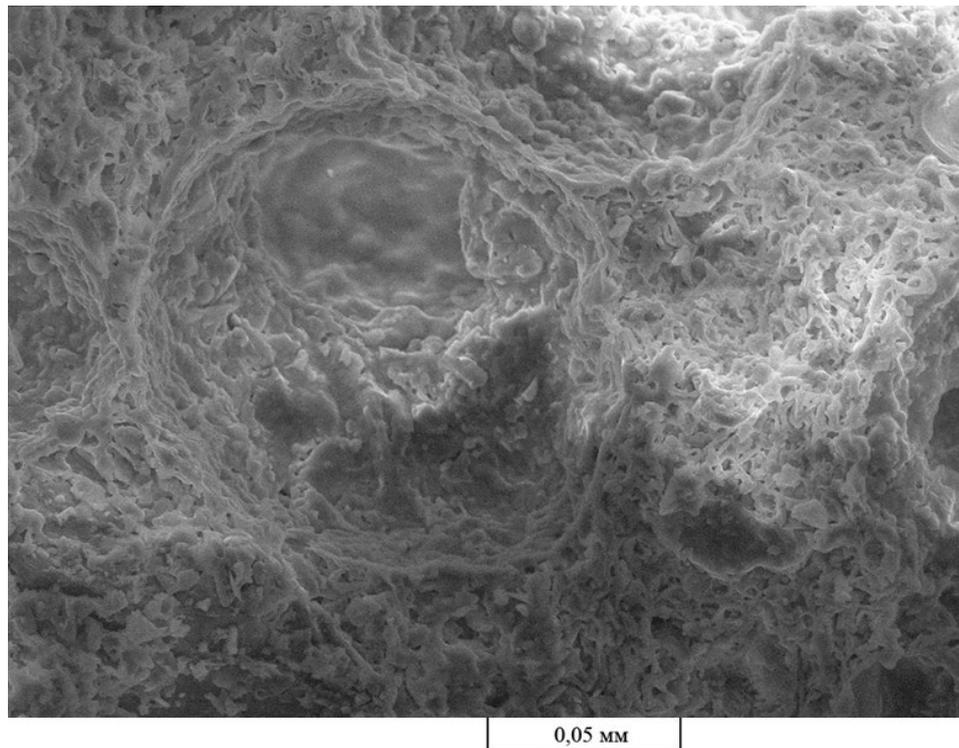


Рисунок 4.19 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,05 мм. Глинистый компонент – шабердинский суглинок

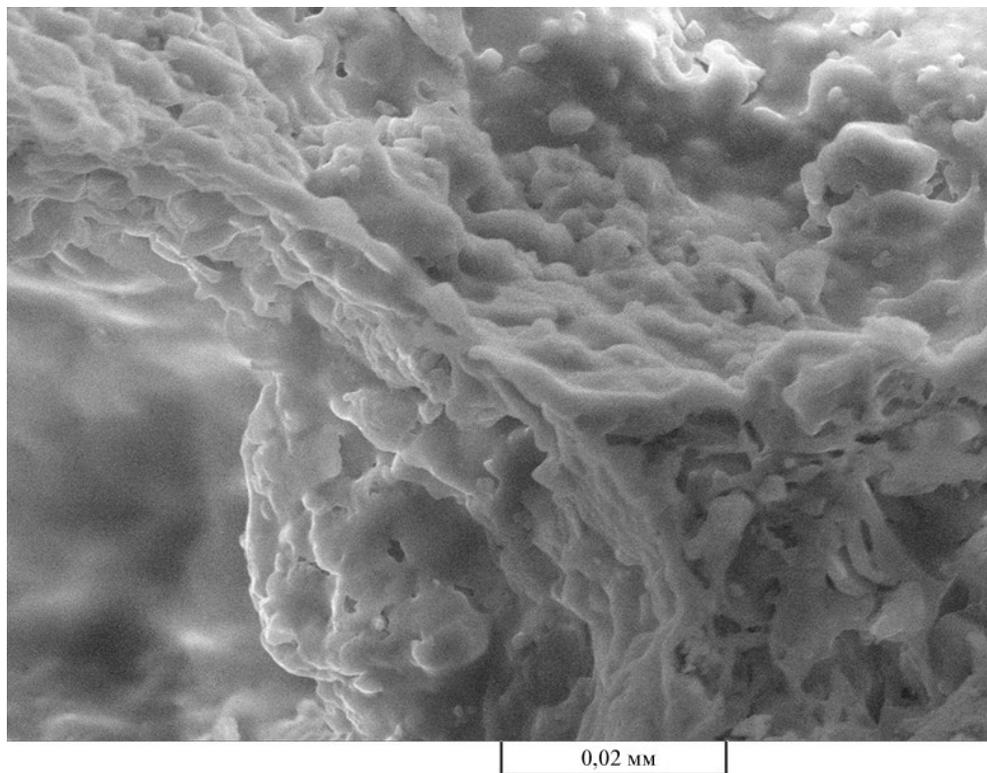


Рисунок 4.20 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,02 мм. Глинистый компонент – шабердинский суглинок

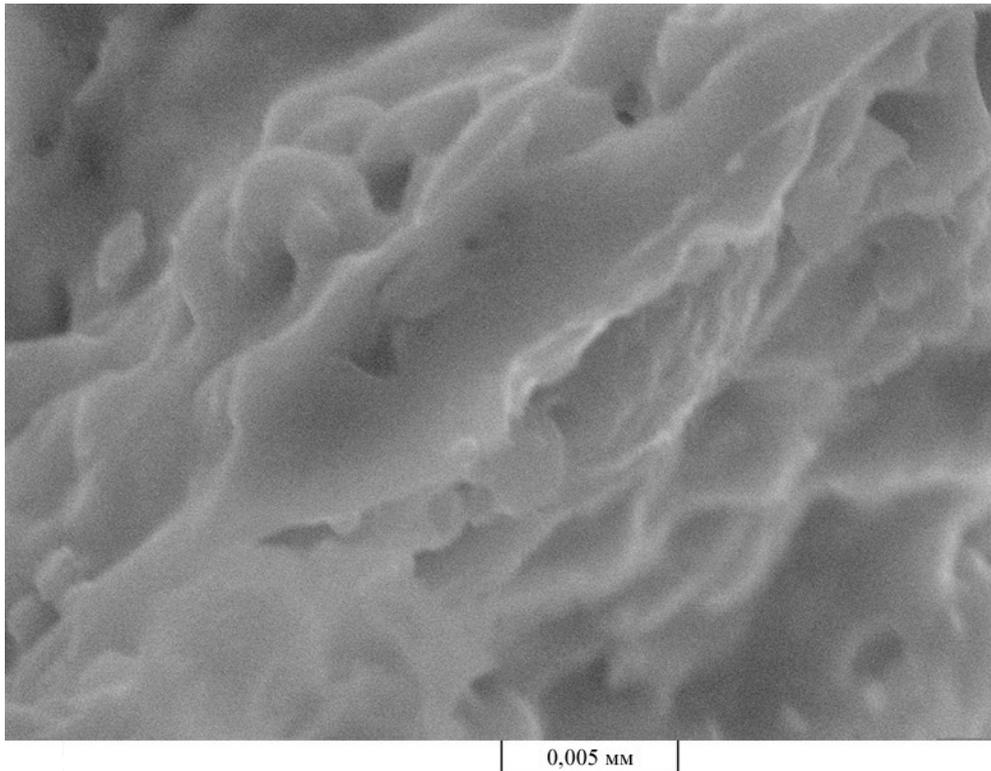


Рисунок 4.21 – Фотография макроструктуры АКИ с измерительной шкалой 0,005 мм. Глинистый компонент – шабердинский суглинок

Анализ представленных выше фотографий микроструктуры АКИ на основе используемого в исследовании глинистого сырья показывает, что для всех образцов характерна общая структурная однородность с преобладанием замкнутых пор различного диаметра.

Структура керамической межпоровой перегородки у глин с огнеупорностью до 1250 °С (кембрийская и боровичско-любытинская) и у шабердинского суглинка менее плотная, отчетливо видны контакты отдельных частиц между собой. Также необходимо отметить, что при аэрировании АКМ происходит интенсивное образование воздушных пор в структуре АКМ и после формования, сушки и термической обработки в ячеистой структуре материала образуются в незначительном количестве дефектные поры (трещины, разрывы, включения, каверны).

Данные дефекты практически не снижают прочностные показатели АКИ, но существенно влияют на их водопоглощение. Чем более компактно сложены

частицы керамической матрицы межпоровых перегородок, тем меньшее значение водопоглощения имеют АКИ. Применяемая для армирования структуры АКИ базальтовая фибра «выгорает» при температуре свыше 1000 °С, а образующиеся вместо нее воздушные полости заполняются более легкоплавкими соединениями, которые формируются при достижении заданной температуры обжига. В итоге фибра играет ведущую роль в формировании структурной прочности керамической матрицы в период приготовления АКМ, сушки АКС и в период нагрева, при котором наблюдаются интенсивный массообмен и значительные структурные напряжения в изделии. Далее в процессе обжига в аэрированном сырце, благодаря процессам твердофазного спекания и образования основных тугоплавких соединений, поровая структура стабилизируется. Высокая газопроницаемость АКС и равномерно распределённые по всему объёму армирующие волокна позволяют проводить режим обжига с большей интенсивностью по сравнению с аналогичными пористыми керамическими изделиями, полученными методом пенообразования.

#### **4.4 Исследование фазового и элементного анализов аэрированных керамических изделий**

Для определения минерального состава образцов выполнен рентгенофазовый анализ проб. Метод РФА позволил установить качественный состав минеральных фаз в обожженных аэрированных керамических изделиях, полученных на основе каолиновой и боровичско-любытинской глин. Выбор АКИ для исследования обусловлен значительной разницей химического состава глин, что напрямую влияет на прочностные показатели готовых АКИ.

Пробы для анализа готовились путем измельчения образцов до размеров частиц около 50 мкм. Съёмка проводилась в угловом диапазоне  $2\Theta$  между 20 и 80° с помощью порошкового дифрактометра D2 PHASER Bruker. Условия проведения съёмки:

- материал анода рентгеновской трубки – кобальт ( $K_{\alpha 1}$  с  $\lambda=1,78897 \text{ \AA}$ );

- время экспозиции в точке – 0,2 с;
- ускоряющее напряжение  $U_{\text{уск}} = 30$  кВ;
- ток цепи анода  $i = 10$  мА.

Идентификация пиков на дифрактограмме проводилась с помощью программного комплекса TOPAS. Рентгенофазовый анализ образца сводился к определению серии межплоскостных расстояний и сравнению их со справочными данными по межплоскостным расстояниям различных соединений.

Содержание основных минеральных фаз в исследуемых образцах АКИ на основе каолиновой глины: кварц – 36,58%, муллит – 28,36%, гроссит – 5,45%,  $\beta$ -кристобалит – 13,87%, каолинит – 15,74%.

Образцы АКИ на основе боровичско-любытинской 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%.

Рентгенограммы исследуемых АКИ представлены на рисунках 4.22 и 4.23.

