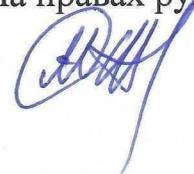


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Дагестанский государственный технический университет»**

На правах рукописи



**Гаджиев Абдулла Магомедсаламович**

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖАРОСТОЙКОГО  
КЕРАМЗИТОБЕТОНА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ  
ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВОМ СМЕСИ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Хаджишалапов Г.Н.

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 5  |
| ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ .....   | 13 |
| 1.1. Жаростойкие бетоны на портландцементе и пути расширения<br>области их эффективного применения .....   | 13 |
| 1.2. Выбор керамзитового заполнителя для жаростойких бетонов .....   | 19 |
| 1.3. Выбор минеральной добавки для композиционного вяжущего .....  | 24 |
| 1.4. Предварительный электрорагрев бетонной смеси, области его<br>использования .....  | 27 |
| 1.5. Цель и задачи исследований .....  | 33 |
| Выводы по первой главе .....   | 34 |
| ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ<br>ИССЛЕДОВАНИЯ .....  | 35 |
| 2.1. Исходные сырьевые материалы .....   | 35 |
| 2.2. Оборудование .....  | 40 |
| 2.3. Подбор состава жаростойкого керамзитобетона .....   | 62 |
| ГЛАВА 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВ СМЕСИ ДЛЯ<br>ЖАРОСТОЙКИХ БЕТОНОВ НА КЕРАМЗИТОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ С<br>КОМПОЗИЦИОННЫМ ВЯЖУЩИМ .....                          | 66 |
| 3.1. Технология предварительного электрорагрева смеси для жаростойких<br>бетонов .....   | 66 |
| 3.2. Математическое моделирование процесса предварительного<br>электрорагрева смеси для жаростойких бетонов .....  | 67 |
| 3.3. Исследование влияния различных режимов предварительного<br>электрорагрева смеси на свойства жаростойкого керамзитобетона на<br>композиционном вяжущем ..... | 74 |
| Выводы по третьей главе .....  | 87 |

|  |     |
|--|-----|
| ГЛАВА 4. ЖАРОСТОЙКИЕ БЕТОНЫ НА КЕРАМЗИТОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВОМ СМЕСИ .....  | 89  |
| 4.1. Влияние зернового состава заполнителя на свойства жаростойкого керамзитобетона .....  | 89  |
| 4.2. Физико-химические исследования жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси .....   | 92  |
| 4.3. Теплофизические исследования жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси .....                                      | 116 |
| 4.4. Исследование влияния технологических факторов на свойства жаростойкого бетона с предварительным электроразогревом смеси .....                                     | 129 |
| 4.5. Выбор режима тепловой обработки изделий из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе .....  | 143 |
| Выводы по четвертой главе .....  | 148 |
| ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖАРОСТОЙКОГО БЕТОНА НА КЕРАМЗИТОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ .....                                  | 152 |
| 5.1. Опытное-промышленное производство жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с композиционным вяжущим .....  | 152 |
| 5.2. Технико-экономическое обоснование эффективности применения жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси .....        | 158 |
| Выводы по пятой главе .....  | 162 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 163 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....   | 166 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ .....   | 182 |
| Приложение А. Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в производство на базе ООО «СпецРемСтройМонтаж» ..... | 183 |
| Приложение Б. Акт о внедрении результатов научно-исследовательских   |     |

|  |     |
|--|-----|
| работ в учебный процесс .....  | 184 |
| Приложение В. Акт № 00000213 от 30.12.2020 об оказании услуг .....   | 185 |
| Приложение Г. Справка о внедрении составов жаростойких бетонов .....   | 186 |
| Приложение Д. Технологический регламент на изготовление блоков для жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси ..... | 187 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Модернизация строительного комплекса является актуальной задачей и неразрывно связана с разработкой и внедрением новых и развитием существующих технологий и материалов. В различных отраслях промышленности при строительстве новых и модернизации или ремонте существующих тепловых агрегатов эффективно применяются новые виды огнеупорных материалов. Перспективным направлением является применение жаростойких бетонов на пористых заполнителях с использованием в качестве тонкомолотой минеральной добавки продуктов, полученных на основе местного минерального сырья, в т.ч. по схеме применения композиционного вяжущего.

В соответствии с законом «О промышленной политике РФ» от 31.12.2014 г. и законом «О промышленной политике РД» №116 от 08.12.2015 г. в Республике Дагестан создан промышленный кластер строительных материалов. Основным участником кластера выступает АО «Каспийский завод листового стекла». Кластер создан благодаря поддержке Ассоциации содействия развитию кластеров и технопарков в России. Решение о создании кластера строительных материалов в Республике Дагестан принято в связи с тем, что регион обладает огромными запасами минерального сырья для производства различных строительных материалов. В Республике Дагестан в настоящее время функционируют достаточно много предприятий строительной индустрии, которые уже сегодня производят различные строительные материалы: завод по производству керамических плиток, завод по производству гипсосодержащих изделий, Каспийский и Хасавюртовский кирпичные заводы, Махачкалинский и Кизилюртовский заводы керамзитовых заполнителей, Буйнакский цементный завод и стекольный завод «Дагестанские Огни».

Применение жаростойких бетонов на пористых заполнителях и модифицированных композиционных вяжущих из местного минерального сырья взамен штучных огнеупоров при футеровке различных тепловых агрегатов позволяет снизить материалоемкость футеровки до 35 %, теплотери, и,

закономерно, расход энергии до 12 %, получить экономию энергозатрат в процессе изготовления и эксплуатации футеровки до 30 %.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время существует большой объем исследований, направленных на получение жаростойких бетонов для футеровки различных тепловых агрегатов промышленности строительной индустрии, металлургической, нефтехимической промышленности, а также предприятий электроэнергетики. Проведены обширные исследования в области лёгких жаростойких бетонов. Вопросы получения лёгких жаростойких бетонов с применением керамзитового заполнителя Кизилюртовского керамзитового завода и активированного композиционного вяжущего с минеральной добавкой из обожженного аргиллита из местного минерального сырья Республики Дагестан с предварительным электроразогревом смеси для повышения эксплуатационных свойств в настоящее время не имеют достаточного научного обоснования.

Исследования в области повышения огнестойкости строительных конструкций, жаростойких портландцементных бетонов на пористых заполнителях, в т.ч. с предварительным электропрогревом бетонных смесей проводились такими учёными, как Горлов Ю.П., Жуков В.В., Масленникова М.Г., Милованов А.Ф., Михальчук П.А., Некрасов К.Д., Перцев В.Т., Ремнев В.В., Тарасов А.П., Тотурбиев Б.Д., Федоров А.Е., Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А. и др. При этом вопросы, связанные с особенностью формирования структуры и свойств жаростойкого керамзитобетона с применением, в качестве тонкомолотой добавки, обожженной аргиллитовой глины, вводимой в бетонную смесь в составе комплексного вяжущего на основе портландцемента, с использованием предварительного сквозного электропрогрева на первой стадии тепловлажностной обработки практически не освещены.

**Цель работы.** Разработка научно обоснованного технологического решения получения жаростойкого керамзитобетона с применением предварительного электроразогрева керамзитобетонной смеси с тонкомолотой добавкой из

обожженной аргиллитовой глины, вводимой в бетонную смесь в составе активированного композиционного вяжущего.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– определены рациональные составы композиционного вяжущего, полученного активацией портландцемента и тонкомолотой добавки из обожженного серого аргиллита;

– обоснованы технологические параметры получения жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– выявлены закономерности изменения от температуры нагрева прочностных, деформационных и теплофизических свойств жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– разработана технологическая схема производства жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– выпущена опытная партия жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем, разработан технологический регламент производства жаростойких бетонов с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– выполнено технико-экономическое обоснование эффективности применения керамзитового гравия и песка Кизилюртовского керамзитового завода для производства футеровочных блоков с температурой применения до 1000 °С из жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси на активированном композиционном вяжущем.

#### **Научная новизна работы:**

– развиты научные представления о количественном изменении содержания несвязанных оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  при реализации предварительного электроразогрева смеси в формах жаростойкого портландцементного керамзитобетона с тонкомолотой добавкой из обожженного аргиллита и их

влиянии на процесс связывания свободных оксидов кальция, образующихся при дегидратации гидроксида;

– доказано, что при реализации предварительного электроразогрева смеси в формах вследствие повышения содержания несвязанных оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  и образования алюмината магния  $\text{Mg}(\text{AlO}_2)_2$ , гидроксида алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и катоита  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$  вследствие их высокой стойкости к температурным и химическим воздействиям и формирования контактного слоя «пористый наполнитель – цементный камень» повышенной плотности обеспечивается рост механической прочности жаростойкого портландцементного керамзитобетона бетона с тонкомолотой добавкой из обожженного аргиллита;

– выявлены основные закономерности влияния рецептурно-технологических факторов: дозы тонкомолотой добавки, состава бетона, продолжительности активации комплексного вяжущего, способа приготовления смеси и формования изделий, продолжительности и температуры предварительного электроразогрева бетонной смеси на изменение прочностных, деформационных и теплофизических свойств жаростойкого керамзитобетона в зависимости от температуры нагрева.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

– выявлена роль предварительного электроразогрева керамзитобетонной смеси в формах в обеспечении улучшения прочностных, деформационных и теплофизических свойств жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем «портландцемент + тонкомолотая минеральная добавка из обожженного аргиллита» с механической активацией на Активаторе-4М вследствие увеличения числа активных молекул вяжущего за счет эффекта самопропаривания и уменьшения миграции влаги в поровых перегородках, что обеспечивает ускорение реакции гидратации вследствие роста химического взаимодействия по причине повышения числа эффективных поверхностей;

– развиты научные представления о влиянии процессов теплообмена и массопереноса при электроразогреве смеси в формах при температуре 60...90 °С и сушке при температуре 105 °С на состав новообразований, формирование

структуры и свойств цементного камня и контактной зоны «пористый заполнитель – цементный камень»;

– выявлены закономерности изменения прочностных, деформационных и теплофизических свойств жаростойкого керамзитобетона, полученного с применением предварительного электроразогрева бетонной смеси в формах на композиционном вяжущем;

– уточнены количественные значения влияния рецептурно-технологических факторов на прочностные, деформационные и теплофизические свойства жаростойкого керамзитобетона, полученного с применением предварительного электроразогрева бетонной смеси в формах на композиционном вяжущем;

– доказана возможность эффективного использования керамзитового гравия и песка Кизилюртовского керамзитового завода и композиционного вяжущего «портландцемент + тонкомолотая минеральная добавка из обожженного аргиллита» после механической активации на Активаторе-4М для производства с предварительным электроразогревом смеси в формах жаростойких керамзитобетонных изделий с температурой применения до 1000 °С;

– разработаны составы композиционного вяжущего и керамзитобетонной смеси, технологические параметры производства жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси в формах на композиционном вяжущем;

– разработан технологический регламент на производство жаростойких изделий – блоков размером 700×400×200 мм для футеровки стен туннельной печи из разработанного жаростойкого керамзитобетона класса по предельно допустимой температуре применения И10 и класса по прочности на сжатие В10 с общим экономическим эффектом 33 тыс. 658 руб/м<sup>3</sup>.

Результаты экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс ДГТУ при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 Строительство, профили подготовки «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», «Промышленное и гражданское строительство», специальности 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

**Методология и методы исследования.** Методы исследования жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем из местного минерального сырья с предварительным электроразогревом смеси в формах основаны на фундаментальных положениях технологии жаростойких бетонов. Экспериментальные исследования по оптимизации режимов предварительного электроразогрева смеси в формах до сушки при температуре 105 °С, изучению влияния рецептурно-технологических факторов на свойства жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем с использованием местного сырья проведены с применением методов математической статистики. Исследования процессов формирования структуры и её влияния на свойства жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем проведены по методикам действующих стандартов. Теплофизические и термомеханические исследования свойств бетона проводились по исследовательским методикам.

**Положения, выносимые на защиту:**

– научно обоснованное технологическое решение получения с применением предварительного электроразогрева смеси жаростойкого керамзитобетона с тонкомолотой добавкой из обожженной аргиллитовой глины, вводимой в бетонную смесь в составе активированного композиционного вяжущего;

– результаты оценки количественного изменения при реализации предварительного электроразогрева керамзитобетонной смеси в формах на комплексном вяжущем «портландцемент + тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита» содержания несвязанных оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  алюмината магния  $\text{Mg}(\text{AlO}_2)_2$ , гидроксида алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и катоита  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$  и их влияния на свойства жаростойкого керамзитобетона;

– параметры целесообразного режима приготовления и уплотнения жаростойкой керамзитобетонной смеси, влияние рецептурно-технологических факторов на прочность, усадку, теплофизические свойства, температурные деформации, в т.ч. под нагрузкой, термостойкость жаростойкого керамзитобетона на комплексном вяжущем «портландцемент + тонкомолотая минеральная добавка из обожженного аргиллита».

**Степень достоверности полученных результатов.** Степень обоснованности и достоверности научных исследований, теоретических и практических выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена достаточным объемом экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях с использованием современных методов исследований и инструментальных средств измерения на аттестованном оборудовании.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Дагестанского государственного технического университета (г. Махачкала, 2009-2022 г.г.); научных семинарах кафедр технологии и организации строительного производства, строительных материалов и инженерных сетей Дагестанского государственного технического университета; Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерные технологии в строительстве» (г. Махачкала, 2011 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Высокотехнологичные и энергоэффективные технологии и материалы в современном строительстве» (г. Махачкала, 2014 г.); Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет» имени акад. М.Д. Миллионщикова. (г. Грозный, 2015 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Новые строительные технологии и материалы» (г. Махачкала, 2016 г.); межрегиональной с международным участием специализированной строительно-архитектурной выставке-форуме «ДАГСТРОЙЭКСПО – 2016, 2017 г.» (г. Махачкала); научно-техническом совещании Министерства промышленности и торговли Республики Дагестан (г. Махачкала, 2016 г.); научно-техническом совещании Министерства строительства и ЖКХ Республики Дагестан (г. Махачкала, 2022 г.).

**Внедрение результатов исследований.** Осуществлен выпуск опытной партии блоков из жаростойкого керамзитобетона на основе композиционного вяжущего с предварительным электроразогревом смеси в ООО «СпецРемСтройМонтаж» (г. Махачкала).

Разработан технологический регламент на изготовление блоков для жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 Строительство, магистров по направлению 08.04.01 Строительство.

**Публикации.** По результатам исследований опубликованы 15 научных статей, в том числе 6 публикаций в рецензируемых изданиях ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus и Web of Science.

**Личный вклад автора.** Заключается в планировании и реализации экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследования в практику производства строительных материалов и изделий. Основные научные результаты получены соискателем лично.

**Структура и объем диссертаций.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, заключения, списка литературы из 150 наименований и 5 приложений. Диссертация изложена на 195 страницах и включает 55 рисунков и 26 таблиц.

Автор выражает благодарность за научные консультации д.т.н., профессору Т.А. Хежеву.

**Область исследований** соответствует паспорту научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия, п.9 «Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья ...», п.16 «Разработка методов и средств для создания эффективных специальных материалов ... для строительства специальных объектов ...».

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1.1. Жаростойкие бетоны на портландцементе и пути расширения области их эффективного применения

Научно-технический прогресс в строительстве неразрывно связан с применением новых видов строительных материалов и конструкций, повышением эксплуатационных показателей изделий и конструкций, применением для изготовления строительных материалов местного минерального сырья, продукции действующих предприятий промышленности строительной индустрии, отходов промышленности с целью защиты окружающей среды от загрязнения. Важное место среди эффективных строительных материалов занимают жаростойкие бетоны и конструкции из него.

Вопросам применения жаростойких бетонов и бетонов подверженных воздействию высоких температур, которые коренным образом решили вопрос комплексной механизации работ при возведении тепловых агрегатов, благодаря переходу от мелкогабаритных штучных огнеупорных изделий к крупным блокам и панелям, посвящены работы [1-5, 14, 16, 27, 29, 36, 37, 146].

В Российской Федерации исследования, связанные с разработкой жаростойких бетонов, впервые были начаты в начале 30-х годов прошлого столетия в центральном научно-исследовательском институте промышленных сооружений (ЦНИИПС), в дальнейшем получили широкое развитие в лаборатории жаростойких бетонов и огнестойкости конструкций в научно-исследовательском, проектно-технологическом институте бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева (НИИЖБ им. А. А. Гвоздева), в Московском государственном строительном университете (МГСУ), в Дагестанском государственном техническом университете и в других научно-исследовательских институтах и высших учебных заведениях нашей страны и за рубежом.

Современные тепловые агрегаты представляют собой крупные и сложные инженерные сооружения, работающие в условиях тяжелого температурного режима, воздействия нагрузки и во многих случаях – агрессивной среды. Физико-

химические процессы, протекающие под воздействием высоких температур, изменяют прочностные, упругие и упруго-пластические свойства огнеупорных материалов, которые применяются при устройстве теплоизоляции и футеровки тепловых агрегатов. Одновременное воздействие высокой температуры и нагрузки приводит к развитию пластических деформаций. Агрессивная среда способствует коррозии материалов, которая приводит к ускорению их разрушений.

Снижение стоимости и повышение продолжительности службы промышленных печей, труб, боровов и других тепловых агрегатов в ряде случаев могут быть достигнуты за счет применения в этих конструкциях жаростойких бетонов. Жаростойкий бетон по сравнению с дорогостоящей огнеупорной кладкой имеет ряд преимуществ, связанных с применением простых и доступных технологических решений при возведении жаростойких конструкций в тепловых агрегатах. Применение крупных блоков, панелей и сборных элементов из жаростойкого бетона и железобетона открывает широкие возможности применения материалов из местного минералогического сырья для строительства теплотехнических сооружений.

Применение жаростойких теплоизоляционных материалов и изделий призвано обеспечить: снижение затрат теплоты и продолжительности разогрева ограждающих конструкций тепловых агрегатов; уменьшение теплопотерь через ограждающие конструкции тепловых агрегатов и тепловых сетей; снижение расхода основных, как правило дефицитных и дорогостоящих материалов, идущих на возведение тепловых и технологических агрегатов (снижение материалоемкости); защиту технологического оборудования и строительных конструкций от вредного воздействия высоких температур; создание нормальных условий для работы людей в горячих цехах и др. Все это многообразие требований одновременно не может выполнять ни один теплоизоляционный материал. Поэтому промышленность выпускает большое количество видов жаростойких теплоизоляционных материалов с различными заданными свойствами [140].

Наибольшая экономическая эффективность от применения тепловой изоляции горячих поверхностей, т. е. наибольшее сокращение теплотерь достигается при целенаправленном применении теплоизоляционных материалов. Для каждого температурного диапазона существует свой наиболее оптимальный по физико-механическим, физико-химическим и теплофизическим показателям, теплоизоляционный жаростойкий материал, характеризующийся определенной пористой структурой и хорошо сопротивляющийся высокотемпературному воздействию. Повышение температуры эксплуатации требует применения материалов с большей огнеупорностью и в зависимости от условий эксплуатации в нужном направлении изменять его химический и вещественный состав. Изменять пористую структуру материала в направлении существенного уменьшения размера пор, но сохраняя при этом или даже увеличивая общую пористость материала. Как показывает практика, дисперсность пористости оказывает большое влияние на теплофизические свойства жаростойкого теплоизоляционного материала.

Как указано в работе [140], в настоящее время в нашей стране производится широкий ассортимент жаростойких теплоизоляционных материалов для различных условий службы. Так, электроэнергетика широко использует минеральную вату и изделия из нее, асбестосодержащие известково-кремнеземистые изделия (температура службы до  $600^{\circ}\text{C}$ ), изделия из перлита, вермикулита с рабочей температурой применения  $700-900^{\circ}\text{C}$ . Промышленность строительных материалов применяет широкий круг жаростойких теплоизоляционных материалов: диатомитовые обжиговые изделия (рабочая температура до  $850^{\circ}\text{C}$ ), перлитокерамические (перлитошамотные) изделия с рабочей температурой до  $1100^{\circ}\text{C}$ , шамотные (алюмосиликатные) изделия с температурой службы до  $1200^{\circ}\text{C}$ . В черной, цветной металлургии, нефтехимической и химической промышленности и других отраслях народного хозяйства применяют шамотные, глиноземистые, высокоглиноземистые, корундовые высокопористые огнеупоры с рабочей температурой от  $1150$  до  $1600^{\circ}\text{C}$ .

В последнее десятилетие широкое применение в высокотемпературной теплоизоляции получили теплоизоляционные материалы, получаемые на основе огнеупорных волокон, характеризующиеся наиболее низкой теплопроводностью и высокой термической стойкостью. Для производства теплоизоляционных изделий используют самые различные сырьевые материалы: вспучивающиеся при нагревании в виде вермикулита, асбеста, керамзита или стекловидных пород типа смоляного камня, обсидиана и перлита и природные пористые в виде инфузорной земли, диатомита или трепела, а также различные сырьевые материалы, обычно применяемые в производстве плотных огнеупорных изделий. Кроме перечисленных материалов, для изготовления этих изделий используют также синтетические пористые полуфабрикаты, вводимые в исходные массы самостоятельно либо в комбинации с какими-либо порообразователями. Для образования пор в изделиях применяют выгорающие добавки, а также пенообразующие газовыделяющие и испаряющиеся вещества. В качестве выгорающих добавок используют опилки и мелкодисперсные порошки каменноугольного, буроугольного и нефтяного кокса, а также другие органические продукты, например, полистирол. Тип выгорающей добавки, в особенности ее поведение при нагревании и остаток после выгорания, значительно влияет на эксплуатационные свойства легковесных изделий. Характерным остатком являются черные зерна, образующиеся при слабо окислительных условиях обжига в изделиях, преимущественно изготовляемых методом пластического формования. Методом выгорающих добавок производят изделия, в основном предназначенные для использования при относительно низких температурах и характеризующиеся сравнительно высокой теплопроводностью.

В данной работе были проанализированы и изучены возможности получения жаростойкого бетона с температурой применения до 1000 °С с применением местного минерального сырья и попутных продуктов производства (керамзитового гравия и песка, тонкомолотой обожженной аргиллитовой глины в качестве минеральной добавки к портландцементу) с улучшенными эксплуатационными

свойствами с предварительным электроразогревом бетонной смеси в формах до сушки при температуре 105 °С. Жаростойкий бетон на керамзитовом заполнителе оценивался по следующим критериям:

- степени научной и практической проработки различных видов жаростойких бетонов;
- стойкости бетонов к воздействию высоких температур;
- изменения прочности, структуры и состава при тепловом воздействии;
- влияния предварительного электроразогрева бетонной смеси на эксплуатационные свойства жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе;
- долговечности и возможности длительной эксплуатации при высоких температурах изделий из жаростойких бетонов, исходя из опыта их использования в тепловых агрегатах различного назначения;
- наличия исходных материалов и производственной базы для изготовления жаростойких бетонов в Северо-Кавказском регионе.

С целью создания жаростойких бетонов были проведены обширные исследования, направленные на изучение физико-химических реакций, протекающих в процессе структурообразования при нагреве и выявлении возможности их использования в диапазоне температур 300-1000 °С. Основные полученные результаты исследований, опыт внедрения и применения приведены в работах: [6-13, 15, 17-28, 30-35, 38].

В строительстве тепловых агрегатов предприятий промышленности строительной индустрии, нефтехимической, металлургической и теплоэнергетической промышленности нашли применение жаростойкие бетоны на основе портландцемента, как наиболее дешевого и широкого распространенного вида вяжущего. Жаростойкие бетоны на портландцементе достаточно хорошо научно изучены и проработаны и могут быть применены, как указано выше, в различных отраслях промышленности.

Для анализа в данной работе рассмотрены жаростойкие бетоны на основе наиболее широко применяемых вяжущих:

- гидравлических (портландцементном, быстротвердеющем портландцементе, глиноземистом и высокоглиноземистом цементах);
- воздушных (жидком стекле, силикат-натриевых композициях);
- химических (алюмофосфатном, алюмохромофосфатном и др.).

При использовании в качестве вяжущего портландцемента, портландцементный камень без введения тонкомолотой добавки не выдерживает воздействия высоких температур, при температуре выше 500 °С происходит дегидратация и разрушение цементного камня. Для стабилизации цементного камня и обеспечения протекания реакций в твердых фазах в состав вяжущего вводят тонкомолотую минеральную добавку с содержанием необходимого количества  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для связывания свободных радикалов оксида кальция с образованием безводных силикатов и алюминатов кальция, стойких при воздействии высоких температур.

Использование портландцемента, как вяжущее, при приготовлении жаростойкого бетона возможно только после введения в состав тонкодисперсной добавки для связывания свободных радикалов оксида кальция с образованием безводных силикатов и алюминатов кальция стойких, как указано в работе [51] при воздействии высоких температур. В качестве добавки могут быть применены: бой керамического кирпича, керамзит, туф, пемза, доменный шлак, шамот, хромит и др. Применение добавки снижает усадку бетона и повышает трещиностойкость. Использование добавки в портландцемент, которые изменяют структуру и усадку бетона не рекомендуется. Для стабилизации портландцементного камня при нагреве и для повышения температуры применения и эксплуатационных характеристик жаростойкого бетона можно ввести как добавки в портландцемент тонкодисперсный кремнезем, отходы асбестодобывающей промышленности и алюминатные цементы. В зависимости от условий эксплуатации оптимальное содержание тонкомолотых добавок, как правило, составляет от 30 до 50%

Необходимо иметь в виду, что огнеупорные тонкомолотые добавки (например, с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , как в работе [25]) могут привести к большому снижению прочности бетона при температуре выше 800 °С, что связано с

отсутствием стабилизации  $\beta$ - $2\text{CaOSiO}_2$ , который при  $875\text{ }^\circ\text{C}$  переходит в  $\gamma$ -форму с нарушением структуры цементного камня.

Портландцемент является самым распространенным и наиболее доступным вяжущим для приготовления, как обычных, так и специальных бетонов, к которым относятся жаростойкие бетоны. Как указано в работе [25] для увеличения температуры применения в портландцемент вводят тонкодисперсные добавки. Температура применения композиционного вяжущего на основе портландцемента зависит от вида тонкодисперсной добавки. Применение тонкодисперсной добавки из обожжённого аргиллита, керамзита, боя керамического кирпича и др. позволяет изготавливать жаростойкие изделия с температурой применения от  $600$  до  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ . Использование в качестве добавки тонкодисперсного кремнезема, как указано в работе [25] дает возможность увеличить эту температуру применения до  $1200$ - $1300\text{ }^\circ\text{C}$ , а тонкомолотой силикат-глыбы до  $1300$ - $1400\text{ }^\circ\text{C}$ .

Из-за наличия в составе неконтролируемого свободного оксида кальция, который при нагреве может привести к разрушению цементного камня, шлакопортландцемент применяют только в ограниченном количестве.

Целесообразно в бетонах для реакторов увеличить количество некоторых из них до  $70\%$  (например, шамота), что будет способствовать повышению прочности и снижению усадки бетона при высокой температуре в реакторе, но увеличит продолжительность его сушки и вывода на рабочий режим. Последнее при очень маленьких скоростях нагрева массива реактора (менее  $5^\circ\text{C}/\text{час}$  не имеет большого значения).

## **1.2. Выбор керамзитового заполнителя для жаростойких бетонов**

Жаростойкие бетоны – безобжиговые строительные материалы, которые применяются при строительстве тепловых агрегатов и заменяют штучные огнеупоры. В ряде случаев сложные современные конструкции тепловых агрегатов выполняются только из жаростойкого бетона из-за сложной конфигурации. Жаростойкий бетон имеет преимущество перед штучными огнеупорами. Многие предприятия строительной индустрии имеют тепловые агрегаты, работающие в

температурном диапазоне от 800 °С до 1200 °С. К таким тепловым агрегатам относятся туннельные печи обжига керамического кирпича, вращающиеся печи обжига керамзита, портландцементного клинкера, печи обжига извести и др. Применение в туннельных печах обжига кирпича жаростойких бетонов на основе керамзитового заполнителя позволяет снизить теплотери через ограждающие конструкции и стоимость футеровки по сравнению с штучными огнеупорами за счет применения местных материалов. Как указано в работе [40] предприятия промышленности строительной индустрии выпускают керамзит с насыпной плотностью 380-800 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сдавливании в цилиндре 0,8-5,9 МПа, водопоглощением 8-21,5 %, огнеупорностью 1150-1250 °С, коэффициентом температурного расширения  $(4,1 \div 6,7) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . В Республике Дагестан Кизилюртовский керамзитовый завод выпускает керамзит средней плотностью от 500 до 800 кг/м<sup>3</sup>.

Выбор керамзита в качестве заполнителя для получения легких жаростойких бетонов основан на том, что в настоящее время он является наиболее широко распространенным искусственным пористым заполнителем во всем мире, относительно дешевым и, как показывает анализ современного состояния производства легких жаростойких бетонов, наиболее пригодным. Как указано в работе [14] использование жаростойких бетонов на основе керамзитового заполнителя в туннельных печах позволит снизить материалоемкость печи и теплотери через ограждающие конструкции. Промышленность выпускает керамзит с насыпной плотностью 380-800 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сдавливании в цилиндре 0,8-5,9 МПа, водопоглощением 8-21,5%, огнеупорностью 1150-1250 °С, коэффициентом термического расширения  $(4,1 \div 6,7) 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Применение в тепловых агрегатах различных видов жаростойких бетонов по сравнению со штучными огнеупорными материалами является более эффективным с экономической точки зрения. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях в данной работе на керамзитовом заполнителе имеют ряд преимуществ по сравнению с облегченными жаростойкими бетонами. Низкая средняя плотность и соответственно меньшая теплопроводность легких

жаростойких бетонов, позволяет уменьшить толщину и массу конструкции и, следовательно, материалоемкость. Применение легких жаростойких бетонов на основе местного минерального сырья позволяет создать конструкции тепловых агрегатов с более высокими показателями экономической эффективности.

К заполнителям, применяемым в легких жаростойких бетонах, предъявляют дополнительные требования: они должны обладать повышенными значениями термостойкости, огнеупорности и температурного коэффициента линейного расширения  $\alpha$ . Кроме того, в заполнителях не должно содержаться оксидов кальция и магния, кварцевых и карбонатных включений.

Термостойкость бетона определяется, прежде всего, термостойкостью заполнителя, поэтому к заполнителям предъявляются также высокие требования и по термостойкости [136].

М. З. Симонов [137] установил, что для формирования структуры легкого бетона важное значение имеет интенсивность капиллярной контракции, обусловленной градиентом давления между зернами пористого заполнителя и цементным тестом. Явление «самоваккумиривания», по М. З. Симонову, способствует получению высокой адгезионной прочности контактного слоя между компонентами легкого бетона.

И. А. Иванов [138, 139] показал, что свойства пористого заполнителя и цементного камня изменяются в результате взаимного влияния, например, вследствие перераспределения напряжений между ними. Он установил, что при усадке цементного камня происходит обжатие пористого заполнителя. Им показано влияние однородности свойств зерен керамзита на деформативные свойства и долговечность легкого бетона при действующих напряжениях, превышающих  $R^{\circ}$ .

Выбор керамзита как заполнителя для получения жаростойкого керамзитобетона связан с тем, что во время сушки его при температуре 105 °С происходит эффект самопропаривания, то есть стремление паров воды, содержащейся в цементном паре, выхода по капиллярам из тела бетона и взаимодействием при этом с непрогидратировавшими минералами

портландцемента. Кроме того, в процессе изготовления бетона керамзит впитывает воду затворения, которая при высушивании постепенно выделяется, обеспечивая дополнительную гидратацию цементного камня. В результате происходит более полная гидратация минералов, что способствует повышению прочности бетона за счет уплотнения геля портландцементного камня.

Керамзитовый заполнитель для жаростойкого бетона необходимо выбирать с большей средней плотностью: чем больше средняя плотность керамзитового заполнителя, тем выше термостойкость жаростойкого керамзитобетона. Как указано в работе [25] причиной низкой термостойкости жаростойкого керамзитобетона является разность в коэффициентах теплопроводности составляющих бетона – цементного камня и керамзита.

Вследствие разности коэффициента теплопроводности создается перепад температур в теле керамзитобетона. При охлаждении керамзитобетона цементный камень вследствие большой плотности и теплопроводности быстрее охлаждается и сжимается. Керамзит при этом вследствие пористой структуры с малой теплопроводностью в какой-то момент находится в нагретом и расширенном состоянии. Все это приводит к возникновению дополнительных напряжений в цементном камне и его разрушению.

Более высокую термостойкость конструкционного жаростойкого керамзитобетона по сравнению с термостойкостью керамзитобетона с меньшей средней плотностью можно объяснить не только большей первоначальной прочностью конструкционного керамзитобетона, но и уменьшением температурного коэффициента расширения (при повторном нагревании) цементного камня с большим количеством тонкомолотого шамота.

В научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева (НИИЖБ) и научно-исследовательском институте керамзита проведены обширные исследования для изучения возможности применения керамзитового заполнителя для получения жаростойких бетонов из обычного и жаростойкого керамзита. Большое влияние на стойкость керамзитобетона при нагреве оказывает его начальная влажность.

Начальная влажность оказывает большое влияние на стойкость жаростойкого бетона при нагреве. Влажность влияет на прочность, деформативные свойства и трещиностойкость жаростойкого бетона.

Исследования, приведенные в работах [39, 40], показали, что прочность на сжатие жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе по мере увеличения влажности непрерывно снижается. Модуль упругости жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с возрастанием влажности увеличивается на 25÷30 % по сравнению с бетоном в сухом состоянии.

После анализа минералогической базы Республики Дагестан и изучения опыта производства керамзитового гравия из местного минерального сырья, было принято решение в качестве заполнителя использовать в данной работе керамзитовый гравий Кизилюртовского керамзитового завода. Керамзитовый гравий получают из глин Кизилюртовского месторождения. В лаборатории Дагестанской геологоразведочной экспедиции были исследованы почвенные образцы, отобранные на глубине 0,2 м, исследовались следующие показатели: полная водяная вытяжка, подвижный фосфор, обменный калий, гидролизуемый азот, гумус и pH. Результаты аналитических исследований по определению содержаний легкорастворимых солей показывает, что данная почва сильно засолена сульфатами, содержание вредных токсичных сульфатов колеблется в пределах 9,84-5,38 мг/100г воздушной сухой почвы. Содержание гидролизуемого азота составляет 7,82- 10,64 мг/100г воздушной сухой почвы. Подвижный фосфор составляет 4,7-12,6 мг/100г воздушной сухой почвы. Обменный калий составляет 64-70 мг/100г воздушной сухой почвы. По содержанию гумуса почва слабо гумусированная, реакция почвы щелочная. Месторождение глин вытянуто с Юга на Север и имеет размеры 850 x 500 м. Поверхность участка имеет ровный рельеф и наклонена с Юго-востока на Северо-запад. Полезная толща представлена глинами от светлого до темно-бурого цвета, структура толщи от рыхлой до комковатой Глины очень плотные, довольно часто в них встречаются органические остатки в виде темно-бурых и черных включений до 5 см в поперечнике. Мощность полезной толщи колеблется от 6,2 до 12,5 м и в

среднем составляет 11-12 м. Глины перекрываются песчано-растительным слоем мощностью 0,2-0,4 м. Мощность полезной толщи определяется глубиной залегания корневых пород, представленных передавливанием плотных тонкослоистых темно-серых глин. По химическому составу полезная толща имеет следующий состав в процентном соотношении:  $\text{SiO}_2$  57,2-67,7;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  14,15-17,2;  $\text{TiO}_2$  0,62-0,81;  $\text{F}_2\text{O}_3$  6,0-9,05;  $\text{CaO}$  0,59-1,96;  $\text{HgO}$  1,3-2,4;  $\text{H}_2\text{O}$  1,74-2,46;  $\text{Na}_2\text{O}$  0,73-1,09; S 0,19-0,78; п.п.п. 6,0-10,27.

Глинистое сырье – низкодисперсное, среднепластичное, число пластичности 12,5–26,5, в основном 18–20.

### 1.3. Выбор минеральной добавки для композиционного вяжущего

Замена части портландцемента минеральной добавкой способствует рациональному использованию природного минерального сырья, снижает затраты на производство жаростойких бетонов на счет уменьшения расхода портландцемента. Минеральные добавки отличаются друг от друга структурой, химическим и минералогическим составом и активностью [144]. Для композиционного вяжущего на основе портландцемента в составе жаростойкого бетона очень важна способность минеральной добавки вступать в химическую реакцию с водными радикалами оксида кальция при дегидратации цементного камня в температурном диапазоне от 30 °С до 520 °С [23]. Исследования возможности использования местного природного минерального сырья серого аргиллита в составе композиционного вяжущего после обжига при температуре от 700 °С с дальнейшей активацией совместно с портландцементом для выявления способности минеральной добавки связываться с оксидом кальция является важной задачей.

Как отмечено в работе [23], чем больше в составе минеральной добавки содержится  $\text{SiO}_2$  и меньше кристаллического кремнезема, находящегося в свободном состоянии, не связанного с другими минералами, тем выше активность минеральной добавки. Термомодифицированный аргиллит оказывает

существенное влияние на повышение прочности портландцемента за счет увеличения гидравлической активности цемента.

Применение в составе композитного вяжущего термомодифицированного серого аргиллита Буйнакского месторождения (пойма реки Шура-Озень), который претерпевает структурные изменения, ведущие к образованию активного соединения, способствует повышению механической прочности образцов цемента. Выбор аргиллита в качестве тонкомолотой добавки, активированной на Активаторе-4М, связан с наличием больших запасов данного минерального сырья в Республике Дагестан. Данные, полученные в диссертационной работе, согласовываются с результатами исследований, приведенными в работе [41].

Для жаростойких бетонов механическая прочность оценивается как остаточная прочность после обжига при соответствующей температуре эксплуатации теплового агрегата. Поэтому важное значение имеет способность минеральной добавки интенсивно взаимодействовать с СаО, наличие которых в составе приводит к разрушению бетона. Кроме вышеизложенного термическая обработка серого аргиллита при температуре 600-700 °С приводит к интенсификации взаимодействия с гидроксидом кальция дополнительного количества активного кремнезема и растворимого глинозема, что приводит в конечном счете к увеличению остаточной прочности жаростойких бетонов.

Во многих регионах России, в том числе и в Республике Дагестан не разрабатываются разведанные месторождения камневидного глинистого сырья – аргиллитов и аргиллитоподобных глин. Их использование для производства керамзита в сухом способе признано нецелесообразным, из-за их низкой вспучиваемости. По химико-минералогическому составу аргиллиты и аргиллитоподобные глины по многим показателям сопоставимы с лучшими видами глинистого сырья. Запасы аргиллитов и аргиллитоподобных глин могут обеспечить потребности предприятия промышленности строительной индустрии на многие десятилетия. В связи с этим, изыскание и применение нетрадиционного глинистого сырья для производства модифицированного композиционного вяжущего на основе портландцемента с использованием

энергоэффективных технологических решений является актуальной научно-технической задачей. Использование камневидных разновидностей глинистого сырья, таких как аргиллитоподобных глин и аргиллитов Республики Дагестан для получения модифицированного композиционного вяжущего для жаростойкого керамзитобетона является эффективным с экономической точки зрения.

В данной диссертационной работе для исследования используется композиционное вяжущее после активации на планетарной мельнице, по методике, приведенной в работе [148]. Совместный помол составляющих композиционного вяжущего с тонкостью помола до  $3500 \text{ см}^2/\text{г}$  осуществляли на планетарной мельнице-активаторе новосибирского производства «Активатор-4М». Активатор позволяет осуществить помол составляющего композиционного вяжущего до механохимических реакций. Для помола в мельнице установлены 4 помольных барабана, которые закреплены вокруг вращающего вала. При помоле для охлаждения барабанов предусмотрено система подачи воды для обеспечения нормальной температуры вращающихся механизмов мельницы и обеспечения охлаждения масла. Для подачи воды в барабан используется подводной шланг, который распределяет воду охлаждения равномерно в объеме барабана во время вращения. Равномерное и интенсивное распределение воды позволяет снять тепловыделение, которое появляется при вращении помольных барабанов. Барабаны для помола имеют объем по  $1300 \text{ м}$  каждый. Электродвигатель барабана имеет обороты  $1450 \text{ об/мин}$ , мощность -  $18 \text{ кВт}$ . Для обеспечения плавного регулирования оборотов двигателя планетарная мельница имеет приставку-преобразователь (инвертор) ToshibaVFP7 – 4185, (400 В 3ф). Приставка (инвертор) позволяет управлять режимом работы мельницы через интерфейс RS485/ RS232 при помощи персонального компьютера. Получение активированного композиционного вяжущего проводим по двухстадийной схеме приготовления: на первой стадии осуществляется помол обожжённого серого аргиллита до тонкости помола цемента в средних пределах  $3200\text{-}3300 \text{ см}^2/\text{г}$ . На второй стадии осуществляется

совместный помол цемента и обожжённого серого аргиллита до тонкости помола 3300 см<sup>2</sup>/г. Совместный помол позволяет повысить химическую активность компонентов вяжущего с регулируемым измельчением, ускорению схватывания и твердения вяжущего.

#### **1.4. Предварительный электроразогрев бетонной смеси, области его использования**

Электроразогрев бетонной смеси основан на пропускании электрического тока. При прохождении электрического тока через бетонную смесь происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Достоинствами электроразогрева бетонной смеси перед другими методами разогрева является его простота и доступность для любого предприятия строительной индустрии. Для электроразогрева бетонной смеси не требуется больших затрат на оборудование и имеет низкую трудоемкость производства работ по сравнению с другими методами. Преимуществом электроразогрева бетонной смеси является то, что его можно использовать в построечных условиях и на открытых полигонах при изготовлении жаростойких конструкций и блоков. Предварительный электроразогрев бетонной смеси обеспечивает ускоренный набор прочности (до 50 % через 8 часов и до 100 % через сутки, минимум энергозатрат 50 кВт-ч/м), повышение прочности бетона и сцепления с арматурой.

Обширные исследования в области предварительного разогрева бетонной смеси для обычных бетонов проведены известными учеными: Б. Г. Скрамтаев, Б. А. Крылов, Н. Н. Данилов, Н. А. Гордиенко, Р. В. Веселов, К. П. Симеренко, А. В. Лагойда, С. А. Миронов, Л. А. Комисаров, З. М. Ларионов, В. И. Медведев, В. Н. Сизов, Г. И. Цителаури, А. И. Ли, Р. А. Лукачев, Б. А. Усов, А. И. Бирюков, В. Н. Ефемчук, К. А. Гасанов, В. И. Смирнов, В. Д. Капилов, М. М. Титов, А. С. Арбенев и др.

В зарубежной практике метод электроразогрева бетонной смеси для обычных бетонов на портландцементе, основанный на пропускании через бетон переменного электрического тока, впервые был предложен в 1931 году учеными из

Швеции А. Брундом и Х. Болином. Позже исследованием влияния электроразогрева бетонной смеси на свойства бетона занимались такие ученые, как Х. Итакура, Я. Илики (Япония), А. Веуми (Швейцария), М. Глевинд (Дания), Н. Тейлор (США), С. Гоида (Венгрия), Х. Шенк (Исландия), и др.

Начало широкому применению метода электроразогрева бетонной смеси на основе портландцемента было заложено в 30-е годы прошлого столетия в Советском Союзе в период индустриализации и строительства крупных промышленных и энергетических объектов. В 1934 году электроразогрев бетонной смеси применяли при строительстве Макеевского металлургического комбината, Урал-вагон завода, автозавода им. И. А. Лихачева, на строительстве доменного цеха Нижне-Тагильского металлургического комбината. Электроразогрев бетонной смеси широко применяли в трестах Мосэнергострой, Магнитстрой, Казметаллургстрой и многих объектах системы Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР.

Электроразогрев бетонной смеси нашел применение при строительстве различных промышленных зданий и специальных сооружений в городах Магнитогорске, Ангарске, Нижнем Тагиле и др. Электроразогрев бетонной смеси широко и успешно применяли при строительстве высотных зданий на Смоленской площади в г. Москве и при строительстве Московского государственного университета. Анализируя преимущества, недостатки методов и способов тепловой обработки, применяемых при изготовлении изделий и конструкций из обычных бетонов, и учитывая специфику технологии изготовления и твердения различных видов жаростойких бетонов как указано в работах [45-47] можно предположить, что электроразогрев бетонной смеси, как метод интенсификации твердения бетонов может быть наиболее эффективным для жаростойких бетонов на основе портландцемента, так и на основе жидкого стекла и силикат-натриевого композиционном вяжущем. Подтверждением эффективности применения предварительного электроразогрева бетонной смеси перед другими методами для жаростойких бетонов на портландцементе, могут служить результаты экспериментальных исследований, выполненных авторами работ [45-47].

Для жаростойких бетонов на портландцементе основной задачей является вопрос связывания свободных радикалов оксида кальция, которое образуется в результате дегидратации гидроксида кальция при нагреве бетона до температуры 380-580 °С [25]. Для связывания свободных радикалов оксида кальция в портландцемент вводят тонкомолотую добавку.

Исследование вопроса влияния электроразогрева бетонной смеси жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с активированным композиционным вяжущим из местного минерального сырья на физико-механические, теплофизические, термомеханические и эксплуатационные свойства бетона является задачей актуальной и требует дальнейшего изучения. Температура предварительного электроразогрева бетонной смеси играет важную роль в технологии производства жаростойких бетонов на основе композиционного вяжущего с портландцементом и минеральной добавкой. В жаростойких бетонах на керамзитовом заполнителе с активированным композиционным вяжущим процесс пересушивания бетонной смеси приводит к снижению прочности из-за большой пористости керамзитового заполнителя и высокого водопоглощения (до 20 %).

Согласно современным представлениям теории твердения цементных вяжущих процесс образования цементного камня начинается с растворения исходного вяжущего, гидратации составляющих его минералов и образования раствора, пересыщенного по отношению к конечным продуктам из-за гораздо меньшей их растворимости [77].

Как указано в работе [43] реакция взаимодействия воды с минералами цементного клинкера протекает более интенсивно при повышенной температуре. Зависимость скорости реакции от температуры, которая может быть описана уравнением Аррениуса:

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + B, \quad (1.1)$$

где  $k$  – константа скорости реакции;

$E$  – энергия активации;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$B$  – постоянная, учитывающая влияние различных других факторов на скорость реакции.

Величина энергии активации, под которой понимается то избыточное количество энергии (по сравнению со средней величиной), которой должна обладать молекула в момент столкновения, чтобы быть способной к данному химическому взаимодействию, изменяется с повышением или понижением температуры весьма незначительно и обычно принимается постоянной. Таким образом, из уравнения (1.1) следует, что с повышением температуры увеличивается константа скорости реакции, а, следовательно, и скорость самой реакции. В этом можно убедиться, если несколько преобразовать уравнение (1.1), исходя из того, что

$$\ln \frac{N'}{N} = - \frac{E}{RT}, \quad (1.2)$$

где  $N'/N$  – относительное число так называемых активных молекул, т.е. молекул, обладающих необходимой для химического взаимодействия энергией активации ( $N'$  – число активных молекул,  $N$  – общее число молекул).

Тогда оно примет вид:

$$\ln k = \ln \frac{N'}{N} + B, \quad (1.3)$$

т. е. логарифм константы скорости реакции прямо пропорционален логарифму относительного числа активных молекул.

Расчеты показывают, что нарастание температуры, увеличивая среднюю кинетическую энергию молекул, сильно повышает и величину  $\frac{N'}{N}$ . Так, например, если принять, что для данной реакции  $E = 25000$  кал, то

$$\text{при } T = 293 \text{ }^\circ\text{K} \quad \frac{N'_1}{N} = e^{-\frac{25000}{2 \cdot 293}} = 3,16 \cdot 10^{-19} \quad (1.4)$$

$$\text{а при } T = 369 \text{ }^\circ\text{K} \quad \frac{N'_2}{N} = e^{-\frac{25000}{2 \cdot 369}} = 1,12 \cdot 10^{-15} \quad (1.5)$$

т. е. повышение температуры с 20 до 90 °С увеличивает число активных молекул в этой реакции примерно в 3500 раз.

Следовательно, причина повышения скорости реакций при повышении температуры – увеличение числа активных молекул, в результате чего увеличивается и число эффективных столкновений, приводящих к химическому взаимодействию. При гидратации минералов цементного клинкера энергия активации каждой реакции различна, и поэтому ускоряющее воздействие повышенной температуры также будет различным.

Ускорение процессов гидратации вяжущего вещества при повышении температуры естественно увеличит пересыщение раствора, тем более что растворимость большинства гидратных новообразований при этом падает. А чем выше пересыщение, тем при прочих равных условиях раньше возникнут зародыши кристаллизации, тем меньше их размер и быстрее будет происходить их рост [141].

Как указано в работе [43], внешнее низкочастотное электрическое поле, воздействующее на бетон в ранний период его твердения (а это всегда бывает при электродном прогреве), не влияя на характер новообразований, вызывает ряд явлений, которые, несомненно, накладывают отпечаток на формирование структуры цементного камня в бетоне. Это, прежде всего, касается электрофореза. Если при постоянном токе он проявляется достаточно четко, то при переменном протекает иначе. В последнем случае, как показывают исследования, движения дисперсных частиц не наблюдается, а их реакция на воздействие поля будет выражаться в колебаниях. Колебания на определенный контакт гидратируемых цементных зерен через пленки новообразований друг с другом будут нарушать целостность пленок и обнажать в отдельных местах непрогидратированные ядра вяжущего. Это обеспечит более свободный доступ к ним воды и углубит, следовательно, гидратацию цемента.

Несмотря на ряд достоинств, предварительный электроразогрев смеси не находит должного применения при изготовлении жаростойких бетонов. Применение предварительного электроразогрева бетонной смеси в технологии изготовления легких жаростойких бетонов по сравнению с тяжелыми

жаростойкими бетонами для улучшения эксплуатационных характеристик является предположительным. В тяжелых жаростойких бетонах из-за плотной структуры бетона в процессе предварительного электроразогрева бетонной смеси и увеличения порового давления могут произойти явления, связанные с нарушением структуры в межпоровых перегородках и новых процессов трещинообразования. На основании вышеизложенного формулируется рабочая гипотеза о том, что в жаростойких легких бетонах на пористых заполнителях при предварительном разогреве бетонной смеси поровое давление не будет оказывать существенного влияния на трещинообразование вследствие распределения давления в порах заполнителя, при этом удаление химически несвязанной воды в результате предварительного электроразогрева бетонной смеси до сушки при температуре 105 °С обеспечит улучшение физико-механических, теплофизических, термомеханических и эксплуатационных характеристик жаростойкого бетона, а при выводе теплового агрегата на рабочий режим возможно сокращение продолжительности сушки, что обеспечит улучшение технико-экономических показателей устройства футеровки вследствие сокращения энергозатрат на сушку.

### 1.5. Цель и задачи исследований

**Цели и задачи исследования** – разработка научно обоснованного технологического решения получения жаростойкого керамзитобетона с применением предварительного электроразогрева керамзитобетонной смеси с тонкомолотой добавкой из обожженной аргиллитовой глины, вводимой в бетонную смесь в составе активированного композиционного вяжущего.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определены рациональные составы композиционного вяжущего, полученного активацией портландцемента и тонкомолотой добавки из обожженного серого аргиллита;
- обоснованы технологические параметры получения жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– выявлены закономерности изменения от температуры нагрева прочностных, деформационных и теплофизических свойств жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– разработана технологическая схема производства жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– выпущена опытная партия жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем, разработан технологический регламент производства жаростойких бетонов с предварительным электроразогревом смеси в формах;

– выполнено технико-экономическое обоснование эффективности применения керамзитового гравия и песка Кизилюртовского керамзитового завода для производства футеровочных блоков с температурой применения до 1000 °С из жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси на активированном композиционном вяжущем.

### **Выводы по первой главе**

1. На основе анализа научных исследований в области жаростойких бетонов на портландцементе обоснована целесообразность применения предварительного электроразогрева бетонной смеси в формах до сушки при температуре 105 °С для повышения эксплуатационных характеристик жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе.

2. Сформулирована рабочая гипотеза о возможности повышения эксплуатационных характеристик жаростойких бетонов на керамзитовом заполнителе путем предварительного электроразогрева бетонной смеси в формах до сушки при температуре 105 °С.

3. Сформулированы цели работы и задачи исследования по разработке технологических основ получения жаростойкого бетона на керамзитовом

заполнителе с предварительным электрорагревом бетонной смеси в формах до сушки при 105 °С.

4. Установлены оптимальные параметры температуры и времени предварительного разогрева бетонной смеси путем математического моделирования процесса расчета параметров давления пара в поровом пространстве жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Исходные сырьевые материалы

Исследуемый состав жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе разработан на основе базового состава в соответствии с СП 27.13330.2011 [143].

В качестве исходных сырьевых материалов для изготовления опытных партий образцов из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе выбраны следующие компоненты:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «Себряковцемент»;
- тонкомолотая добавка из обожженной аргиллитовой глины Буйнакского месторождения Республики Дагестан;
- керамзитовый гравий и песок ООО «Кизилюртовский завод керамзитового гравия»;
- суперпластификатор СП-1 по ТУ 5870-005-58042865-2005.

При изготовлении жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе применялась пластифицирующая добавка суперпластификатор СП-1.

#### 2.1.1. Портландцемент

В качестве вяжущего для приготовления бетонной смеси выбран портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н с содержанием  $C_3A$  в количестве не более 6,5 % по массе с тонкомолотой добавкой из обожженной аргиллитовой глины в количестве 30 % от портландцементного вяжущего.

Нормируемыми показателями качества вяжущего приняты тонкость помола, сроки схватывания, максимальная температура применения, предел прочности на сжатие и изгиб после сушки при температуре 105 °С и обжига при температуре 1000 °С. Истинная плотность портландцемента – 3075 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность – 1300 кг/м<sup>3</sup>, водопотребность – 20,5-27,0 %, начало схватывания – 1,25 часа, конец схватывания – 6,8 часа. Основные показатели качества портландцемента ПЦ1-500Н

(ГОСТ 31108-2003 [52]), химический и минеральный составы приведены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3.

Таблица 2.1 – Основные показатели качества портландцемента

| Марка цемента | Наименование показателей |                                       |  |                                     |   |                            |
|---------------|--------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|---|----------------------------|
|               | ЦЕМ<br>ПЦ1-<br>500Н      | Тонкость помола (сито с сеткой № 008) | Нормальная густота цементного теста, % | Активность в возрасте 28 суток, МПа | Удельная поверхность см <sup>2</sup> /г | Сроки схватывания, час-мин |
| начало        |                          |                                       |  |                                     |   | конец                      |
| 3,6           |                          | 27,0                                  | 48,9                                   | 3300                                | 3-20                                    | 4-40                       |

Таблица 2.2 – Химический состав портландцемента в %

| SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | п.п. |
|------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----|-------------------|------------------|------|
| 20,72            | 2,60            | 5,07                           | 4,71                           | 63,42 | 119 | 0,33              | 0,55             | 1,41 |

Таблица 2.3 – Минеральный состав портландцемента

| Минералы      | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|---------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Количество, % | 64,9             | 12,0             | 5,3              | 15,0              |

### 2.1.2. Тонкомолотая добавка

В качестве тонкомолотой добавки применена обожженная аргиллитовая глина Буйнакского месторождения поймы реки Шура-Озень. Количество тонкомолотой добавки принято 30 % от объема вяжущего в соответствии с рекомендациями по технологии приготовления жаростойкого бетона [48-50].

Химический и минеральный составы аргиллита Буйнакского месторождения приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Химический состав аргиллита Буйнакского месторождения

|                  |                                |                                |     |                 |                  |      |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----------------|------------------|------|
| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | п.п  |
| 58,62            | 19,84                          | 4,95                           | 3,5 | 4,7             | 1,3              | 6,59 |

Таблица 2.5 – Минеральный состав аргиллита Буйнакского месторождения

|  |            |
|--|------------|
| Монтмориллонит<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 4SiO <sub>2</sub> ; 4H <sub>2</sub> O | Гидрослюда |
| 70+75 %  | 45+40 %    |

### 2.1.3. Заполнители

В качестве заполнителя применены керамзитовый гравий и песок Кизилюртовского керамзитового завода из глины Буйнакского месторождения Республики Дагестан. По своим свойствам керамзит удовлетворяет требованиям: ГОСТ 32496-2013 Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия; ГОСТ 25820-2014 Бетоны легкие. Технические условия.

В экспериментах использован керамзитовый гравий фракции 5-10 мм, марок 500 и 600 по плотности. Основные физико-механические свойства и гранулометрический состав использованного керамзитового гравия приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные физико-механические свойства и гранулометрический состав керамзитового гравия

| Наименование показателей                                 | Ед. изм           | Фракции, мм        |     |       |     |
|--|-------------------|--------------------|-----|-------|-----|
|  |                   | 5-10               |     | 10-20 |     |
|  |                   | Марка по плотности |     |       |     |
|  |                   | 500                | 600 | 500   | 600 |
| Зерновой состав. Частные остатки на ситах диаметром, мм: |                   |                    |     |       |     |
| 20   | %                 | -                  | -   | 6     | 8   |
| 10   | %                 | 5                  | 7   | 91    | 90  |
| 5  | %                 | 93                 | 90  | 3     | 2   |
| Менее 5  | %                 | 2                  | 3   | -     | -   |
| Насыпная плотность                                       | кг/м <sup>3</sup> | 508                | 610 | 495   | 590 |

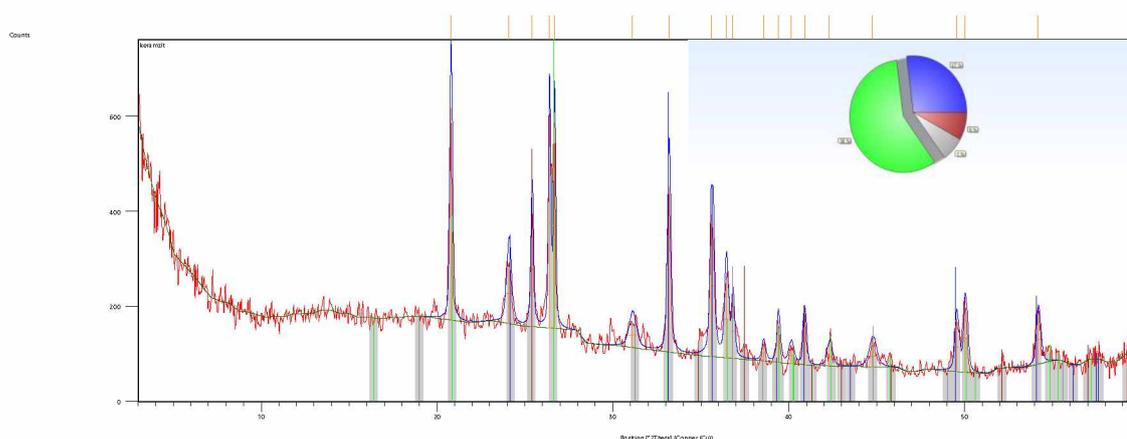
|   |        |      |      |      |      |
|---|--------|------|------|------|------|
| Прочность при сдавливании в цилиндре                    | МПа    | 4,3  | 5,6  | 2,3  | 3,7  |
| Потеря массы после 15 циклов замораживания и оттаивания | %      | 3,6  | 3,2  | 3,8  | 3,5  |
| Морозостойкость (Мрз)                                   | циклов | 15   | 15   | 15   | 15   |
| Водопоглощение  | %      | 17,0 | 16,3 | 17,2 | 12,5 |
| Потеря массы при кипячении                              | %      | 4,3  | 4,1  | 3,9  | 2,7  |
| Содержание расколотых зерен                             | %      | 8,3  | 9,6  | 7,5  | 8,8  |
| Коэффициент формы зерен                                 |        | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,4  |
| Число зерен с коэффициентом формы более 2,5             | %      | -    | -    | 2,0  | 2,2  |
| Влажность естественная                                  | %      | 3,8  | 3,1  | 2,7  | 2,6  |

Химический состав керамзитового гравия приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Химический состав керамзитового гравия Кизилюртовского керамзитового завода РД

| Содержание, %       |                      |                                |                                |      |                  |      |      |                 |                  |      |      |
|---------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|------|-----------------|------------------|------|------|
| SiO <sub>2</sub> св | SiO <sub>2</sub> общ | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | TiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> O | п.п. | орг. |
| 25,50               | 58,00                | 14,78                          | 9,13                           | 0,79 | 0,50             | 1,75 | 2,11 | 3,08            | 1,02             | 8,64 | 0,75 |

Рентгенографический анализ исходного керамзита (рис. 2.1) показал, что основными химическими элементами керамзитового гравия являются SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что в процентном соотношении составляет более 80 % от общего количества оксидов.

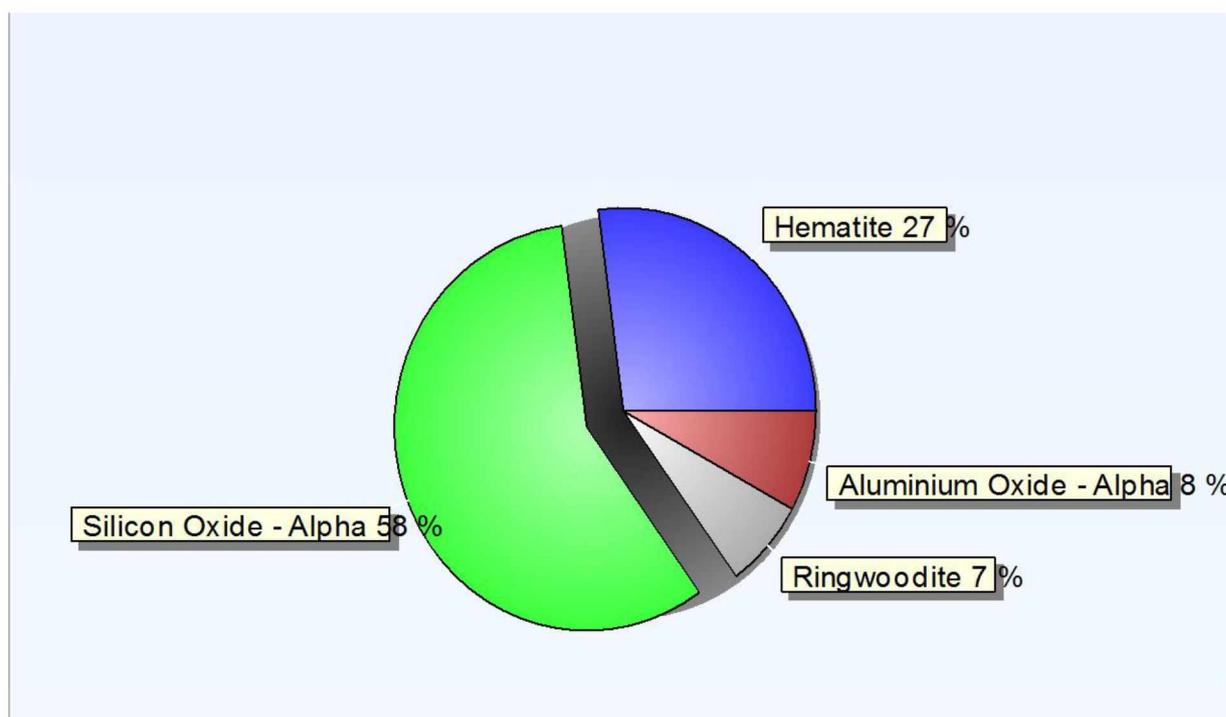


## Рисунок 2.1 – Рентгенограмма исходного керамзита

В таблице 2.8 и на рисунке 2.2 приведены результаты рентгенографического анализа и диаграмма составляющих керамзитового гравия.