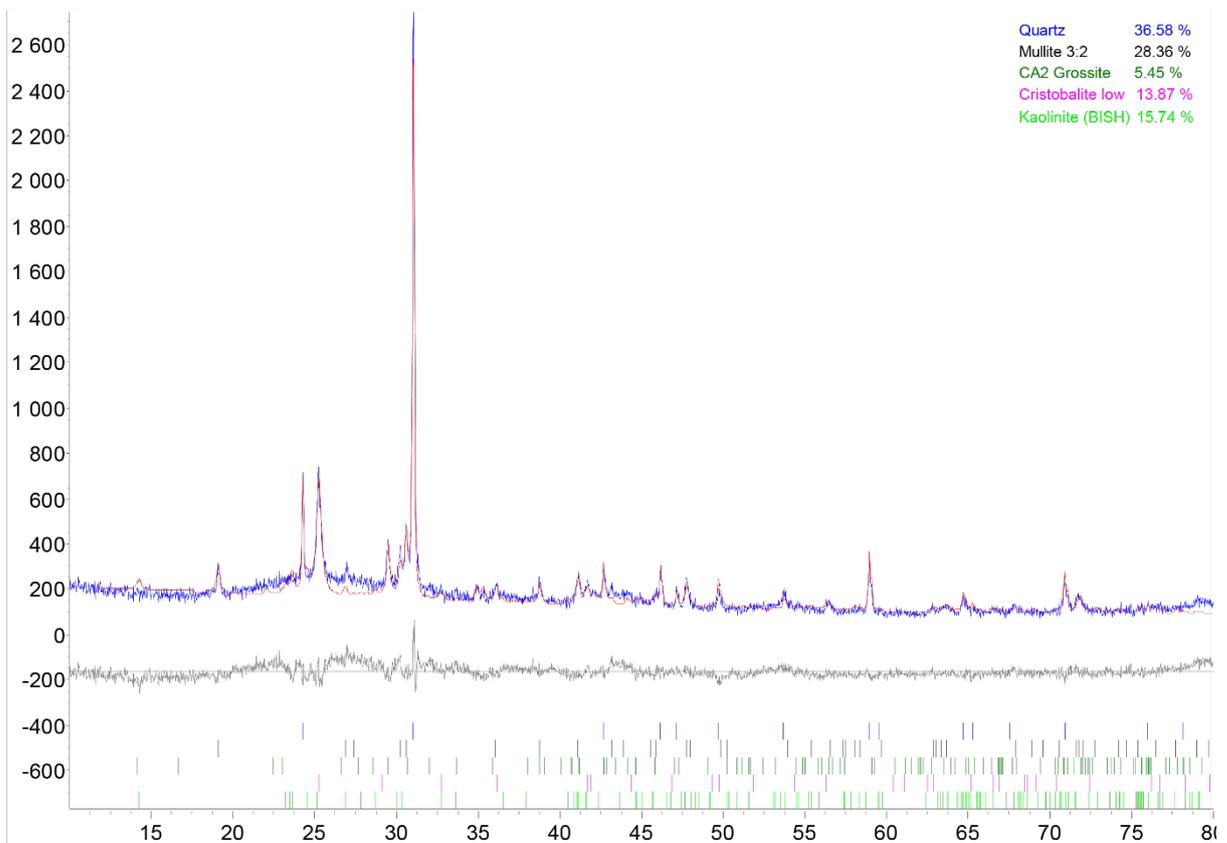


Рисунок 4.22 – Рентгенограмма АКИ на основе каолиновой глины

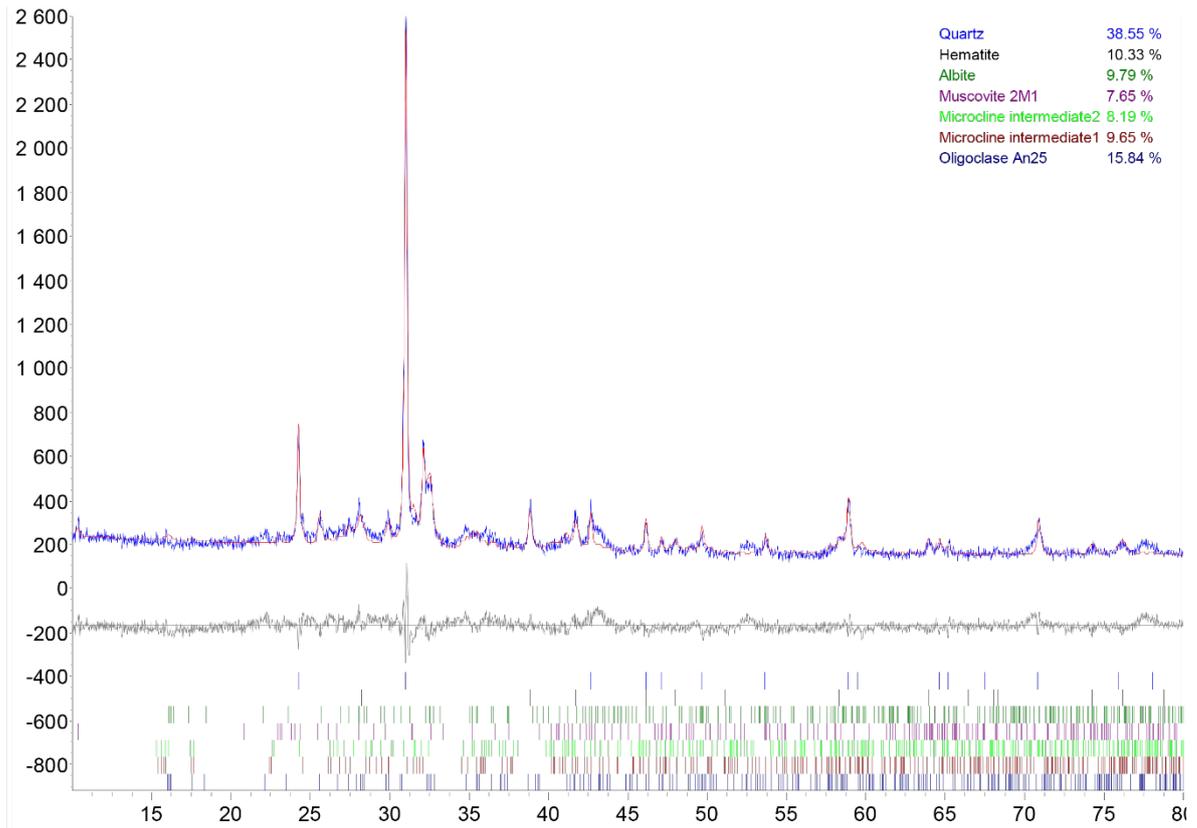


Рисунок 4.23 – Рентгенограмма АКИ на основе боровичско-любывитинской глины

Высокое содержание муллита в минеральной части образцов из АКИ на основе каолиновой глины вносит значительный вклад в высокую структурную прочность и однородность стенок пор. Наличие каолинита в составе минеральной части свидетельствует о том, что глинистое сырье обладает высокой огнеупорностью. Можно предположить, что температура обжига, при которой в АКИ на основе каолиновой глины сформировался окончательный кристаллический фазовый состав, составляет около 1250°C. Также содержание около 14% низкотемпературной модификации кварца ( $\beta$ -кристобалита) в составе придает готовым АКИ дополнительную твердость и снижает показатели их водопоглощения в сравнении с образцами АКИ на основе из легкоплавкого глинистого сырья.

В фазовом составе АКИ из боровичско-любывитинской глины присутствуют минералы гематита, что обуславливает темно-красный цвет керамического черепка

АКИ. Достаточно большое суммарное содержание микроклина в фазовом составе (около 18%), который образовался в результате твердо-фазовых посткристаллизационных превращений ранее образованного моноклинного калиевого полевого шпата, вносит вклад в формирование плотной структуры межпоровых перегородок. Наличие около 16% содержание олигоклаз An<sub>25</sub> говорит о том, что при установленном в исследовании режиме обжига, олигоклаз не успел перейти полностью в минерал альбит. Дополнительные исследования различных режимов обжига АКИ позволят установить интервалы образований минеральных фаз и определить их точные количественные переходы из расплавов в стабильные формы минералов.

Исследования структуры образцов на микроуровне выполнялось с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH с энергодисперсионной приставкой для элементного микроанализа и вакуумированием образцов.

Технические характеристики:

- разрешение: 3 нм при 30 кВ, 8 нм при 3 кВ;
- увеличение: от 4,5 до 1 000 000;
- электронная пушка: вольфрамовый нагреваемый катод с термоэлектронной эмиссией;
- рабочее значение вакуума в камере: менее  $9 \times 10^{-3}$  Па.

Элементный анализ 6 спектров исследуемых образцов АКИ (№1 – АКИ из каолиновой глины, №2 – АКИ из боровичско-любытинской глины) приведен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Содержание элементов образцов АКИ

№ п/п	Содержание элемента, %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
1-max	7,69	62,98	0,37	0,51	15,73	22,33	0,92	1,01	1,45	2,16
1-min	0,00	60,39	0,37	0,29	12,36	15,18	0,61	0,35	0,45	0,50
2-max	14,06	59,65	1,29	1,61	8,91	23,22	2,91	2,45	0,00	5,36
2-min	0,00	54,19	1,29	1,01	6,43	17,13	1,85	1,52	0,00	3,72

Повышенное содержание алюминия в АКИ на основе каолиновой глины определяет высокие физико-механические показатели изделий в сравнении с АКИ на основе легкоплавкой боровичско-любытинской глины. Дальнейшие эксперименты с применением в компонентном составе АКИ глинистого сырья на основе двух и более различных месторождений позволят направленно повышать определенные характеристики АКИ, например, прочность при сжатии, или оптимизировать производственный процесс создания АКИ, например, уменьшение продолжительности сушки АКС и др.

#### **4.5 Метод проектирования состава сырьевой шихты для получения аэрированной керамики со средней плотностью в диапазоне от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии от 3 до 10 МПа**

При использовании математической модели расчета прочности при сжатии аэрированных керамических изделий (формула 4.8) в зависимости от химического состава исходного глинистого сырья с учетом расчетного значения температуры огнеупорности получен метод проектирования состава сырьевой шихты.

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

##### ***1. Формирование проектных характеристик аэрированной 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 4.9 позволяет определить численное значение  $T_{огн}^{расч}$ , которое необходимо получить для достижения требуемых параметров.

При к.к.к. от 7,36 до 10,77 используется формула 4.9:

$$T_{огн}^{расч} = 1479 - 909 \times \sqrt{2,65 - 0,19 \times \frac{R_{сжс} + 20}{\rho_{ср} + 1,34}} \quad (4,9)$$

При к.к.к. от 10,78 до 11,52 используется формула 4.10:

$$T_{огн}^{расч} = 1479 + 909 \times \sqrt{0,19 \times \frac{R_{сж} + 20}{\rho_{ср} + 1,34} - 2,65} \quad (4.10)$$

## **2. Определение химического состава сырьевой шихты**

Расчетное значение огнеупорности сырьевой шихты  $T_{огн}^{расч}$  формируется на основе химического состава глинистого компонента. Формула 4.1 позволяет произвести расчет  $T_{огн}^{расч}$  и выбрать тип используемого глинистого компонента или смесь из нескольких глинистых компонентов.

## **3. Определение компонентного состава сырьевой шихты**

### **3.1 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 4.11:

$$\eta_{отн} = \frac{T_1}{T_2} \quad (4.11)$$

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

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.

### **3.2 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. При других значениях относительной вязкости на начальном этапе сушки аэрированных керамических

сырцов наблюдаются структурные дефекты в виде нарушения сплошности структуры. Водотвердое отношение готовой сырьевой шихты перед аэрированием должно находиться в значениях от 0,45 до 0,55.

### ***3.3 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:

$$K = \frac{\eta_{\text{отн}}}{\eta_{\text{отн}}^5} \quad (4.12)$$

где:  $\eta_{\text{отн}}$  – относительная вязкость сырьевой шихты в начальный момент измерения 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. Если проектируемый состав шихты не достигает указанного интервала значений, требуется осуществить пересмотр количества используемой отощающей добавки.

### ***3.4 Определение оптимального количества воздухововлекающих и армирующих добавок.***

Перед началом процесса аэрирования в готовую сырьевую шихту добавляются воздухововлекающая и армирующая добавки. Расход армирующей добавки принимается исходя из данных таблицы 3.3.

Содержание воздухововлекающей 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. Распалубка аэрированных керамических сырцов осуществляется в течение от 30 минут до 6 часов после формования, время выдержки в формах напрямую зависит от плотности и коэффициента коагуляции готовой сырьевой шихты.

#### ***4. Испытание опытной партии азрированной 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 компонентный состав сырьевой шихты. В случае изменения значений средней плотности и/или прочности при сжатии необходимо произвести перерасчёт химического состава сырьевой шихты.

#### **Выводы по четвертой главе**

1. Произведена оценка области промышленного использования глинистого сырья по его химическому составу по диаграмме А.И. Августинника: кембрийская, боровичско-любыйтинская глины и шабердинский суглинок относятся к области производства кирпича и черепицы, каолиновая глина – к области изготовления огнеупорных изделий.

2. Установлена методика расчета предела прочности при сжатии азрированных керамических изделий. Прочностной показатель АКИ определяется через общий и температурный коэффициенты соответствия, среднюю плотность и расчетную температуру огнеупорности керамической шихты. Среднее значение относительной погрешности установленной зависимости составляет не более 5%. Данная методика расчета позволяет с необходимой точностью определить численное значение предела прочности при сжатии АКИ в диапазоне средней плотности от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup>, что позволяет оценить качество компонентного состава шихты без проведения дополнительных испытаний.

3. Разработан критерий относительной прочности АКИ, классификация изделий по данному критерию.

4. Приведены фотографии макроструктуры образцов АКИ с применением различных видов глинистого компонента. Показана общая структурная однородность исследуемых образцов, характерная для глинистых композиций с преобладанием пор диаметром от 0,2 до 0,8 мм. Установлено, что базальтовая

фибра, используемая в компонентном составе АКМ, после термической обработки превращается в расплав и участвует в формировании структуры межпоровой керамической матрицы АКИ.

5. Проведен фазовый и элементный анализ аэрированных керамических изделий на основе каолиновой и боровичско-любытинской глин. Установлено, что высокие прочностные показатели АКИ на основе каолиновой глины связаны с содержанием в минеральном составе алюминийсодержащих соединений, в частности муллита (28,36%). Элементный анализ также подтверждает, что содержание алюминия более чем в 2 раза выше по сравнению с АКИ на основе боровичско-любытинской глины.

6. Разработан метод проектирования компонентного состава для получения АКИ через расчетное значение температуры огнеупорности сырьевой шихты, что позволяет производить бездефектные изделия, характеризующиеся величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$  прочность при сжатии  $3 \div 10 \text{ МПа}$ .

## 5. ВЫПУСК ОПЫТНО–ПРОМЫШЛЕННОЙ ПАРТИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВА

### 5.1. Технология изготовления пористых керамических материалов методом аэрирования и результаты опытно-промышленных испытаний

К настоящему времени наибольшее распространение получили следующие виды АКИ промышленного изготовления:

- камни и кирпичи керамические, полнотелые;
- плиты керамические, применяемые для чистовой отделки полов помещений;
- санитарно-технические изделия, керамические;
- отдельные керамические фасонные элементы индивидуальных форм и размеров;
- легкие заполнители, применяемые в составах сухих строительных смесей различного назначения.

На рисунках 5.1 и 5.2 представлены примеры промышленных образцов АКИ.

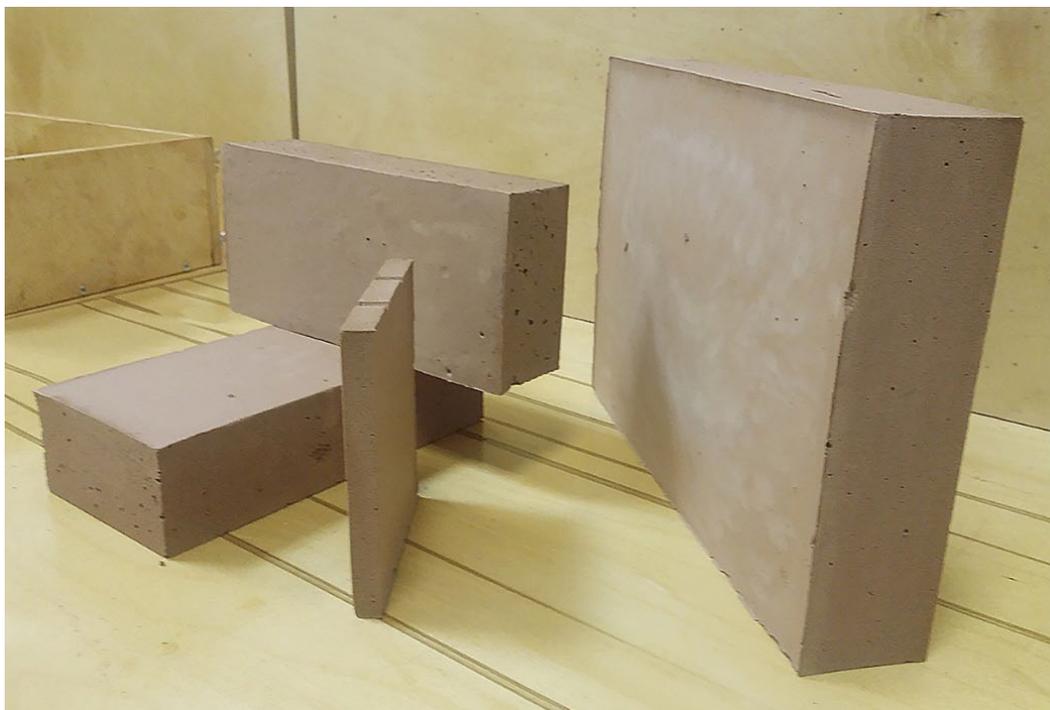


Рисунок 5.1 – Фотография промышленных образцов АКИ. Керамические кирпич, камень и плитка



Рисунок 5.2 – Фотография промышленных образцов АКИ. Керамические фасонные изделия индивидуальных форм и размеров

Значительное большинство промышленных образцов АКИ, средняя плотность которых составляет  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$ , характеризуется следующими физико-механическими показателями:

- общая пористость: от 63.0 до 81.7 %;
- коэффициент теплопроводности (состояние образцов сухое): от 0.091 до 0.181 Вт/(м·°С);
- коэффициент паропроницаемости: от 0.15 до 0.23 мг/(м·ч·Па);
- предел прочности при изгибе: от 1.1 до 3.2 МПа;
- предел прочности при сжатии: от 3.1 до 10.3 МПа;
- водопоглощение по массе материала: от 48.1 до 135.3 %;
- марка морозостойкости изделия: от F50 до F100.

Производственный процесс изготовления АКИ включает следующую последовательность технологических операций:

- подбор и обработка (подготовка) компонентов структурной (сырьевой) смеси;
- изготовление подготовленной сырьевой смеси в виде шликера;

- аэрирование готовой сырьевой смеси;
- формование и сушка АКМ;
- предварительная резка и обжиг АКС;
- механическая обработка и обеспыливание готовых АКИ;
- декорирование поверхности АКИ (при необходимости);
- паллетирование и отправка на склад готовой продукции.

Стоит отметить, что основные технологические узлы для производства АКИ базируются на отечественном оборудовании с использованием автоматических комплексов полного цикла.

Лабораторные испытания кирпичей аэрированных керамических на основе каолиновой глины, проводимые в Центре совершенствования технологий и производства АО «БКО», установили, что предел прочности при сжатии составляет 23 МПа при средней плотности равной 550 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 5.3). Полученные данные свидетельствует о перспективах использования технологии аэрирования при производстве АКИ высокой прочности для применения в особо ответственных конструкциях (приложение В).

Принципиальная схема производственного процесса изготовления АКИ промышленным способом представлена на рисунке 5.4.