Таблица 2.8 – Результаты рентгенографического анализа керамзитового гравия

| Pos. [2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [2Th.] | d-spacing [A] | Rel. Int. [%] |
|-------------|--------------|------------------|---------------|---------------|
| 20,7915     | 445,60       | 0,1574           | 4,27239       | 100,00        |
| 24,0833     | 126,75       | 0,3149           | 3,69537       | 28,45         |
| 25,3940     | 242,59       | 0,1574           | 3,50752       | 54,44         |
| 26,3862     | 443,95       | 0,1181           | 3,37784       | 99,63         |
| 26,6674     | 431,55       | 0,1181           | 3,34286       | 96,85         |
| 31,1100     | 53,15        | 0,4723           | 2,87488       | 11,93         |
| 33,1772     | 347,43       | 0,1968           | 2,70033       | 77,97         |
| 35,6187     | 298,79       | 0,2362           | 2,52063       | 67,05         |
| 36,4432     | 163,67       | 0,2362           | 2,46548       | 36,73         |
| 36,8159     | 115,86       | 0,1519           | 2,43934       | 26,00         |
| 38,5558     | 35,03        | 0,2362           | 2,33511       | 7,86          |
| 39,3935     | 88,48        | 0,1968           | 2,28736       | 19,86         |
| 40,1237     | 34,53        | 0,3149           | 2,24740       | 7,75          |
| 40,8863     | 110,15       | 0,1574           | 2,20723       | 24,72         |
| 42,3062     | 40,35        | 0,3149           | 2,13638       | 9,05          |
| 44,7585     | 45,68        | 0,4723           | 2,02486       | 10,25         |
| 49,5354     | 103,12       | 0,2362           | 1,84021       | 23,14         |
| 50,0314     | 141,04       | 0,1968           | 1,82312       | 31,65         |
| 54,1702     | 103,91       | 0,2362           | 1,69320       | 23,32         |



| Visible | Ref. Code   | Score | Compound Name           | Displacement [°2Th.] | Scale Factor | Chemical Formula                               |
|---------|-------------|-------|-------------------------|----------------------|--------------|--|
| *       | 98-002-2505 | 67    | Hematite                | 0,000                | 0,717        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 |
| *       | 98-003-9830 | 55    | Silicon Oxide - Alpha   | 0,000                | 1,008        | O <sub>2</sub> Si <sub>1</sub>                 |
| *       | 98-016-2347 | 41    | Ringwoodite             | 0,000                | 0,254        | Mg <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>1</sub> |
| *       | 98-009-9783 | 21    | Aluminium Oxide - Alpha | 0,000                | 0,490        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 |

Рисунок 2.2 – Диаграмма процентного содержания оксидов в исходном керамзитовом гравии Кизилюртовского завода

## 2.2. Оборудование

Для выполнения поставленных задач использовался комплекс аттестованного и поверенного оборудования лаборатории строительных материалов научно-образовательного центра «Современные строительные технологии и строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Свидетельство об аттестации (оценке

состояния измерений в лаборатории) № 590 от 15.05.2013 г. действительно до 15.05.2016 г. и заключение (о состоянии измерения в лаборатории) № 005 от 20.02.2023 г. действительно до 20.02.2026 г.

В ходе выполнения экспериментальной части работы использовался комплекс аттестованного и поверенного специализированного оборудования для проведения теплофизических, физико-химических и термомеханических исследований свойств материалов:

– пресс гидравлический для статических испытаний металлов и материалов МС-500, зав. № 1120, Госреестр № 9065-83 (Свидетельство о поверке № 106493 от 25.05.2017);

– разрывная машина для испытаний металлов и строительных материалов РМ-50, зав. № 1263, Госреестр № 5649-97 (Свидетельство о поверке № 101242 от 20.06.2017);

– сито лабораторное СЛ-0,315, Госреестр СИ № 20147-00 (Свидетельство о поверке № 001246 от 06.03.2017);

– сито лабораторное СЛ-0,14, Госреестр СИ № 20147-00 (Свидетельство о поверке № 001247 от 06.03.2017);

– сито лабораторное СЛ-0,63, Госреестр СИ № 20147-00 (Свидетельство о поверке № 001245 от 06.03.2017);

– сито лабораторное СЛ-1,25, Госреестр СИ № 20147-00 (Свидетельство о поверке № 001248 от 06.03.2017);

– линейка измерительная металлическая ЛИ-500, Госреестр СИ № 20048-05 (Свидетельство о поверке № 001244 от 06.03.2017);

– весы настольные электронные фирмы «МИДЛ» Базар с НПВ-30, Госреестр № 61500-15 (Свидетельство о поверке № 006494 от 25.05.2017);

– вискозиметр ВЗ-1,5,4, зав. № 9727 Госреестр № 60166-15 (Свидетельство о поверке № 001392 от 20.12.2016);

– и другое оборудование, описание которого приведено далее по тексту.

### 2.2.1. Лабораторный стенд для предварительного электроразогрева бетонной смеси в формах до нагрева при температуре 105 °С

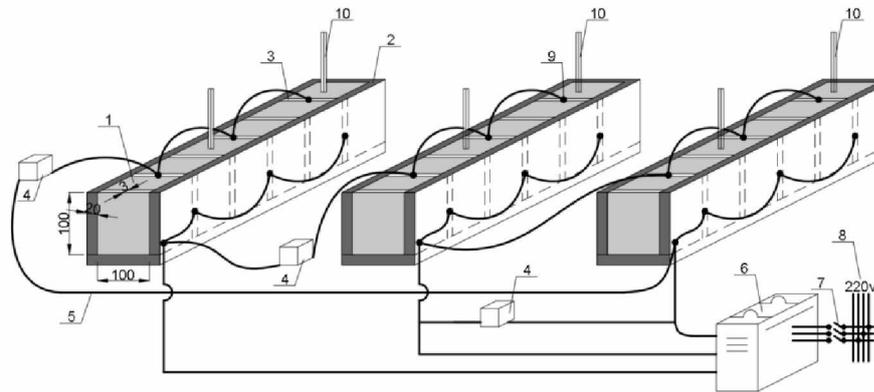


Рисунок 2.3 – Схема лабораторного стенда для электроразогрева бетонной смеси

- 1 – образец из керамзитобетона; 2 – корпус из композитного материала;  
 3 – электрод-перегородка; 4 – сопротивление; 5 – электропровода;  
 6 – трансформатор; 7 – выключатель; 8 – источник энергии; 9 – клемма;  
 10 – термометр



Рисунок 2.4 – Вид лабораторного стенда для предварительного электроразогрева бетонной смеси

### 2.2.2. Планетарная мельница «Активатор-4М»

Мельница управляется с персонального компьютера при помощи программы «Активатор» через интерфейс RS485/ RS232.

Технические характеристики:

|  |           |
|--|-----------|
| Скорость вращения центральной оси, об/мин.         | 100-800   |
| Минимальное время разгона до рабочей частоты (мин) | 2         |
| Скорость вращения барабанов, об/мин.               | 150-1200  |
| Ускорение мелющих тел, g, (м/сек <sup>2</sup> )    | 100(1000) |
| Объем барабанов, мл.                               | 1300(x 4) |
| Шаровая загрузка (на 1 барабан):                   |           |
| Масса, г   | 600-1800  |
| Диаметр шаров, мм                                  | 5-15      |
| Загрузка материала (на – 1 барабан), г             | 50-400    |
| Среднее время помола (до – 1 мкм), мин             | 5-15      |
| Габариты:  |           |
| Длина, мм  | 940       |
| Ширина, мм   | 695       |
| Высота, мм   | 1500      |
| Масса, кг  | 390       |
| Мощность эл. двигателя, кВт                        | 18        |

Общий вид планетарной мельницы «Активатор-4М», инвертора Toshiba VFP74185 и схема барабана приведены на рисунках 2.5, 2.6 и 2.7.



Рисунок 2.5 – Общий вид планетарной мельницы «Активатор-4М» с инвертором «Toshiba» и программным управлением

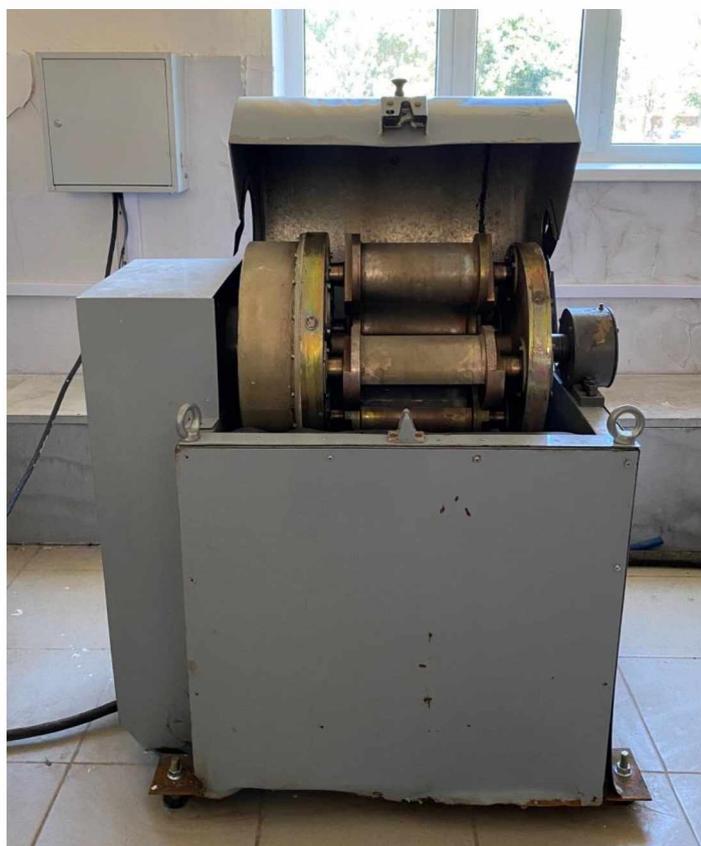


Рисунок 2.6 – Планетарная мельница «Активатор-4М» перед загрузкой

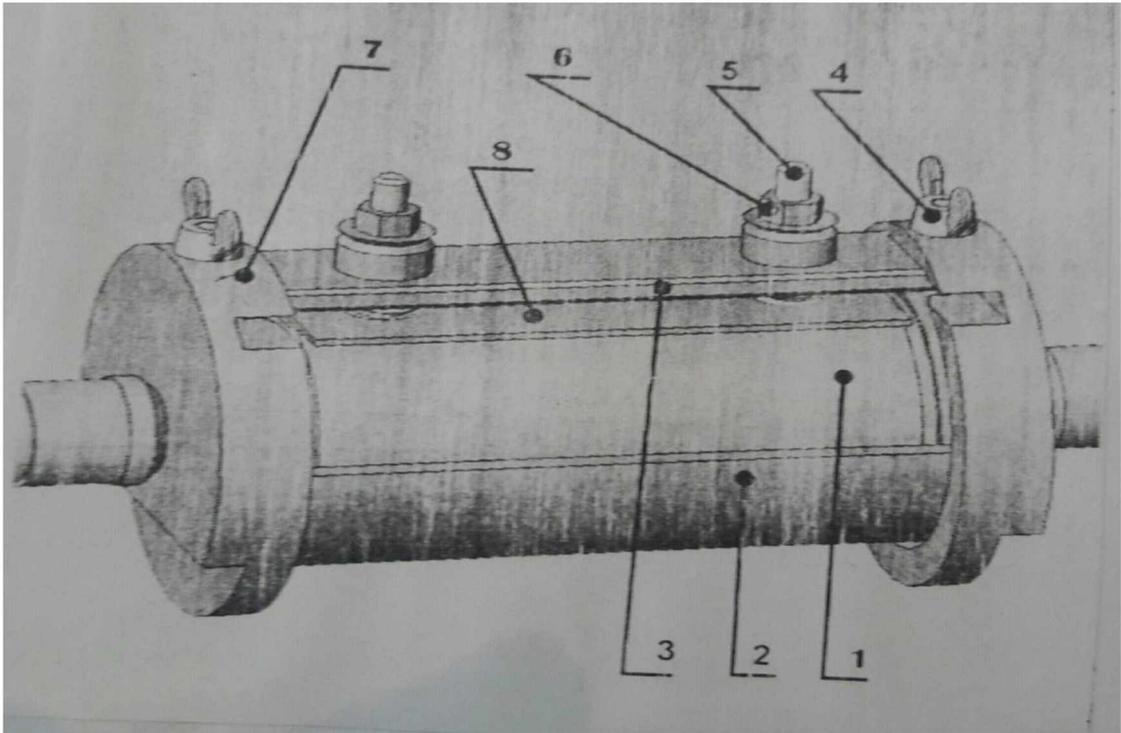


Рисунок 2.7 – Вид барабана планетарной мельницы «Активатор-4М»

1 – барабан, 2 – держатель барабана, 3 – фиксирующая планка, 4 – болт – барашек, 5 – фиксирующий болт, 6 – контровочная гайка, 7 – порядковый болт, 8 – номер держателя, 9 – плоская грань барабана

### 2.2.3. Установка для определения теплопроводности керамзитобетона

Теплопроводность является одним из важнейших показателей свойств жаростойкого бетона. Она зависит от общей пористости, размера и форм пор, температуры, вида твердой фазы [7].

В представленной работе теплопроводность жаростойкого керамзитового бетона определяли по методике ВНИПИТеплопроект, основанной на измерении стационарного потока тепла, коэффициента температуропроводности и табличных данных теплоемкости.

Общий вид и схема установки для определения теплопроводности приведена на рисунках 2.8 и 2.9.



Рисунок 2.8 – Общий вид установки для определения теплопроводности бетона

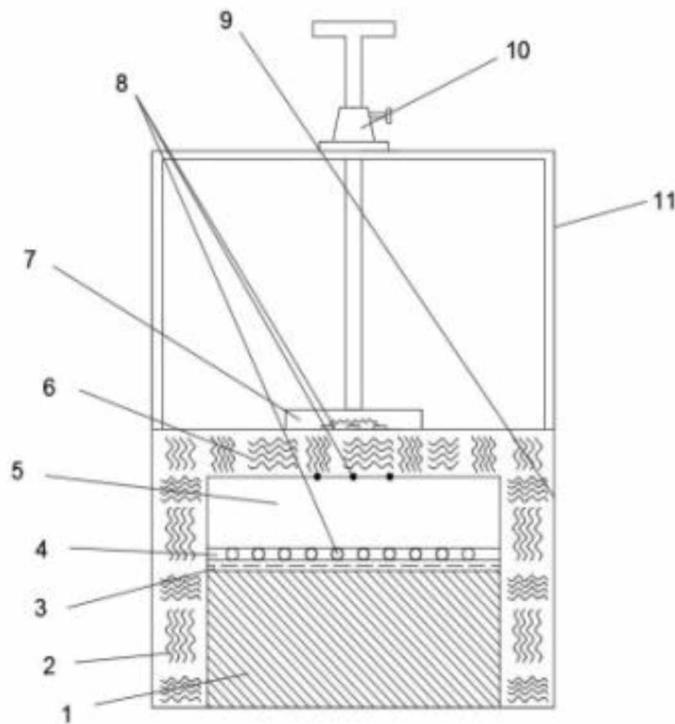


Рисунок 2.9 – Схема установки для определения теплопроводности жаростойких материалов при высоких температурах

- 1 – плита на основе каолиновой ваты и глиняной связки толщиной 22 см;  
 2 – каолиновая вата; 3 – электронагреватель; 4 – нагревательная плита с углублениями для термопар; 5 – испытуемый материал; 6 – каолиновая вата (второй слой) толщиной 5 см; 7 – термомер; 8 – измерительные термопары;

9 – металлический кожух; 10 – прижимное устройство; 11 – П-образный кронштейн

Теплопроводность является одним из важнейших показателей свойств жаростойкого бетона. Она зависит от общей пористости, размера и форм пор, температуры, вида твердой фазы [53, 54].

В представленной работе теплопроводность жаростойкого керамзитового бетона определяли по методике ВНИПИтеплопроект, основанной на измерении стационарного потока тепла, коэффициента теплопроводности и табличных данных теплоемкости.

Установка состоит из теплоизолирующей плиты на основе каолиновой ваты и глиняной связки 1, каолиновой ваты 2 и 6, электронагревателя 3, выполненного из проволоки марки Х2310 ТА диаметром 0,6 мм /ГОСТ 12766 – 77, нагревательной плиты 4 из стали марки Х 23 Н 18, собранной из двух плит, сваренных между собой и имеющих сквозные отверстия для измерительных термопар 8.

На нагревательную плиту 4 помещают испытуемый образец 5, на горячем и холодном концах которого устанавливают термопары 8, затем укладывают каолиновую вату толщиной 5 см, а на него (5) помещают тепломер 7, который состоит из дифференциальных термометров 12, 13, 14, и прижимается к испытуемому образцу посредством приспособления 10. Весь прибор помещен в металлический ящик 9.

Образец, высушенный до постоянной массы устанавливают на нагревательную плиту, прижимают тепломером, а после чего включают печь.

После установления стационарного потока тепла, проходящего через образец в направлении перпендикулярно его поверхности, количество тепла рассчитывают по формуле:

$$Q=K*E[\text{Вт/м}^2],$$

где E – это электродвижущая сила (ЭДС), K – постоянная тепломера, полученная при градуировке.

Расчет теплопроводности материала производится по формуле:

$$\gamma = \frac{Q_6}{t_1-t_2}[\text{Вт/м } ^\circ\text{C}],$$

где  $\delta$  – толщина образца, м;  $t_1, t_2$  – температура горячей и холодной поверхности образца, °С.

В представленной работе теплопроводность жаростойкого бетона также определяли по результатам измерений распределения температуры по толщине при одностороннем нагреве блока размером 250\*250\*500 мм. Схема расположения термопар приведена на рисунке 2.10. Тепловую изоляцию боковых граней блока обеспечивали каолиновой ватой. Нагрев осуществляли в печи при 100, 200, 400, 600, 800 1000 °С с выдержкой в течении одного часа. Электрическая схема измерения температуры при одностороннем нагреве блока из жаростойкого бетона приведена на рисунке 2.11.

По данным распределения температуры в блоке с учетом его геометрических размеров были рассчитаны коэффициенты температуропроводности ( $\text{м}^2/\text{ч}$ ) по формуле

$$a = \frac{KR^2}{6 \cdot \Delta t} [\text{м}^2 / \text{ч}],$$

где  $K$  – скорость нагрева образца, °С/ч;  $R$  – расстояние между саями термопар, м;  $\Delta t = t_{\text{ног}} - t_1$  – разность температур между нагреваемой поверхностью и каждого сая термопар в образце, °С;  $\delta$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров исследуемого блока.

Теплопроводность жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе вычисляли по формуле:

$$\lambda = a \cdot \rho / c [\text{Вт/с } ^\circ\text{С}],$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;  $c$  – теплоемкость жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе;  $\rho$  – средняя плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Схема расположения термопар в блоке и электрическая схема измерения температур при одностороннем нагреве блока из жаростойкого бетона приведены на рисунках 2.10 и 2.11.

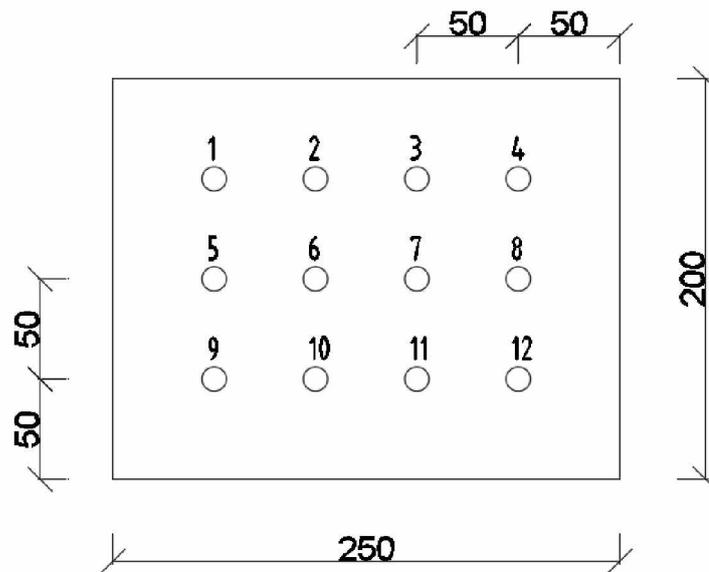


Рисунок 2.10 – Схема расположения термопар в блоке

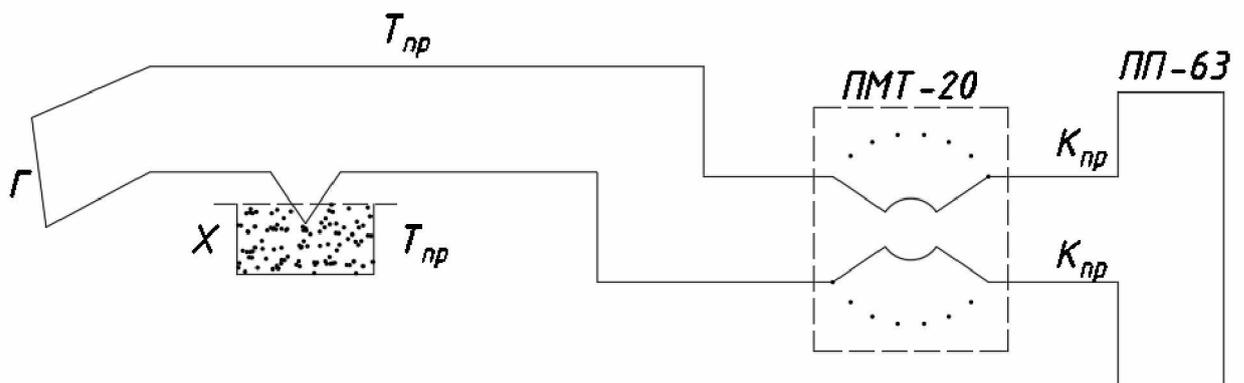


Рисунок 2.11 – Электрическая схема измерения температуры при одностороннем нагреве жаростойких бетонных блоков

КПр – компенсационный провод; Г – горячий спай термоэлектродов; Х – холодный спай термоэлектродов; Тпр – термоэлектродный провод; ПМТ-20 – двадцатиточечный переключатель; ПП-63 – потенциометр

#### **2.2.4. Установка для определения деформаций керамзитобетона под нагрузкой при высоких температурах**

Деформации жаростойкого бетона под нагрузкой при высоких температурах определяют испытанием образцов-цилиндров диаметром 36 и высотой 50 мм.

Отклонения от номинальных размеров образцов по диаметру и высоте цилиндра не должны превышать  $\pm 1$  %.

Верхнее и нижнее основания образцов должны быть отшлифованы с помощью карборундового диска.

Неперпендикулярность основания и боковой поверхности цилиндра образца не должна превышать 0,5 мм. Величину неперпендикулярности определяют по ГОСТ 10180-2012.

Образцы выпиливают или высверливают из контрольных неармированных блоков, изготовленных одновременно с изделиями из той же бетонной смеси, или из готовых изделий и конструкций с последующей подшлифовкой до требуемых размеров. При выборе участка конструкции или изделия, бывших в эксплуатации, для высверливания или выпиливания выбирают места с наименьшей температурой нагрева.

Выпиливание и высверливание образцов производят, отступив от граней изделия или блока не менее чем на 20 мм. Допускается при подборе состава бетона, а также при проведении научно-исследовательских работ изготавливать образцы в формах в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012.

Формы для изготовления образцов должны удовлетворять требованиям ГОСТ 22685-89.

Максимальная крупность зерен заполнителя бетонной смеси, применяемой для изготовления образцов, должна быть не более 5 мм.

Контрольные блоки или образцы после изготовления подвергают дополнительной обработке:

– контрольные блоки и образцы из жаростойкого бетона на портландцементе выдерживают 7 суток при температуре  $20 \pm 5$  °С и относительной влажности окружающего воздуха 90-95 %, после чего их

сушат в электрическом шкафу при температуре  $105 \pm 5$  °С в течение 32 ч (при этом подъем температуры не должен превышать 50 °С в час) и охлаждают в электрическом шкафу до  $20 \pm 5$  °С.

### **Аппаратура**

Для проведения испытания применяют:

- муфельную печь по ГОСТ 13474-70;
- электрический шкаф по ГОСТ 13474-70;
- электрическую криптоловую печь с механическим устройством для нагрузки образца и измерения величины деформации (рис. 2.12 и 2.13);
- оптический пирометр по ГОСТ 8335-96;
- платино-платинородиевую термопару по ГОСТ 6616-94;
- щипцы для установки образца.

Электрическая криптоловая печь и механическое устройство для нагрузки образца и измерения величины деформации должны обеспечивать:

- равномерный подъем температуры со скоростью 4-5 °С в минуту и рабочую температуру печи не менее 1100 °С;
- вертикальную передачу нагрузки на образец;
- измерение деформации образца с погрешностью  $\pm 0,1$  мм;
- сжатие образца не менее чем на 20 мм;
- показание нулевой деформации при пуске прибора без образца под нагрузкой при температуре до 1100 °С.



Рисунок 2.12 – Общий вид установки для определения деформации керамзитобетона под нагрузкой

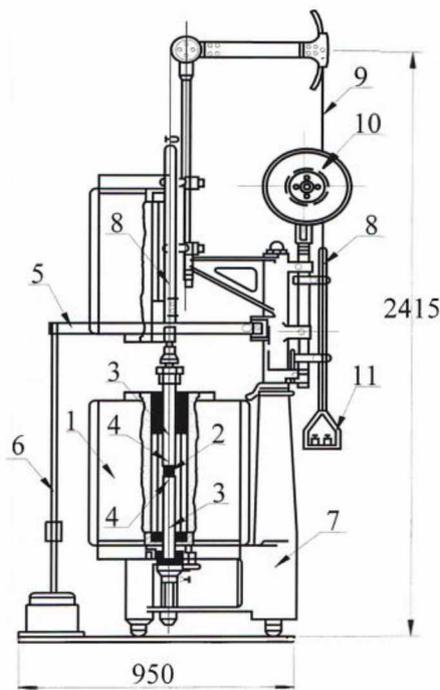


Рисунок 2.13 – Схема установки для определения деформации керамзитобетона под нагрузкой

1 – печь; 2 – образец; 3-6 – механическое устройство для нагрузки образцов (3 – угольные стержни, 4 – угольные прокладки, 5 – рычаг, 6 – подвеска с грузом); 7 – станина прибора; 8-11 – механическое устройство измерения деформаций (8 – шток, 9 – трос, 10 – шкив с дисковой шкалой, 11 – натяжной груз)

### Подготовка и проведение испытания

Для определения деформации бетона под нагрузкой при высоких температурах испытывают один образец.

Величину нагрузки на образец выбирают таким образом, чтобы в поперечном сечении образца, перпендикулярном действию сжимающей силы, создать напряжение, равное:

2,0 кгс/см<sup>2</sup> – для бетонов средней плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> и более;

1,5 кгс/см<sup>2</sup> – для бетонов средней плотностью от 1000 до 1400 кг/м<sup>3</sup>;

1,0 кгс/см<sup>2</sup> – для бетонов средней плотностью менее 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Образец устанавливают на стержень по центру печи так, чтобы середина его высоты находилась по центру визирной трубки, используемой для измерения температуры образца.

Сверху и снизу образца между стержнями и образцом устанавливают угольные прокладки диаметром 50 мм и толщиной 10 мм.

Сверху образца устанавливают стержень, а также механическое устройство для нагрузки образца и измерения величины деформации.

Скорость подъема температуры при испытании не должна превышать:

10 °С в минуту – при нагреве до 800 °С;

4-5 °С в минуту – при нагреве свыше 800 °С.

Температуру измеряют:

– платино-платинородиевой термопарой при нагреве до 1300 °С; параллельно термопарой и пирометром при нагреве от 1000 до 1300 °С;

– пирометром при нагреве свыше 1300 °С.

При измерении температуры горячий спай термопары должен располагаться на уровне середины высоты образца и не должен касаться внутренней нагреваемой поверхности печи.

Пирометром измеряют температуру боковой поверхности образца через визирную трубку из высокоогнеупорного материала внутренним диаметром 10-12 мм, которая установлена в футеровке печи в середине зоны наивысшей

температуры нагрева. Снаружи трубка закрывается заслонкой, которую открывают только на время замера температуры.

Температуру и деформацию образца измеряют каждые 10 мин. Результаты измерений записывают в журнал.

Испытание заканчивают в момент, когда деформация образца достигнет 40 % его первоначальной высоты или произойдет разрушение образца.

### 2.2.5. Установка для определения коэффициента линейного температурного расширения керамзитобетона

Коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) при нагреве образцов определяли на кварцевом емкостном dilatометре, разработанном институтом физики ДНЦ РАН. Вид установки и схема измерительного устройства для определения КЛТР приведены на рисунках 2.15 и 2.16.

Технические характеристики dilatометра:

- предел измерения температуры: 2-1500 °С;
- предел измерения КЛТР:  $(6-25)10^{-6}$  град<sup>-1</sup>;
- погрешность стабилизации температуры в диапазоне 90-1500 °С: 0,2 °С;
- чувствительность:  $2 \cdot 10^{-5}$  мм;
- размеры образцов: высота L=60 мм, диаметр d=1,3мм;
- погрешность измерения температуры в диапазоне 20-1500 °С: 0,5-1,3 °С.

Коэффициент линейного температурного расширения определяли на цилиндрических образцах диаметром 30 мм и высотой 60 мм (рисунок 2.15 и 2.16) при нагреве в интервале температур 20-700 °С.

При этом производились измерения абсолютных и относительных деформаций расширения при первом нагреве. Относительные деформации  $\varepsilon_i$ , интегральные  $\alpha_i$  и дифференциальные значения  $da_i$  КЛТР соответственно определяли по формулам:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\alpha_i = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{T_{i+1} - T_1}$$

$$d\alpha_i = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{T_{i+1}},$$

где:  $\Delta L$  – приращение длины образца при нагреве;

$L_0$  – начальная длина образца;

$T$  – температура образца.

Регистрирующим элементом является конденсатор, включенный в колебательный контур высокочастотного генератора (2), верхняя пластина (7) конденсатора закреплена на подвижном кварцевом штоке (11), который своим нижним концом опирается на поверхность образца (16). Подвижный шток служит для передачи измерений размеров образца на конденсатор. Нижняя пластина (8) конденсатора закреплена на неподвижном опорном кварцевом штоке (12). В нижней части опорного штока находится кварцевая пятка (17), на которой находится образец.

Изменение длины подвижного штока при изменении температуры компенсируется практически по всей его длине аналогичным решением длины опорного штока. Исключением является участок неподвижного штока, равный длине образца. Для этого участка компенсации нет ввиду того, что его размеры известны, КЛТР кварца на порядок меньше КЛТР исследуемых веществ и хорошо изучен, и его влияние может быть учтено при расчете КЛТР. Для фиксирования образца на пятке служат пружинные растяжки (15), прижимающие подвижный шток к пятке. Нагрев осуществляется печью (6). Для центрирования измерительной ячейки и исключения люфта штоков служит направляющая кварцевая трубка (6) с верхней (9) и нижней (14) муфтами.

Для стабилизации температуры и исключения влияния внешних теоретических и тепловых факторов на измерительный конденсатор и ВЧ генератор, они помещены под металлический охлаждаемый вакуумированный колпак (1), который крепится к основанию (3) через прокладки из вакуумной резины (2), служащие для герметизации системы.

Для механизации области нагрева служит система охлаждения проточной водой, выпускаемой через термостат, состоящий из верхней (1) и нижней (4) частей. Нижняя часть надета на кварцевый цилиндрический корпус (5). Вход верхней части соединен со входом нижней. Такая система охлаждения препятствует переносу тепла из зоны нагрева в измерительную часть установки. Для большей локализации области нагрева, в ячейки между нижней частью внешнего охладителя (4) и внутренней нижней муфтой (14) устанавливается тепловой контакт посредством медной посеребренной гофрированной фольги, исключая осуществление обмена излучением и препятствующей переносу тепла снизу. Нагрев образца приводит к перемещению подвижного штока, в результате чего изменяется емкость измерительного конденсатора, что приводит к изменению частоты колебаний ВЧ генератора. Описанная ячейка позволяет проводить исследования влияния магнитных и электрических полей на КЛТР в интервале воздействия температур от 100 °С до 1000 °С.



Рисунок 2.14 – Цилиндрические образцы размером 30x60 мм для определения коэффициента линейного температурного расширения керамзитобетона



Рисунок 2.15 – Вид установки для определения коэффициента линейного температурного расширения керамзитобетона

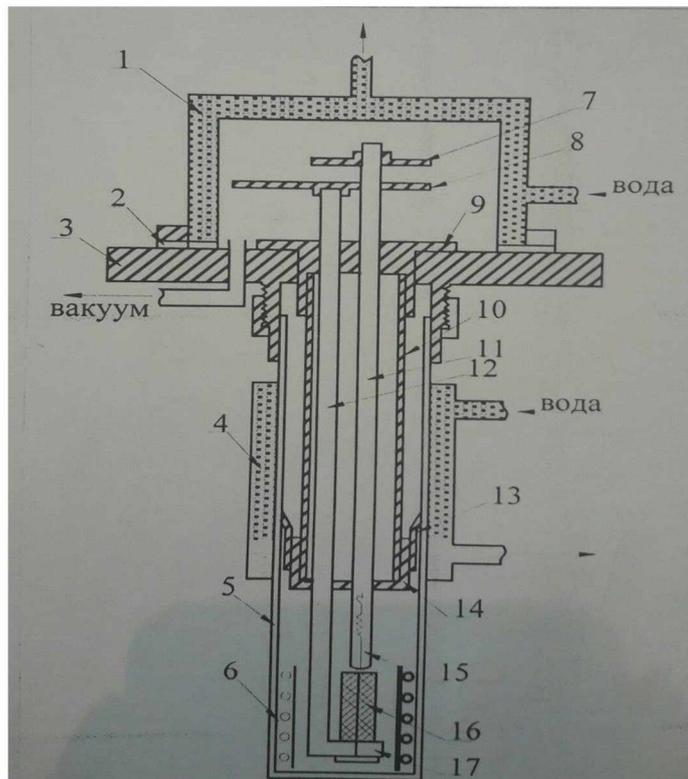


Рисунок 2.16 – Схема измерительного устройства для определения коэффициента линейного температурного расширения керамзитобетона

### 2.2.6. Методы испытаний и исследования

Исследования химического состава и микроструктуры жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси с активированным вяжущим проводились на базе научно-исследовательской лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии» Грозненского государственного нефтяного технического университета им. М. Д. Миллионщикова. При этом применены методы спектрального и электронно-микроскопического анализа.