Рисунок 5.3 – АКИ различной средней плотности на основе каолиновой глины

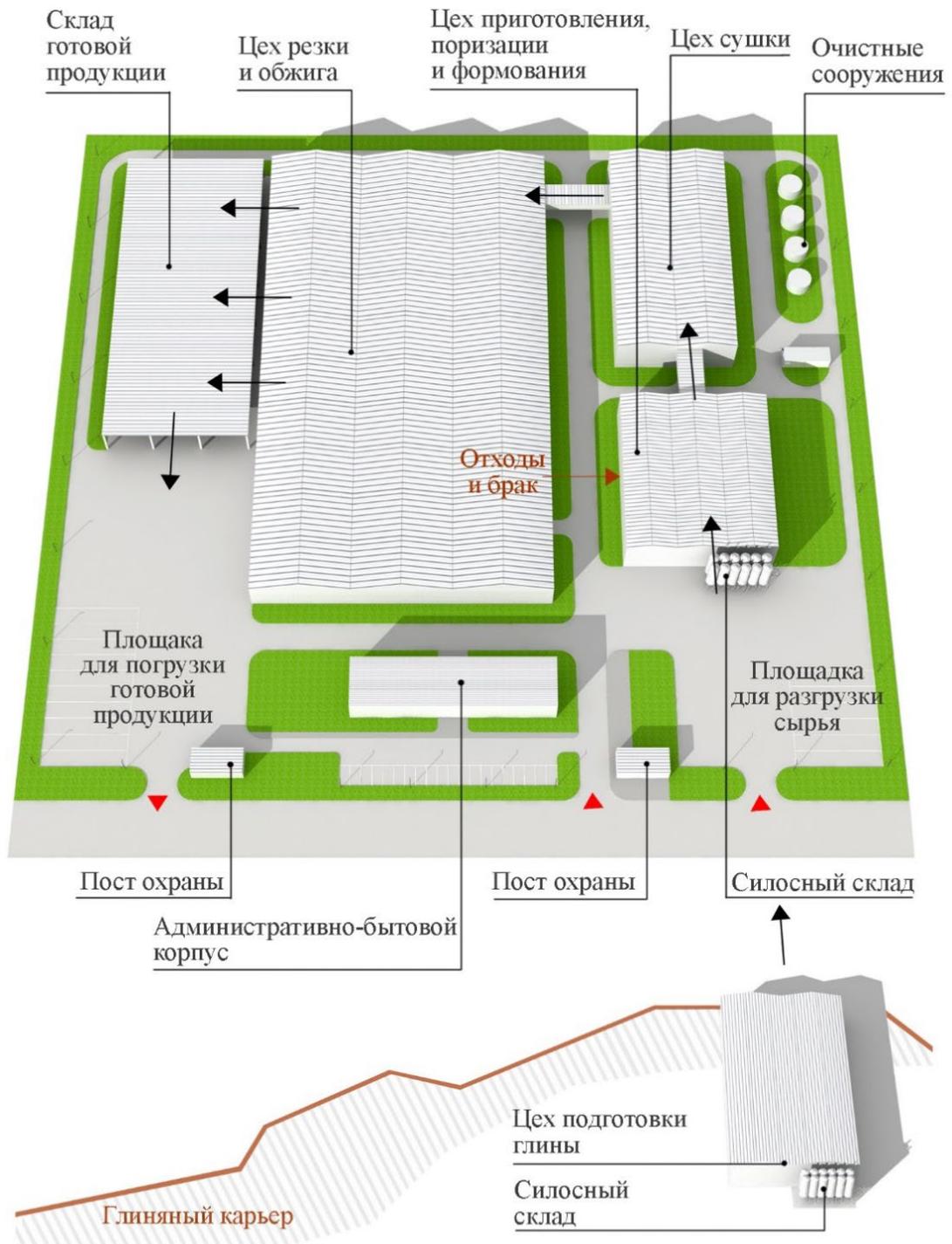


Рисунок 5.4 – Принципиальная схема производства АКЦИ

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 АКЦИ осуществляли в виде кирпичей с размерами

250×120×65 мм средней плотностью 400–800 кг/м<sup>3</sup> в количестве 8000 шт. (глинистый компонент – боровичско-любыйтинская глина). Для получения аэрированной керамики заданной средней плотности и прочности использовали разработанный выше метод проектирования состава сырьевой шихты (приложение Г). Производство изделий осуществлялось согласно проекту технологического регламента, разработанного обществом с ограниченной ответственностью «Центр строительных материалов и технологий «ИНФОСМИТ» (приложение Д).

Физико-механические характеристики (показатели) опытной партии кирпичей аэрированных керамических подобранных составов приведены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Физико-механические характеристики (показатели) аэрированных керамических подобранных составов

Наименование характеристики (показателя)	Величина характеристик (показателя)				
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5
Плотность средняя, кг/м <sup>3</sup>	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				
Класс пожарной опасности	К0				
Водопоглощение по объему, %	35,44	28,27	22,71	20,15	17,92
Коэффициент конструктивного качества (к.к.к.)	7,42	8,20	8,81	9,39	9,97

Технологическая схема производства опытных АКИ состоит из следующих основных этапов:

- добыча глины карьерной влажности (средняя плотность – 1500 кг/м<sup>3</sup>, влажность – 20%);

- транспортировка глины на склад хранения с помощью электрических рельсовых вагонеток;
- грубое измельчение глины ( $d_n=700$  мм,  $d_k=100$  мм);
- измельчение глины с одновременным камневыделением ( $d_n=100$  мм,  $d_k=15–30$  мм);
- железоотделение;
- сушка измельченной глины в сушильном барабане;
- тонкий помол высушенной глины в шаровой мельнице до порошкообразного состояния ( $d_n=15–30$  мм,  $d_k=0,045–0,1$  мм);
- приготовление глиняного шликера в смесителе турбулентного типа в следующей последовательности: вода техническая, разжижающая добавка (натриевое жидкое стекло), затем дозированная подача глиняного порошка небольшими порциями с непрерывным перемешиванием, последующее добавление наполнителя (шамотный порошок ПШМБ) и армирующей добавки (базальтовая фибра с длиной волокон 13 мм). После достижения однородности суспензии глиняного шликера (плотность около  $1710$  кг/м<sup>3</sup>) в смеситель добавляется порообразующая добавка (синтетический углеводородный пенообразователь «ПБ-Формула 2012»), где под избыточным давлением осуществляется аэрирование до требуемой плотности. Время приготовления глиняного шликера – 20 мин., время аэрирования – 10 мин;
- укладка АКМ в бортовые формы с внутренними размерами  $850 \times 1200 \times 100$  мм;
- распалубка форм через 24 часа после формования АКМ;
- время сушки АКС составляет 216 часов до остаточной влажности не более 4%., воздушная усадка при этом составляет около 12%;
- обжиг АКС в туннельной печи на протяжении 12 часов;
- калибровка готовых АКИ методом шлифования (огневая усадка АКМ составляет от 1,8 до 2,3%) и обеспыливание АКИ продувкой сжатым воздухом (приложение Е, Ж).

Сравнение прочностных показателей опытно-промышленной партии АКИ ( $R_{сж}$  – опыт.) с результатами АКИ рациональных составов, изготовленных в лабораторных условиях ( $R_{сж}$  – лаб.) представлено на рисунке 5.5.

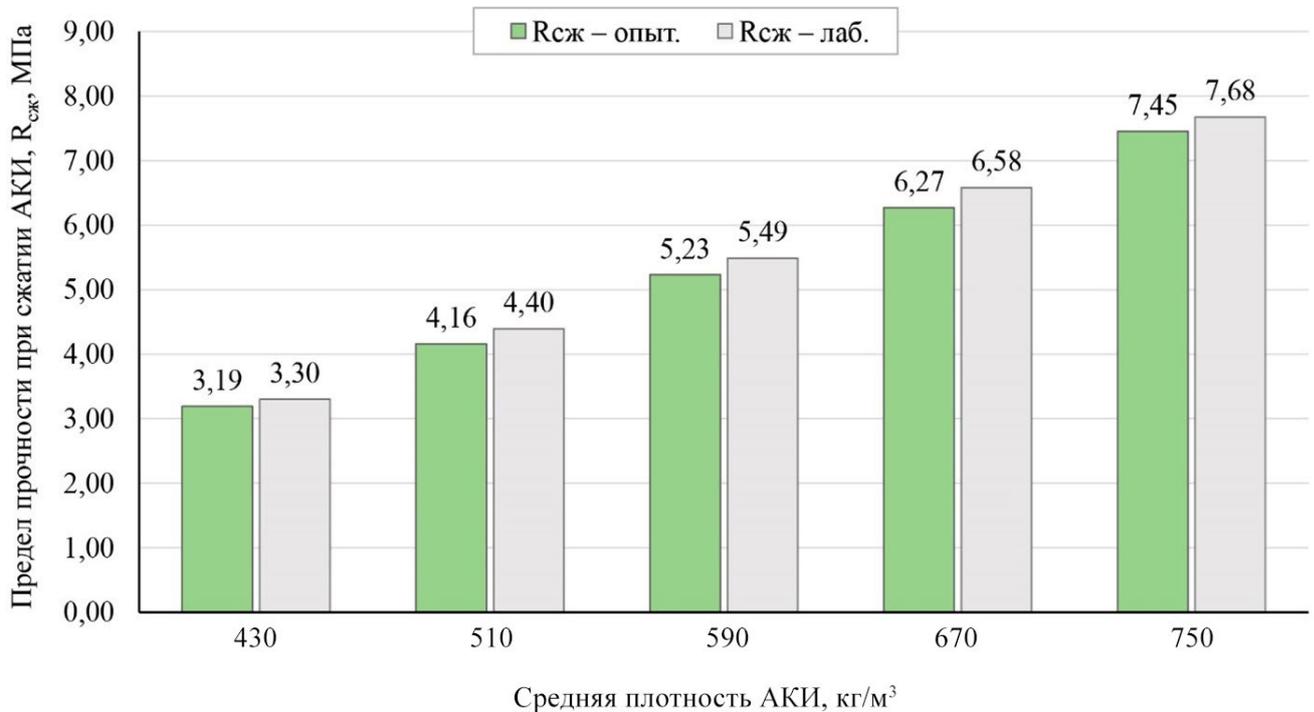


Рисунок 5.5 – Гистограмма предела прочности при сжатии АКИ, полученных в производственных и лабораторных условиях

Средние отклонения значений предела прочности при сжатии опытно-промышленных образцов от проектных значений составили около 5%, что свидетельствует о сходимости полученных результатов. Коэффициент конструктивного качества находится в диапазоне значений от 7,42 до 9,97.

## 5.2. Показатели технической и экономической эффективности изготовления поризованных (аэрированных) керамических изделий

Потребность в организации окружающего пространства, прежде всего для удовлетворения запросов в отношении создания комфортной, экологичной и

безопасной среды, остается актуальным социальным запросом населения, проживающего в различных географических и природно-климатических условиях.

Повышение уровня благосостояния населения, поступательное и динамичное развитие экономических процессов способствуют качественному и количественному росту строительной индустрии, включая производство современных и эффективных строительных материалов и изделий.

Малоэтажные строительные объекты жилого назначения в значительном большинстве случаев предусматривают архитектурно-строительные и конструктивные решения с применением бескаркасной схемы и стенами, которые совмещают несущие и ограждающие функции и выполнены из строительных изделий природного происхождения (рисунок 5.6).

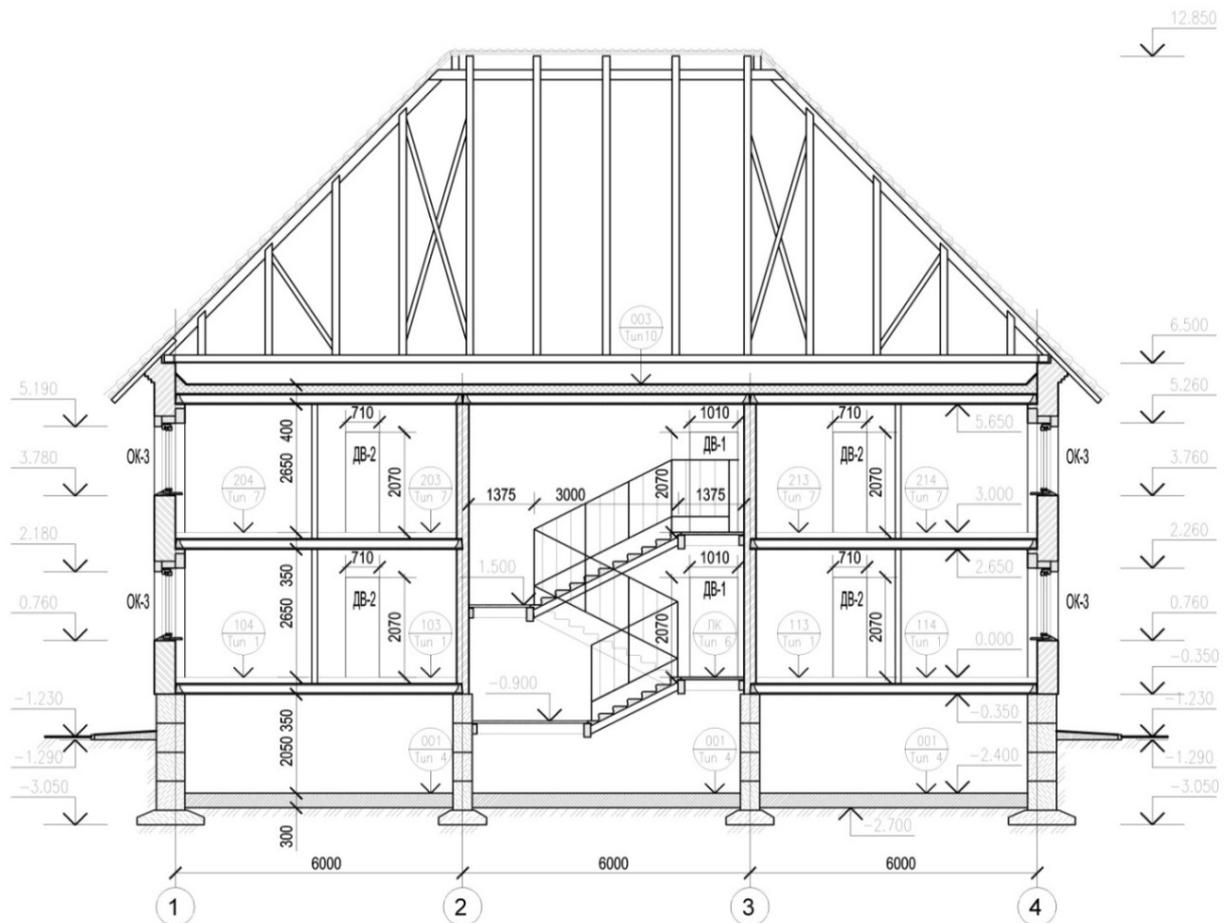


Рисунок 5.6 – Типовое архитектурно-строительное и конструктивное решение малоэтажного жилого дома

Именно формат малоэтажного жилого дома является наиболее рациональным для применения аэрированных керамических изделий (АКИ) в составе внешних и внутренних стен, перегородок.

К числу основных особенностей применения аэрированных керамических изделий для устройства конструкций малоэтажных жилых домов относятся [43, 48, 71]:

- предпочтения в применении строительных материалов природного происхождения;
- обеспечение параметров микроклимата помещений за счет высоких теплотехнических свойств материала;
- сравнительная простота и технологичность возведения строительных конструкций;
- высокие показатели эксплуатационной эффективности, надежности и долговечности строительных объектов.

Широкое распространение на территории Российской Федерации глинистого сырья, определенные культурные традиции и сравнительно несложные условия для промышленного изготовления позволяют утверждать как о значительном потенциале АКИ для удовлетворения внутреннего спроса, так и об экспортном потенциале рассматриваемого вида керамических изделий для различных стран различных континентов [34].

Промышленное производство керамического кирпича, блоков и камня по состоянию на 2023 год осуществлялось более чем на 300 предприятиях строительной индустрии и составляет годовой объем в количестве 6,5 миллиардов штук условных единиц продукции (рядового, отделочного, клинкерного).

Прогноз потребления керамических изделий, включая и стеновые строительные материалы природного происхождения, характеризующиеся высокими показателями тепловой защиты, указывает на ежегодный рост емкости рынка керамических изделий в количестве 1,5÷1,9 % от общей емкости рынка стеновых материалов.

На рисунке 5.7 приведена усредненная структура распределения промышленного производства керамического кирпича по регионам Российской Федерации за период времени, включающий 2021÷2023 годы.