Спектральный анализ основан на изучении дифракционного рассеяния рентгеновских лучей отдельными атомами, входящими в структурно-упорядоченные образования. В диссертационной работе для исследования применили метод порошка. Для съемки рентгенограмм брали порошок исследуемого вещества, спрессованный в цилиндр диаметром 0,5-1 мм.

Макро- и микроструктуру жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с активированным композиционным вяжущим определяли с помощью системы электронных сфокусированных ионных пучков Quanta 200 ЗД. На данном приборе были получены электронные фотографии микроструктуры рассматриваемого жаростойкого бетона. При этом акцентировалось внимание на свежие сколы образцов, сделанные таким образом, чтобы скол проходил через цементный камень и заполнитель. После этого на образцы жаростойкого бетона проводилось напыление углерода на вакуумном посту ЭВП-2 для образования токопроводящего слоя на поверхности образца – диэлектрика.

Структура жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с активированным композиционным вяжущим, контактной зоны композиционного вяжущего с заполнителем просматривалась при различных увеличениях: 100, 104, 2000, 2500 и 5000 раз.

Истинная плотность материала определялась пикнометрическим методом по ГОСТ 12154-2013 [55], который заключается в измельчении испытуемого материала до прохождения без остатка через сито с размерами ячеек в свету 0,2 мм, гидростатическом взвешивании в пикнометре.

Кажущаяся плотность, открытая пористость и водопоглощение определялись по методике ГОСТ 2409-2014 [56]. Метод состоял в определении водопоглощения, кажущейся плотности, открытой пористости при вакуумном способе насыщения материалов жидкостью и гидростатическом взвешивании испытуемых образцов.

Удельную поверхность вяжущего определяли методом воздухопроницаемости в соответствии с методикой ГОСТ 3-1108-2020 [57] на приборе ПСХ-2 и рассчитывали по формуле:

$$S_{уд.} = \frac{KM\sqrt{T}}{P} [M^2/KГ],$$

где: К – постоянная прибора для той пары риска, между которыми наблюдалось падение столба жидкости;

М – величина, определяемая по таблице и зависящая от высоты слоя материала и температуры воздуха;

Т – время прохождения мениска жидкости между двумя рисунками манометра, в сек.;

Р – масса навески, ч.

Линейную усадку или расширение бетона определяли по ГОСТ 24544-2020 [58] на образцах сечением 30×30 мм и высотой 61 мм, высушенных до постоянной массы. Скорость подъема температуры в печи (8-10) °С/мин, выдержка – 2 часа. Дополнительную линейную усадку или расширение образца в процентах в процентах вычисляли по формуле:

$$\pm \Delta l = \pm \frac{1}{3} \Delta v_{д.п.л}$$

$$\pm \Delta v_{д.п.л} = \frac{V_K - V_H}{V_H} \cdot 100,$$

где:  $V_H$  – объем образца до нагрева, см<sup>3</sup>;

$V_K$  – объем образца после нагрева, см<sup>3</sup>.

Объемы  $V_H$ ,  $V_K$  определяли гидростатическим взвешиванием в соответствии с ГОСТ 2409-2014 [56].

$$V_H, V_K = \frac{m_{н.ж} - m}{\rho_{ж}},$$

где  $m_{н.ж.}$  – масса образца, насыщенного жидкостью, кг;

$m$  – масса образца в жидкости, кг;

$\rho_{ж}$  – плотность насыщающей жидкости при температуре испытания, кг/м<sup>3</sup>.

Термическая стойкость жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе определялась по методике ГОСТ 20910-90 [59] в водных теплосменах. Три образца куба размером 70x70x70 мм, после их твердения и сушки при температуре 105 °С в течение 48 часов, взвешивались с фиксацией первоначальной массы. Затем образцы помещали в разогретую до 700 °С печь и выдерживали 40 минут. Затем нагретый образец опускали в ванну с водой на 5 минут. При этом температура воды составляла 25 °С. Через 5 минут образцы вынимали из воды, выдерживали в воздушной среде в течение 10 минут при температуре 20-25 °С, затем повторяли нагревание до 700 °С. После каждой теплосмены производили смену воды в ванной. Термическая стойкость выражалась числом теплосмен (700 °С – вода 25 °С), которые выдерживали образцы жаростойкого бетона на базальтовом заполнителе до потери 20 % первоначальной массы.

Прочность при сжатии и изгибе определялась по ГОСТ 10180-2012 [60] на прессах типа МС–500 и МС–100. При этом погрешность измерения не превышала  $\pm 2$  %.

Физико-химические исследования проводились на базе лабораторного оборудования лаборатории строительных материалов научно-образовательного центра «Современные строительные технологии и строительные конструкции» Дагестанского государственного технического университета и НИЦКП Грозненского государственного нефтяного технического университета им. М. Д. Миллионщикова «Наноматериалы и нанотехнологии».

Рентгеноструктурный анализ испытуемых образцов произведен на дифрактометре общего назначения ДРОН 2,0 с высокотемпературной установкой УВД-2000, которые приведены на рисунке 2.17.

Исследования микроструктуры жаростойкого бетона после нагрева до заданных температур проводились на растровом электронном микроскопе Quanta200 3Д – SEM/FIB (DuaeBuamtm), вид которого приведен на рисунке 2.18.

Обработку экспериментальных данных производили с помощью программы Microsoft Excel.

Полученные результаты физико-механических испытаний подверглись статистической обработке с вычислением среднеарифметических значений результатов испытаний ( $M$ ), среднеквадратического отклонения ( $G$ ), коэффициента вариации ( $V$ ) и с определением количества образцов ( $n$ ), необходимых для получения результатов с заданной степенью точности ( $P$ ). Для обеспечения достоверности результатов эксперимента минимальное количество образцов в каждой серии испытаний принято не менее трех, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 10180-2012 [60].



Рисунок 2.17 – Вид установки для рентгеноструктурного анализа ДРОН 2.0 с высокотемпературной установкой УВД-2000



Рисунок 2.18 – Электронный растровый микроскоп Quanta 200 3D - SEM/FIB (DualBeam™)

### 2.3. Подбор состава жаростойкого керамзитобетона

Подбор состава жаростойкого керамзитового бетона проводили в соответствии с рекомендациями [61, 48, 62, 50].

Для расчета состава жаростойкого бетона определяли:

- количество частиц менее 0,15 мм в мелком заполнителе;
- кажущуюся плотность заполнителей (плотность в куске);
- оптимальную плотность смеси заполнителя мелкой и крупной фракций (без зерен мельче 0,14 мм);
- плотность материала.

Расход смеси заполнителей мелкой и крупной фракций на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси определяли по формуле:

$$P_3 = \frac{1000}{\frac{1}{V_k} + \frac{a \cdot K_{из}}{V_H}},$$

где:  $P_3$  – количество мелкого и крупного заполнителя, кг;

$K_{из}$  – коэффициент избытка вяжущего теста;

$V_k$  – кажущаяся плотность заполнителей, г/см<sup>3</sup>;

$V_H$  – насыпная плотность заполнителя, г/см<sup>3</sup>;

$a$  – пустотность заполнителя ( $a=0,24 - 0,3$ ), которая уточнялась по формуле:

$$a = 1 - \frac{V_H}{V_K},$$

где  $K_{из}$  – коэффициент избытка вяжущего теста, является одной из важнейших величин, обеспечивающих заданную удобоукладываемость бетонной смеси и влияющих на прочностные характеристики жаростойких бетонов.

Для жаростойких бетонов на цементных вяжущих, для определения коэффициента избытка устанавливают водовяжущее отношение, необходимое для обеспечения заданной прочности бетона, по формуле:

$$B/B_B = \frac{nA_B}{R+1,3nA_B},$$

где:  $B/B_B$  – водовяжущее отношение;

$n$  – коэффициент качества заполнителя;

$R$  – проектная марка бетона;

$A_B$  – активность вяжущего ( $0,5 - 0,75 A_u$ ), определяют по формуле:

$$A_B = \frac{A_{ц}}{1 + d},$$

где:  $A_{ц}$  – активность цемента;

$d$  – количество тонкомолотой добавки в частях веса цемента.

Коэффициент избытка определяют по формуле:

$$1_g K_{из} = 0,64 - 1_g S \cdot B/B,$$

где:  $S$  – удобоукладываемость бетонной смеси, с.

Расход смеси мелкого и крупного заполнителей (сумма объемов) на 1м<sup>3</sup> бетонной смеси находится в пределах 0,3-1,4 м<sup>3</sup>. Для тяжелых и облученных бетонов расход заполнителя составляет 0,9-1,1 м<sup>3</sup>, для легких – 1-1,4 м<sup>3</sup>.

Расход мелкого и крупного заполнителя для бетона на цементных вяжущих определяют по формуле:

$$M = K = \frac{P_3}{2},$$

где:  $M$  – количество мелкого заполнителя, кг;

$K$  – количество крупного заполнителя, кг.

Расход портландцемента и тонкомолотой добавки для бетонов на портландцементе вычисляют по формулам:

$$Ц = \frac{1000 - \frac{P_3}{V_k}}{0,33 + \frac{D}{V_d} + (1+D)V/V}$$

$$D = Ц_d \times 0,3,$$

где:  $D$  – количество тонкомолотой добавки, кг;

$V_d$  – плотность тонкомолотой добавки, г/см<sup>3</sup>.

Количество тонкомолотой добавки в жаростойком бетоне на КВ составляет 30 % по массе.

Расход воды на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси на цементных вяжущих определяют по формуле:

$$B = P_3 \cdot \frac{W}{100} + (ц + д)V/V_B,$$

где:  $B$  – количество воды, кг или л;

$W$  – водопоглощение заполнителя, %.

Сушку и обжиг образцов бетона проводили в лабораторной муфельной печи с диапазоном температуры нагрева до 1100 °С. Нагрев испытуемых образцов производился до температуры 1000 °С.

Вид муфельной печи с образцами-кубами из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе и активированном композиционном вяжущем приведен на рисунке 2.19.

Вид образцов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе приведен на рисунке 2.20.



Рисунок 2.19 – Муфельная печь для обжига образцов жаростойкого бетона в диапазоне температур до 1100 °С



Рисунок 2.20 – Вид образцов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе при сушке 105 °С и при нагреве 500 и 1000 °С с предварительным электроразогревом смеси и без предварительного разогрева

### **ГЛАВА 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВ СМЕСИ ДЛЯ ЖАРОСТОЙКИХ БЕТОНОВ НА КЕРАМЗИТОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ С КОМПОЗИЦИОННЫМ ВЯЖУЩИМ**

#### **3.1. Технология предварительного электроразогрева смеси для жаростойких бетонов**

В лаборатории строительных материалов научно-образовательного центра «Современные строительные материалы и строительные конструкции» ФГБОУ ВО «ДГТУ» совместно с электротехнической лабораторией ООО «Аура-Алиф» для проведения исследования влияния предварительного электроразогрева смеси был собран испытательный стенд с автоматическим регулированием режима электропрогрева, схема и вид которого приведены на рисунках 2.3 и 2.4.

Исследование влияния предварительного электроразогрева смеси проводили на образцах-кубах размером 10x10x10 см. Образцы формовали и прогревали в специальных формах из композитного материала (водостойкая ламинированная древесно-стружечная плита) с поперечными металлическими перегородками, которые одновременно являлись и электродами. Боковые стороны и днища форм толщиной 10 мм – деревянные. Поперечные металлические перегородки из листовой стали толщиной 3 мм.

В каждой форме одновременно изготавливали и прогревали по шесть образцов. Ток проводился к каждому электроду так, чтобы образцы в процессе прогрева находились в равноценных условиях. Каждая серия состояла из 18 образцов, одновременно прогреваемых в трех формах. После электропрогрева смеси по три образца-близнеца от каждой серии испытывали на прочность при сжатии, а остальные образцы помещали в лабораторный сушильный шкаф и выдерживали при температуре 100-110 °С до достижения постоянного веса. После сушки по три образца от каждой серии испытывали на прочность при сжатии. Высушенные образцы нагревали до температуры 800 и 1000 °С в муфельной печи по следующему режиму: подъем температуры в печи со скоростью 200 °С/ч, выдержка при

заданной температуре 4 часа. Образцы остывали в печи, испытание образцов на прочность при сжатии производили через 10 суток после нагревания.

Для изготовления образцов был принят следующий базовый состав бетона в кг/м<sup>3</sup>:

|  |     |
|--|-----|
| портландцемент Серебряковского цементного завода<br>марки 500..... | 450 |
| тонкомолотая обожженная глина.....                                 | 133 |
| керамзитовый песок.....  | 450 |
| керамзитовый щебень.....   | 550 |

Водовязущее отношение количества воды за вычетом воды на водопоглощение к общему количеству вяжущего (цемент + тонкомолотый серый аргиллит) – колебалось в пределах 0,29-0,31. Осадка стандартного конуса соответственно изменялась в пределах 0,8-1,5 см.

### 3.2. Математическое моделирование процесса предварительного электроразогрева смеси для жаростойких бетонов

Результаты экспериментальных исследований, полученные нами, позволяют предположить, что физико-механические и теплофизические показатели бетона во многом зависят от «механизма» предварительного электроразогрева бетонной смеси до сушки при температуре 105 °С. Физико-механические и теплофизические показатели существенно зависят от формы кривой зависимости температуры нагревания исследуемой бетонной смеси от времени, т. е. от функции  $\varphi = f(t)$ , где  $f$  – температура исследуемой бетонной смеси, а  $t$  – время нагревания.

Однако закон изменения этой температуры во времени до сих пор строго не определен. В этой связи, в данной работе делается попытка решить задачу составления математической модели процесса предварительного электроразогрева бетонной смеси с целью получения жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем, относительно высокими, физико-механическими, теплофизическими и эксплуатационными свойствами.

Существует множество разработанных математических моделей различных процессов и объектов исследования. Наиболее эффективным считается метод, при котором достигается максимальное соответствие полученной модели реальной действительности, т. е. максимальная адекватность математической модели исследуемому процессу.

Если при выборе структуры математической модели имеется возможность учитывать, в той или иной степени, физические процессы, протекающие в исследуемом объекте и, соответственно, подбирать математические законы, описывающие вышеназванные процессы, то такое моделирование известно под названием «неформальное моделирование». Отличается это моделирование тем, что параметры модели являются конкретными физическими величинами. Моделирование структуры и свойства термостойких материалов, применяемых для огнезащиты строительных конструкций посвящена работа авторов [147].

При «неформальном моделировании», функция, описывающая исследуемый процесс, выражается эмпирической формулой. Критерии, влияющие на выбор эмпирической формулы, называются неформальными критериями. К их числу и относится критерий наименьшей невязки (КНН), применение которого может одновременно обеспечить адекватность и простоту математической модели [117].

В случае, когда вид функции подсказывается самой природой изучаемого явления, модель процесса желательно искать в относительно узком классе алгебраических функций.

Практика показывает, что теплотехнические процессы, протекающие при получении строительных материалов, подчиняются, в основном, логарифмическому  $y(t) = a \cdot \ln t + b$ , экспоненциальному  $y(t) = ae^{bt}$  и степенному  $y(t) = at^b$  закону [118].

В рассматриваемом нами случае природа температурных явлений, протекающих при схватывании вяжущих материалов, подсказывает о целесообразности использования экспоненциальной функции в качестве исходной для составления математической модели, т.е.  $\varphi(t) = ae^{bt}$ .

Критерий наименьшей невязки, о котором упоминалось выше, имеет вид [117]:

$$F = |\varphi_s - \varphi_d|, \quad (3.1),$$

где  $\varphi_s$  – вычисляют по формуле  $\varphi_s = \sqrt{\varphi_1 \cdot \varphi_N}$ , используя крайние значения из таблицы 3.1, в которую занесены результаты, полученные экспериментальным путем.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные, полученные в ходе предварительного электроразогрева исходной смеси для получения бетона с улучшенными физико-механическими, теплофизическими и эксплуатационными характеристиками:  $t_i$  – дискретное значение времени нагревания в минутах;  $\varphi_i$  – дискретное значение температуры исследуемого объекта в градусах Цельсия

| i  | $t_i$<br>мин. | $\varphi_i$<br>град. Цельсия | Сингулярные участки                          |
|----|---------------|------------------------------|--|
| 1  | 0             | 20                           | $\varphi_1(t)$ ,<br>коэффициенты- $a_1, b_1$ |
| 2  | 15            | 37                           |  |
| 3  | 30            | 50                           |  |
| 4  | 45            | 60                           |  |
| 5  | 60            | 68                           |  |
| 6  | 90            | 80                           |  |
| 7  | 120           | 85                           | $\varphi_2(t)$ ,<br>коэффициенты- $a_2, b_2$ |
| 8  | 150           | 87                           |  |
| 9  | 180           | 88                           |  |
| 10 | 210           | 89                           |  |
| 11 | 240           | 90                           |  |
| 12 | 270           | 77                           | $\varphi_3(t)$ ,<br>коэффициенты- $a_3, b_3$ |
| 13 | 300           | 65                           |  |
| 14 | 330           | 55                           |  |
| 15 | 360           | 47                           |  |
| 16 | 390           | 38                           |  |
| 17 | 420           | 32                           |  |
| 18 | 450           | 25                           |  |
| 19 | 480           | 20                           |  |

Анализ результатов, полученных в ходе экспериментального исследования (табл. 3.1), позволяет делать следующий вывод: на формализуемой кривой  $\varphi=f(t)$  следует выделить 3 сингулярных участка:

$$\varphi_1 = a_1 e^{b_1 t} \varphi_2 = a_2 e^{b_2 t} \varphi_3 = a_3 e^{b_3 t},$$

т. е. математическую модель ищем в следующем виде:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_1(t) = a_1 e^{b_1 t}, & \text{при } 0 \leq t \leq 120 \\ \varphi_2(t) = a_2 e^{b_2 t}, & \text{при } 120 < t \leq 240 \\ \varphi_3(t) = a_3 e^{b_3 t}, & \text{при } 240 < t \leq 480 \end{cases} \quad (3.2).$$

Такое решение оправдано, так как скорости изменения производных функции  $\varphi = f(t)$  во времени на этих участках существенно различаются.

Учитывая принятое выше решение, значения  $\varphi_s \varphi_d$  в выражении (3.1) определяются для каждого сингулярного участка отдельно:

$$\varphi_{s_1} = \sqrt{\varphi_1 \cdot \varphi_6} = \sqrt{20 \cdot 80} = 40^\circ C;$$

$$\varphi_{s_2} = \sqrt{\varphi_7 \cdot \varphi_{11}} = \sqrt{85 \cdot 90} = 87^\circ C;$$

$$\varphi_{s_3} = \sqrt{\varphi_{12} \cdot \varphi_{19}} = \sqrt{77 \cdot 20} = 39^\circ C.$$

С целью вычисления значений  $\varphi_d$  находим [1]:

$$t_{d_1} = \frac{t_1 + t_6}{2} = \frac{0 + 90}{2} = 45 \text{ мин.};$$

$$t_{d_2} = \frac{t_7 + t_{11}}{2} = \frac{120 + 240}{2} = 180 \text{ мин.};$$

$$t_{d_3} = \frac{t_{12} + t_{19}}{2} = \frac{270 + 480}{2} = 375 \text{ мин.}$$

По таблице 3.1 находим значения  $\varphi_d$ , соответствующие  $t_{d_1}, t_{d_2}, t_{d_3}$ :

$$\varphi_{d_1} = 60^\circ C; \varphi_{d_2} = 88^\circ C; \varphi_{d_3} = 43^\circ C.$$

Вычисляем критерии наименьшей навязки для каждого сингулярного участка кривой  $\varphi = f(t)$ :

$$F_1 = |\varphi_{s_1} - \varphi_{d_1}| = |40 - 60| = 20^\circ C;$$

$$F_2 = |\varphi_{s_2} - \varphi_{d_2}| = |87 - 88| = 1^\circ C;$$

$$F_3 = |\varphi_{s_3} - \varphi_{d_3}| = |39 - 43| = 4^\circ C.$$

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

Искомая функция  $\varphi(t)$  на участке 1 изменяется с относительно высокой скоростью, чем на участках 2 и 3 (рисунок 3.1).

Между участками 2 и 3 должно находиться место расположения точки перегиба функции (рисунок 3.1).

Наличие точки перегиба указывает на тот факт, что коэффициенты  $b_2$  и  $b_3$  имеют разные знаки: если  $b_2 > 0$ , то  $b_3 < 0$  и наоборот.

Выбор исходной функции  $\varphi(t) = a_i e^{b_i t}$ , а также сингулярных участков для моделирования осуществлены верно.

Для составления реальной модели исследуемого процесса следует вычислить значения коэффициентов  $a_1, a_2, a_3$  и  $b_1, b_2, b_3$  в функционале (3.2). Для этого используем таблицу 3.1 и следующие расчетные формулы [1]:

$$b_j = \frac{(\sum_{i=1}^N [t_i \cdot \ln \varphi_i] - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \cdot \sum_{i=1}^N \ln \varphi_i)}{(\sum_{i=1}^N t_i^2 - \frac{1}{N} \cdot [\sum_{i=1}^N t_i]^2)} ; \quad (3.3)$$

$$a_j = \exp\left(\frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N \ln \varphi_i - b_j \sum_{i=1}^N t_i \right]\right). \quad (3.4)$$

Вычисление этих коэффициентов выполнено с использованием программных средств, структурная схема алгоритма которой приведена на рисунке 3.2.

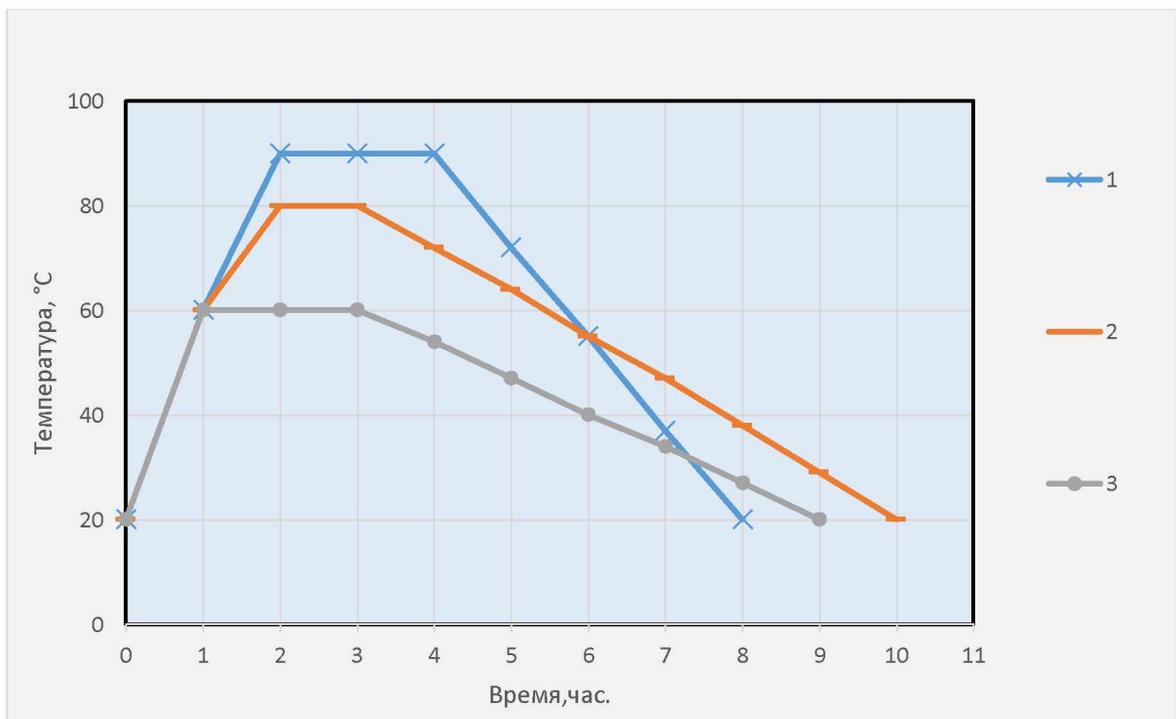
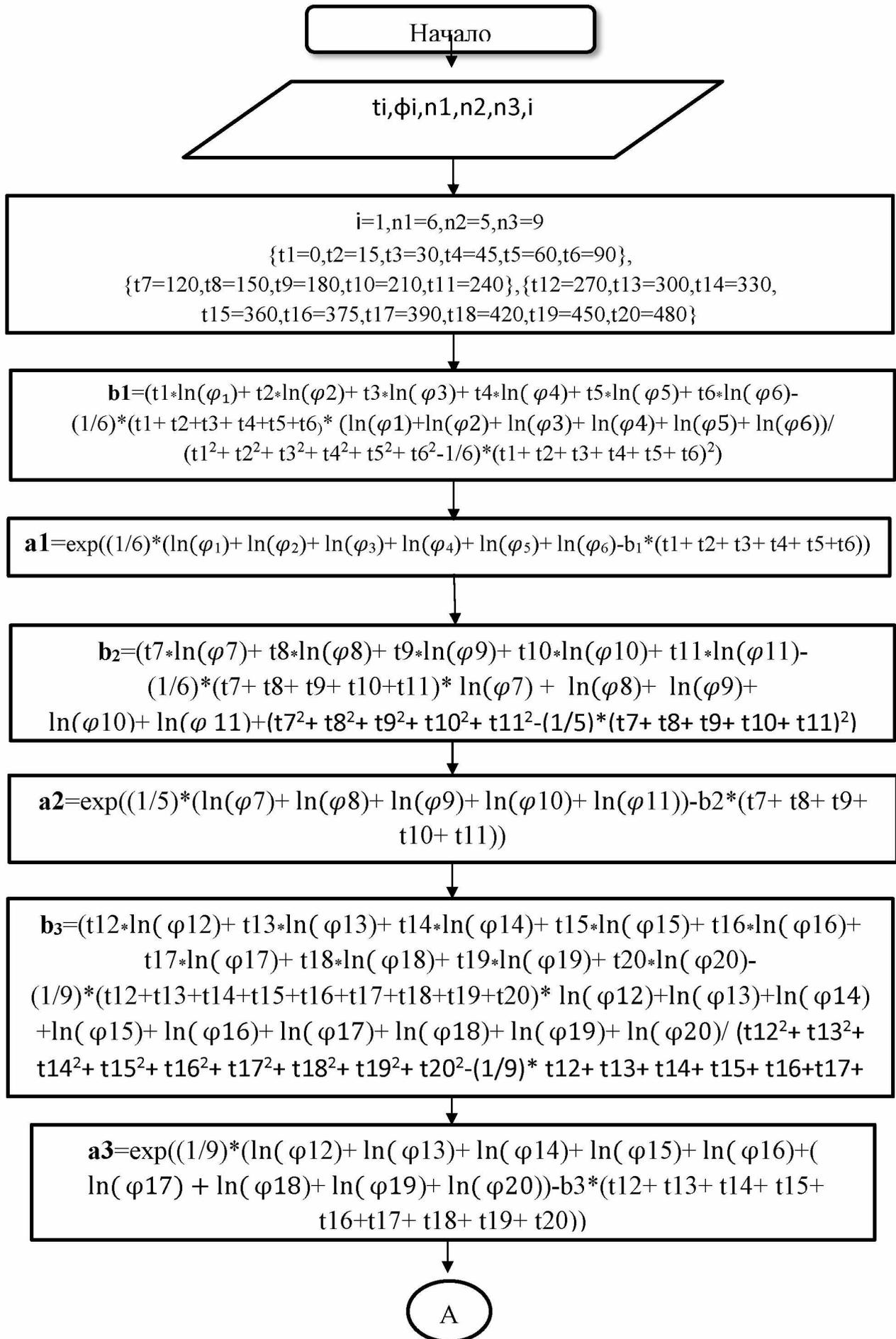


Рисунок 3.1 – График режима нагрева смеси



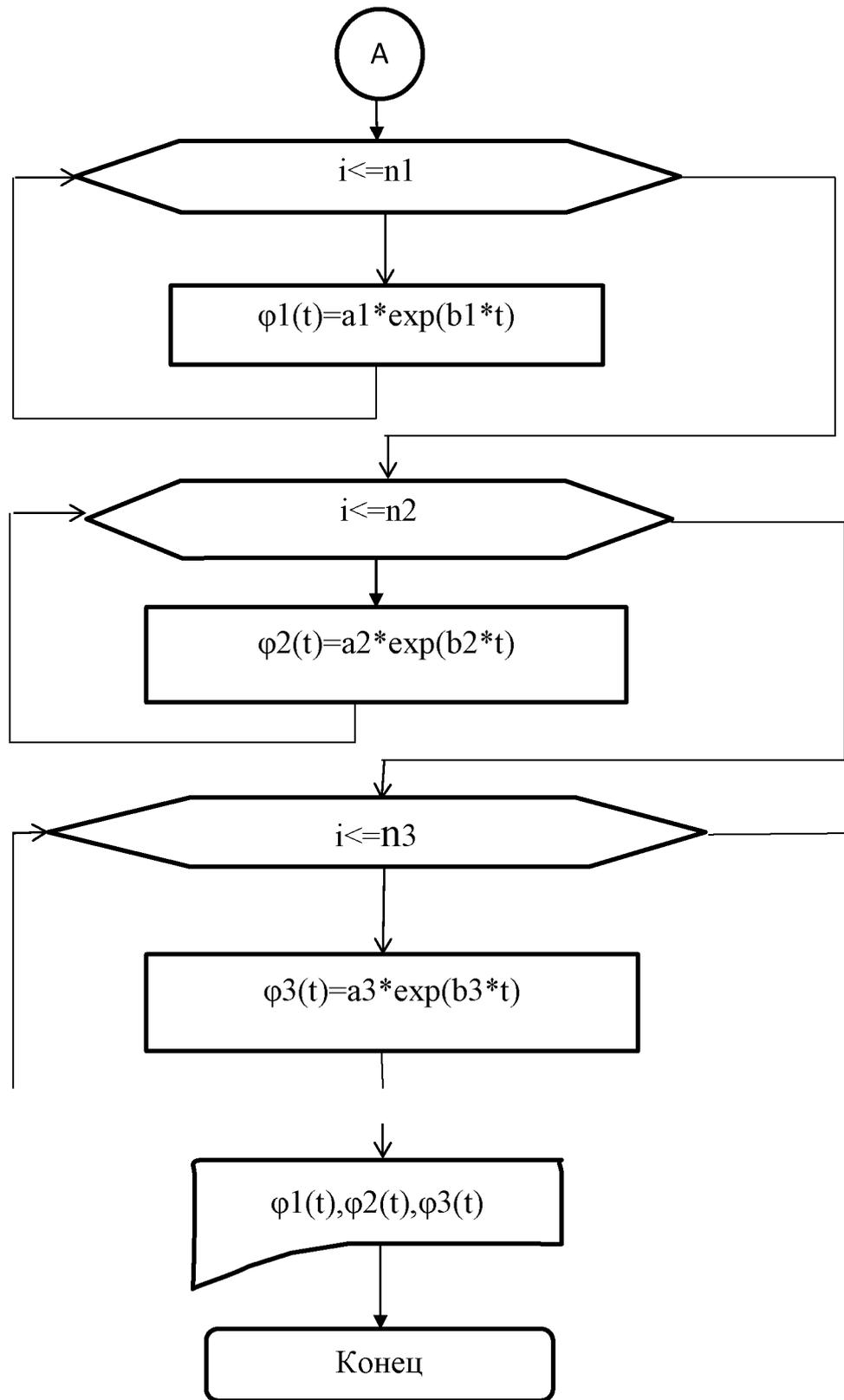


Рисунок 3.2 – Структурная схема алгоритма расчета

### 3.3. Исследование влияния различных режимов предварительного электроразогрева смеси на свойства жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем

Исследование влияния предварительного электроразогрева смеси проводилось на лабораторном стенде, приведенной на рисунке 2.3, по методике, предложенной в работах [45, 46]. С целью изучения влияния предварительного электроразогрева смеси на физико-термические характеристики бетона в зависимости от температуры термообработки образцы высушивались при температуре 105 °С. Прочность жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе после высушивания до постоянной массы при температуре 105 °С принимали за 100 %.