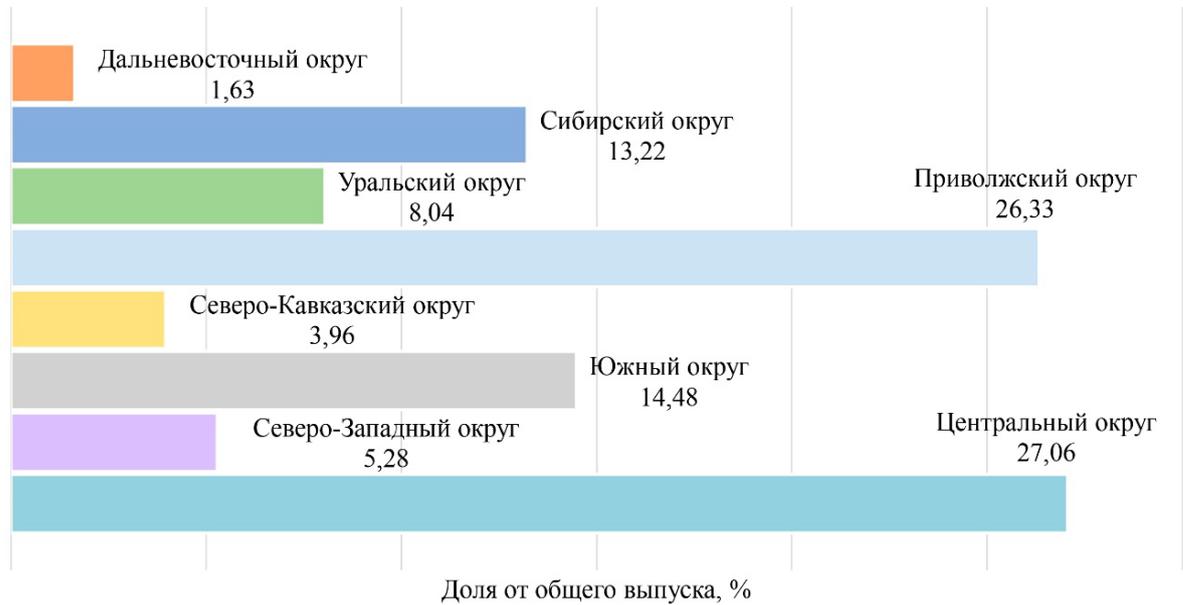


Рисунок 5.7 – Характеристика распределения промышленного производства керамического кирпича по регионам Российской Федерации за 2021÷2023 годы

К числу главных потребительских преимуществ применения аэрированных керамических изделий (АКИ) относятся:

- высокие показатели экологичности, достигаемые посредством высокотемпературного обжига при изготовлении изделий;
- низкие параметры пожарной опасности, которые позволяют применять изделия для объектов строительства, характеризующихся наиболее высокими требованиями к обеспечению пожарной безопасности конструктивных элементов;
- стабильность геометрических размеров и форм изделий и конструкций из них в течение продолжительного периода эксплуатации;
- высокие показатели параметров тепловой защиты, необходимые для формирования современных, энергоэффективных домов, зданий и сооружений различного функционального назначения;

- высокие показатели эксплуатационной эффективности, низкие затраты на ремонт и содержание в течение срока службы, сравнительно высокая долговечность материала изделий и строительных конструкций, возведенных из керамических изделий;
- стабильность показателей отпускной и равновесной влажности, сопровождаемая естественной регуляцией параметров микроклимата внутреннего пространства;
- возможность применения для помещений, характеризующихся мокрым режимом при эксплуатации.

Основные категории конечных потребителей керамических изделий:

- подрядные строительные организации разного масштаба, ориентированные на формат нового строительства, реконструкции и реновации объектов жилого назначения;
- сравнительно небольшие, частные бригады и звенья, привлекаемые на условиях субподряда к новому строительству или ремонту капитальных объектов жилого фонда;
- отдельные физические лица и специалисты, осуществляющие самостоятельную подрядную строительную и ремонтную деятельность на объектах различного назначения.

Широкое распространение керамических изделий в строительной деятельности многочисленных и разнообразных (в количественном отношении, структуре и масштабах подрядных организаций) объясняется сравнительной простотой и доступностью технологических приемов обработки и возведения конструкций из керамических изделий [34].

Природное происхождение глинистого сырья определяет широкий диапазон возможностей как по модификации структурного состава (например, введением добавок из побочных продуктов промышленности или более полным и рациональным использованием природных особенностей глиняного сырья), так и по технологической последовательности производства керамических изделий. Производственный цикл является замкнутой процедурой, в которой используются

предварительно подготовленные бракованные изделия и вторично используемые продукты из возведенных строительных конструкций.

К числу основных технологических особенностей промышленного производства аэрированных керамических изделий относятся:

- возможность для расширения или оптимизации номенклатуры керамических изделий на отдельно взятом предприятии и отрасли в целом;
- минимальный процент величины отходов и/или побочных продуктов основного производства;
- возможность адаптации технологии с целью вторичного применения отходов основного производства и побочных продуктов иных производств;
- способность изменения технологических режимов, а также регламентов производства с целью оптимизации расхода материальных ресурсов и параметров санитарной и экологической безопасности процессов производства;
- возможность оптимизации первоначального состава структурной смеси, направленная на снижение стоимости компонентов смеси при обеспечении требуемых физико-механических характеристик и потребительских свойств изготовленного изделия

В таблице 5.2 приведен пример формирования (оптимизации) состава керамической смеси для производства АКИ средней плотности 550 кг/м<sup>3</sup> с учетом экономических факторов.

Таблица 5.2 – Оптимизация стоимости компонентов керамической смеси, необходимых для производства 1 м<sup>3</sup> АКИ

Компонент	Единица измерения	Стоимость компонента, рублей	Расход для 1 м <sup>3</sup> АКИ	Стоимость 1 м <sup>3</sup> АКИ, рублей
Глинистое сырье	кг	0,3	458,42	137,56
Добавка разжижающая	л	18,3	11,19	205,48
Добавка воздухововлекающая	л	85,2	5,32	450,88
Добавка отощающая	кг	0,1	129,28	12,93
Добавка армирующая	кг	146,5	2,11	314,85
Вода	м <sup>3</sup>	6,2	0,34	2,18

При составлении расчетных параметров, указанных в таблице 5.2, приняты следующие виды и величины переходных коэффициентов (от величины 1 м<sup>3</sup> АКМ к значению 1 м<sup>3</sup> АКИ):

- значение калибровочного коэффициента,  $k_k = 1,1$ ;
- значение стандартного коэффициента брака,  $k_b = 1,031$ ;
- значение коэффициента объемной усадки смеси  $k_y = 1,364$ .

По результатам расчетов получены следующие экономические показатели:

- соотношение себестоимостей производственной и сырьевой составляющих: 0,85;
- себестоимость сырьевой составляющей для производства 1 м<sup>3</sup> АКИ: 1123,8 рублей;
- себестоимость общая (сырьевая + производственная составляющие) для производства 1 м<sup>3</sup> АКИ: 2079,0 рублей;
- себестоимость общая для производства единицы продукции (одного изделия): 4,06 рублей.

Доступность сырьевых запасов компонентов керамической смеси, необходимых для производства АКИ, а также производительного оборудования, обеспечивающего эффективное проведение основных технологических операций (включая подготовку глинистого сырья, сушку и обжиг), являются основными компонентами системы промышленного производства, которая в сочетании с отлаженной системой организации сбыта готовой продукции способна обеспечить максимально быстрый возврат инвестиций.

При достигнутом балансе производственной (сырьевой) и сбытовой систем, расширение номенклатуры керамических изделий (например, посредством введения технологии аэрирования первоначальной структурной смеси) позволяет осуществить дополнительный качественный и количественный рост инвестиций в производственную составляющую.

В таблице 5.3 приведены экономические показатели, характеризующие целесообразность расширения производственной составляющей производственного предприятия АЛ «БКСМ» посредством внедрения

технологической операции аэрирования с целью производства АКИ в количестве 30 миллионов единиц условного кирпича (или 58,6 тысяч м<sup>3</sup> изделий) в год.

Таблица 5.3 – Экономические показатели эффективности проектных инвестиционных решений в отношении технологии аэрирования керамических изделий

Наименование показателя	Единица измерения	Величина показателя
Расчетный объем производства изделий в год	м <sup>3</sup>	58500
Расчетный (средний) объем производства изделий в месяц	м <sup>3</sup>	4875
Общее количество затрат (инвестиций)	млн. рублей	130,004
Срок планирования затрат (инвестиций)	месяцев	180
Точка безубыточности производства	%	10
Срок окупаемости затрат (инвестиций)	месяцев	37
Индекс доходности затрат (инвестиций)	–	13,9
Чистый доход (ЧД, PV) без дисконта	млн. рублей	1679,169
Чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV)	млн. рублей	428,638
Чистый доход (ЧД, PV) без дисконта	млн. рублей	1679,169
Чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV) с терминальной стоимостью (TV)	млн. рублей	641,332
Внутренняя норма доходности затрат (инвестиций) (ВНД, IRR) в год	%	75
Отпускная цена изделия	рублей/ м <sup>3</sup> рублей/единица	4300 8,39
Планируемый (средний) объем продаж продукции в месяц	млн. рублей	25,134
Объем текущих (производственная составляющая) расходов, в месяц	млн. рублей	9,994
Чистая прибыль от продаж изделий в месяц	млн. рублей	9,643
Денежный поток от продаж изделий в месяц	млн. рублей	10,051
Точка безубыточности продаж в месяц	млн. рублей	2,512
Коэффициент рентабельности чистой прибыли от продаж продукции	%	45
Коэффициент рентабельности валовой прибыли от продаж продукции	%	60
Коэффициент рентабельности операционной прибыли от продаж продукции	%	57

При анализе целевых показателей и затрат (инвестиций) проекта рассмотрены следующие виды (группы) рисков:

1. Производственные (функционально-технологические риски): не выявлены.
2. Организационные и управленческие риски, включая:
  - 2.1. ошибки в подборе и квалификации рабочего персонала: средний уровень;
  - 2.2. потери или частичная утрата имущества (инвентаря): низкий уровень;

- 2.3. недостаточный спрос (сбыт) производимых изделий: низкий уровень;
- 2.4. завышенная цена продаж (сбыта) производимых изделий: низкий уровень;
3. Финансовые риски, включая:
  - 3.1. неплатежи: низкий уровень;
  - 3.2. недостаток финансовой устойчивости проекта: низкий уровень.
4. Риски материально-технического обеспечения проектных и производственных процедур: не выявлены.
5. Экономические риски: средний уровень, возможны, вследствие резких изменений условий налогообложения.
6. Экологические риски: не выявлены.

Расчетные значения для показателей эффективности проектных (инвестиционных) решений вида (см. Таблицу 5.3):

- I. положительная величина чистого дисконтированного дохода, без учета терминальной стоимости, равная: 428,638 млн. рублей;
- II. положительная величина чистого дисконтированного дохода, с учетом терминальной стоимости, равная: 641,332 млн. рублей.

Величина внутренней нормы доходности составляет 75 %, что указывает на высокий уровень вероятности окупаемости затрат (инвестиций) в течение установленного периода времени и эффективности привлечения инвестиций в рассматриваемый проект.

### **Выводы по пятой главе**

1. Представлена принципиальная схема производства АКИ с армирующими добавками, предусматривающая отказ от традиционных вяжущих материалов для стабилизации параметров смеси. Особенностью схемы является безотходный принцип производства и применение побочных продуктов других производств.

2. Установлены экспериментальным методом параметры образцов АКИ плотностью 570 кг/м<sup>3</sup> на основе каолиновой глины, характеризующиеся

величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $550 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии до 23.0 МПа. Данный результат свидетельствует о потенциале изготовления высокопрочных АКИ для применения в конструкциях с особыми условиями эксплуатации.

3. Определена общая себестоимость промышленного производства АКИ средней плотностью  $550 \text{ кг/м}^3$  на основе каолиновой глины, которая составила: 2079 рублей/ $\text{м}^3$  или 4,06 рублей/единица условного изделия (кирпича). При заметном различии в расходе глинистого компонента для изготовления традиционного керамического и аэрированного кирпича доступные запасы глинистого сырья расходуются эффективнее и значительно более продолжительно при введении технологической операции аэрирования.

На базе производственного предприятия АО «БКСМ» (Боровичский комбинат строительных материалов, Новгородская область, г. Боровичи) изготовлена опытно-промышленная партия АКИ с высокими физико-механическими характеристиками. Средние отклонения опытных значений предела прочности при сжатии от лабораторных составили 4.25%.

4. Определены показатели экономической эффективности производства АКИ (формат 1НФ) средней плотностью  $550 \text{ кг/м}^3$  на основе каолиновой глины. Индекс доходности затрат (инвестиций) проекта: 13,9. Проектные характеристики производственных возможностей технологической линии: 30 млн. единиц условного кирпича.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе и по результатам проведения диссертационного исследования теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность технологии аэрирования керамических масс с применением дисперсного армирования для получения высокопрочных пористых керамических изделий средней плотности 400–800 кг/м<sup>3</sup> для стеновых ограждающих конструкций:

1. По результатам литературного обзора и анализа данных трудов и работ по теме исследования определена эффективность метода аэрирования керамических масс для получения высокопрочных изделий пониженной плотности. Наличие в компонентном составе АКМ базальтовой фибры уменьшает значение общей усадки АКС на среднюю величину, составляющую 20÷25% по сравнению с образцами без применения армирующих волокон.

2. Определены рациональные составы АКИ с требуемыми физико-механическими показателями с помощью метода полного факторного эксперимента. При этом исследована динамика изменения значимости факторов и их комбинаций на исследуемые параметры оптимизации (воздушная усадка и предел прочности при сжатии) в интервале средней плотности от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup>.

3. Выявлены зависимости между значением показателя предела прочности при сжатии АКИ и химическим составом керамической шихты, которая позволяет прогнозировать эффективность использования глинистого сырья различных месторождений при проектировании компонентного состава шихты для производства пористых керамических изделий по технологии принудительного аэрирования. 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 для получения АКИ через расчетное значение температуры огнеупорности сырьевой шихты, что

позволяет производить бездефектные изделия с заданными величинами физико-механических показателей: средняя плотность  $400 \div 800 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии:  $3 \div 10 \text{ МПа}$ .

5. В результате экспериментальных исследований опытно-промышленной партии изделий АКИ в виде полнотелого кирпича 1 НФ получен диапазон значений физико-механических показателей: средняя плотность  $431 \div 752 \text{ кг/м}^3$  и прочность при сжатии до  $3,2 \div 7,5 \text{ МПа}$ . Фактические значения характеристик опытно-промышленных образцов в сравнении с лабораторными образцами, изготовленными из сырьевой шихты по разработанному методу проектирования аэрированной керамики, отличаются не более чем на 5%.

6. Определена общая (производственной и сырьевой составляющих) себестоимость производства АКИ средней плотности  $550 \text{ кг/м}^3$ , которая составила:  $2079 \text{ рублей/м}^3$  или  $4,06 \text{ рубля/единица}$  условного изделия (кирпича). Общая себестоимость производства АКИ средней плотности  $550 \text{ кг/м}^3$  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  $550 \text{ кг/м}^3$ , значительно меньше по сравнению с расходом глинистого сырья для изготовления традиционного керамического кирпича.