Составы жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Составы жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем

| №№<br>сост<br>авов | Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона |  |     |                             |     |      |                     |
|--------------------|--|--|-----|-----------------------------|-----|------|---------------------|
|                    | портланд<br>цемент<br>(ПЦ), кг               | тонкомолотая добавка -<br>обожженная аргиллитовая<br>глина |     | заполнитель, л, фракции, мм |     |      | добавка<br>СП-1, кг |
|                    |  | % от ПЦ  | кг  | 5-10                        | 2-5 | до 2 |                     |
| 1                  | 2  | 3  | 4   | 5                           | 6   | 7    | 8                   |
| 1                  | 405  | 10   | 45  | 360                         | 360 | 580  | 0,68                |
| 2                  | 315  | 30   | 135 | 360                         | 360 | 580  | 0,68                |
| 3                  | 270  | 40   | 180 | 360                         | 360 | 580  | 0,68                |
| 4                  | 225  | 50   | 225 | 360                         | 360 | 580  | 0,68                |

Примечание: расход воды 175 л/м<sup>3</sup>

Тепловые агрегаты предприятия промышленности строительной индустрии, такие как: обжиговые туннельные печи для обжига кирпича, вращающиеся печи для обжига портландцементного клинкера или керамзитового гравия и другие тепловые агрегаты, эксплуатирующие при воздействии повышенных и высоких температур изготавливают из жаростойкого бетона, либо сборными на полигонах заводов железобетонных изделий или монолите, непосредственно на строительной площадке. Вопросам применения жаростойких бетонов при строительстве тепловых агрегатов посвящены работы [2, 12, 15, 16, 22, 28, 32, 38, 52, 63-67, 149]. Тепловая обработка при изготовлении изделий из жаростойкого бетона позволяет интенсифицировать процесс гидратации вяжущего. В данной диссертационной работе для интенсификации процесса гидратации и твердения бетонной смеси в формах до сушки при температуре 105 °С применяется метод электроразогрева.

Образцы четырех составов бетонной смеси испытывали на прочность в зависимости от процентного содержания тонкомолотой добавки в композиционном вяжущем. Результаты испытания приведены в таблицах 3.3-3.4.

В таблице 3.4 приведена зависимость прочности жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе от нагрева в температурном диапазоне от 20 до 1000 °С четырех составов различным соотношением тонкомолотой добавки в композиционном вяжущем без предварительного электроразогрева смеси.

Сравнительный анализ изменения зависимости прочности всех четырех составов от температуры нагрева показывает, что значение прочности образцов бетона с предварительным электрорагревом смеси на 25÷32 % выше по сравнению с результатами образцов без предварительного электроразогрева смеси. Увеличение прочности бетона с предварительным электрорагревом смеси связано с равномерным распределением теплового потока по всему объему испытываемых образцов бетона. При применении электроразогрева смеси миграционные процессы между цементирующим и пористым заполнителем становятся слабее, так как воздух в порах заполнителя при повышении температуры увеличивается в объеме и будет противодействовать миграцию влаги. Предварительный электрорагрев бетонной смеси способствует интенсификации

реакции гидратации портландцемента и значительно ускоряет скорость набора прочности бетона в начальный период твердения. Также предварительный электроразогрев смеси способствует снижению количества химически несвязанной воды и уменьшению порового пространства в структуре бетона и при дальнейшей сушке при температуре 105 °С и нагреве до температуры 1000 °С.

Таблица 3.3 – Влияние предварительного электроразогрева смеси на прочность при сжатии жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем

| № состава по табл. 3.2 | Температура разогрева, °С | Режимы твердения в часах        |                    |                        | Расчетная средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Предел прочности при сжатии в МПа после нагревания до температуры, °С |       |       |       |       |       |
|------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        |                           | выдержка перед электропрогревом | подъем температуры | изотермический прогрев |  | 200   | 100   | 400   | 600   | 800   | 1000  |
|                        |                           |                                 |                    |                        |  |   |       |       |       |       |       |
| 1                      | 90                        | 0,5                             | 2                  | 2                      | 1470   | 13,26   | 15,86 | 13,11 | 12,71 | 11,54 | 9,16  |
|                        | 90                        | 3                               | 2                  | 2                      | 1470   | 15,23   | 18,71 | 13,87 | 13,47 | 12,36 | 10,61 |
|                        | 90                        | 4                               | 2                  | 2                      | 1470   | 20,41   | 21,06 | 14,77 | 14,17 | 13,51 | 11,34 |
|                        | 80                        | 0,5                             | 1,5                | 2                      | 1470   | 11,31   | 14,73 | 13,64 | 13,12 | 9,43  | 8,24  |
|                        | 80                        | 3                               | 1,5                | 2                      | 1470   | 13,26   | 17,23 | 14,12 | 13,77 | 10,33 | 10,73 |
|                        | 80                        | 6                               | 1,5                | 2                      | 1470   | 14,87   | 19,51 | 14,87 | 14,12 | 12,58 | 10,61 |
|                        | 60                        | 0,5                             | 1                  | 2                      | 1470   | 10,01   | 13,06 | 13,82 | 13,75 | 9,82  | 7,88  |
|                        | 60                        | 3                               | 1                  | 2                      | 1470   | 11,15   | 14,27 | 14,62 | 14,37 | 10,17 | 9,16  |
|                        | 60                        | 6                               | 1                  | 2                      | 1470   | 12,48   | 16,47 | 15,12 | 14,18 | 21,98 | 10,52 |
| 2                      | 90                        | 0,5                             | 2                  | 2                      | 1470   | 15,91   | 18,61 | 16,72 | 14,37 | 12,17 | 10,82 |
|                        | 90                        | 3                               | 2                  | 2                      | 1470   | 16,53   | 21,34 | 17,8  | 15,42 | 13,27 | 11,31 |
|                        | 90                        | 4                               | 2                  | 2                      | 1470   | 18,61   | 23,57 | 19,72 | 16,83 | 14,97 | 12,22 |
|                        | 80                        | 0,5                             | 1,5                | 2                      | 1470   | 13,15   | 15,52 | 13,67 | 12,37 | 10,81 | 9,31  |
|                        | 80                        | 3                               | 1,5                | 2                      | 1470   | 14,12   | 18,34 | 16,24 | 13,64 | 11,82 | 10,61 |
|                        | 80                        | 6                               | 1,5                | 2                      | 1470   | 15,68   | 27,85 | 18,1  | 15,72 | 13,63 | 11,37 |
|                        | 60                        | 0,5                             | 1                  | 2                      | 1470   | 12,57   | 14,78 | 13,17 | 11,24 | 10,27 | 8,54  |
|                        | 60                        | 3                               | 1                  | 2                      | 1470   | 13,82   | 17,37 | 14,11 | 13,15 | 11,17 | 9,72  |
|                        | 60                        | 6                               | 1                  | 2                      | 1470   | 14,67   | 17,82 | 15,87 | 14,27 | 12,63 | 11,63 |

|   |    |     |     |   |      |       |       |       |       |       |       |
|---|----|-----|-----|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 | 90 | 0,5 | 2   | 2 | 1470 | 16,10 | 18,91 | 17,12 | 14,82 | 12,67 | 11,12 |
|   | 90 | 3   | 2   | 2 | 1470 | 16,72 | 21,72 | 18,32 | 15,87 | 13,92 | 11,87 |
|   | 90 | 4   | 2   | 2 | 1470 | 19,11 | 23,92 | 20,12 | 17,22 | 15,27 | 12,74 |
|   | 80 | 0,5 | 1,5 | 2 | 1470 | 13,47 | 15,93 | 13,64 | 12,85 | 11,17 | 9,68  |
|   | 80 | 3   | 1,5 | 2 | 1470 | 14,53 | 18,82 | 16,19 | 14,11 | 12,21 | 10,93 |
|   | 80 | 6   | 1,5 | 2 | 1470 | 16,11 | 24,15 | 18,87 | 16,13 | 14,15 | 11,85 |
|   | 60 | 0,5 | 1   | 2 | 1470 | 13,11 | 15,13 | 13,12 | 12,32 | 10,91 | 9,13  |
|   | 60 | 3   | 1   | 2 | 1470 | 14,11 | 18,32 | 12,87 | 13,22 | 11,82 | 10,12 |
|   | 60 | 6   | 1   | 2 | 1470 | 15,91 | 23,86 | 18,12 | 15,93 | 13,97 | 10,83 |
| 4 | 90 | 0,5 | 2   | 2 | 1470 | 17,12 | 19,15 | 18,17 | 17,63 | 10,11 | 8,85  |
|   | 90 | 3   | 2   | 2 | 1470 | 18,21 | 22,14 | 21,77 | 20,65 | 11,72 | 10,12 |
|   | 90 | 4   | 2   | 2 | 1470 | 20,53 | 25,77 | 24,64 | 23,12 | 12,55 | 11,31 |
|   | 80 | 0,5 | 1,5 | 2 | 1470 | 16,22 | 18,21 | 17,12 | 16,51 | 9,37  | 7,31  |
|   | 80 | 3   | 1,5 | 2 | 1470 | 17,47 | 21,47 | 20,31 | 19,48 | 10,11 | 8,57  |
|   | 80 | 6   | 1,5 | 2 | 1470 | 19,34 | 14,17 | 23,32 | 22,31 | 11,47 | 9,87  |
|   | 60 | 0,5 | 1   | 2 | 1470 | 15,12 | 19,61 | 16,15 | 15,11 | 8,12  | 6,87  |
|   | 60 | 3   | 1   | 2 | 1470 | 15,92 | 20,52 | 19,11 | 17,22 | 9,37  | 7,62  |
|   | 60 | 6   | 1   | 2 | 1470 | 17,67 | 23,42 | 21,82 | 20,37 | 10,53 | 8,22  |

Таблица 3.4– Зависимость прочности жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем без предварительного электроразогрева смеси оптимального гранулометрического состава от количества тонкомолотой добавки и температуры нагрева

| № составов | Процентное соотношение ПЦ и ТМД | Предел прочности при сжатии в МПа после нагревания до температуры в °С. |       |       |       |       |      |
|------------|---------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|------|
|            |                                 | 20  | 100   | 400   | 600   | 800   | 1000 |
| 1          | 90:10                           | 10,72   | 15,80 | 11,21 | 10,62 | 6,67  | 6,82 |
| 2          | 70:30                           | 11,32   | 16,87 | 12,63 | 11,78 | 11,32 | 7,87 |
| 3          | 60:40                           | 11,67   | 17,11 | 13,88 | 12,47 | 11,82 | 8,44 |
| 4          | 50:50                           | 12,32   | 18,27 | 14,42 | 13,62 | 11,91 | 8,48 |

Необходимо отметить возрастание активности воды, при повышенных температурах за счет увеличения степени диссоциации по сравнению с водой в бетонных смесях при нормальных температурных условиях.

Графики зависимости прочности на сжатие керамзитобетона от температуры нагрева для оптимального состава без предварительного разогрева и четырех составов с предварительным разогревом образцов бетона в формах приведены на рисунках: 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7.

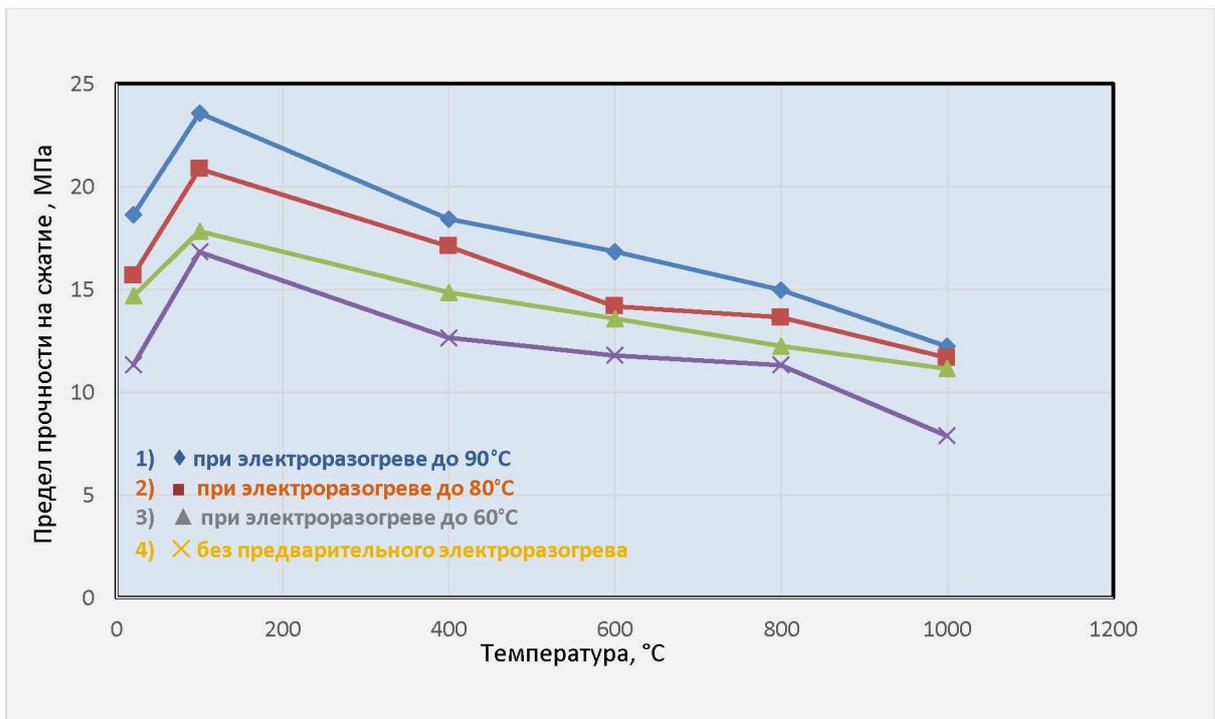


Рисунок 3.3 – Зависимость прочности на сжатие керамзитобетона оптимального состава от температуры нагрева

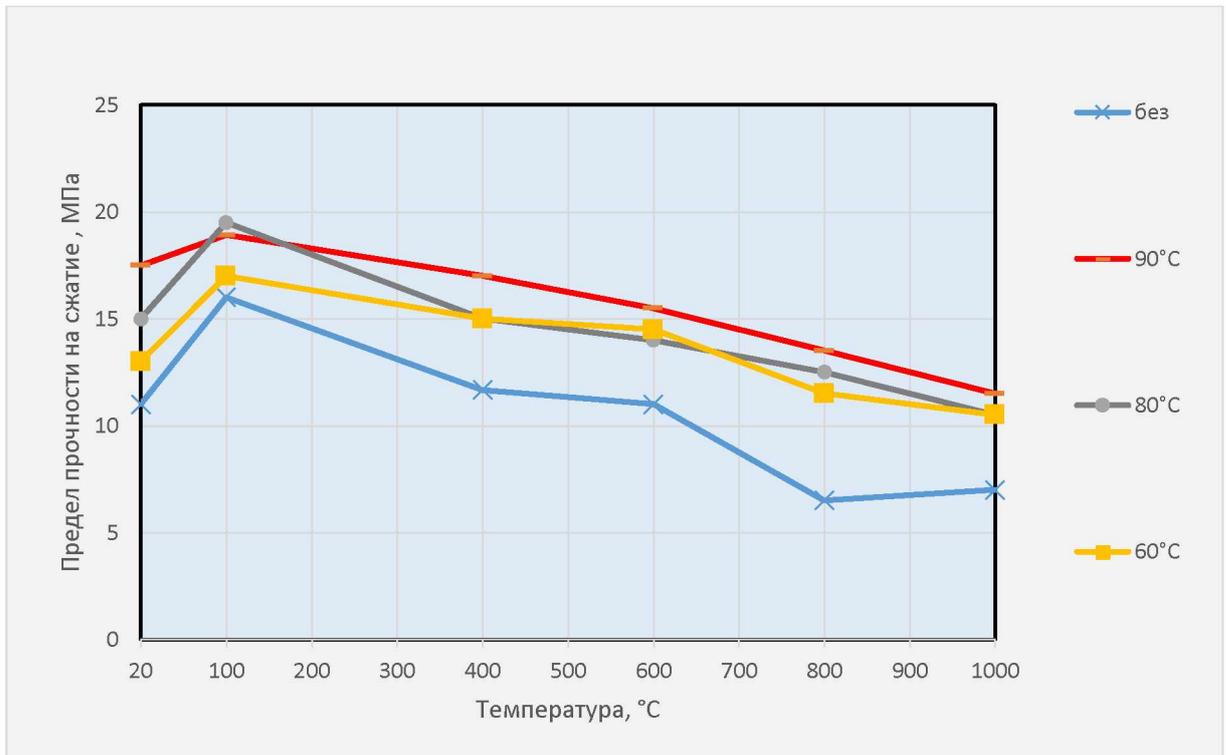


Рисунок 3.4 – Зависимость прочности на сжатие керамзитобетона от температуры нагрева состава №1 при различных режимах предварительного разогрева

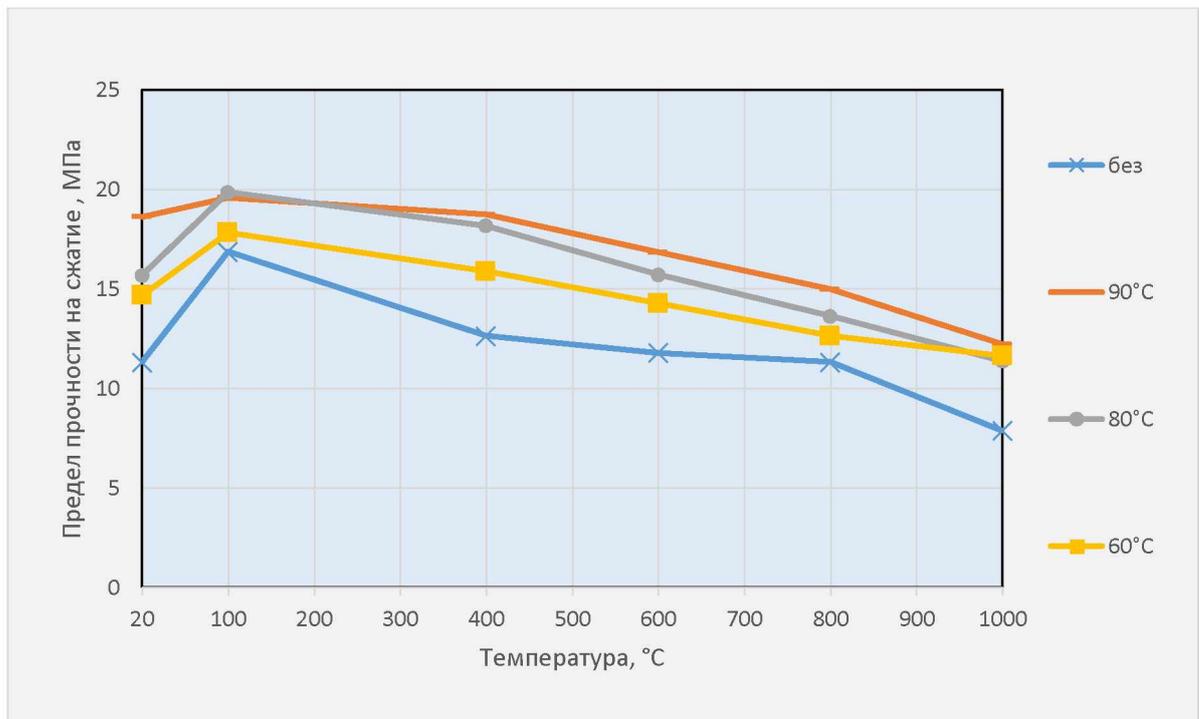


Рисунок 3.5 – Зависимость прочности на сжатие керамзитобетона от температуры нагрева состава №2 при различных режимах предварительного разогрева

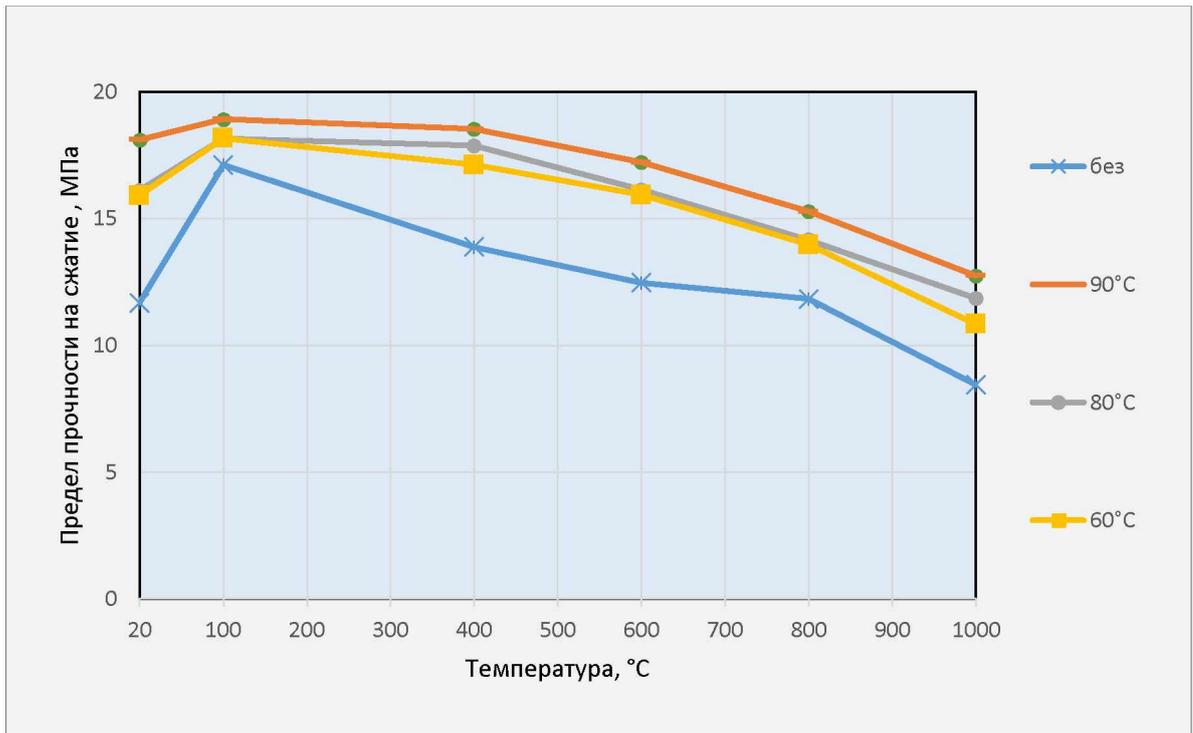


Рисунок 3.6 – Зависимость прочности на сжатие керамзитобетона от температуры нагрева состава №3 при различных режимах предварительного разогрева

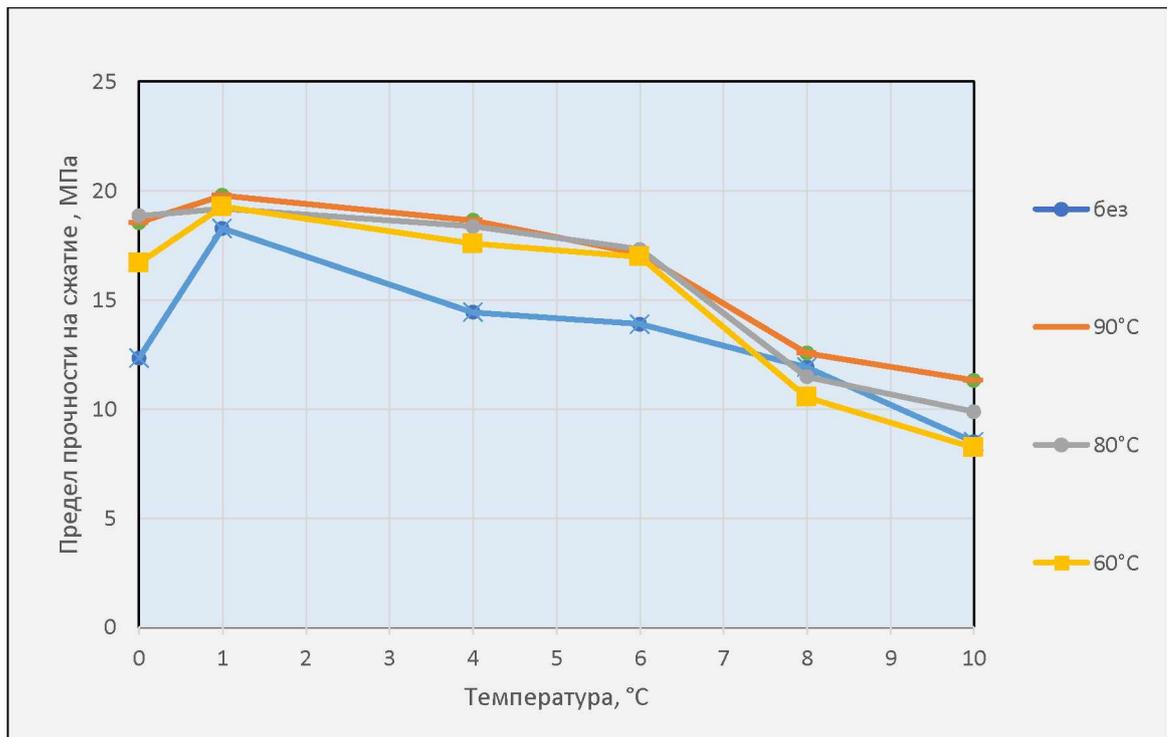


Рисунок 3.7 – Зависимость прочности на сжатие керамзитобетона от температуры нагрева состава №4 при различных режимах предварительного разогрева

Как видно из рисунков 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7. прочность образцов бетона после предварительного электроразогрева смеси, до сушки при температуре  $105^{\circ}\text{C}$  выше чем прочность образцов без предварительного электроразогрева смеси. Увеличение прочности по сравнению с образцами бетона без предварительного электроразогрева смеси объясняется тем, что при предварительном электроразогреве смеси происходит процесс самопропаривания, связанное с наличием достаточного количества влаги содержащих в зернах заполнителя (керамзита). Результаты исследования показали что при нагревании бетона в температурном диапазоне от  $400$  до  $1000^{\circ}\text{C}$  с увеличением температуры нагревания прочность снижается. Это связано со структурными изменениями затвердевшего композиционного вяжущего в следствии разрушения пространственной решетки кристаллогидратов при дегидратации цементного камня, сопровождаемые потерей их прочности. Снижение прочности также связано с разницей в деформациях цементного камня и заполнителя при первом нагреве.

Температурные напряжения в бетоне возникают при резком подъеме температуры. Эти процессы происходят при температуре предварительного разогрева в интервале от  $40$  до  $70^{\circ}\text{C}$ . Как указано в работе [43, 44] при подъеме температуры от  $20$  до  $70^{\circ}\text{C}$  для снижения влияния напряженного состояния на структуру жаростойкого керамзитобетона рекомендуется устроить технологический перерыв в подъеме температуры. В температурном диапазоне от  $20$  до  $40^{\circ}\text{C}$  увеличение скорости подъема не оказывает существенного влияния на изменение показателей прочности как до, так и после нагревания образцов бетона до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$ . При предварительном электроразогреве смеси увеличение скорости нагрева до  $40^{\circ}\text{C}$ , как указано в работе [149] происходит нейтрализация деструктивных явлений, связанные с наличием в бетоне активированного композиционного вяжущего с развитой удельной поверхностью, который снижает температурные деформации в бетоне и способствует интенсификации реакции гидратации с повышением температуры нагрева.

Водотвёрдое отношения для жаростойких бетонов на керамзитовом заполнителе играет важную роль. Обычно для жаростойких бетонов, как указано в работах [32, 49, 62] водотвердое отношение колеблется в пределах от 0,2 до 0,35, так как при этом достигается оптимальное значение подвижности по осадке стандартного конуса, который не превышает 2 см. Как указано в работе [44] уменьшение водотвердого отношения до 0,25 приводит к повышению прочности после электроразогрева смеси до 30 %. Причиной замедления процесса интенсификации реакции гидратации с большим содержанием воды является увеличение расстояния между частицами цемента из-за большого слоя воды и уменьшения силы взаимодействия между частицами. Изменения прочности бетона при сжатии одинаковы при водотвердом отношении равном  $0,2 \div 0,25$  при нормальных влажностных условиях твердения и с применением электроразогрева смеси. Применение дополнительного пригруза при формировании изделий из жаростойкого керамзитобетона позволяет обеспечить более плотную упаковку крупного и мелкого заполнителя при уплотнении бетонной смеси. Очень важным показателем при формировании изделия является подвижности бетонной смеси. Применение предварительного электроразогрева позволяет оптимизировать количество воды затворения, пластифицирующей добавки и количества активированного композиционного вяжущего за счет регулирования температурного режима разогрева смеси. Повышение эксплуатационных показателей изделий из жаростойкого бетона при предварительном электроразогреве достигается за счет удаления химически несвязанной воды из растворной части бетона, а также влаги из порового пространства заполнителя. Большое значение для повышения эксплуатационных характеристик жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем имеет исследование влияния электроразогрева смеси на потерю влаги. Результаты опытов показали, что с увеличением температуры электроразогрева смеси испарение воды увеличивается. Как указано в работе [44] за 15 часов прогрева по режиму 3+8+4 часов при температуре 80 °С из тяжелого бетона с водосодержанием 195 литров на 1м<sup>3</sup> испаряется на 8 % влаги больше, чем за то же время прогрева при температуре 60

°С (соответственно 49 и 41 % влаги от воды затворения). Исследования влияния предварительного электроразогрева смеси для жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем на потерю влаги показали, что испарения при температуре нагрева 90 °С в 7 раз больше, чем в условиях прогрева при температуре 80 °С. Полученные результаты совместимы с результатами опытов, приведенных в работе [44]. На рисунке 3.8 приведены зависимости потери влаги бетона в % от водосодержания в процессе электроразогрева смеси.

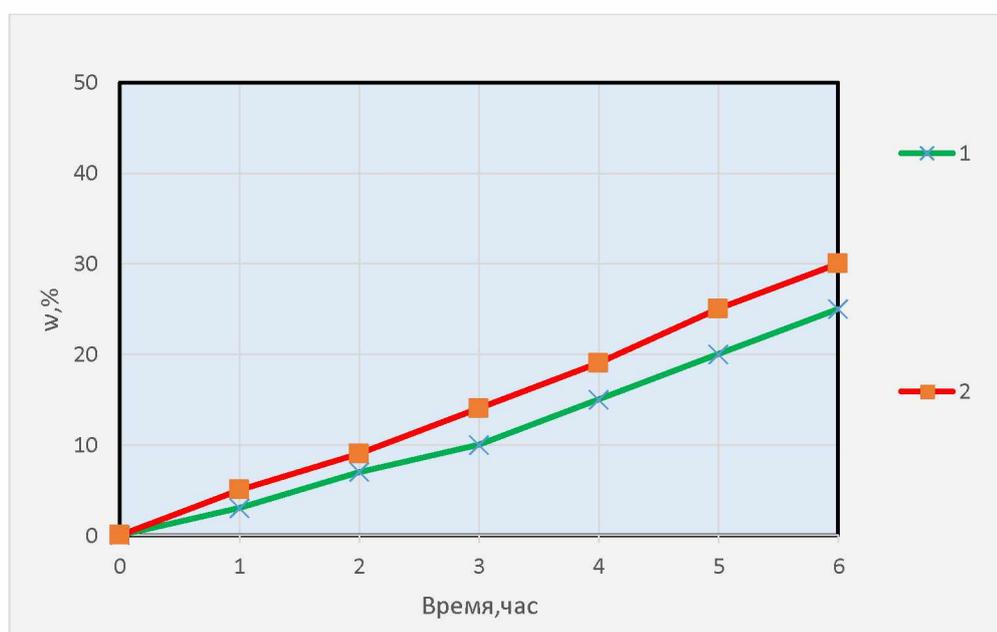


Рисунок 3.8 – Зависимость потери влаги керамзитобетона от времени электроразогрева смеси в часах

1. Прогрев смеси при температуре 80 °С
2. Прогрев смеси при температуре 90 °С

Как показали исследования с повышением температуры электроразогрева смеси количество испарившейся воды увеличивается с постоянной интенсивностью 0,4-0,5 % на 1°С. При предварительном электроразогреве смеси потеря влаги также зависит от скорости разогрева. Установлено, что [44] с увеличением скорости разогрева количество испарившейся воды за время прогрева возрастает, достигая максимальной величины при температуре 240 °С. Из жаростойкого керамзитобетона со скоростью подъема температуры 240 °С в 1 час

происходит максимальное испарение воды – до 45-48 %, что почти в два раза выше потери влаги при разогреве со скоростью 20 °С в час. Зависимость потери влаги от скорости нагрева приведена на рисунке 3.9.