#### **Перспективы дальнейшей 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 в условиях применения дисперсного армирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Августинник, А.И.* Керамика / А.И. Августинник. – Л.: Стройиздат, 1975. – 592 с.
2. *Адылов, Г.Т.* Перспективы расширения сырьевой базы для керамического производства / Г.Т. Адылов, Г.С. Меносманова, Т.Т. Рискиев, М.Х. Руми, Ш.А. Файзиев // *Стекло и керамика*. – 2010. – № 2. – С. 29–31
3. *Аксельрод, Л.М.* Развитие огнеупорной отрасли – отклик на запрос / Л.М. Аксельрод // *Новые огнеупоры*. – 2013. – № 3. – С. 107–122
4. *Андрианов, Н.Т.* Практикум по технологии керамики: учеб. пособие для вузов / Н.Т. Андрианов, А.В. Беляков, А.С. Власов, И.Я. Гузман и др. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2005. – 336 с.
5. *Ахмедова, М.Т.* Керамический теплоизоляционный материал / М.Т. Ахмедова, З.П. Нуруллаев, Н.Н. Акрамова // *Реф. Инф. ВНИИЭСМ, серия «Керамическая промышленность»*. – вып. 3., 1979 – С. 13–14
6. *Ашмарин, Г.Д.* Инновационные технологии высокоэффективных керамических строительных изделий на основе кремнистых пород / Г.Д. Ашмарин, В.Г. Ласточкин, В.В. Илюхин, А.В. Татьянчиков // *Строительные материалы*. – 2011. – № 7. – С. 28–30
7. *Ашмарин, Г.Д.* Керамические экологически чистые теплоэффективные стены – реальность современного строительства / Г.Д. Ашмарин, В.А. Кондратенко, В.Г. Ласточкин, А.П. Павленко // *Строительные материалы*. – 2011. – № 12. – С. 10–11
8. *Бакунов, В.С.* Многофункциональный керамический строительный материал – керпен / В.С. Бакунов, В.А. Кочетков, А.В. Надденный, Б.С. Черепанов, Е.М. Шелков // *Строительные материалы*. – 2004. – № 11. – С.10–11
9. *Беляков, А.В.* Высокопористая проницаемая ячеистая керамика из карбида кремния с добавками муллита / А.В. Беляков, Мо У. Зо Е, Н.А. Попова, Р.А. Корнилов // *Новые огнеупоры*. – 2017. – № 9. – С. 36–39

10. *Беркман, А.С.* Пористая проницаемая керамика / А.С. Беркман. – М.: Стройиздат, 1969. – 170 с.
11. *Богданов, А.Н.* Модификация керамических масс пластифицирующими добавками / А.Н. Богданов, Л.А. Абдрахманова, В.Г. Хозин // Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации». XXI научные чтения. Белгород: БГТУ. – 2014. – С. 46–49
12. *Болдырев, А.С.* Технический прогресс в промышленности строительных материалов / А.С. Болдырев, В.И. Добужинский, Я.А. Рекитар. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
13. *Бутт, Ю.М.* Общая технология силикатов: учебник / Ю.М. Бутт, Г.Н. Дудеров, М.А. Матвеев. – М.: Стройиздат, 1976. – 600 с.
14. *Вакалова, Т.В.* Рациональное использование природного и техногенного сырья в керамических технологиях / Т.В. Вакалова, В.М. Погребенков // Строительные материалы. – 2007. – № 4. – С. 58–61
15. *Вакалова, Т.В.* Управление качеством строительной и теплоизоляционной керамики путем проектирования состава масс / Т.В. Вакалова, В.М. Погребенков, В.И. Верещагин, И.Б. Ревва // Строительные материалы. – 2007. – № 2. – С. 27–30
16. *Васянов, Г.П.* Использование ресурсов глинистого кирпичного сырья Республики Татарстан для строительного комплекса / Г.П. Васянов, Б.Ф. Горбачев, Е.В. Красникова, Р.К. Садыков // Строительные материалы. – 2013. – № 8. – С. 17–21
17. *Воробьев, Х.С.* Влияние основных технологических параметров изготовления сырца на прочность пористокерамических образцов / Х.С. Воробьев, Л.В. Воропаева, Л.С. Набатова // Сб. трудов ВНИИСтром. – 1980. – №. 43 (71). – С. 16–27
18. *Воропаева, Л.В.* К вопросу сравнительной оценке пористокерамических изделий с различной объемной массой и прочностью / Л.В. Воропаева, В.П.

- Варламов, В.А. Езерский // Сб. трудов ВНИИСтром. – 1981. – №. 45 (73). – С. 135–140
19. *Гаспарян, М.Д.* Синтез полифункциональных высокопористых блочно-ячеистых материалов на основе оксидной керамики / М.Д. Гаспарян, В.Н. Грунский, А.В. Беспалов, М.Г. Давидханова, А.Н. Кабанов, Е.С. Лукин, Н.А. Попова, Н.И. Харитонов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2016. – № 6. – С. 3–8
  20. *Горбачев, Б.Ф.* Состояние и возможные пути развития сырьевой базы каолинов, огнеупорных и тугоплавких глин в Российской Федерации / Б.Ф. Горбачев, Е.В. Красникова // Строительные материалы. – 2015. – № 4. – С. 6–17
  21. *Горбачев, Б.Ф.* Каолины России: состояние и перспективы развития сырьевой базы / Б.Ф. Горбачев, Н.С. Чуприна // Отечественная геология. – 2009. – № 1. – С. 74–86
  22. *Горлов, Ю.П.* Технология теплоизоляционных материалов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
  23. *Григораш, О.А.* Особенности возникновения усадочных деформаций при сушке керамических изделий / О. А. Григораш, Ю. А. Сучкова, К.С. Дмитриев // 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
  24. *Гринфельд, Г.И.* Кирпич и камни с высокой пустотностью в облицовочной кладке наружных стен / Г.И. Гринфельд, А.А. Вишневский // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 11. – С. 22–36
  25. *Гузман, И. Я.* Высокоогнеупорная пористая керамика / И. Я. Гузман. – М.: Металлургия, 1971. – 283 с.
  26. *Дмитриев, К.С.* Аэрированная керамика – инновационный материал для энергоэффективного строительства / 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

27. *Дмитриев, К.С.* Методика расчета предела прочности при сжатии аэрированных керамических изделий по химическому составу шихты / К.С. Дмитриев // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 1. – С. 16-24
28. *Дмитриев, К.С.* Моделирование процессов разжижения глиняных масс / К.С. Дмитриев // Российско-китайский научный журнал «Содружество». – 2016. – №2 (1). – С. 7–10
29. *Дмитриев, К.С.* Особенности проектирования состава пенокерамических изделий / К.С. Дмитриев // Вестник гражданских инженеров. – СПбГАСУ. – 2015. – №4(51) – С. 112–116
30. *Дмитриев, К.С.* Пептизация глинистых суспензий в технологии пенокерамики / К.С. Дмитриев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-2 – С. 249–253
31. *Дмитриев, К.С.* Пористая керамика: современное состояние и перспективы / К.С. Дмитриев // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – №7. – С. 152–154
32. *Дмитриев, К.С.* Современные технологии эффективных ограждающих конструкций / 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
33. *Дмитриев, К.С.* Способ аэрирования керамических масс в технологии легковесных огнеупоров / К.С. Дмитриев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2018. – № 3. – С. 36–44.
34. *Дмитриев, К.С.* Технико-экономическая оценка производства аэрированных керамических изделий / К.С. Дмитриев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 4. – в печати.

35. *Дмитриев, К.С.* Усадочные деформации при сушке пенокерамических изделий / К.С. Дмитриев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21031>
36. *Довженко, И.Г.* Исследование влияния металлургических шлаков на сушильные свойства керамических масс для производства лицевого кирпича / И.Г. Довженко // Стекло и керамика. – 2013. – № 12. – С. 24–27
37. *Жаворонков, М.И.* Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона / М.И. Жаворонков, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1(60). – С. 172–176
38. *Женжурист, И.А.* Перспективные направления наномодифицирования в строительной керамике / И.А. Женжурист // Строительные материалы. – 2014. – № 4. – С. 36–39
39. *Завадский, В.Ф.* Поризованная строительная керамика / В.Ф. Завадский, Н.Б. Путро, Ю.С. Максимова // Строительные материалы. – 2004. – № 2. – С. 50–51
40. *Зверев, В.Б.* Зависимость области использования керамического сырья от его химического состава / В.Б. Зверев, К.С. Дмитриев // 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
41. *Зверев, В.Б.* Исследование строительно-технических свойств керамики с использованием побочных продуктов промышленности в зависимости от температуры огнеупорности сырьевых шихт: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Зверев Виктор Борисович. – Ленинград, 1979. – 164 с.
42. *Зверев, В.Б.* Разработка состава керамических шихт с использованием побочных продуктов промышленности для Боровичского комбината строительных материалов (БКСМ) / В.Б. Зверев, К.С. Дмитриев // 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

43. *Зубехин, А.П.* Теоретические основы инновационных технологий строительной керамики / А.П. Зубехин, Н.Д. Яценко // *Строительные материалы.* – 2014. – № 1–2. – С. 88–92.
44. Изделия из пеноглины: пат. 943980 Канада / заявитель и патентообладатель Макалай Гавин А.. заявл. 01.06.1970; опубл. 19.03.1974. Бюл. № 14. – 2 с.
45. *Кара-сал, Б.К.* Получение керамического стенового материала из вскрышных пород углеобогащения / Б.К. Кара-сал, В.И. Котельников, Т.В. Сапелкина // *Естественные и технические науки.* – 2015. – № 2. – С. 160–163
46. *Кащеев, И.Д.* Возможность получения алюмосиликатных заполнителей на основе каолина и техногенных материалов / И.Д. Кащеев, К.Г. Земляной, К.О. Степанова // *Новые огнеупоры.* – 2017. – №10. – С. 31–37
47. *Кащеев, И.Д.* Производство огнеупоров: учебное пособие / И.Д. Кащеев, К.Г. Земляной. – СПб.: Лань, 2018. – 344 с.
48. *Котляр, В.Д.* Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу / В.Д. Котляр, Ю.В. Терехина, А.В. Котляр // *Строительные материалы.* – 2015. – № 4. – С. 72–74
49. *Кролевецкий, Д.В.* Пенокерамические стеновые и теплоизоляционные изделия на основе легкоплавких глин: дис. ... канд. техн. наук: 05:23:05 / Д.В. Кролевецкий. – М., 2005. – 213 с.
50. *Крупа, А.А.* Влияние минералогического состава глинистого сырья на свойства керамических изделий / А.А. Крупа, В.А. Михайленко, Е.Г. Иванова // *Стекло и керамика.* – 1996. – № 1 – 2. – С. 35–39
51. *Кукса, П.Б.* Высокопористые керамические изделия, полученные нетрадиционным способом / П.Б. Кукса, А.А. Акберов // *Строительные материалы.* – 2004. – № 2. – С. 34–35
52. *Лисачук, Г.В.* Оценка пригодности глинистого сырья для производства стеновой и фасадной керамики / Г.В. Лисачук, Л.П. Щукина, В.В. Цовма, Л.А. Белостоцкая, Ю.Д. Трусова // *Стекло и керамика.* – 2013. – № 3. – С. 14–19

53. *Лопатников, М.И.* Минерально-сырьевая база керамической промышленности России / М.И. Лопатников // *Строительные материалы.* – 2004. – № 2. – С. 31–38
54. *Маргишвили, А.П.* Разработка и внедрение в производство новых огнеупорных материалов и пропантов / А.П. Маргишвили, С.И. Гершкович, А.Н. Иксанова, И.Г. Белова, Ф.Р. Иксанов, В.В. Скурихин // *Новые огнеупоры.* – 2017. – №6. – С. 16–24
55. *Михалев, В.В.* Свойства глин для производства санитарно-технических изделий / В.В. Михалев, А.С. Власов // *Стекло и керамика.* – 2007. – № 3. – С. 10–13
56. *Мокчаро, А.* Пористая структура керамического материала, изготовленного с применением порообразующих добавок / А. Мокчаро, М.Б. Ломбарди, А.Н. Шан // *Новые огнеупоры.* – 2017. – №1. – С. 54–57
57. *Мороз, И.И.* Технология строительной керамики: учебное пособие / И.И. Мороз. – 3-е изд., перераб. и доп. – Репринтное воспроизведение издания 1980 г. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 384 с.
58. *Никитин, А.И.* Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения / А.И. Никитин, Г.И. Стороженко, Л.К. Казанцева, В.И. Верещагин // *Строительные материалы.* – 2014. – № 8. – С. 34–37
59. *Осипов, В.И.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств / В.И. Осипов, В.Н. Соколов. – М.: ГЕОС, 2013. – 576 с.
60. *Перегудов, В.В.* Новый эффективный стеновой материал – керамика с вовлеченным воздухом / В.В. Перегудов // *Научные доклады высшей школы, «Строительство».* – 1958. – № 2. – С.193–196
61. *Петров, В.П.* Пористые заполнители из отходов промышленности / В.П. Петров С.А. Токарева // *Строительные материалы.* – 2011. – № 12. – С. 46–51
62. Пористая керамика: пат. 41233284 США / заявитель и патентообладатель Конрад Р. – № 794425, заявл. 06.05.1977; опубл. 31.10.1978. Бюл. № 10. – 2 с.

63. *Рабухин, А.И.* Основы технологии керамики и огнеупоров: учеб. пособие / А.И.Рабухин. – М.: РХТУ, 2001. – 112 с.
64. *Роговой, М. И.* Технология искусственных пористых заполнителей и керамики / М.И. Роговой. – Репринтное воспроизведение издания 1974 г. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 320 с.
65. *Сакулин, А.В.* На уровне современных требований / А.В. Сакулин // Новые огнеупоры. – 2017. – №6. – С. 12–15
66. *Сакулин, А.В.* Разработка современных высокоэффективных огнеупорных материалов / А.В. Сакулин, В.В. Скурихин, Л.Ю. Громова, О.С. Федорова // Новые огнеупоры. – 2012. – № 6. – С. 14–19
67. *Салахов, А.М.* Структурообразование керамики из глин, формирующих при обжиге различные минеральные фазы / А.М. Салахов, Л.Р. Тагиров // Строительные материалы. – 2015. – № 8. – С. 68–74
68. *Сахарова, Н.А.* Легковесные пористо-пустотелые керамические блоки / Н.А. Сахарова. – Киев: Акад. Архитектуры УССР, 1951. – 27 с.
69. *Сидоров, В.И.* Химия в строительстве / В.И. Сидоров, Э.П. Агасян, Т.П. Никифорова. – Учебник для вузов. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 344 с.
70. *Соков, В.Н.* Создание огнеупорных бетонов и теплоизоляционных материалов с повышенной термостойкостью: монография / В.Н. Соков. – М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. Гос. Строит. Ун-т. М.: МГСУ, 2015. – 288 с.
71. *Соков, В.Н.* Теория и практика создания композиционной шамотной термостойкой теплоизоляции / В.Н. Соков, В.В. Соков, А.Э. Бегляров // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2011. – №1(15) URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Sokov-2011\\_1\(15\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Sokov-2011_1(15).pdf)
72. *Солодский, Н.Ф.* Сырьевые материалы и пути повышения эффективности производства строительной керамики / Н.Ф. Солодский, А.С. Шамриков // Стекло и керамика. – 2009. – № 1. – С. 26–29
73. Способ изготовления вспененных строительных материалов: пат. 2517133 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/08, В 28 В 5/04 / Увайсов Ш.У.; заявитель и

- патентообладатель Увайсов Ш.У. – № 2012131262/03, заявл. 23.07.2012; опубл. 27.05.2014 Бюл. № 15. – 6 с.
74. Способ изготовления высокопористых легковесных изделий: пат. 3801132 ФРГ / заявитель и патентообладатель Улрич Х., Рудольф М. – № 3801132.8, заявл. 16.01.1988; опубл. 27.07.1989. Бюл. № 11. – 3 с.
75. Способ изготовления и применение легкого керамического материала: пат. 3414967 ФРГ / заявитель и патентообладатель Рудигер Л., Бернд М. – № Р3414967.8, заявл. 19.04.1984; опубл. 07.11.1985. Бюл. № 45. – 2 с.
76. Способ изготовления керамики: пат. 55 – 116652 Япония / заявитель и патентообладатель Ясуо Ц., Такаюки К. – № 54 – 24197, заявл. 01.03.1979; опубл. 08.09.80. Бюл. № 8. – 2 с.
77. Способ изготовления плит или тонкостенных блоков из пенокерамики: пат. 381036 Швеция / заявитель и патентообладатель Энгстром Б., Перссон Г. – № 7407671–2, заявл. 11.06.1974; опубл. 24.11.1975. Бюл. № 24. – 2 с.
78. Способ изготовления пористого керамического материала: пат. 593656 Великобритания / заявитель и патентообладатель Джордис Раваульт Ф.Э.– № 1870615/29–33, заявл. 12.01.1973; опубл. 15.02.1978. Бюл. № 6. – 2 с.
79. Состав для изготовления теплоизоляционного материала: пат. 2327672 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/02, С 04 В 28/26, С 04 В 22/04, С 04 В 14/10 / Александров Ю.А., Диденкулова И.И., Цыганова Е.И.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «Хикома». – № 2005141699/03, заявл. 29.12.2005; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18. – 6 с
80. Способ изготовления пенокерамических изделий: пат. 2251540 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/02 / Галаган К.В., Черных В.Ф., Маштаков А.Ф.; заявитель и патентообладатель Галаган К.В. – № 2004111833/03, заявл. 20.04.2004; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13. – 6 с.
81. Способ изготовления пористых керамических стеновых изделий: пат. 2425817 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/08 / Габидуллин М.Г., Рахимов Р.З., Шангараев А.Я., Миндубаев А.А., Габидуллин Б.М., Хисамиев Д.Р.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-

- строительный университет». – № 2010107708/03, заявл. 25.02.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. – 11 с.
82. Способ и устройство для изготовления изделий из керамзита: пат. 1945811 ФРГ / заявитель и патентообладатель Судерманн Э. – № 1945811.6, заявл. 27.08.1977; опубл. 12.05.1978. Бюл. № 5. – 2 с.
83. Способ получения пенокерамики: пат. 57 – 47756 Япония / заявитель и патентообладатель Кенки К. – № 55 – 120939, заявл. 01.09.1980; опубл. 18.03.82. Бюл. № 17. – 2 с.
84. Способ получения пенокерамических изделий: пат. 2349563 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/02 / Габидуллин М.Г., Хузагарипов А.Г.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2007117845/03, заявл. 03.05.2007; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8. – 8 с.
85. Способ получения пенокерамики и изделий из нее: пат. 2469979 Рос. Федерация: МПК С 04 В 33/13, С 04 В 28/26, С 04 В 38/00, С 04 В 40/00 / Крутов Ю.М., Гаврилюк А.Ю.; заявитель и патентообладатель Крутов Ю.М., Гаврилюк А.Ю. – № 2010130850/03, заявл. 22.07.2010; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35. – 9 с.
86. Способ производства поризованного строительного кирпича: пат. 2422409 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/06 / Косарев Н.П., Гревцев Н.В., Тяботов И.А., Рязанов А.Г., Верхотуров И.М., Глазунов А.С.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». – № 2010101916/03, заявл. 21.01.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. – 11 с.
87. Способ производства стеклокристаллических пеноматериалов: пат. 2451000 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/02 / Б.С. Черепанов, А.Б. Черепанов, И.Н. Долманов, Ю.М. Винжегин, М.В. Шульженко, Э.И. Винокур; заявитель и патентообладатель ООО «Керапен». – № 010150698/03, заявл. 13.12.2010; опубл. 0.05.2012 Бюл. № 14. – 12 с.

88. *Столбоушкин, А.Ю.* Теоретические основы формирования керамических матричных композитов на основе техногенного и природного сырья / А.Ю. Столбоушкин // *Строительные материалы.* – 2011. – № 2. – С. 10–13
89. *Стороженко, Г.И.* Влияние степени диспергирования глинистого сырья на его структуру и технологические свойства / Г.И. Стороженко, В.Ф. Завадский, Г.В. Болдырев // *Известия вузов. Строительство.* – 1998. – № 7. – С. 51–54
90. *Стороженко, Г.И.* Перспективы отечественного производства керамического кирпича на основе отходов углеобогащения / Г.И. Стороженко, А.Ю. Столбоушкин, М.П. Мишин // *Строительные материалы.* – 2013. – № 4. – С. 57–61.
91. *Страхов, А.В.* Влияние активных минеральных наполнителей на формирование структуры и свойств энергоэффективных строительных композитов / А.В. Страхов, Н.А. Иващенко, Д.К. Тимохин // *Вестник СГТУ.* – 2012. – № 3 (67). – С. 228–230
92. *Суворов, И.О.* Влияние вида и количества армирующих волокон на усадочные деформации фибропенобетона / И.О. Суворов // *Вестник гражданских инженеров.* – 2014. – № 5 (46). – С. 90–94
93. *Сулименко, Л.М.* Общая технология силикатов / Л.М. Сулименко. – М.: Инфра-М, 2004 – 335 с.
94. Сырьевая смесь для изготовления керамических изделий: пат. 1560528 СССР: МПК С 04 В 38/00 / Опекунов В.В., Даценко Б.М., Юськович В.И.; заявитель и патентообладатель Государственный научно–исследовательский институт строительных материалов и изделий. – № 4397463/23–33, заявл. 28.03.1988; опубл. 30.04.1990, Бюл. № 16. – 2 с.
95. Сырьевая смесь для изготовления керамического кирпича: пат. 2287504 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/06 / Бармин М.И., Гребенкин А.Н., Павличенко В.В., Кемпи Е.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Санкт–Петербургский государственный университет технологии и дизайна». – № 2005116805/03, заявл. 01.06.2005; опубл. 20.11.2006 Бюл. № 32. – 6 с.

96. Сырьевая смесь для изготовления керамических теплоизоляционных строительных материалов: пат. 2484063 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/02, С 04 В 33/00 / Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Логинова Е.В., Селиванов В.М.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012104036/03, заявл. 06.02.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16. – 6 с.
97. Сырьевая смесь для изготовления пенокерамики: пат. 2273621 Рос. Федерация: МПК С 04 В 38/10 / Галаган К.В., Маштаков А.Ф., Черных В.Ф., Линьков А.В.; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный технологический университет. – № 2004117336/03, заявл. 07.06.2004; опубл. 10.04.2006 Бюл. № 10. – 4 с.
98. *Эббрехт, Т.* Новая высокоэффективная связка для огнеупоров / Т. Эббрехт, Б. Вейерсхаузен, Т. Фон Раймон Липински, Х. Шторм // Новые огнеупоры. – 2009. – № 7. – С. 37–39
99. *Эванс, А. Г.* Конструкционная керамика / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
100. *Юшкевич, М.О.* Технология керамики / М.О. Юшкевич, М.И. Роговой. – М.: Книга по требованию, 2012. – 348 с.
101. *Яценко, Н.Д.* Научные основы инновационных технологий керамического кирпича и управление его свойствами в зависимости от химико-минералогического состава сырья / Н.Д. Яценко, А.П. Зубехин // Строительные материалы. – 2014. – № 4. – С. 28–31
102. *Albank, M.* Technologie de poroceramique // Ziegelindustrie. 1972. – No 10. p. 452–456
103. *Amoros, J.L.* Porous single fired wall tile bodies: Influence of quartz particle size on tile properties / J.L. Amoros, M.J. Orts, S. Mestre, J. Garcui-Ten., C. Feliu // Journal of The European Ceramic Society. 2010. – Vol. 30, No 1. p. 17–28
104. *Bruno, G.* Thermal and mechanical response of industrial porous ceramics / G. Bruno, I. Pozdnyakova, A. M. Efremov [et al.] // Mater. sci. Forum. 2010. – Vol. 652. p. 191–196

105. *Dmitriev, K.* Innovative construction material based on aerated ceramics / K. Dmitriev, V. Zverev // *Architecture and Engineering*. 2017. – Vol. 2, No 4. p. 9–13
106. *Fugmann, K.* Raw materials and raw material atorage / K. Fugmann // *Interbrick*. 1989. – Vol. 5. No 2. p. 30–33
107. *Gonzenbach, U.T.* Macroporous ceramics from particle-stabilized wet foams [текст] / U.T. Gonzenbach, A.R. Studart, E. Tervoort, L.J. Gauckler // *Journal of the American Ceramic Society*. 2007. – No 90 (1). p. 19–22
108. *Hammel, E.* Processing and properties of advanced porous ceramics: an application based review / E. Hammel, O.L.R. Ighodaro, O.I. Okoli // *Ceram. Int*. 2014. – Vol. 40, No 10. p. 15351–15370
109. *Junkes, J.A.* Ceramic tile formulations from industrial waste / J. A. Junkes, M.A. Carvalho, A.M. Segaddes, D. Hotza // *Inrerceram*. 2011. - Vol. 60, No 1. p. 221–225
110. *Kim, Y.W.* Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics / Y.W. Kim, J.H. Eom, S. Raju // *J. Asian Ceram. Soc*. 2013. – Vol. 1. p. 220–242
111. *Kovo, A.* Kaolin to zeolites conversion / A. Kovo // LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 312 p.
112. *Laefer, D.* Engineering Properties of Historic Brick: Variability Considerations as a Function of Stationary versus Nonstationary Kiln Types / D. Laefer // *Journal of the American Institute for Conservation*. 2004. – No 3. p. 255–272
113. *Malhotra, S.K.* Development of bricks from granulated blast furnace slag / S.K. Malhotra, S.P. Tehri // *Construction and building material*. – 1996. – Vol. 10, p. 191–193
114. *Morris, G.* The effect of particle hydrophobicity, separation distance and packing patterns on the stability of a thin film / G. Morris, M. R. Pursell, S. J. Neethling, J. J. Cilliers // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. – No 327. p. 138–144
115. *Pucharenko, Ju.* Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete / Ju. Pucharenko, V. Morozov // *World Applied Sciences Journal*, 2013. No. 23 (Problems of Architecture and Construction), p. 111–116

116. *Rice, R.W.* Porosity of ceramics / R. W. Rice // New York: Marcel Dekker, Inc., 1998. – 539 p.
117. *Segal, D.* Chemical synthesis of ceramic materials / D. Segal // J. Mater. Chem. 1997. – No 7 (8). p. 1297–1305
118. *Singer, F.* Industrielle Keramik: Dritter Band Die keramischen Erzeugnisse / F. Singer, S. S. Singer. – Berlin: Springer, 2013. – 278 s.
119. *Xiong, L.* Improvement of the mechanical properties of siC reticulated porous ceramics with optimized three-layered struts for porous media combustion / L. Xiong, L. Yawei, L. Jun [et al.] // Ceram. Int. 2017. – Vol. 43. No 4. p. 3741–3747
120. *Zhu, X. W.* Improvement in the strut thickness of reticulated porous ceramics / X. W. Zhu, D. L. Jiang, S. H. Tan [et al.] // J. Am. Ceram. soc. 2004. – Vol. 84. p. 1654–1656

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А. Результаты расчета параметров уравнений регрессии для функции отклика «воздушная усадка»

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): воздушная усадка, % (для  $\Delta\rho_{cp} = 0,4 - 0,5 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$z_1^-$ : 0,5	$z_2^-$ : 25	$z_3^-$ : 494
$z_1^+$ : 0,9	$z_2^+$ : 75	$z_3^+$ : 602

4. Исходная матрица планирования ПФЭ 2<sup>3</sup>:

№ эксперимента	Исследуемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	7,59	7,58	7,57	7,58
2	-	+	+	7,97	7,98	7,99	7,98
3	+	-	+	7,78	7,76	7,77	7,77
4	-	-	+	8,12	8,11	8,09	8,11
5	+	+	-	7,35	7,33	7,32	7,33
6	-	+	-	8,02	8,03	8,01	8,02
7	+	-	-	7,74	7,75	7,73	7,74
8	-	-	-	8,04	8,05	8,05	8,05

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной		
$z_1$	0,9	0,5	0,7	0,2	$x_1 = 5,00$	$z_1$	- 3,50
$z_2$	75	25	50	25	$x_2 = 0,04$	$z_2$	- 2
$z_3$	602	494	548	54	$x_3 = 0,019$	$z_3$	- 10,15

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$b_0 = 7,8221$	$b_1 = -0,2163$	$b_2 = -0,0938$	$b_3 = 0,0371$
$b_{1,2} = -0,0554$	$b_{1,3} = 0,0321$	$b_{2,3} = 0,0146$	$b_{1,2,3} = 0,0396$

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{cp}$	$(y_{j1}-y_{cp})^2$	$(y_{j2}-y_{cp})^2$	$(y_{j3}-y_{cp})^2$	$S_j^2$
1	7,59	7,58	7,57	7,5800	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
2	7,97	7,98	7,99	7,9800	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
3	7,78	7,76	7,77	7,7700	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
4	8,12	8,11	8,09	8,1067	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
5	7,35	7,33	7,32	7,3333	0,0003	0,0000	0,0002	0,0002
6	8,02	8,03	8,01	8,0200	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
7	7,74	7,75	7,73	7,7400	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
8	8,04	8,05	8,05	8,0467	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = 0,0001$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{коэф} = 0,0023$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,005** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$b_0 = 7,8221$	$b_1 = -0,2163$	$b_2 = -0,0938$	$b_3 = 0,0371$
$b_{1,2} = -0,0554$	$b_{1,3} = 0,0321$	$b_{2,3} = 0,0146$	$b_{1,2,3} = 0,0396$

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 7,822 - 0,2163 x_1 - 0,0938 x_2 + 0,0371 x_3 - 0,0554 x_1x_2 + 0,0321 x_1x_3 + 0,0146 x_2x_3 + 0,040 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	7,5800	7,9800	7,7700	8,107	7,333	8,020	7,740	8,047
$(y_j - y_{cp})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S_{ост}^2 = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{расч} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{табл} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = 6,6259 + 1,8620 z_1 + 0,05433 z_2 + 0,0032 z_3 - 0,0914 z_1z_2 - 0,0044 z_1z_3 - 0,00009 z_2z_3 + 0,0001 z_1z_2z_3$$

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): воздушная усадка, % (для  $\Delta\rho_{\text{ар}} = 0,5 - 0,6 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$$z_1^-: \begin{matrix} 0,9 \\ 1,5 \end{matrix}$$

$$z_2^-: \begin{matrix} 75 \\ 145 \end{matrix}$$

$$z_3^-: \begin{matrix} 0,602 \\ 0,714 \end{matrix}$$

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	7,78	7,79	7,78	7,78
2	-	+	+	8,11	8,09	8,12	8,11
3	+	-	+	7,88	7,87	7,89	7,88
4	-	-	+	8,21	8,22	8,23	8,22
5	+	+	-	7,59	7,58	7,57	7,58
6	-	+	-	7,97	7,98	7,99	7,98
7	+	-	-	7,78	7,76	7,77	7,77
8	-	-	-	8,12	8,11	8,09	8,11

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$z_1$	1,5	0,9	1,2	0,3	$x_1 = 3,33 \quad z_1 - 4,00$
$z_2$	145	75	110	35	$x_2 = 0,029 \quad z_2 - 3,1429$
$z_3$	0,714	0,602	0,658	0,056	$x_3 = 17,86 \quad z_3 - 11,75$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0 = \begin{matrix} 7,9283 \\ -0,0058 \end{matrix}$$

$$b_1 = \begin{matrix} -0,1750 \\ 0,0092 \end{matrix}$$

$$b_2 = \begin{matrix} -0,0658 \\ 0,0133 \end{matrix}$$

$$b_3 = \begin{matrix} 0,0692 \\ 0,0100 \end{matrix}$$

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{\text{ср}}$	$(y_{j1}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j2}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j3}-y_{\text{ср}})^2$	$S_j^2$
1	7,78	7,79	7,78	7,7833	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	8,11	8,09	8,12	8,1067	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
3	7,88	7,87	7,89	7,8800	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
4	8,21	8,22	8,23	8,2200	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
5	7,59	7,58	7,57	7,5800	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
6	7,97	7,98	7,99	7,9800	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
7	7,78	7,76	7,77	7,7700	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
8	8,12	8,11	8,09	8,1067	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002