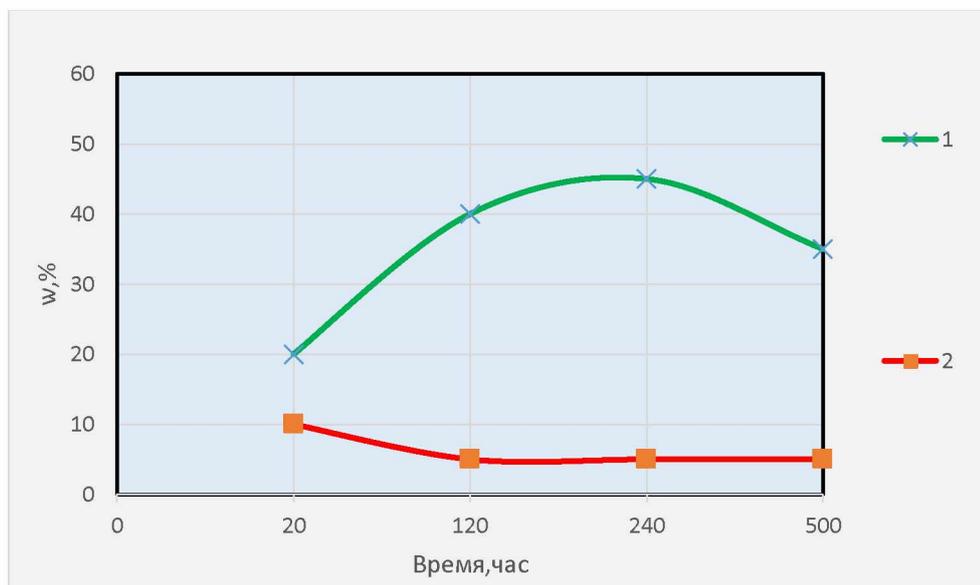


Рисунок 3.9 – Зависимость испарения влаги жаростойкого керамзитобетона от температуры нагрева

1. Испарение за время прогрева в течении 7 часов без предварительного электроразогрева; 2. То же с предварительным электроразогревом

Испарение влаги за время разогрева уменьшается по мере увеличения скорости подъема температуры. Для керамзитобетона при нагреве с 20 до 120 °С в час количество испарившейся влаги снижается. При дальнейшем возрастании интенсивности разогрева уменьшение количества испаряющейся воды незначительно. На основании полученных результатов и анализа проведенных исследований приведенных в работе [149] и в области предварительного электроразогрева бетонных смесей можно сделать вывод, что предварительный электроразогрев смеси для жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем на основе активированного композиционного вяжущего позволит получить бетон с более высокими физико-термическими и эксплуатационными характеристиками. Также предварительный электроразогрев смеси позволяет сократить технологический процесс изготовления жаростойких изделий и период сушки и вывода теплового агрегата на рабочий режим. Установлено, что наиболее

благоприятным режимом первого нагрева является ступенчатый нагрев, так как способствует снижению деструктивных процессов в бетоне, вызванные структурными нарушениями в период подъема температуры первого нагрева. Предварительный электроразогрев смеси позволяет получить бетон высокого качества при значительном сокращении времени термической обработки.

### **Выводы по третьей главе**

1. Выполнено математическое моделирование процесса предварительного электроразогрева смеси жаростойких бетонов, которое обеспечивает приемлемое совпадение теоретических данных с результатами экспериментальных исследований.

2. Выявлено, что значение прочности образцов из жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси до сушки при температуре 105 °С после нагрева в температурном диапазоне от 20 °С до 1000 °С больше на 25÷30 % по сравнению с результатами образцов без предварительного электроразогрева смеси.

3. Выявлено, что предварительный электроразогрев керамзитобетонной смеси в формах до сушки при температуре 105 °С способствует эффекту самопропаривания связанное с наличием достаточного количества влаги в зернах керамзитового гравия.

4. Установлено, что увеличение прочности бетона с предварительным электроразогревом смеси в формах до сушки при температуре 105 °С связано с равномерным распределением теплового потока по всему объему испытуемых образцов и увеличением объема воздуха в порах заполнителя, которые противодействуют миграции влаги и снижению за счет этого миграционных процессов между цементирующим и пористым заполнителем, что существенно уменьшает появление микротрещин в перегородках порового пространства. Эти утверждения и выводы согласуются с результатами исследований, приведенных в работе [43].

5. Установлено, что предварительный электроразогрев смеси в формах до

сушки при температуре 105 °С способствует интенсификации реакции гидратации вяжущего, которая ускоряет набор прочности и способствует снижению количества химически несвязанной воды в следствии чего уменьшается поровое пространство в структуре бетона.

## **ГЛАВА 4. ЖАРОСТОЙКИЕ БЕТОНЫ НА КЕРАМЗИТОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВОМ СМЕСИ**

### **4.1. Влияние зернового состава заполнителя на свойства жаростойкого керамзитобетона**

При подборе зернового состава заполнителей необходимо учитывать нормативные требования и положения, приведенные в работах [50, 61, 76, 82], которые способствуют повышению прочности, сокращению расходов вяжущего и улучшению реологических свойств. Повышение физико-механических и теплофизических свойств жаростойких бетонов с минимальным расходом вяжущего обеспечивает оптимально подобранный гранулометрический состав заполнителя. Как указано в работах [70, 71] оптимальное соотношение между фракциями заполнителя и правильный выбор наибольшего размера зерен заполнителя оказывает большое влияние на дисперсность структуры бетона. При выборе наибольшего размера зерен заполнителя и соотношения его фракций необходимо учитывать коэффициенты температурного расширения и тангенциальные напряжения в зоне контакта цементного камня и заполнителя. Как указано в работах [69, 76, 77, 78, 80] крупный заполнитель из-за большой зоны контакта вызывает более высокие напряжения, что является причиной появления дефектов в структуре жаростойкого бетона при нагреве. Регулированию зернового состава заполнителей для варьирования свойств жаростойкого бетона посвящены работы [72-75, 79].

Анализ литературных данных показывает, что верхний предел крупности зерен заполнителя в зависимости от химической и физической природы огнеупорного материала может колебаться для керамзитового бетона от 10 до 20 мм согласно ГОСТ 9758-2012. Крупный заполнитель должен применяться в виде отдельных фракций, при этом должны использоваться только фракции 5-10 и 10-20 мм. [23, 81, 82]. Применение фракций 20-40 мм не рекомендуется, так как бетонные смеси на таком заполнителе подвержены расслоению при

транспортировании и формовании. Соотношение фракций 5-10 и 10-20 мм должны находиться в пределах 1:1,5 и 1:3.

В нашей стране и за рубежом проведены достаточно обширные исследования жаростойких бетонов на различных видах заполнителей и вяжущих. Анализ исследований, приведенных в работах [32, 61, 62, 70, 71, 82, 133] по определению оптимальной гранулометрии зернового состава бетонов для конструкции эксплуатируемых при воздействии повышенных и высоких температур позволяет сделать вывод, что для изготовления штучных изделий в виде жаростойких строительных блоков для футеровки ограждающих конструкций различных тепловых агрегатов верхний предел крупности зерен заполнителей рационально принять равным 10 мм. Как указано в работах [32, 61, 71, 82] при проектировании оптимальной гранулометрии состава заполнителя жаростойкого бетона применяются два метода. Первый метод направлен на достижение максимальной упаковки зерен заполнителей различного диаметра. Бетон, подобранный по первому методу, имеет высокие показатели по прочности. По второму методу применяют заполнители одинакового диаметра, при этом плотность бетона ниже, но показатели термостойкости высокие за счет оптимизации показателей коэффициента температурного расширения [23, 71].

Для заполнения пустот в структуре жаростойкого бетона, образованных зернами большего диаметра, зернами меньшего диаметра и получения более плотной упаковки в единице объема часто используют зерна с дискретной гранулометрией. Размеры зерен каждой фракции должны быть строго определенными. На практике применение строго определенной фракции в жаростойких бетонах проблематично, поэтому бетоны характеризуются по средним размерам зерен заполнителя. П. И. Баженов и др. [105] считают, что для получения наиболее плотных бетонов соотношения между средними размерами зерен фракций должны находиться в пределах 1:4-1:5, с крупностью зерен заполнителя 0,2 мм, 1 мм и 5 мм.

Целесообразность снижения среднего диаметра крупных частиц смеси жаростойкого бетона связано с повышением их термической стойкости. Особенно

это важно для бетонов с большим значением температурного коэффициента линейного расширения: чем больше размеры зерен заполнителя, тем больше возникают дополнительные напряжения при воздействии повышенных высоких температур и больше дефектность структуры бетона [29, 83, 84].

Анализируя и обобщая литературные данные [12, 61, 62, 70, 71, 85-87] об оптимальной гранулометрии легких жаростойких бетонов для изготовления штучных изделий, в данных исследованиях верхний предел крупности зерен заполнителей был принят до 10 мм. Согласно ГОСТ 9757 крупный заполнитель должен применяться в виде отдельных фракций при этом должны использоваться заполнители только фракций 5-10 и 10-20 мм.

Вид пористого заполнителя был определен, исходя из наличия его производства в Республике Дагестан. Единственный вид пористого заполнителя, промышленный выпуск которого налажен в Республике керамзитовый гравий.

Количественное соотношение между отдельными фракциями определялось на основе методов математической статистики.

Гранулометрический состав жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на основе активированного вяжущего оптимизирован по основным физико-техническим показателям:

- предел прочности на сжатие бетона при испытании после сушки при температуре 105 °С с предварительным электроразогревом смеси;
- предел прочности при изгибе бетона;
- пористость бетона.

Оптимизация составов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе по гранулометрическому составу заполнителя проводилась при испытаниях образцов в возрасте 7 и 28 суток после естественного твердения, последующей сушки при 105 °С, с предварительным электроразогревом смеси и нагреве до 1000 °С включительно. Образцы изготавливались методом вибропрессования из бетонной смеси с осадкой конуса 2 см, с применением механически активированного композиционного вяжущего «портландцемент – тонкомолотая добавка из обожженного серого аргиллита» и пластифицирующей добавки

(суперпластификатор СП-1). В результате проведенных исследований установлена эффективность применения керамзитового заполнителя для приготовления жаростойких бетонов с максимальной температурой применения 1000 °С. В дальнейших экспериментах исследовался оптимальный состав бетона, представленный в таблице 3.2, с вариациями зернового состава заполнителя и технологического процесса предварительного электроразогрева бетонной смеси.

Базовый состав жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе (на 1 м<sup>3</sup>):

– вяжущее – портландцемент ПЦ1–500Н по ГОСТ 10178-85 производства «Себряковцемент» – 280 кг;

– тонкомолотая добавка из обожженной аргиллитовой глины Буйнакского месторождения по ГОСТ 530-2012– 120 кг;

– пластифицирующая добавка – суперпластификатор СП-1 – 2кг;

– вода – 175 л.

Композиционное вяжущее «портландцемент + тонкомолотая добавка из обожженной аргиллитовой глины» получено методом механической активации – совместным помолотом ПЦ с ТМД до удельной поверхности 3500 см<sup>2</sup>/г. на Активаторе-4М. Образцы изготавливали методом вибропрессования из бетонной смеси с осадкой конуса 2 см.

#### **4.2. Физико-химические исследования жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси**

##### **4.2.1. Оптический анализ микроструктуры жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе**

Анализ пустотности керамзитобетона (рис. 4.1) показывает, что при общей анализируемой площади 1417,61 мм<sup>2</sup>, общий периметр пор 1774,7 мм<sup>2</sup>, общая площадь пор 145,24 мм<sup>2</sup>, средняя площадь пор 0,051 мм<sup>2</sup>, средний периметр 0,63 мм, средний диаметр 0,17 мм, средний фактор формы 0,62 мм, максимальный диаметр 4,71 мм, минимальный диаметр 0,04 мм.

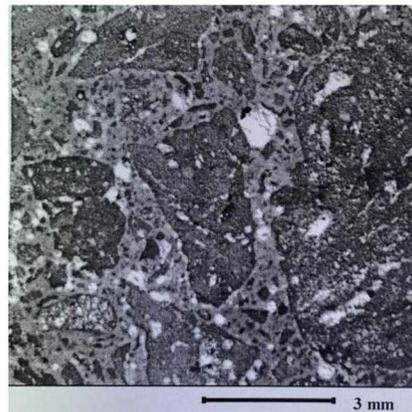
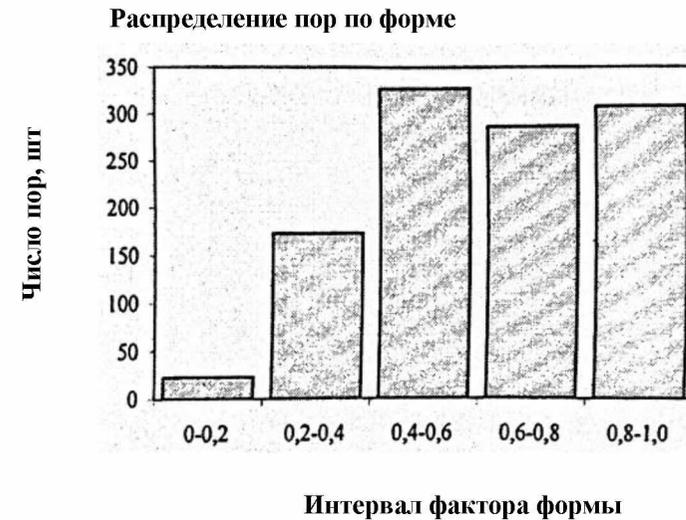
На графиках (рис. 4.1. а) приведены дифференциальные параметры пористости: площадь, занимаемая порами разного размера, и число пор разного

размера для интервалов (мм): 0-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,7-0,8; 0,8-0,9; 0,9-1,0; 1,0-1,5; 1,5-2,0; 2,0-2,5; 2,5-8, а также распределение пор размерами крупностью до 0,3 мм и крупностью более 0,3 мм и площадь, занимаемая порами разного размера до 0,3 мм и крупнее 0,3 мм. Микроскопические исследования (рис. 4.1 б) показали, что во всех образцах примерно 60 % составляют зерна заполнителя (керамзит), остальное приходится на вяжущую массу.

Керамзит довольно неоднороден по внешнему виду и пористости. Отдельные зерна имеют плотную слабопористую поверхность, а также ноздреватый вид. Зерна керамзита между собой прочно сцементированы. Адгезионный слой в основном химический, коррозионный.

## Параметры условно замкнутой пористости бетона базового состава

|   |         |
|---|---------|
| Пористость, (%)                                 | 10,25   |
| Общая анализируемая площадь, мм <sup>2</sup>    | 1417,61 |
| Число пор в единице объема (1/мм <sup>3</sup> ) | 12,03   |
| Средняя толщина междупоровых перегородок, мм    | 0,68    |
| Число пор в плоскости шлифа                     | 2827    |
| Общий периметр пор, мм                          | 1774,7  |
| Общая площадь пор, мм <sup>2</sup>              | 145,24  |
| Средняя площадь пор, мм <sup>2</sup>            | 0,051   |
| Средний периметр, мм                            | 0,63    |
| Средний диаметр, мм                             | 0,17    |
| Средний фактор формы                            | 0,62    |
| Максимальный диаметр, мм                        | 4,71    |
| Минимальный диаметр, мм                         | 0,04    |



Количество пор размером до 0,3мм

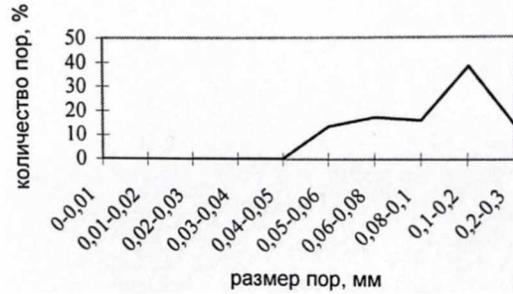
2527

Количество пор размером более 0,3 мм

300

Общая площадь пор размером до 0,3 мм, мм<sup>2</sup> 37,93

**Распределение по размерам пор до 0,3 мм**

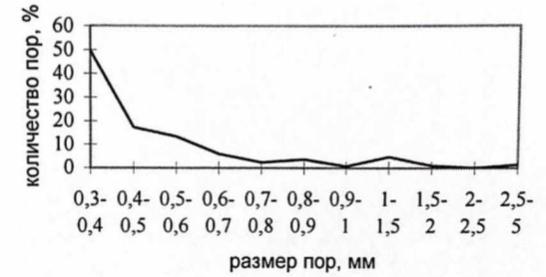


**Площадь, занимаемая порами разного размера для пор до 0,3 мм**



Общая площадь пор размером более 0,3 мм, мм<sup>2</sup> 107,31

**Распределение по размерам пор крупнее 0,3 мм**



**Площадь, занимаемая порами разного размера для пор крупнее 0,3 мм**



Рисунок 4.1 – Дифференциальные параметры пустотности керамзитобетона

#### **4.2.2. Электронно-микроскопические исследования жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси**

##### **Электронно-микроскопические исследования**

Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом микроскопе Quanta 200 ЗД - SEM/FIB. Для исследования были отобраны образцы оптимального состава бетона, приведенные в таблице 3.2. Образцы состава 1 исследовались с предварительным разогревом до 80 °С и без предварительного разогрева. Результаты исследования (микрофотографии разломов с увеличением от 104 до 2000 раз и шлифов с увеличением от 100 до 1000 раз) приведены на рисунках 4.2-4.5.

Сравнительный анализ приведенных микрофотографий показывает, что в образцах без предварительного электроразогрева смеси после обжига при температуре 1000 °С появились волосяные микротрещины.

Появление микротрещин в образцах без предварительного электроразогрева смеси объясняется тем, что в таких образцах в процессе твердения бетона остается лишняя химически несвязанная вода, которая при обжиге в 1000 °С переходит в парообразное состояние за счет чего увеличивается поровое давление. Поровое давление вызывает дополнительные напряжения в структуре бетона и способствует появлению микротрещин.

Как указано в работах [1, 3] напряжение в бетоне возникает от действия таких факторов, как: давление пара воды в порах бетона; фильтрация пара из зоны фазового перехода к горячей поверхности элемента; разницы температурных коэффициентов линейного расширения растворов и заполнителя; разницы температурных и влажностных деформаций слоев бетона.

Отсутствие (сравнительно меньшее количество) микротрещин в образцах с электроразогревом смеси до 80 °С объясняется тем, что в процессе предварительного электроразогрева смеси происходит самопропаривание и испарение лишней (несвязанной) воды.

Применение предварительного электроразогрева смеси снижает парообразование и соответственно миграцию пара в процессе подъема температуры обжига до 1000 °С за счет эффекта самопропаривания керамзитобетона, что в свою очередь снижает процесс трещинообразования в структуре бетона.

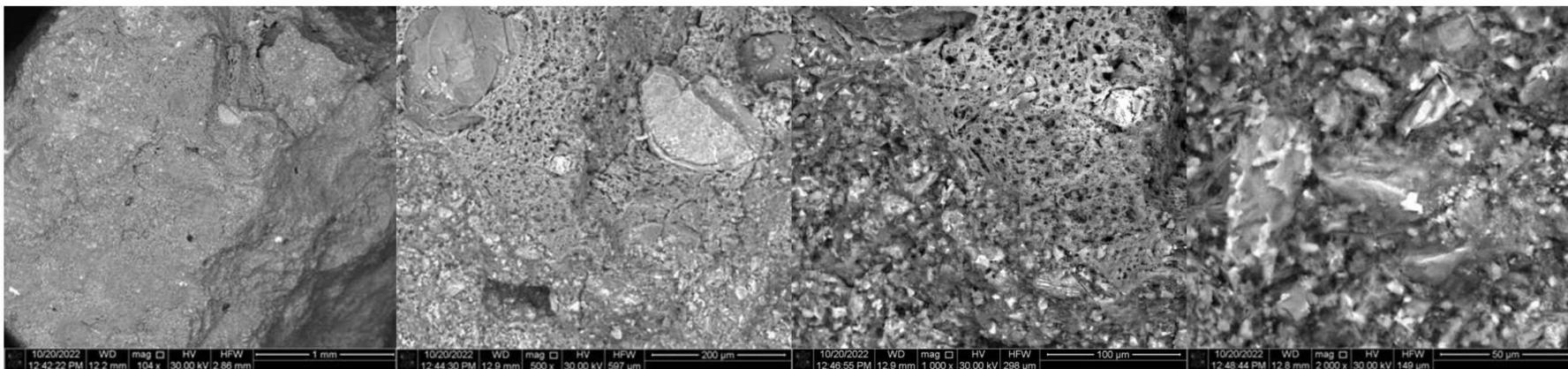
Как указывают авторы [1, 3] в таком случае поровое давление в бетоне не превышает 1,2 МПа и не оказывает сильное влияние на процесс трещинообразования в перегородках межпорового пространства в структуре бетона из-за уравнивания давления в смежных порах, где возникают как сжимающие, так и растягивающие усилия. В этом случае давление пара способствует более полной гидратации вяжущего и тем самым способствует повышению прочности бетона. Уменьшение количества трещин вероятно происходит за счет уменьшения миграции влаги из одного порового пространства в другое за счет эффекта самопропаривания в процессе предварительного электроразогрева смеси. Как указывают авторы [1, 3], миграция влаги способствует процессу трещинообразования в перегородках пор в структуре бетона. Снижение процесса трещинообразования в перегородках пор растворной части положительно влияет на эксплуатационные характеристики бетона, в процессе эксплуатации теплового агрегата при высоких температурах, а также при выводе его на рабочий режим.

Исследования, проведенные авторами работ [43, 44] показывают, что резкий подъем температуры приводит к образованию высоких местных напряжений в структуре бетона. Для снижения напряжения в бетоне необходимо ступенчато-плавный нагрев.

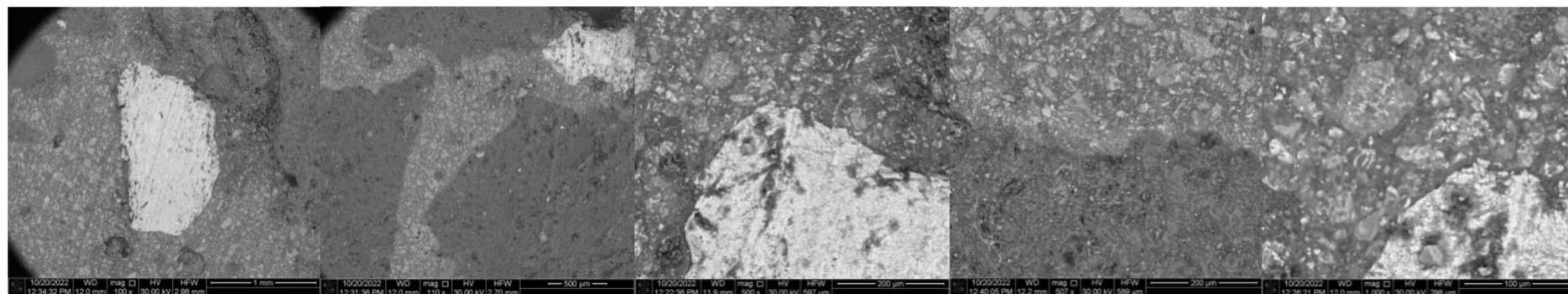
Для керамзитобетона допускается также форсированный нагрев из-за наличия пористой структуры, где аккумулируются влага, которая накапливается в процессе приготовления бетонной смеси. Микрофотографии образцов бетона подтверждают положительный эффект от предварительного электроразогрева смеси для жаростойкого керамзитобетона связанное с снижением деструктивных

явлений в структуре бетона при обжиге с температурой 1000 °С и улучшает эксплуатационные характеристики бетона.

Анализ микрофотографий, приведенных на рисунках 4.2-4.5 показывает, что вышеприведенные выводы достоверны и для образцов жаростойкого керамзитобетона после предварительного электроразогрева и сушки при температуре 105 °С, а также для образцов жаростойкого бетона без предварительного электроразогрева смеси и сушки при температуре 105 °С.



а)

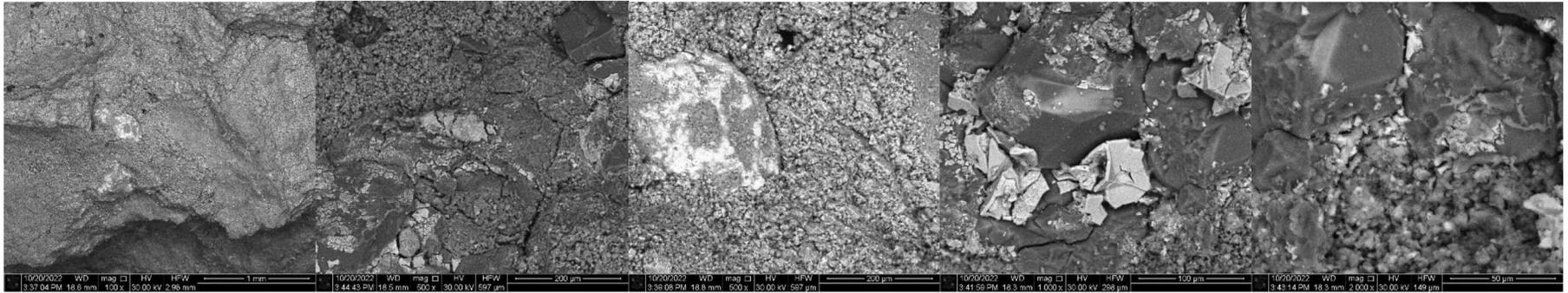


б)

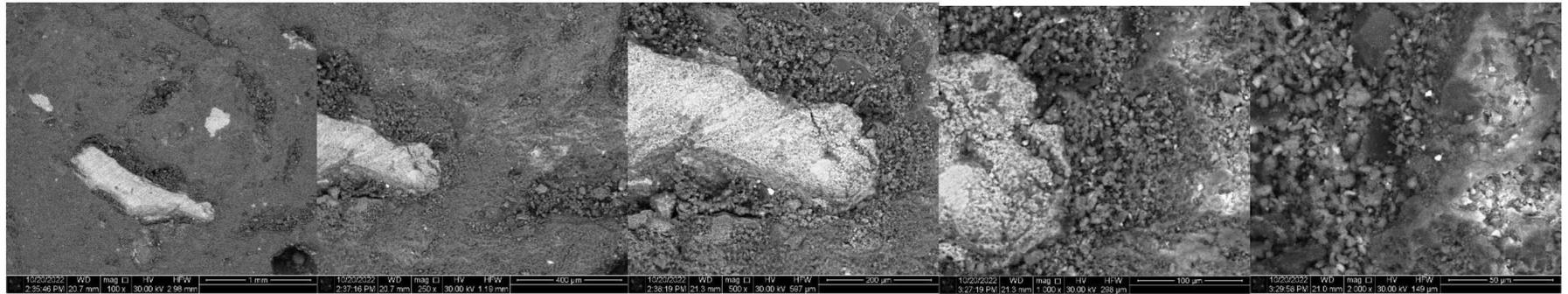
Рисунок 4.2 – Микрофотографии образцов жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси при температуре 80 °С, после обжига при температуре 1000 °С

а) микрофотографии разломов с увеличением от 104 до 2000 раз;

б) микрофотографии шлифов с увеличением от 100 до 1000 раз



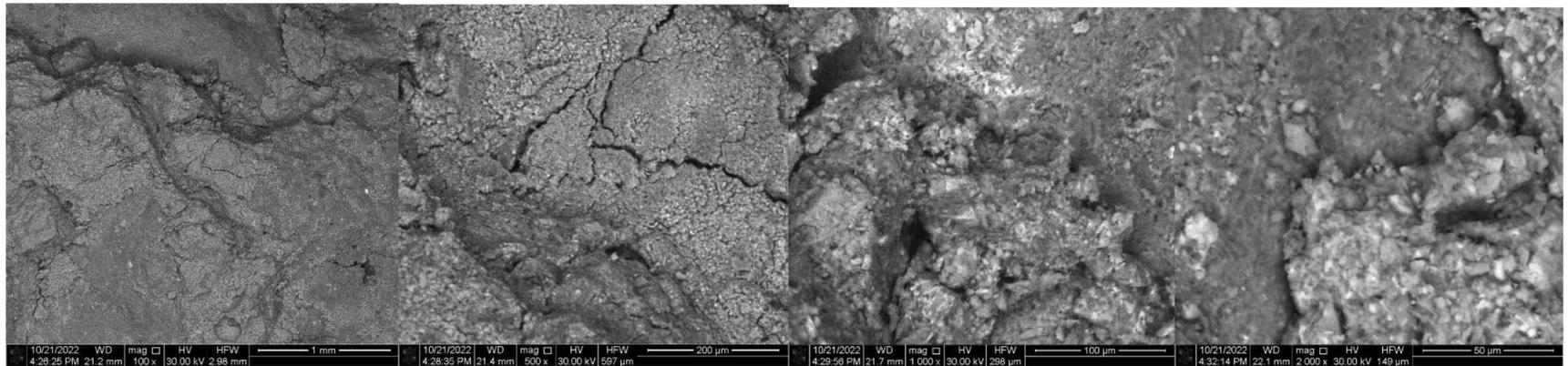
а)



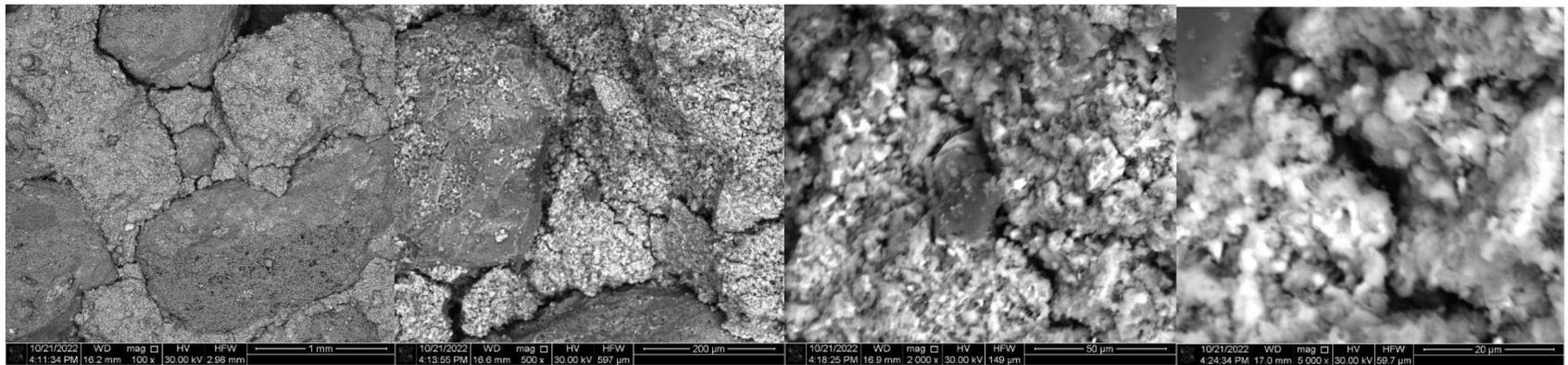
б)

Рисунок 4.3 – Микрофотографии образцов жаростойкого керамзитобетона без предварительного электроразогрева смеси после обжига при температуре 1000 °С

а) микрофотографии разломов с увеличением от 104 до 2000 раз; б) микрофотографии шлифов с увеличением от 100 до 2000

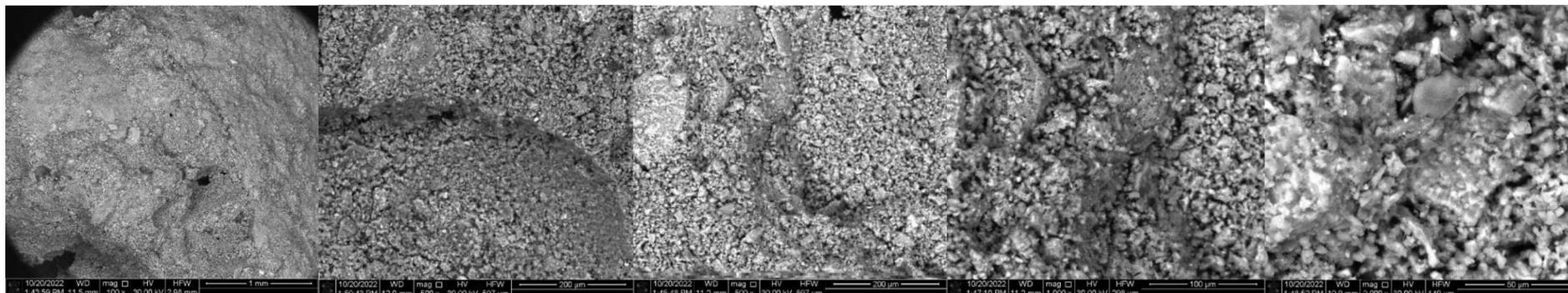


а)

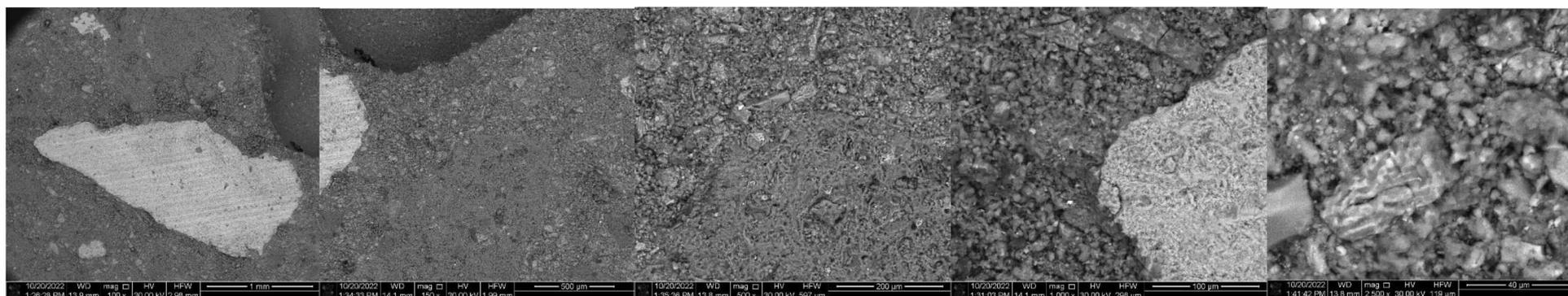


б)

Рисунок 4.4 – Микрофотографии образцов жаростойкого керамзитобетона без предварительного электроразогрева после нагрева при температуре 105 °С  
 а) микрофотографии разломов с увеличением от 104 до 2000 раз; б) микрофотографии шлифов с увеличением от 100 до 2500



а)



б)

Рисунок 4.5 – Микрофотографии образцов жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С

после нагрева при температуре 105 °С

а) микрофотографии разломов с увеличением от 104 до 2000 раз; б) микрофотографии шлифов с увеличением от 100 до 5000

#### 4.2.3. Рентгеноструктурный анализ жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным и без предварительного электроразогрева смеси

Сравнение результатов рентгеноструктурного анализа образцов жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси при температуре 80 °С и после нагрева при температуре 1000 °С и без предварительного электроразогрева смеси показывает снижение количества основных компонентов таких как: SiO<sub>2</sub> (с 58 до 33,3 %), αFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (с 27 до 10,1 %) и αAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (с 8 до 3 %) в образцах бетона без предварительного электроразогрева смеси (таблица 4.1, 4.2), а также для образцов жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси при температуре 80 °С и после нагрева при температуре 105 °С и без предварительного электроразогрева смеси показывает снижение количества основных компонентов таких как: SiO<sub>2</sub> (с 57,02 до 34,7 %), αFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (с 23,95 до 22,8 %). Количественное увеличение αFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и αAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в бетоне с предварительным электроразогревом смеси способствует повышению физико-механических и эксплуатационных характеристик жаростойкого бетона, так как α-модификация Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит) и α-модификация Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (глинозем) обладают высокой стойкостью к температурным и химическим воздействиям. Устойчивая α-форма Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладает огнеупорностью до 1565 °С. Гематит в керамических материалах, а также в специальных жаростойких бетонах при обжиге способствуют появлению железистого стекла, при этом инициирует образование муллита [21, 24]. Наличие в составе свободного оксида алюминия α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> интенсифицирует муллитообразование в структуре бетона. Следовательно, анализируя полученные результаты рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод, что предварительный электроразогрев смеси способствует повышению физико-механических, теплофизических и эксплуатационных характеристик бетона.

Таблица 4.1 – Содержание несвязанных оксидов в жаростойком бетоне с предварительным электроразогревом смеси

| Содержание несвязанных оксидов, % |      |
|-----------------------------------|------|
| SiO <sub>2</sub> составляет       | 58 % |
| αFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 27 % |
| αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 8 %  |
| Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>  | 7 %  |

Таблица 4.2 – Содержание несвязанных оксидов без предварительного электроразогрева смеси в жаростойком бетоне

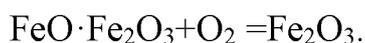
| Содержание несвязанных оксидов, %   |        |
|---|--------|
| SiO <sub>2</sub> составляет   | 33,3 % |
| αFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 10,1 % |
| αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3 %    |
| Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> - Mg <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>       | 36,4 % |
| Al <sub>2</sub> Mg O <sub>4</sub> (Mg (Al O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ) | 17,2 % |

Реакция гидратации цемента, как известно, сопровождается образованием алюминатов и силикатов магния, а также гидроксида кальция, который может вступать в химические реакции с компонентами аргиллита (амфотерные и кислотные оксиды, содержащиеся в нем в процентном соотношении), а также превращается в игольчатые длинные кристаллы, которые прорастают по всей массе бетона, что приводит к упрочнению бетона. Кроме того, образование алюмината магния Mg (AlO<sub>2</sub>)<sub>2</sub> предполагает возможность протекания следующих химических реакций:



что приводит к образованию гидроксида алюминия, который также может вступать в различные реакции с оксидами натрия, калия, магния и кальция, содержащиеся как в портландцементе, так и в аргиллите. Все эти химические процессы приводят к увеличению механической прочности жаростойкого бетона.

Анализ образцов бетона с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и сушки при 105 °С показывает незначительное уменьшение процентного содержания двуокиси кремния, это очевидно связано с незначительным температурным интервалом выдержки испытуемого материала и образованием силикатов кальция и магния, соответствующее формуле:  $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{MgSiO}_3$ . В то же время мы видим увеличение процентного содержания альфа-гематита, что можно объяснить возможной химической реакцией окисления смешанного оксида  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  кислородом воздуха по схеме:



Особой строкой хотелось бы отметить образование состава  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$  соединения открытого в первой половине 19-го века и названного в честь первооткрывателя этого минерала катоитом. Примечательность этого соединения состоит в том, что он имеет по шкале твердости Мооса 6 баллов, и именно образованием этого соединения, а также увеличением процентного содержания  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  можно объяснить увеличение механической прочности бетона.

Система  $\text{MgAl}_2\text{Si}_2$  в течение многих лет подвергалась обширным исследованием из-за ее большого практического значения. Основной характеристикой этого материала является его твердость, которая достигает по шкале Винкера 2,7 и именно его образованием также объясняется увеличение механической прочности бетона.

Ниже на рисунках 4.6-4.11 и в таблицах 4.3-4.7 приведены результаты рентгеноструктурного анализа образцов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе: с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 1000 °С; без предварительного электроразогрева смеси после нагрева при 1000 °С; с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 105 °С; без предварительного электроразогрева смеси после нагрева при 105 °С; с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С; без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С.

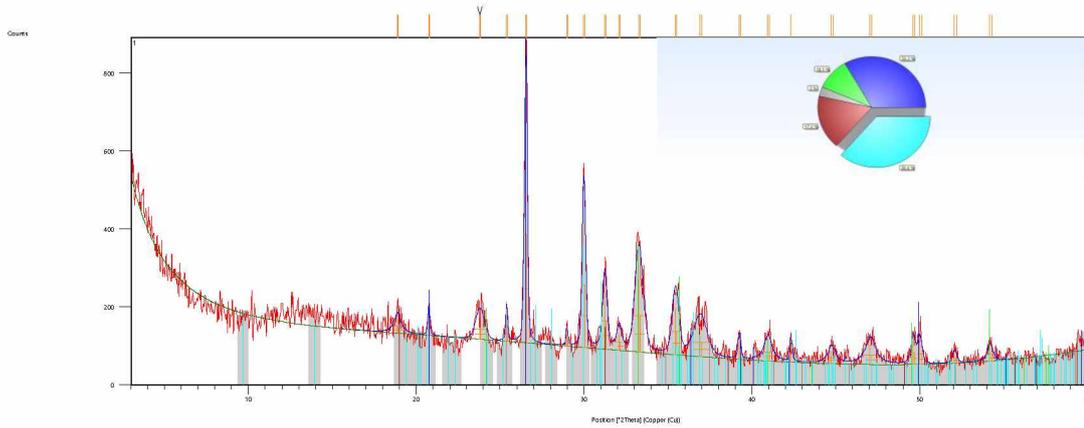


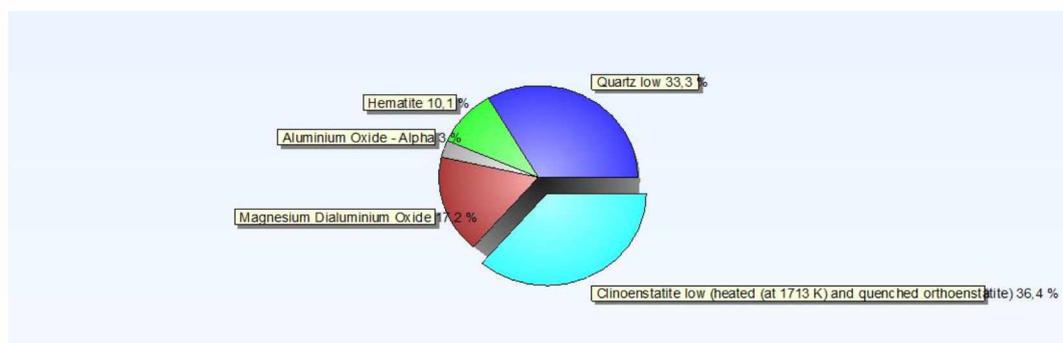
Рисунок 4.6 – Дифракционный спектр образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 1000 °С

Таблица 4.3 – Пики межплоскостных расстояний кристаллической решетки компонентов образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 1000 °С

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| 18,88(3)     | 36(4)        | 0,49(9)           | 4,69763       | 6,43          |
| 18,92(3)     | 18(4)        | 0,49(9)           | 4,69763       | 3,21          |
| 20,74(1)     | 58(9)        | 0,14(3)           | 4,27993       | 10,48         |
| 20,79(1)     | 29(9)        | 0,14(3)           | 4,27993       | 5,24          |
| 23,79(2)     | 54(4)        | 0,62(5)           | 3,73689       | 9,78          |
| 23,85(2)     | 27(4)        | 0,62(5)           | 3,73689       | 4,89          |
| 25,377(7)    | 81(17)       | 0,11(3)           | 3,50696       | 14,64         |
| 25,441(7)    | 41(17)       | 0,11(3)           | 3,50696       | 7,32          |
| 26,515(2)    | 554(16)      | 0,191(6)          | 3,35892       | 100,00        |
| 26,582(2)    | 277(16)      | 0,191(6)          | 3,35892       | 50,00         |
| 28,97(1)     | 51(14)       | 0,08(4)           | 3,08007       | 9,16          |
| 29,04(1)     | 25(14)       | 0,08(4)           | 3,08007       | 4,58          |
| 29,968(3)    | 320(11)      | 0,222(9)          | 2,97929       | 57,89         |
| 30,044(3)    | 160(11)      | 0,222(9)          | 2,97929       | 28,94         |
| 31,213(6)    | 144(8)       | 0,30(2)           | 2,86321       | 25,92         |
| 31,293(6)    | 72(8)        | 0,30(2)           | 2,86321       | 12,96         |
| 32,07(2)     | 44(6)        | 0,33(6)           | 2,78882       | 7,87          |
| 32,15(2)     | 22(6)        | 0,33(6)           | 2,78882       | 3,94          |
| 33,245(6)    | 186(5)       | 0,57(2)           | 2,69274       | 33,61         |
| 33,330(6)    | 93(5)        | 0,57(2)           | 2,69274       | 16,81         |
| 35,430(8)    | 118(5)       | 0,46(2)           | 2,53155       | 21,37         |
| 35,521(8)    | 59(5)        | 0,46(2)           | 2,53155       | 10,68         |
| 36,90(2)     | 72(3)        | 0,95(4)           | 2,43406       | 13,10         |
| 36,99(2)     | 36(3)        | 0,95(4)           | 2,43406       | 6,55          |
| 39,22(1)     | 57(8)        | 0,15(3)           | 2,29530       | 10,34         |

|          |       |         |         |       |
|----------|-------|---------|---------|-------|
| 39,32(1) | 29(8) | 0,15(3) | 2,29530 | 5,17  |
| 40,93(2) | 47(4) | 0,53(7) | 2,20302 | 8,46  |
| 41,04(2) | 23(4) | 0,53(7) | 2,20302 | 4,23  |
| 42,3150  | 78,50 | 0,0900  | 2,13419 | 14,18 |
| 44,72(2) | 32(4) | 0,48(9) | 2,02470 | 5,82  |
| 44,84(2) | 16(4) | 0,48(9) | 2,02470 | 2,91  |
| 47,03(2) | 49(3) | 0,70(8) | 1,93068 | 8,85  |
| 47,15(2) | 25(3) | 0,70(8) | 1,93068 | 4,43  |
| 49,58(2) | 61(9) | 0,26(7) | 1,83705 | 10,97 |
| 49,71(2) | 30(9) | 0,26(7) | 1,83705 | 5,49  |
| 49,98(2) | 55(8) | 0,25(5) | 1,82330 | 9,92  |
| 50,11(2) | 27(8) | 0,25(5) | 1,82330 | 4,96  |
| 52,04(2) | 26(5) | 0,25(7) | 1,75579 | 4,73  |
| 52,18(2) | 13(5) | 0,25(7) | 1,75579 | 2,36  |
| 54,15(2) | 38(7) | 0,30(8) | 1,69244 | 6,85  |
| 54,29(2) | 19(7) | 0,30(8) | 1,69244 | 3,42  |

На рисунке 4.7 приведена диаграмма составляющих оксидов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после нагрева при 1000 °С.



| Visible | Ref. Code   | Score | CompoundName  | Displacement [°2Th.] | ScaleFactor | ChemicalFormula |
|---------|-------------|-------|---|----------------------|-------------|-----------------|
|         | 98-008-9279 | 61    | Quartzlow   | 0,000                | 0,905       | O2 Si1          |
|         | 98-015-4191 | 50    | Hematite  | 0,000                | 0,308       | Fe2 O3          |
|         | 98-009-9783 | 28    | AluminiumOxide - Alpha  | 0,000                | 0,113       | Al2 O3          |
|         | 98-020-1174 | 44    | MagnesiumDialuminiumOxide   | 0,000                | 0,172       | Al2 Mg1 O4      |
|         | 98-003-0893 | 26    | Clinoenstatite low (heated (at 1713 K) and quenched orthoenstatite) | 0,000                | 0,292       | Mg1 O3 Si1      |

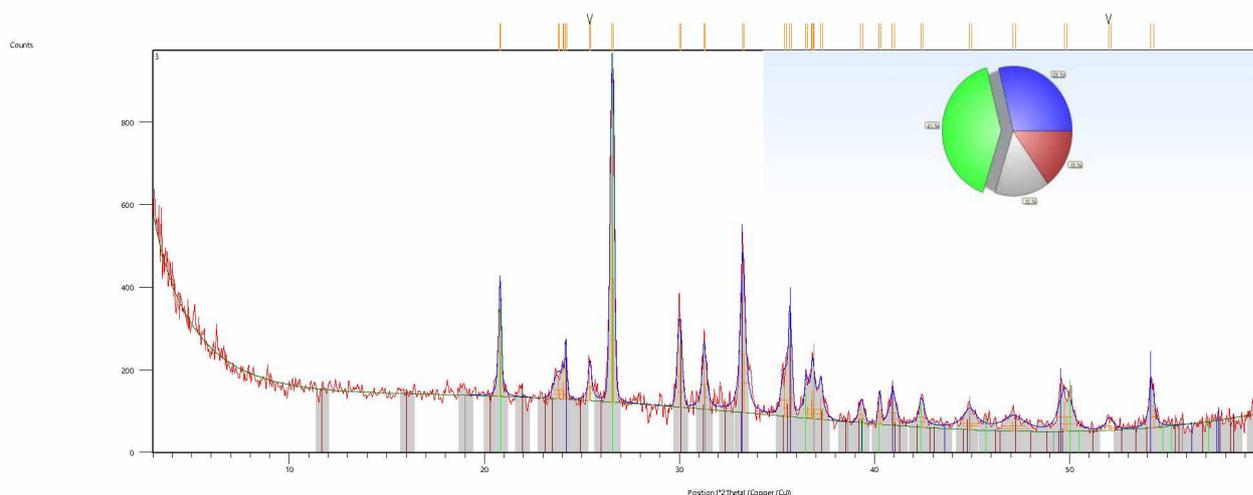


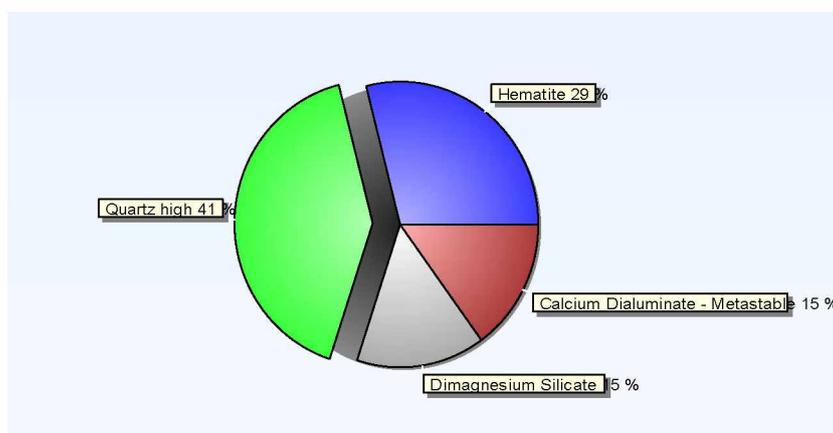
Рисунок 4.7 – Дифракционный спектр образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после обжига при 1000 °С

Таблица 4.4 – Пики межплоскостных расстояний кристаллической решетки компонентов бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после нагрева при 1000 °С

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| 20,785(4)    | 211(14)      | 0,16(2)           | 4,27025       | 35,17         |
| 20,837(4)    | 106(14)      | 0,16(2)           | 4,27025       | 17,59         |
| 23,79(6)     | 44(6)        | 0,6(1)            | 3,73705       | 7,38          |
| 23,85(6)     | 22(6)        | 0,6(1)            | 3,73705       | 3,69          |
| 24,01(2)     | 41(25)       | 0,06(2)           | 3,70322       | 6,84          |
| 24,07(2)     | 21(25)       | 0,06(2)           | 3,70321       | 3,42          |
| 24,16(1)     | 102(22)      | 0,10(2)           | 3,68006       | 16,96         |
| 24,23(1)     | 51(22)       | 0,10(2)           | 3,68006       | 8,48          |
| 25,40(1)     | 68(9)        | 0,21(5)           | 3,50388       | 11,40         |
| 25,46(1)     | 34(9)        | 0,21(5)           | 3,50388       | 5,70          |
| 26,537(2)    | 600(13)      | 0,232(5)          | 3,35626       | 100,00        |
| 26,604(2)    | 300(13)      | 0,232(5)          | 3,35626       | 50,00         |
| 29,993(5)    | 149(7)       | 0,28(2)           | 2,97692       | 24,84         |
| 30,069(5)    | 75(7)        | 0,28(2)           | 2,97692       | 12,42         |
| 31,258(7)    | 118(10)      | 0,24(4)           | 2,85922       | 19,60         |
| 31,338(7)    | 59(10)       | 0,24(4)           | 2,85922       | 9,80          |
| 33,233(4)    | 281(13)      | 0,27(2)           | 2,69366       | 46,79         |
| 33,318(4)    | 140(13)      | 0,27(2)           | 2,69366       | 23,40         |
| 35,39(5)     | 79(10)       | 0,44(9)           | 2,53453       | 13,14         |
| 35,48(5)     | 39(10)       | 0,44(9)           | 2,53453       | 6,57          |
| 35,659(7)    | 175(24)      | 0,17(3)           | 2,51580       | 29,21         |
| 35,750(7)    | 88(24)       | 0,17(3)           | 2,51580       | 14,61         |
| 36,48(1)     | 57(15)       | 0,09(1)           | 2,46073       | 9,47          |
| 36,58(1)     | 28(15)       | 0,09(1)           | 2,46073       | 4,73          |
| 36,8(2)      | 47(24)       | 0,9(2)            | 2,44108       | 7,77          |
| 36,80(1)     | 67(30)       | 0,13(4)           | 2,44038       | 11,14         |
| 36,9(2)      | 23(24)       | 0,9(2)            | 2,44108       | 3,89          |

|           |         |         |         |       |
|-----------|---------|---------|---------|-------|
| 36,89(1)  | 33(30)  | 0,13(4) | 2,44038 | 5,57  |
| 37,24(2)  | 51(30)  | 0,18(7) | 2,41281 | 8,55  |
| 37,33(2)  | 26(30)  | 0,18(7) | 2,41281 | 4,28  |
| 39,30(2)  | 40(5)   | 0,31(5) | 2,29090 | 6,62  |
| 39,40(2)  | 20(5)   | 0,31(5) | 2,29090 | 3,31  |
| 40,240(8) | 68(11)  | 0,13(3) | 2,23933 | 11,36 |
| 40,344(8) | 34(11)  | 0,13(3) | 2,23933 | 5,68  |
| 40,91(1)  | 58(5)   | 0,37(5) | 2,20432 | 9,71  |
| 41,01(1)  | 29(5)   | 0,37(5) | 2,20432 | 4,85  |
| 42,38(1)  | 49(6)   | 0,32(6) | 2,13092 | 8,24  |
| 42,49(1)  | 25(6)   | 0,32(6) | 2,13092 | 4,12  |
| 44,86(3)  | 33(3)   | 0,9(1)  | 2,01883 | 5,54  |
| 44,98(3)  | 17(3)   | 0,9(1)  | 2,01883 | 2,77  |
| 47,10(5)  | 24(2)   | 1,3(2)  | 1,92787 | 4,03  |
| 47,23(5)  | 12(2)   | 1,3(2)  | 1,92787 | 2,02  |
| 49,75(1)  | 70(3)   | 0,77(4) | 1,83133 | 11,71 |
| 49,88(1)  | 35(3)   | 0,77(4) | 1,83133 | 5,86  |
| 52,01(3)  | 22(5)   | 0,4(1)  | 1,75702 | 3,62  |
| 52,14(3)  | 11(5)   | 0,4(1)  | 1,75702 | 1,81  |
| 54,164(8) | 105(10) | 0,22(4) | 1,69199 | 17,45 |
| 54,309(8) | 52(10)  | 0,22(4) | 1,69199 | 8,73  |

На рисунке 4.8 приведена диаграмма составляющих оксидов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после сушки при 105 °С.



| Visible | Ref. Code   | Score | Compound Name                    | Displacement [°2Th.] | ScaleFactor | ChemicalFormula                                |
|---------|-------------|-------|----------------------------------|----------------------|-------------|--|
| *       | 98-041-5251 | 63    | Hematite                         | 0,000                | 0,468       | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 |
| *       | 98-004-2498 | 57    | Quartzhigh                       | 0,000                | 1,022       | O <sub>2</sub> Si <sub>1</sub>                 |
| *       | 98-008-6504 | 43    | Dimagnesium Silicate             | 0,000                | 0,187       | Mg <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>1</sub> |
| *       | 98-015-7457 | 32    | Calcium Dialuminate - Metastable | 0,000                | 0,219       | Al <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> O <sub>4</sub> |

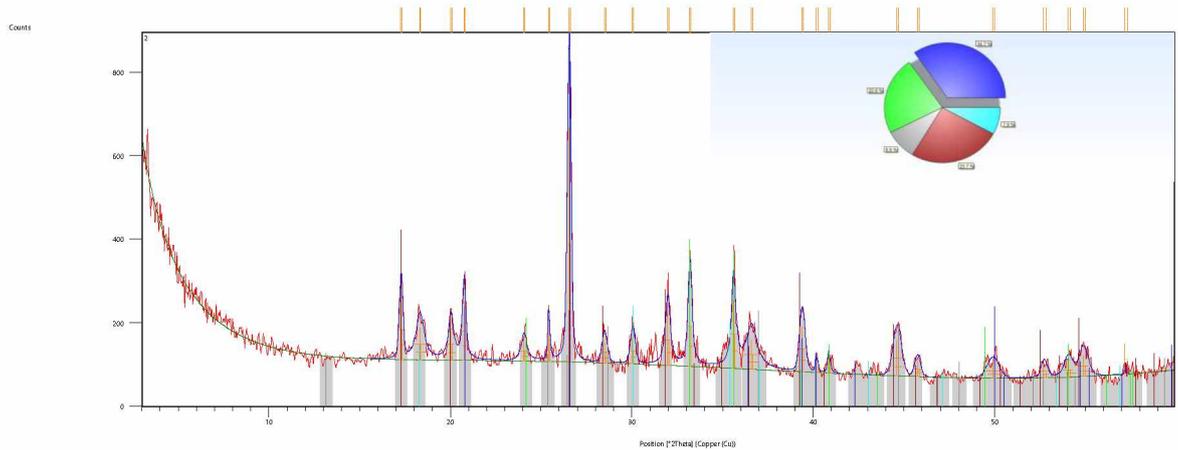


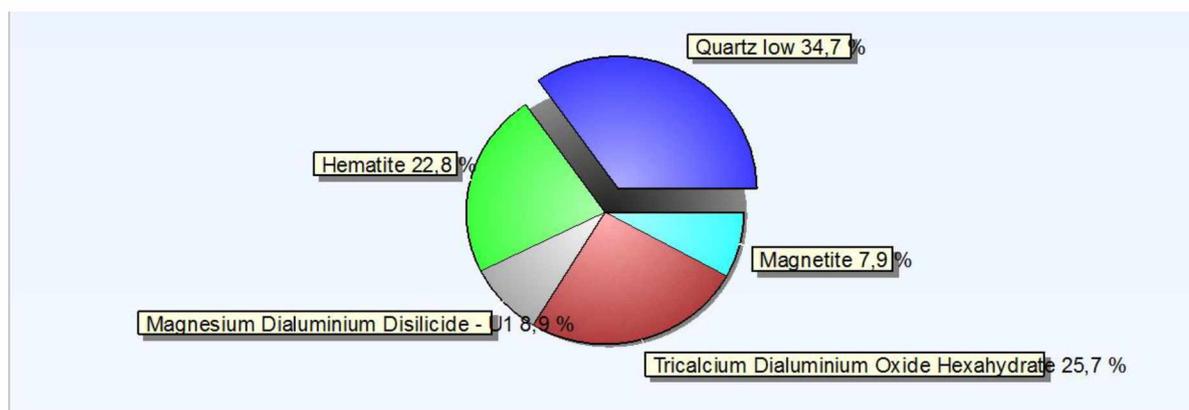
Рисунок 4.8 – Дифракционный спектр образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после сушки при 105 °С

Таблица 4.5 – Пики образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после сушки при 105 °С

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| 17,273(5)    | 143(8)       | 0,23(2)           | 5,12972       | 25,37         |
| 17,316(5)    | 71(8)        | 0,23(2)           | 5,12972       | 12,68         |
| 18,32(1)     | 76(5)        | 0,53(5)           | 4,83961       | 13,58         |
| 18,36(1)     | 38(5)        | 0,53(5)           | 4,83961       | 6,79          |
| 20,03(1)     | 75(7)        | 0,33(5)           | 4,43007       | 13,39         |
| 20,08(1)     | 38(7)        | 0,33(5)           | 4,43007       | 6,70          |
| 20,742(6)    | 139(10)      | 0,21(2)           | 4,27884       | 24,76         |
| 20,795(6)    | 70(10)       | 0,21(2)           | 4,27884       | 12,38         |
| 24,04(2)     | 47(5)        | 0,38(4)           | 3,69839       | 8,27          |
| 24,10(2)     | 23(5)        | 0,38(4)           | 3,69839       | 4,13          |
| 25,408(6)    | 107(17)      | 0,10(3)           | 3,50272       | 18,97         |
| 25,472(6)    | 53(17)       | 0,10(3)           | 3,50272       | 9,49          |
| 26,531(2)    | 562(15)      | 0,227(7)          | 3,35694       | 100,00        |
| 26,598(2)    | 281(15)      | 0,227(7)          | 3,35694       | 50,00         |
| 28,48(1)     | 53(5)        | 0,34(3)           | 3,13147       | 9,36          |
| 28,55(1)     | 26(5)        | 0,34(3)           | 3,13147       | 4,68          |
| 30,04(1)     | 63(6)        | 0,31(4)           | 2,97238       | 11,15         |
| 30,12(1)     | 31(6)        | 0,31(4)           | 2,97238       | 5,58          |
| 31,958(7)    | 121(8)       | 0,31(3)           | 2,79821       | 21,46         |
| 32,039(7)    | 60(8)        | 0,31(3)           | 2,79821       | 10,73         |
| 33,187(5)    | 192(12)      | 0,22(2)           | 2,69732       | 34,19         |
| 33,272(5)    | 96(12)       | 0,22(2)           | 2,69732       | 17,09         |
| 35,585(6)    | 163(11)      | 0,26(3)           | 2,52086       | 29,02         |
| 35,676(6)    | 82(11)       | 0,26(3)           | 2,52086       | 14,51         |
| 36,58(2)     | 71(4)        | 0,71(7)           | 2,45443       | 12,66         |
| 36,68(2)     | 36(4)        | 0,71(7)           | 2,45443       | 6,33          |
| 39,368(7)    | 109(6)       | 0,35(2)           | 2,28692       | 19,34         |
| 39,469(7)    | 54(6)        | 0,35(2)           | 2,28692       | 9,67          |
| 40,16(2)     | 43(14)       | 0,09(3)           | 2,24385       | 7,63          |
| 40,26(2)     | 21(14)       | 0,09(3)           | 2,24385       | 3,81          |
| 40,83(2)     | 46(17)       | 0,13(5)           | 2,20806       | 8,26          |

|          |        |         |         |       |
|----------|--------|---------|---------|-------|
| 40,94(2) | 23(17) | 0,13(5) | 2,20806 | 4,13  |
| 44,59(1) | 84(4)  | 0,55(3) | 2,03026 | 14,95 |
| 44,71(1) | 42(4)  | 0,55(3) | 2,03026 | 7,47  |
| 45,72(2) | 37(4)  | 0,36(5) | 1,98304 | 6,53  |
| 45,84(2) | 18(4)  | 0,36(5) | 1,98304 | 3,27  |
| 49,87(2) | 34(3)  | 0,78(7) | 1,82721 | 6,00  |
| 50,00(2) | 17(3)  | 0,78(7) | 1,82721 | 3,00  |
| 52,69(2) | 32(4)  | 0,36(7) | 1,73578 | 5,71  |
| 52,83(2) | 16(4)  | 0,36(7) | 1,73578 | 2,86  |
| 54,03(3) | 37(4)  | 0,55(9) | 1,69575 | 6,50  |
| 54,18(3) | 18(4)  | 0,55(9) | 1,69575 | 3,25  |
| 54,87(2) | 50(5)  | 0,57(6) | 1,67199 | 8,85  |
| 55,01(2) | 25(5)  | 0,57(6) | 1,67199 | 4,43  |
| 57,17(2) | 73(92) | 0,02(2) | 1,60994 | 13,01 |
| 57,33(2) | 37(92) | 0,02(2) | 1,60994 | 6,50  |

На рисунке 4.9 приведена диаграмма составляющих оксидов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после сушки при 105 °С



| Visible | Ref. Code   | Score | Compound Name                         | Displacement [°2Th.] | ScaleFactor | Chemical Formula |
|---------|-------------|-------|---------------------------------------|----------------------|-------------|------------------|
| *       | 98-008-9278 | 58    | Quartzlow                             | 0,000                | 1,010       | O2 Si1           |
| *       | 98-002-2505 | 57    | Hematite                              | 0,000                | 0,338       | Fe2 O3           |
| *       | 98-015-6100 | 24    | MagnesiumDialuminiumDisilicide - U1   | 0,000                | 0,157       | Al2 Mg1 Si2      |
| *       | 98-003-8279 | 47    | TricalciumDialuminiumOxideHexahydrate | 0,000                | 0,346       | H12 Al2 Ca3 O12  |
| *       | 98-008-5806 | 29    | Magnetite                             | 0,000                | 0,155       | Fe3 O4           |