Дисперсия воспроизводимости  $S^2_y = 0,0001$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{\text{коэф}} = 0,0023$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,005** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$$b_0 = \begin{matrix} 7,9283 \\ -0,0058 \end{matrix}$$

$$b_1 = \begin{matrix} -0,1750 \\ 0,0092 \end{matrix}$$

$$b_2 = \begin{matrix} -0,0658 \\ 0,0133 \end{matrix}$$

$$b_3 = \begin{matrix} 0,0692 \\ 0,0100 \end{matrix}$$

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 7,928 - 0,1750 x_1 - 0,0658 x_2 + 0,0692 x_3 - 0,0058 x_1x_2 + 0,0092 x_1x_3 + 0,0133 x_2x_3 + 0,010 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	7,7833	8,1067	7,8800	8,220	7,580	7,980	7,770	8,107
$(y_j - y_{\text{ср}})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S^2_{\text{ост}} = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{\text{табл}} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = 7,395 + 0,350 z_1 + 0,008 z_2 + 2,077 z_3 - 0,012 z_1z_2 - 1,325 z_1z_3 - 0,014 z_2z_3 + 0,017 z_1z_2z_3$$

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): воздушная усадка, % (для  $\Delta\rho_{\text{ар}} = 0,6 - 0,7 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$$z_1^-: \begin{matrix} 1,5 \\ 1,9 \end{matrix}$$

$$z_2^-: \begin{matrix} 145 \\ 205 \end{matrix}$$

$$z_3^-: \begin{matrix} 0,714 \\ 0,828 \end{matrix}$$

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	7,89	7,88	7,87	7,88
2	-	+	+	8,04	8,02	8,01	8,02
3	+	-	+	8,29	8,27	8,31	8,29
4	-	-	+	8,35	8,34	8,31	8,33
5	+	+	-	7,78	7,79	7,78	7,78
6	-	+	-	8,11	8,09	8,12	8,11
7	+	-	-	7,88	7,87	7,89	7,88
8	-	-	-	8,21	8,22	8,23	8,22

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$z_1$	1,9	1,5	1,7	0,2	$x_1 = 5,00 \quad z_1 - 8,50$
$z_2$	205	145	175	30	$x_2 = 0,033 \quad z_2 - 5,8333$
$z_3$	0,828	0,714	0,771	0,057	$x_3 = 17,54 \quad z_3 - 13,526$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0 = \begin{matrix} 8,0646 \\ -0,0104 \end{matrix}$$

$$b_1 = \begin{matrix} -0,1063 \\ 0,0596 \end{matrix}$$

$$b_2 = \begin{matrix} -0,1163 \\ -0,0638 \end{matrix}$$

$$b_3 = \begin{matrix} 0,0671 \\ -0,0146 \end{matrix}$$

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{\text{ср}}$	$(y_{j1}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j2}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j3}-y_{\text{ср}})^2$	$S_j^2$
1	7,89	7,88	7,87	7,8800	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
2	8,04	8,02	8,01	8,0233	0,0003	0,0000	0,0002	0,0002
3	8,29	8,27	8,31	8,2900	0,0000	0,0004	0,0004	0,0004
4	8,35	8,34	8,31	8,3333	0,0003	0,0000	0,0005	0,0004
5	7,78	7,79	7,78	7,7833	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	8,11	8,09	8,12	8,1067	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
7	7,88	7,87	7,89	7,8800	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
8	8,21	8,22	8,23	8,2200	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001

Дисперсия воспроизводимости  $S^2_y = 0,0002$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{\text{коэф}} = 0,0029$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,006** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$$b_0 = \begin{matrix} 8,0646 \\ -0,0104 \end{matrix}$$

$$b_1 = \begin{matrix} -0,1063 \\ 0,0596 \end{matrix}$$

$$b_2 = \begin{matrix} -0,1163 \\ -0,0638 \end{matrix}$$

$$b_3 = \begin{matrix} 0,0671 \\ -0,0146 \end{matrix}$$

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 8,065 - 0,1063 x_1 - 0,1163 x_2 + 0,0671 x_3 - 0,0104 x_1x_2 + 0,0596 x_1x_3 - 0,0638 x_2x_3 - 0,015 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	7,8800	8,0233	8,2900	8,333	7,783	8,107	7,880	8,220
$(y_j - y_{\text{ср}})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S^2_{\text{ост}} = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{\text{табл}} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = 19,823 - 10,011 z_1 - 0,028 z_2 - 13,870 z_3 + 0,031 z_1z_2 + 12,689 z_1z_3 + 0,035 z_2z_3 - 0,043 z_1z_2z_3$$

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): воздушная усадка, % (для  $\Delta\rho_{\text{ар}} = 0,7 - 0,8 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$z_1^-$ :	1,9
$z_1^+$ :	2,3

$z_2^-$ :	205
$z_2^+$ :	255

$z_3^-$ :	0,828
$z_3^+$ :	0,944

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	8,15	8,14	8,12	8,14
2	-	+	+	8,36	8,35	8,33	8,35
3	+	-	+	8,56	8,55	8,51	8,54
4	-	-	+	8,76	8,74	8,72	8,74
5	+	+	-	7,89	7,88	7,87	7,88
6	-	+	-	8,04	8,02	8,01	8,02
7	+	-	-	8,29	8,27	8,31	8,29
8	-	-	-	8,35	8,34	8,31	8,33

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$z_1$	2,3	1,9	2,1	0,2	$x_1 = 5,00 \quad z_1 - 10,50$
$z_2$	255	205	230	25	$x_2 = 0,04 \quad z_2 - 9,2$
$z_3$	0,944	0,828	0,886	0,058	$x_3 = 17,24 \quad z_3 - 15,276$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$b_0 =$	8,2863
$b_{1,2} =$	-0,0137

$b_1 =$	-0,0746
$b_{1,3} =$	-0,0279

$b_2 =$	-0,1896
$b_{2,3} =$	-0,0096

$b_3 =$	0,1546
$b_{1,2,3} =$	0,0112

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{\text{ср}}$	$(y_{j1}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j2}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j3}-y_{\text{ср}})^2$	$S_j^2$
1	8,15	8,14	8,12	8,1367	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
2	8,36	8,35	8,33	8,3467	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
3	8,56	8,55	8,51	8,5400	0,0004	0,0001	0,0009	0,0007
4	8,76	8,74	8,72	8,7400	0,0004	0,0000	0,0004	0,0004
5	7,89	7,88	7,87	7,8800	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
6	8,04	8,02	8,01	8,0233	0,0003	0,0000	0,0002	0,0002
7	8,29	8,27	8,31	8,2900	0,0000	0,0004	0,0004	0,0004
8	8,35	8,34	8,31	8,3333	0,0003	0,0000	0,0005	0,0004

Дисперсия воспроизводимости  $S^2_y = 0,0003$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{\text{коэф}} = 0,0038$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,008** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$b_0 =$	8,2863
$b_{1,2} =$	-0,0137

$b_1 =$	-0,0746
$b_{1,3} =$	-0,0279

$b_2 =$	-0,1896
$b_{2,3} =$	-0,0096

$b_3 =$	0,1546
$b_{1,2,3} =$	0,0112

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 8,286 - 0,0746 x_1 - 0,1896 x_2 + 0,1546 x_3 - 0,0137 x_1x_2 - 0,0279 x_1x_3 - 0,0096 x_2x_3 + 0,011 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	8,1367	8,3467	8,5400	8,740	7,880	8,023	8,290	8,333
$(y_j - y_{\text{ср}})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S^2_{\text{ост}} = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{\text{табл}} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = -15,302 + 10,297 z_1 + 0,076 z_2 + 27,9763 z_3 - 0,037 z_1z_2 - 11,329 z_1z_3 - 0,088 z_2z_3 + 0,039 z_1z_2z_3$$

## Приложение Б. Результаты расчета параметров уравнений регрессии для функции отклика «предел прочности при сжатии»

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): предел прочности при сжатии, МПа (для  $\Delta\rho_{\text{ср}} = 0,4 - 0,5 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$z_1^-$ : <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,5</span>	$z_2^-$ : <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">25</span>	$z_3^-$ : <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,494</span>
$z_1^+$ : <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,9</span>	$z_2^+$ : <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">75</span>	$z_3^+$ : <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,602</span>

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Исследуемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	
1	+	+	+	4,61	4,63	4,59	4,61
2	-	+	+	4,33	4,35	4,31	4,33
3	+	-	+	4,76	4,74	4,75	4,75
4	-	-	+	4,54	4,55	4,51	4,53
5	+	+	-	3,39	3,37	3,36	3,37
6	-	+	-	3,22	3,21	3,22	3,22
7	+	-	-	3,48	3,47	3,45	3,47
8	-	-	-	3,34	3,36	3,31	3,34

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной	
$z_1$	0,9	0,5	0,7	0,2	$x_1 = 5,00$	$z_1 - 3,50$
$z_2$	75	25	50	25	$x_2 = 0,04$	$z_2 - 2$
$z_3$	0,602	0,494	0,548	0,054	$x_3 = 18,52$	$z_3 - 10,148$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$b_0 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3,9521</span>	$b_1 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0979</span>	$b_2 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-0,0696</span>	$b_3 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,6038</span>
$b_{1,2} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0113</span>	$b_{1,3} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0263</span>	$b_{2,3} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-0,0163</span>	$b_{1,2,3} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0046</span>

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{\text{ср}}$	$(Y_{j1}-Y_{\text{ср}})^2$	$(Y_{j2}-Y_{\text{ср}})^2$	$(Y_{j3}-Y_{\text{ср}})^2$	$S_j^2$
1	4,61	4,63	4,59	4,6100	0,0000	0,0004	0,0004	0,0004
2	4,33	4,35	4,31	4,3300	0,0000	0,0004	0,0004	0,0004
3	4,76	4,74	4,75	4,7500	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
4	4,54	4,55	4,51	4,5333	0,0000	0,0003	0,0005	0,0004
5	3,39	3,37	3,36	3,3733	0,0003	0,0000	0,0002	0,0002
6	3,22	3,21	3,22	3,2167	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	3,48	3,47	3,45	3,4667	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
8	3,34	3,36	3,31	3,3367	0,0000	0,0005	0,0007	0,0006

Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = 0,0003$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{\text{коэф}} = 0,0036$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,008** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$b_0 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3,9521</span>	$b_1 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0979</span>	$b_2 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-0,0696</span>	$b_3 = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,6038</span>
$b_{1,2} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0113</span>	$b_{1,3} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0263</span>	$b_{2,3} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-0,0163</span>	$b_{1,2,3} = $ <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,0000</span>

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 3,952 + 0,0979 x_1 - 0,0696 x_2 + 0,6038 x_3 + 0,0113 x_1x_2 + 0,0263 x_1x_3 - 0,0163 x_2x_3 + 0,000 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	4,6054	4,3346	4,7546	4,529	3,378	3,212	3,462	3,341
$(Y_j - Y_{\text{ср}})^2$	0,000021	0,000021	0,000021	0,000021	0,000021	0,000021	0,000021	0,000021

Остаточная дисперсия  $S_{\text{ост}}^2 = 0,00050$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 1,64$

Уравнение адекватно

$F_{\text{табл}} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = -1,697 - 0,955 z_1 + 0,002 z_2 + 10,081 z_3 + 0,002 z_1z_2 + 2,431 z_1z_3 - 0,012 z_2z_3 + 0,0000 z_1z_2z_3$$

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): предел прочности при сжатии, МПа (для  $\Delta\rho_p = 0,5 - 0,6 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$z_1^-$ : 0,9	$z_2^-$ : 75	$z_3^-$ : 0,602
$z_1^+$ : 1,5	$z_2^+$ : 145	$z_3^+$ : 0,714

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	5,98	5,96	5,97	5,97
2	-	+	+	5,58	5,56	5,59	5,58
3	+	-	+	6,12	6,09	6,09	6,10
4	-	-	+	5,87	5,86	5,85	5,86
5	+	+	-	4,61	4,63	4,59	4,61
6	-	+	-	4,33	4,35	4,31	4,33
7	+	-	-	4,76	4,74	4,75	4,75
8	-	-	-	4,54	4,55	4,51	4,53

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$z_1$	1,5	0,9	1,2	0,3	$x_1 = 3,33 \quad z_1 - 4,00$
$z_2$	145	75	110	35	$x_2 = 0,029 \quad z_2 - 3,1429$
$z_3$	0,714	0,602	0,658	0,056	$x_3 = 17,86 \quad z_3 - 11,75$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$b_0 = 5,2163$	$b_1 = 0,1413$	$b_2 = -0,0946$	$b_3 = 0,6604$
$b_{1,2} = 0,0271$	$b_{1,3} = 0,0171$	$b_{2,3} = -0,0087$	$b_{1,2,3} = 0,0112$

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{cp}$	$(y_{j1}-y_{cp})^2$	$(y_{j2}-y_{cp})^2$	$(y_{j3}-y_{cp})^2$	$S_j^2$
1	5,98	5,96	5,97	5,9700	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
2	5,58	5,56	5,59	5,5767	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
3	6,12	6,09	6,09	6,1000	0,0004	0,0001	0,0001	0,0003
4	5,87	5,86	5,85	5,8600	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
5	4,61	4,63	4,59	4,6100	0,0000	0,0004	0,0004	0,0004
6	4,33	4,35	4,31	4,3300	0,0000	0,0004	0,0004	0,0004
7	4,76	4,74	4,75	4,7500	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
8	4,54	4,55	4,51	4,5333	0,0000	0,0003	0,0005	0,0004

Дисперсия воспроизводимости  $S^2_y = 0,0003$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{коэф} = 0,0033$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: 0,007 и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$b_0 = 5,2163$	$b_1 = 0,1413$	$b_2 = -0,0946$	$b_3 = 0,6604$
$b_{1,2} = 0,0271$	$b_{1,3} = 0,0171$	$b_{2,3} = -0,0087$	$b_{1,2,3} = 0,0112$

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 5,216 + 0,1413 x_1 - 0,0946 x_2 + 0,6604 x_3 + 0,0271 x_1x_2 + 0,0171 x_1x_3 - 0,0087 x_2x_3 + 0,011 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	5,9700	5,5767	6,1000	5,860	4,610	4,330	4,750	4,533
$(y_j - y_{cp})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S^2_{ост} = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{расч} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{табл} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = -3,653 + 0,903 z_1 + 0,012 z_2 + 13,589 z_3 - 0,010 z_1z_2 - 1,088 z_1z_3 - 0,027 z_2z_3 + 0,019 z_1z_2z_3$$

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): предел прочности при сжатии, МПа (для  $\Delta\rho_{\text{ф}} = 0,6 - 0,7 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$z_1^-$ :	1,5
$z_1^+$ :	1,9

$z_2^-$ :	145
$z_2^+$ :	205

$z_3^-$ :	0,714
$z_3^+$ :	0,828

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	7,38	7,36	7,34	7,36
2	-	+	+	6,72	6,71	6,69	6,71
3	+	-	+	7,41	7,39	7,42	7,41
4	-	-	+	7,34	7,33	7,32	7,33
5	+	+	-	5,98	5,96	5,97	5,97
6	-	+	-	5,58	5,56	5,59	5,58
7	+	-	-	6,12	6,09	6,09	6,10
8	-	-	-	5,87	5,86	5,85	5,86

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$z_1$	1,9	1,5	1,7	0,2	$x_1 = 5,00 \quad z_1 - 8,50$
$z_2$	205	145	175	30	$x_2 = 0,033 \quad z_2 - 5,8333$
$z_3$	0,828	0,714	0,771	0,057	$x_3 = 17,54 \quad z_3 - 13,526$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$b_0 = 6,5388$	$b_1 = 0,1704$	$b_2 = -0,1354$	$b_3 = 0,6621$
$b_{1,2} = 0,0912$	$b_{1,3} = 0,0121$	$b_{2,3} = -0,0321$	$b_{1,2,3} = 0,0529$

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{\text{ср}}$	$(y_{j1}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j2}-y_{\text{ср}})^2$	$(y_{j3}-y_{\text{ср}})^2$	$S_j^2$
1	7,38	7,36	7,34	7,3600	0,0004	0,0000	0,0004	0,0004
2	6,72	6,71	6,69	6,7067	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
3	7,41	7,39	7,42	7,4067	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
4	7,34	7,33	7,32	7,3300	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
5	5,98	5,96	5,97	5,9700	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
6	5,58	5,56	5,59	5,5767	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
7	6,12	6,09	6,09	6,1000	0,0004	0,0001	0,0001	0,0003
8	5,87	5,86	5,85	5,8600	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001

Дисперсия воспроизводимости  $S^2_y = 0,0002$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{\text{коэф}} = 0,0030$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,006** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$b_0 = 6,5388$	$b_1 = 0,1704$	$b_2 = -0,1354$	$b_3 = 0,6621$
$b_{1,2} = 0,0912$	$b_{1,3} = 0,0121$	$b_{2,3} = -0,0321$	$b_{1,2,3} = 0,0529$

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 6,539 + 0,1704 x_1 - 0,1354 x_2 + 0,6621 x_3 + 0,0912 x_1x_2 + 0,0121 x_1x_3 - 0,0321 x_2x_3 + 0,053 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	7,3600	6,7067	7,4067	7,330	5,970	5,577	6,100	5,860
$(y_j - y_{\text{ср}})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S^2_{\text{ост}} = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{\text{табл}} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = -35,183 + 18,250 z_1 + 0,187 z_2 + 59,128 z_3 - 0,104 z_1z_2 - 26,017 z_1z_3 - 0,282 z_2z_3 + 0,155 z_1z_2z_3$$

1. Объект исследования: кембрийская глина (Ленинградская область)

2. Функция отклика (y): предел прочности при сжатии, МПа (для  $\Delta\rho_p = 0,7 - 0,8 \text{ г/см}^3$ )

3. Факторы:  $z_1$  – содержание базальтовой фибры, кг;  $z_2$  – содержание шамота, кг;  $z_3$  – плотность ПГМ,  $\text{г/см}^3$

$z_1^-$ :	1,9
$z_1^+$ :	2,3

$z_2^-$ :	205
$z_2^+$ :	255

$z_3^-$ :	0,828
$z_3^+$ :	0,944

4. Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$ :

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты эксперимента			Среднее значение эксперимента
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	+	+	+	8,63	8,58	8,59	8,60
2	-	+	+	8,22	8,24	8,21	8,22
3	+	-	+	8,84	8,81	8,85	8,83
4	-	-	+	8,42	8,41	8,39	8,41
5	+	+	-	7,38	7,36	7,34	7,36
6	-	+	-	6,72	6,71	6,69	6,71
7	+	-	-	7,41	7,39	7,42	7,41
8	-	-	-	7,34	7,33	7,32	7,33

5. Кодирование факторов:

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной	
$z_1$	2,3	1,9	2,1	0,2	$x_1 = 5,00$	$z_1 - 10,50$
$z_2$	255	205	230	25	$x_2 = 0,04$	$z_2 - 9,2$
$z_3$	0,944	0,828	0,886	0,058	$x_3 = 17,24$	$z_3 - 15,276$

6. Матрица планирования для обработки результатов:

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

7. Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$b_0 =$	7,8583
$b_{1,2} =$	0,0658

$b_1 =$	0,1917
$b_{1,3} =$	0,0092

$b_2 =$	-0,1358
$b_{2,3} =$	0,0317

$b_3 =$	0,6575
$b_{1,2,3} =$	-0,0783

8. Расчет выборочных дисперсий:

j	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_{cp}$	$(y_{j1}-y_{cp})^2$	$(y_{j2}-y_{cp})^2$	$(y_{j3}-y_{cp})^2$	$S_j^2$
1	8,63	8,58	8,59	8,6000	0,0009	0,0004	0,0001	0,0007
2	8,22	8,24	8,21	8,2233	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
3	8,84	8,81	8,85	8,8333	0,0000	0,0005	0,0003	0,0004
4	8,42	8,41	8,39	8,4067	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
5	7,38	7,36	7,34	7,3600	0,0004	0,0000	0,0004	0,0004
6	6,72	6,71	6,69	6,7067	0,0002	0,0000	0,0003	0,0002
7	7,41	7,39	7,42	7,4067	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002
8	7,34	7,33	7,32	7,3300	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001

Дисперсия воспроизводимости  $S^2_y = 0,0003$

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов  $S_{коэф} = 0,0037$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии: **0,008** и более

9. Коэффициенты уравнения регрессии после проверки:

$b_0 =$	7,8583
$b_{1,2} =$	0,0658

$b_1 =$	0,1917
$b_{1,3} =$	0,0092

$b_2 =$	-0,1358
$b_{2,3} =$	0,0317

$b_3 =$	0,6575
$b_{1,2,3} =$	-0,0783

10. Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 7,858 - 0,1917 x_1 - 0,1358 x_2 + 0,6575 x_3 + 0,0658 x_1x_2 + 0,0092 x_1x_3 + 0,0317 x_2x_3 - 0,078 x_1x_2x_3$$

11. Проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера:

$y^j$	8,6000	8,2233	8,8333	8,407	7,360	6,707	7,407	7,330
$(y_j - y_{cp})^2$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Остаточная дисперсия  $S^2_{ост} = 0,00000$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{расч} = 0,00$

Уравнение адекватно

$F_{табл} = 4,49$

12. Уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = 124,924 - 57,814 z_1 - 0,555 z_2 - 125,81 z_3 + 0,252 z_1z_2 + 62,917 z_1z_3 + 0,589 z_2z_3 - 0,270 z_1z_2z_3$$

## Приложение В. Служебная записка. Тестирование азрированных керамических образцов



Акционерное общество  
«Боровичский комбинат огнеупоров»

Гриф: Нет грифа

Код формы АО БКО

Д000134

Начальнику отдела  
Гершковичу С. И.

ВП-28-19717  
17.11.2017

### СЛУЖЕБНАЯ ЗАПИСКА

(Тестирование азрированных керамических образцов)

В октябре 2017 г. в ЦСТиП поступило три образца азрированного керамического кирпича (г.Колпино): сырец – 2 образца (кусок от угла и кирпич) и кирпич после обжига.  
Внешний вид образцов представлен на фото 1, 2.

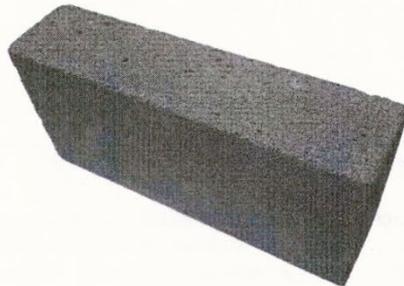


Фото №1. Сырец кирпича азрированного керамического, 254x120x61 мм.



Фото №2. Кирпич азрированный керамический после обжига, 249x113x56 мм.

СЭД АО БКО ИД 4241096

Исполнитель: Вихрова Наталья Владимировна, Центр совершенствования технологий и производства,  
Ведущий инженер, тел. 28-89, nvihrova@aobko.ru

На образцах были определены качественные показатели, представленные в таблице 1.  
Таблица 1. Качественные показатели и химический состав образцов.

Наименование показателя	Сырец кирпича азрированного керамического (образец №1)	Кирпич азрированный керамический (образец №2)
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	0,58	0,55
Предел прочности при сжатии, Н/мм <sup>2</sup>	0,45	23,0
Температура начала размягчения, °С	-	1060
Остаточные изменения размеров, при температуре 1150°С	-	-7,9 -7,9
Теплопроводность, Вт/(М·К), при T <sub>ср</sub> =350°С T <sub>ср</sub> =650°С	-	0,23 0,27
Массовая доля, %	<b>СРМ-25</b>	<b>СРМ-25</b>
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,4	36,9
- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,61	1,73
- TiO <sub>2</sub>	1,87	1,90
- SiO <sub>2</sub>	58,6	57,4
- CaO	0,60	0,59
- Na <sub>2</sub> O	0,35	0,29
- K <sub>2</sub> O	0,98	0,98
- MgO	0,59	0,52
- ппп	9,42	0,92
- P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-
- SO <sub>3</sub>	-	-
Усадка изделий при термообработке составила 2,0×5,8×8,2 %		

Из данных, представленных в таблице 1, видно, что как сырец азрированного керамического кирпича, так и изделие после обжига, имеют идентичный химический состав.

Необходимо отметить, что при низкой кажущейся плотности изделия после обжига 0,55 г/см<sup>3</sup> показатель предела прочности при сжатии имеет высокое значение – 23,0 Н/мм<sup>2</sup>.

Начальник

А. Н. Иксанова

Приложение 1.

СЭД АО БКО ИД 4241096

Исполнитель: Вихрова Наталья Владимировна, Центр совершенствования технологий и производства,  
Ведущий инженер, тел. 28-89, nvihrova@aobko.ru

**Исследование образцов аэрированного керамического кирпича, г. Колпино.**

Наименование образцов	1. Образец– сырец №1 (маленький); 2. Образец– сырец №2 – сырец (большой); 3. Образец № 3 – обожжённое изделие.
Задачи исследования	Анализ структуры образцов, компонентный состав
Оборудование	Стереомикроскоп «Nikon» SMZ800; сканирующий электронный микроскоп «JEOL-6380LV»

**Результаты исследования:**

Предоставленные на анализ образцы изучались на сколах и срезах с помощью стереомикроскопа и электронного микроскопа.

**Образец – сырец №1 (маленький) и образец – сырец № 2 (большой).**

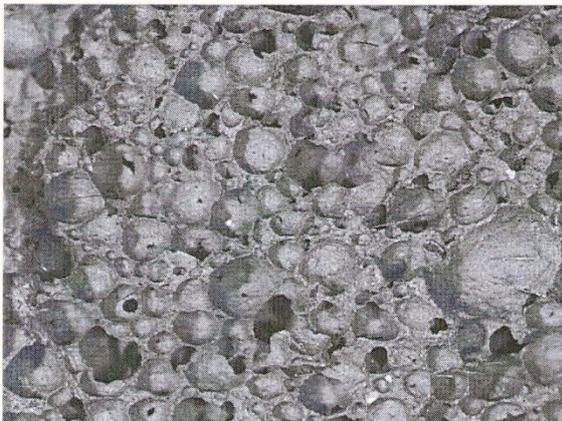


Фото 1. Внешний вид скола образца №1, х 10.



Фото 2. Внешний вид скола образца №2, х 10.

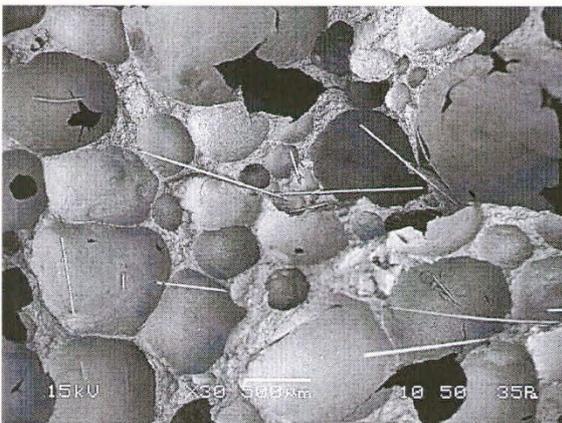


Фото 3. Электронно-микр. изображение обр. №1.



Фото 4. Электронно-микр. изображение обр. №2.

СЭД АО БКО ИД 4241096

Исполнитель: Вихрова Наталья Владимировна, Центр совершенствования технологий и производства,  
Ведущий инженер, тел. 28-89, nvihrova@aobko.ru

Приложение Г. Диплом победителя конкурса  
«Инновации в строительстве 2019»



В рамках Международной выставки «ИнтерСтройЭкспо»  
18–20 апреля 2019 | Россия, Санкт-Петербург

# ДИПЛОМ

Победителя конкурса  
**ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ 2019**



## II СТЕПЕНИ

в номинации «Материалы и технологии, используемые  
при строительстве зданий и сооружений»

награждается компания

## ИНФОСМИТ

за аэрированные керамические изделия  
для энергоэффективного строительства Air Ceramic

Организаторы:



Правительство  
Санкт-Петербурга  
Комитет  
по строительству



Международная  
Выставочная  
Компания  
Компания МВК  
Офис в Санкт-Петербурге

Л. В. Кулаков  
Председатель Комитета  
по строительству Санкт-Петербурга

И. Любина  
Директор компании МВК  
в Санкт-Петербурге

## Приложение Д. Акт № 15 от 24.08.2018. О производстве опытно-промышленной партии азрированного керамического кирпича



РОССИЯ

### Акционерное общество «БОРОВИЧСКИЙ КОМБИНАТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

174409, Новгородская область, г. Боровичи, ул. Загородная, д.38  
Тел/Факс (81664) 4-82-64, 4-82-68    E-mail: [brickred@mail.ru](mailto:brickred@mail.ru)    ИНН 5320013632

#### Акт № 15 от 24.08.2018г.

О выпуске опытно-промышленной партии азрированных керамических изделий (АКИ)

В период с 08.06.2018г. по 23.08.2018г. на территории производственного комплекса Боровичского комбината строительных материалов (АО «БКСМ», 174409, Новгородская обл., г. Боровичи, ул. Загородная, д. 38) осуществлен выпуск опытно-промышленной партии АКИ в виде кирпичей с размерами 250×120×65 мм средней плотностью 400-800 кг/м<sup>3</sup> в количестве 8000 шт.

Производство изделий осуществлялось по проекту технологического регламента, разработанного Центром строительных материалов и технологий «ИНФОСМИТ» (ООО «ИНФОСМИТ»).

Полученные АКИ имеют физико-механические показатели, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические показатели опытно-промышленной партии АКИ

Наименование показателя	Значение показателя				
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5
Предел прочности при сжатии, МПа	3,19	4,16	5,23	6,27	7,45
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	431,3	511,6	589,7	670,9	752,1
Общая пористость, %	82,6	79,4	76,1	72,9	69,6

Компонентный состав опытной партии АКИ: боровичско-люббытинская глина (АО «БКСМ»), базальтовая фибра с длиной волокон 13 мм (ТУ 5952-036-05328981), натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078), синтетический углеводородный пенообразователь «ПБ-Формула 2012» (ТУ 2481-008-80824910-2012), шамотный порошок ПШМБ (АО «БКО»), вода техническая.

В выпуске опытно-промышленной партии участвовали:

от АО «БКСМ» г. Боровичи:  
Главный инженер



/ Павлов А.П. /  
(подпись)

от СПбГАСУ г. Санкт-Петербург:  
инженер



/ Дмитриев К.С. /  
(подпись)

от ООО «ИНФОСМИТ» г. Санкт-Петербург:  
начальник лаборатории



/ Пикалова Е.А. /  
(подпись)

Приложение Е. Патент на изобретение РФ №2663980 «Способ изготовления аэрированных керамических изделий»



**Приложение Ж. Свидетельство о включении в «Реестр новых научных направлений-2018»**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ УЧЕНЫХ, ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ

# СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВКЛЮЧЕНИИ В «РЕЕСТР НОВЫХ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ»

№ 0138 (7.05.2018)

**Дмитриев Константин Сергеевич**  
Новое научное направление

**«Технология аэрированной керамики  
для стеновых ограждающих  
конструкций»**

05.23.05 Строительные материалы и изделия

Главный научный секретарь  
к.м.н., профессор РАЕ



Н.Ю.Стукова