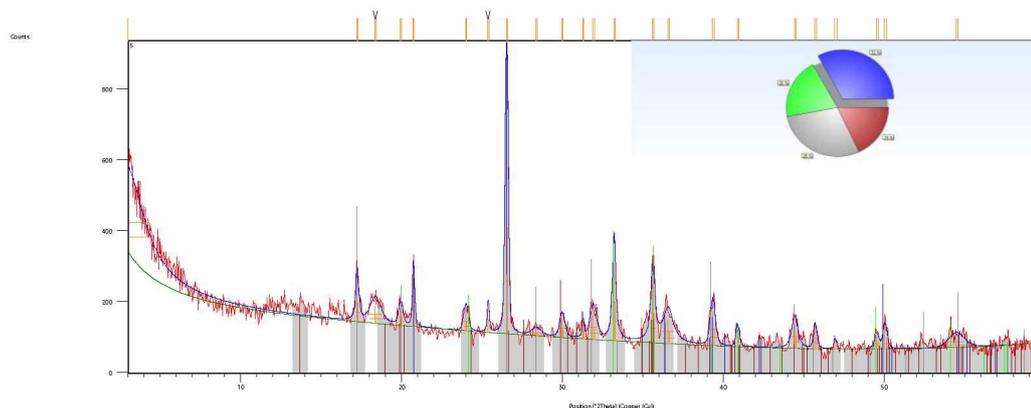


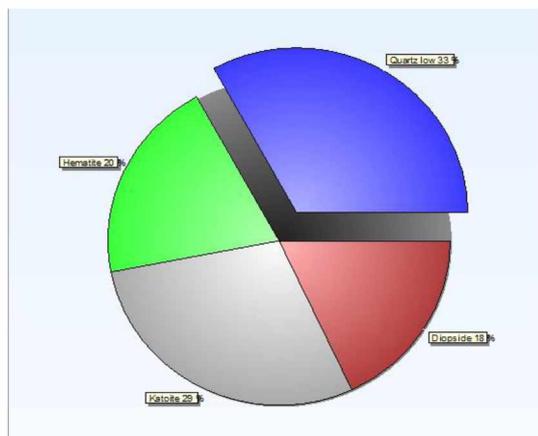
Рисунок 4.9 – Дифракционный спектр образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после сушки при 105 °С

Таблица 4.6 – Пики образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после сушки при 105 °С

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| 3,0(2)       | 160(49)      | 2,6(4)            | 29,42662      | 26,92         |
| 3,0(2)       | 80(49)       | 2,6(4)            | 29,42662      | 13,46         |
| 17,231(7)    | 104(9)       | 0,23(3)           | 5,14211       | 17,48         |
| 17,274(7)    | 52(9)        | 0,23(3)           | 5,14211       | 8,74          |
| 18,37(3)     | 49(4)        | 0,81(8)           | 4,82644       | 8,22          |
| 18,41(3)     | 24(4)        | 0,81(8)           | 4,82644       | 4,11          |
| 19,94(2)     | 47(6)        | 0,32(4)           | 4,44981       | 7,89          |
| 19,99(2)     | 23(6)        | 0,32(4)           | 4,44981       | 3,94          |
| 20,731(5)    | 137(11)      | 0,15(2)           | 4,28109       | 23,08         |
| 20,784(5)    | 69(11)       | 0,15(2)           | 4,28109       | 11,54         |
| 23,98(1)     | 52(3)        | 0,339(8)          | 3,70726       | 8,76          |
| 24,05(1)     | 26(3)        | 0,339(8)          | 3,70726       | 4,38          |
| 25,367(8)    | 70(12)       | 0,13(3)           | 3,50827       | 11,76         |
| 25,431(8)    | 35(12)       | 0,13(3)           | 3,50827       | 5,88          |
| 26,514(2)    | 594(14)      | 0,216(6)          | 3,35904       | 100,00        |
| 26,581(2)    | 297(14)      | 0,216(6)          | 3,35904       | 50,00         |
| 28,37(6)     | 16(7)        | 0,7(1)            | 3,14352       | 2,64          |
| 28,44(6)     | 8(7)         | 0,7(1)            | 3,14352       | 1,32          |
| 29,97(2)     | 50(5)        | 0,38(5)           | 2,97959       | 8,42          |
| 30,04(2)     | 25(5)        | 0,38(5)           | 2,97959       | 4,21          |
| 31,254(7)    | 74(10)       | 0,067(9)          | 2,85959       | 12,49         |
| 31,334(7)    | 37(10)       | 0,067(9)          | 2,85959       | 6,24          |
| 31,89(1)     | 68(5)        | 0,48(5)           | 2,80393       | 11,47         |
| 31,97(1)     | 34(5)        | 0,48(5)           | 2,80393       | 5,74          |
| 33,183(4)    | 219(12)      | 0,23(2)           | 2,69763       | 36,82         |
| 33,268(4)    | 109(12)      | 0,23(2)           | 2,69763       | 18,41         |
| 35,587(6)    | 163(10)      | 0,26(2)           | 2,52075       | 27,41         |
| 35,678(6)    | 81(10)       | 0,26(2)           | 2,52075       | 13,71         |

|           |       |         |         |       |
|-----------|-------|---------|---------|-------|
| 36,54(2)  | 67(4) | 0,76(6) | 2,45740 | 11,26 |
| 36,63(2)  | 33(4) | 0,76(6) | 2,45740 | 5,63  |
| 39,312(8) | 95(6) | 0,35(3) | 2,29001 | 16,02 |
| 39,414(8) | 48(6) | 0,35(3) | 2,29001 | 8,01  |
| 40,85(1)  | 55(7) | 0,18(4) | 2,20747 | 9,18  |
| 40,95(1)  | 27(7) | 0,18(4) | 2,20747 | 4,59  |
| 44,40(1)  | 64(5) | 0,45(5) | 2,03860 | 10,81 |
| 44,52(1)  | 32(5) | 0,45(5) | 2,03860 | 5,41  |
| 45,67(1)  | 59(7) | 0,21(4) | 1,98503 | 9,88  |
| 45,79(1)  | 29(7) | 0,21(4) | 1,98503 | 4,94  |
| 46,92(2)  | 33(8) | 0,11(3) | 1,93494 | 5,57  |
| 47,04(2)  | 17(8) | 0,11(3) | 1,93494 | 2,78  |
| 49,49(2)  | 33(6) | 0,29(9) | 1,84029 | 5,61  |
| 49,62(2)  | 17(6) | 0,29(9) | 1,84029 | 2,80  |
| 50,00(1)  | 57(8) | 0,26(6) | 1,82260 | 9,61  |
| 50,14(1)  | 29(8) | 0,26(6) | 1,82260 | 4,80  |
| 54,45(4)  | 29(2) | 1,1(1)  | 1,68377 | 4,81  |
| 54,60(4)  | 14(2) | 1,1(1)  | 1,68377 | 2,41  |

На рисунке 4.10 приведена диаграмма составляющих оксидов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С.



| Visible | Ref. Code   | Score | CompoundName | Displacement [°2Th.] | ScaleFactor | ChemicalFormula |
|---------|-------------|-------|--------------|----------------------|-------------|-----------------|
| *       | 98-008-9279 | 58    | Quartzlow    | 0,000                | 0,996       | O2 Si1          |
| *       | 98-002-2505 | 58    | Hematite     | 0,000                | 0,315       | Fe2 O3          |
| *       | 98-001-6592 | 41    | Katoite      | 0,000                | 0,348       | H12 Al2 Ca3 O12 |
| *       | 98-003-0522 | 25    | Diopside     | 0,000                | 0,171       | Ca1 Mg1 O6 Si2  |

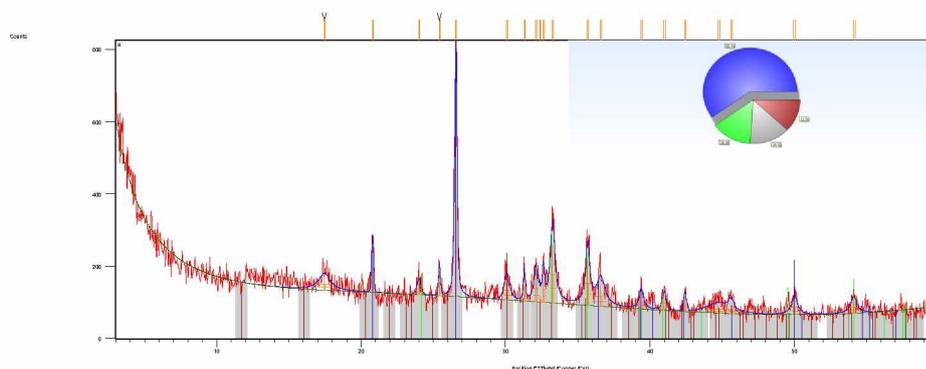


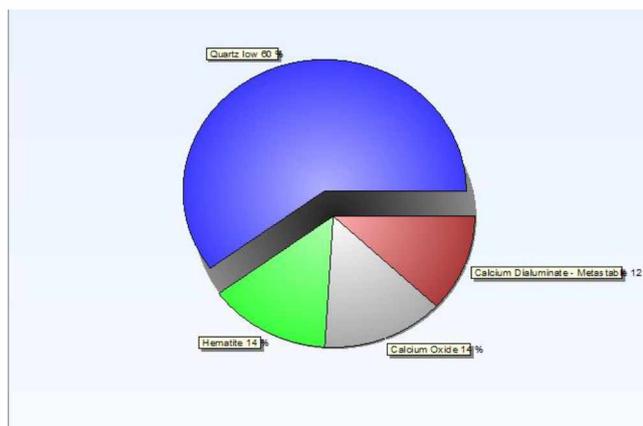
Рисунок 4.10 – Дифракционный спектр образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С

Таблица 4.7 – Пики образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| 17,44(4)     | 32(3)        | 1,0(2)            | 5,08081       | 6,34          |
| 17,48(4)     | 16(3)        | 1,0(2)            | 5,08081       | 3,17          |
| 20,778(6)    | 113(8)       | 0,18(2)           | 4,27160       | 22,65         |
| 20,830(6)    | 56(8)        | 0,18(2)           | 4,27160       | 11,32         |
| 23,99(2)     | 31(4)        | 0,36(6)           | 3,70585       | 6,16          |
| 24,05(2)     | 15(4)        | 0,36(6)           | 3,70585       | 3,08          |
| 25,407(8)    | 71(12)       | 0,12(3)           | 3,50291       | 14,23         |
| 25,471(8)    | 35(12)       | 0,12(3)           | 3,50291       | 7,11          |
| 26,539(2)    | 498(15)      | 0,198(8)          | 3,35597       | 100,00        |
| 26,606(2)    | 249(15)      | 0,198(8)          | 3,35597       | 50,00         |
| 30,07(2)     | 52(5)        | 0,44(5)           | 2,96914       | 10,47         |
| 30,15(2)     | 26(5)        | 0,44(5)           | 2,96914       | 5,24          |
| 31,285(8)    | 78(9)        | 0,11(1)           | 2,85684       | 15,66         |
| 31,365(8)    | 39(9)        | 0,11(1)           | 2,85684       | 7,83          |
| 32,08(1)     | 72(7)        | 0,33(5)           | 2,78801       | 14,54         |
| 32,16(1)     | 36(7)        | 0,33(5)           | 2,78801       | 7,27          |
| 32,36(3)     | 17(102)      | 0,013(9)          | 2,76452       | 3,44          |
| 32,44(3)     | 9(102)       | 0,013(9)          | 2,76452       | 1,72          |
| 32,61(1)     | 71(24)       | 0,16(8)           | 2,74399       | 14,25         |
| 32,69(1)     | 35(24)       | 0,16(8)           | 2,74399       | 7,12          |
| 33,233(7)    | 159(8)       | 0,37(3)           | 2,69368       | 32,00         |
| 33,318(7)    | 80(8)        | 0,37(3)           | 2,69368       | 16,00         |
| 35,650(8)    | 122(9)       | 0,32(4)           | 2,51643       | 24,58         |
| 35,741(8)    | 61(9)        | 0,32(4)           | 2,51643       | 12,29         |
| 36,57(2)     | 54(4)        | 0,68(9)           | 2,45543       | 10,86         |
| 36,66(2)     | 27(4)        | 0,68(9)           | 2,45543       | 5,43          |
| 39,37(2)     | 41(7)        | 0,32(9)           | 2,28683       | 8,28          |
| 39,47(2)     | 21(7)        | 0,32(9)           | 2,28683       | 4,14          |

|          |        |         |         |      |
|----------|--------|---------|---------|------|
| 40,95(2) | 37(5)  | 0,31(5) | 2,20200 | 7,48 |
| 41,06(2) | 19(5)  | 0,31(5) | 2,20200 | 3,74 |
| 42,39(1) | 42(7)  | 0,21(4) | 2,13045 | 8,44 |
| 42,50(1) | 21(7)  | 0,21(4) | 2,13045 | 4,22 |
| 44,7(3)  | 20(4)  | 2(1)    | 2,02412 | 3,94 |
| 44,9(3)  | 10(4)  | 2(1)    | 2,02412 | 1,97 |
| 45,59(4) | 20(10) | 0,4(1)  | 1,98819 | 4,00 |
| 45,71(4) | 10(10) | 0,4(1)  | 1,98819 | 2,00 |
| 49,95(2) | 40(4)  | 0,45(7) | 1,82428 | 7,97 |
| 50,09(2) | 20(4)  | 0,45(7) | 1,82428 | 3,98 |
| 54,07(2) | 33(5)  | 0,5(1)  | 1,69462 | 6,63 |
| 54,22(2) | 17(5)  | 0,5(1)  | 1,69462 | 3,32 |
|          |        |         |         |      |

На рисунке 4.11 приведена диаграмма составляющих оксидов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С.



| Visible | Ref. Code   | Score | CompoundName                    | Displacement [°2Th.] | ScaleFactor | ChemicalFormula |
|---------|-------------|-------|---------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| *       | 98-008-9278 | 60    | Quartzlow                       | 0,000                | 0,947       | O2 Si1          |
| *       | 98-006-4599 | 51    | Hematite                        | 0,000                | 0,238       | Fe2 O3          |
| *       | 98-026-1847 | 43    | CalciumOxide                    | 0,000                | 0,159       | Ca1 O1          |
| *       | 98-015-7457 | 29    | CalciumDialuminate - Metastable | 0,000                | 0,156       | Al2 Ca1 O4      |

Рисунок 4.11 – Дифракционный спектр образца жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без предварительного электроразогрева смеси при 80 °С и после нагрева при 500 °С

### 4.3. Теплофизические исследования жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси

#### 4.3.1 . Исследования влияния температуры нагрева на температурный коэффициент расширения, линейные деформации и усадку жаростойкого керамзитобетона в зависимости от температуры предварительного электроразогрева смеси

Для проведения исследования влияния температуры нагрева на температурный коэффициент расширения, линейные деформации и усадку жаростойкого керамзитобетона после предварительного электроразогрева смеси и сушки при температуре 105 °С был выбран оптимальный базовый состав бетона, который приведен в таблице 4.8.

Одним из важных характеристик жаростойких бетонов, которые влияют на эксплуатационные показатели является температурный коэффициент расширения и усадки бетона линейная деформация зависимости от температуры нагрева.

Таблица 4.8 – Базовый состав жаростойкого бетона на керамзитовом  
заполнителе с предварительным электроразогревом смеси

| КВ<br>(ПЦ+ТМД),<br>кг/м <sup>3</sup> | СП-1,<br>кг/м <sup>3</sup> | Заполнитель в зависимости от фракции кг/м <sup>3</sup> |         |                    | Вода,<br>л |
|--------------------------------------|----------------------------|--|---------|--------------------|------------|
|                                      |                            | керамзитовый гравий                                    |         | керамзитовый песок |            |
|                                      |                            | 5-7 мм   | 7-10 мм | 0,1–2,0 мм         |            |
| (280 +120) <sup>1</sup>              | 2                          | 507  | 218     | 625                | 175        |

Примечание: 1 – тонкость помола 3500 см<sup>2</sup>/г

В промышленных печах теплоизоляционные конструкции и детали, изготовленные из жаростойкого бетона, находятся под воздействием высоких температур. На трещинообразование в бетоне и на его прочность влияют его деформации, возникающие под воздействием высоких температур, форма и размер различных конструкций и деталей, а так же химический, минералогический и гранулометрический состав заполнителей и вяжущего жаростойкого бетона. Большое влияние на трещинообразование в бетоне при первом нагреве и выводе

теплового агрегата на рабочий режим оказывает В/Ц отношение в жаростойком бетоне и форма связи воды с компонентами вяжущего. Количественно температурные деформации жаростойких бетонов характеризуются показателем коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР).

Первый нагрев и вывод теплового агрегата на рабочий режим оказывает влияние на термическое расширение жаростойкого бетона и его термическую стойкость.

В данной работе рассматривали жаростойкие блоки для футеровки стен туннельной печи с предварительным электроразогревом смеси и без предварительного разогрева, которые находятся под воздействием неравномерного одностороннего нагрева. Односторонний нагрев (температурный градиент) усиливает процесс трещинообразования в жаростойком бетоне. При подборе состава необходимо в качестве крупного и мелкого заполнителя применять максимально однородные по теплофизическим характеристикам материалы, так как каждый природный материал имеет свои показатели коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР). КЛТР жаростойкого бетона зависит от показателей КЛТР заполнителей, химического и минералогического состава цементного камня. Чем выше КЛТР, тем ниже температурная стойкость материала.

Исследования по определению коэффициента линейного температурного расширения проводили на специализированной установке (на кварцевом емкостном dilatометре) по методике института физики Дагестанского научного центра Российской академии наук в лаборатории теплофизики и термоэлектричества. Вид и схема установки для определения КЛТР приведены на рисунках 2.12 и 2.13.

Коэффициент линейного температурного расширения определяли на цилиндрических образцах диаметром  $d=30$  мм и высотой  $h=60$  мм в температурном диапазоне от  $20$  °С до  $1000$  °С.

Для стабилизации температуры и исключения влияния внешних электрических и тепловых факторов на измерительный конденсатор образец помещался под металлический охлаждаемый вакуумированный колпак, который

закреплен к основанию через прокладки из вакуумной резины, служащий для герметизации системы. Для локализации области нагрева служила система охлаждения проточной водой, пропускаемой через термостат, состоящий из верхней и нижней части. Нижняя часть надета на кварцевый цилиндрический корпус. Выход верхней части соединен со входом нижней. Такая система охлаждения препятствует переносу тепла из зоны нагрева в измерительную часть установки. Для большей локализации области нагрева ячейки нижней частью внешнего охладителя и внутренней муфтой устанавливался тепловой контакт посредством медной посеребренной гофрированной фольги, исключающей осуществление теплообмена излучением и препятствующей переносу тепла снизу-вверх.

Среднее значение КЛТР жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе для двух составов бетона с различными режимами предварительного разогрева для каждого интервала  $\alpha_{\text{ср}}$  рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \alpha_m - \frac{(\alpha_m - \alpha_a)D_a 2K}{K_m + K_a + D_a(K_a - K_m)},$$

где:  $\alpha_m$  – коэффициент линейного температурного расширения матрицы бетона (растворной части);  $\alpha_a$  – коэффициент линейного температурного расширения заполнителя;  $D_a$  – объем заполнителей в бетоне в %;  $K_a$  и  $K_m$  – объемные модули упругости соответственно заполнителя и матрицы.

Зависимость коэффициента температурного расширения от температуры нагрева приведена на рисунке 4.12. Установлено, что в интервале температур от 200 до 700 °С температурный коэффициент расширения ( $\alpha$ ) оптимального состава жаростойкого керамзитобетона при первом нагреве без предварительного электроразогрева смеси составляет от  $4,3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  до  $5,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , а с предварительным электроразогревом смеси от  $3,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  до  $4,7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  при первом нагреве, а при повторном нагреве от  $5,1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  до  $6,4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , а с предварительным разогревом КЛТР  $4,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  до  $5,9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

При этом установлено, что усадочные деформации в жаростойком бетоне на керамзитовом заполнителе прекращаются во время сушки при температуре 105 °С.

Следовательно, можно утверждать, что усадочные деформации при более высоких температурах не оказывают большое влияние на коэффициент линейного температурного расширения.

В опытах на образцах жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе при первом нагреве после сушки при 105 °С с активированным композиционным вяжущим установлено, что усадочные деформации в бетоне, связанные с обезвоживанием, прекращаются в процессе сушки в интервале температур 180÷220 °С. При дальнейшем нагреве усадочные деформации не оказывают влияния на коэффициент линейного температурного расширения. Возрастание значения КЛТР наблюдается в интервале размягчения и образования плавня, сопровождающегося возникновением новообразований. Снижение КЛТР у жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с механической активацией композиционного вяжущего «портландцемент-тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита» связана с уменьшением гелиевого пространства между частицами цемента за счет интенсификации реакций гидратации, увеличением средней плотности и прочности бетона.

Таким образом, можно констатировать, что в диапазоне температур от 20 °С до 200 °С отмечается повышение КЛТР примерно на 10 %, далее при нагреве от 300 °С до 800 °С происходит увеличение КЛТР примерно на 10 %, после 900 °С отмечается значительное снижение величины КЛТР. В рабочем диапазоне температур до 1000 °С КЛТР жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе изменяется в пределах 6,5 %. В жаростойком бетоне с предварительным разогревом смеси показатель КЛТР на 10-20 % ниже после первого нагрева.

Это обусловлено тем, что предварительный электроразогрев смеси до нагрева образцов приводит к более интенсивному формированию структуры цементного камня и более полной гидратации вяжущего вещества. Предварительный электроразогрев смеси до температуры 80-90 °С, помимо ускорения твердения цементного камня сказывается на разрушении первоначально образовавшегося вокруг гидратирующихся зерен цемента «экранезирующих» пленок из гидросульфоалюминатов кальция, которые при температуре близкой 100

°С почти полностью разрушаются [44]. В результате этого эффекта открываются негидратировавшие слои цементного камня, обеспечивающие новый контакт с водой и отвод продуктов гидратации, увеличивая степень гидратации с уменьшением количества влаги в поровом пространстве легкого, крупного и мелкого заполнителя. На снижение КЛТР предварительным электроразогревом смеси при первом и втором нагреве существенное влияние оказывает и уменьшение порового давления, связанное с удалением влаги из пор заполнителя.

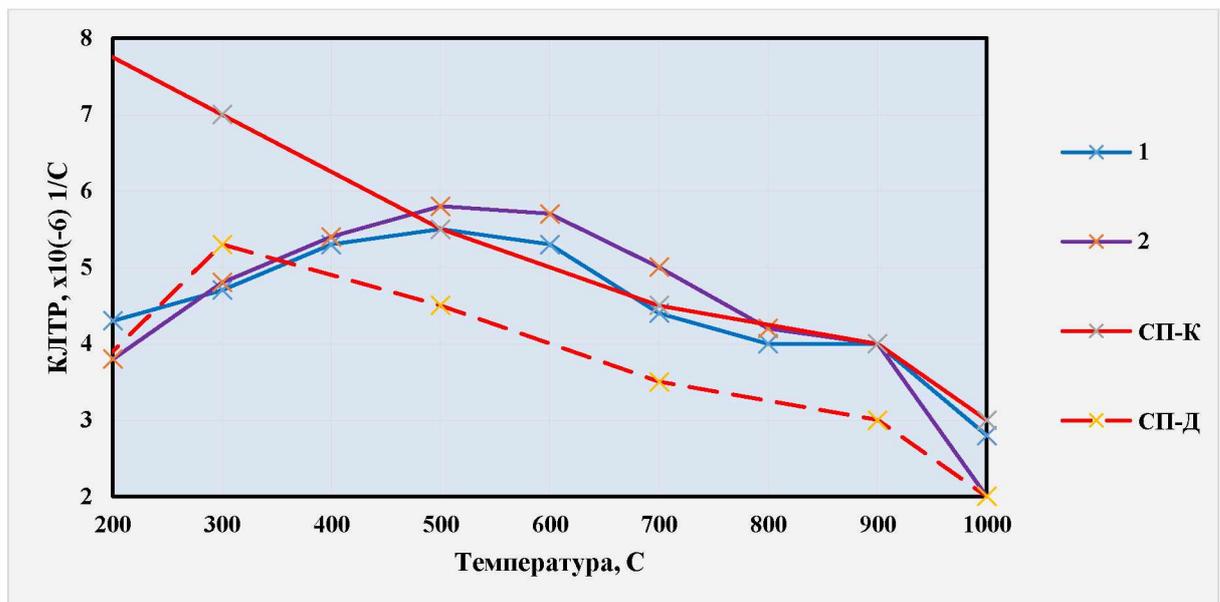


Рисунок 4.12 – График зависимости коэффициента линейного температурного расширения от температуры нагрева керамзитобетона средней плотности  $\gamma = 1500 \text{ кг/м}^3$

1. Первый нагрев без предварительного разогрева смеси;
2. Первый нагрев с предварительным разогревом смеси

Снижение коэффициента температурного расширения жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси объясняется удалением физически не связанной воды при предварительном электроразогреве смеси, при температуре до 90 °С и соответственно уменьшением порового давления, которое появляется при расширении воды.

Анализ кривых линейных деформаций (в %) от температуры нагрева приведенных на рисунке 4.13 показывает, что при повторном нагревании для образцов с предварительным электроразогревом и без электроразогрева наблюдается равномерное расширение до 1000 °С. При первом нагревании с предварительным и без предварительного электроразогрева расширение наблюдается до температуры 650 °С, затем деформация стабилизируется и снижение с температуры 700 °С наблюдается плавное уменьшение.

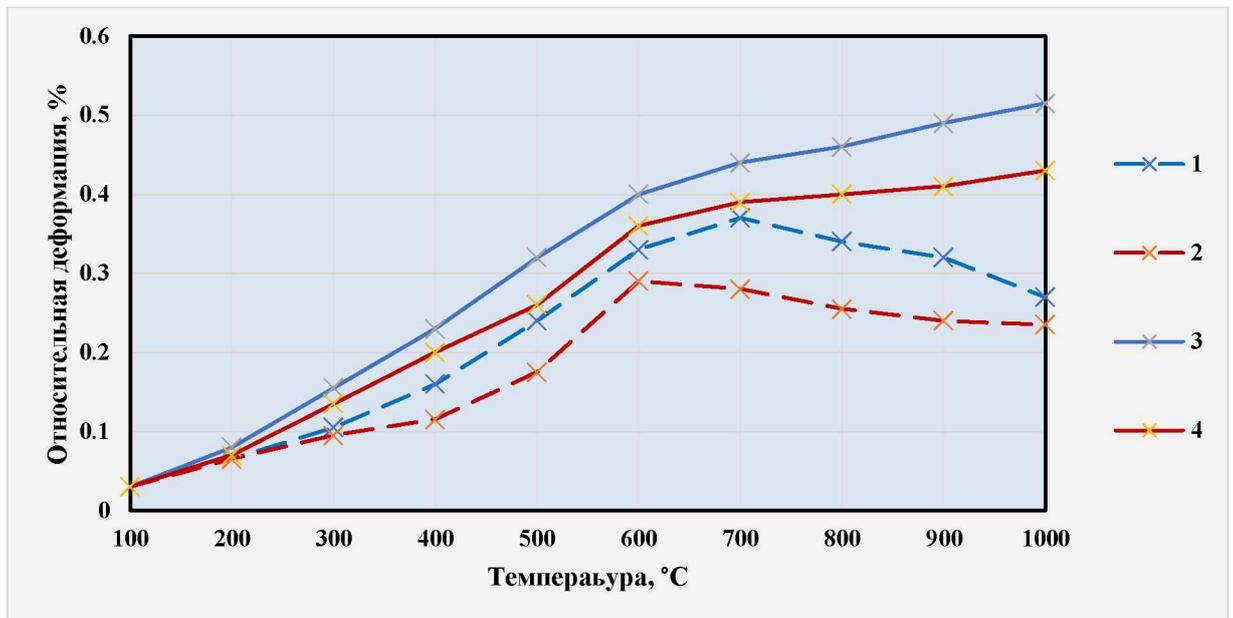


Рисунок 4.13 – Зависимость линейной деформации керамзитобетона в % от температуры нагрева

1. Первый нагрев без предварительного электроразогрева смеси;
2. Первый нагрев с предварительным электроразогревом смеси;
3. Второй нагрев без предварительного электроразогрева смеси;
4. Второй нагрев с предварительным оэлектроразогревом смеси

Предварительный электроразогрев смеси оказывает положительное воздействие на линейные деформации. Для проведения исследования бетона были изготовлены образцы кубы из базового состава (оптимального состава).

Очевидно, что керамзитовые бетоны на активированном композитном вяжущем в процессе нагрева в меньшей степени претерпевают изменение объема,

что способствует более лучшему сохранению структуры и соответственно прочностных показателей вследствие снижения уровня напряжений, обусловленных температурными деформациями.

Зависимость усадки жаростойкого керамзитобетона от температуры нагрева приведена на рисунке 4.14.

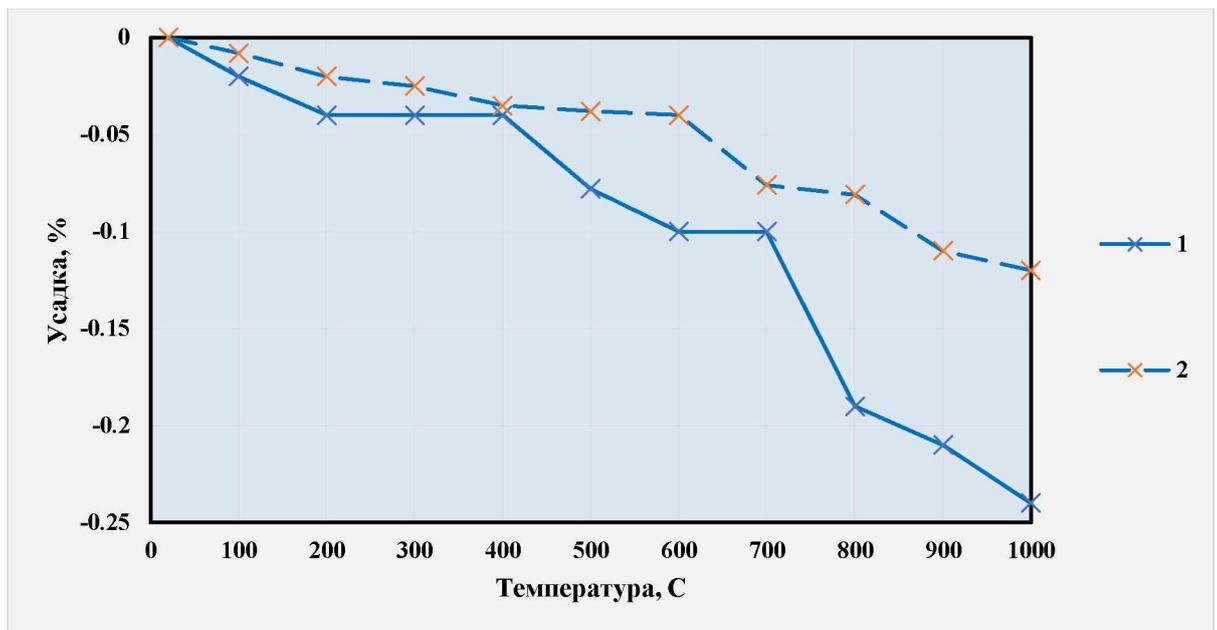


Рисунок 4.14 – Зависимость усадки керамзитобетона от температуры нагрева

1. Без предварительного электропрогрева смеси
2. С предварительным электропрогревом смеси

Термическая стойкость жаростойкого керамзитобетона также является одним из основных показателей, которая влияет на эксплуатационную стойкость материалов. Термическая стойкость жаростойких бетонов – это способность выдерживать резкие колебания температуры без нарушения внутренней структуры материала, которые исключают появления деструктивных явлений в бетоне.

Применение предварительного электропрогрева смеси способствует снижению деструкции в бетоне в процессе нагрева и охлаждения. Как указано в работах [23, 28] разрушение жаростойкого керамзитобетона после испытания на термостойкость (определение количества теплосмен) происходит в зоне контакта керамзита с цементным камнем. Разрушение бетона в зоне контакта (сцепления)

происходит из-за усадки цементного камня при первом нагреве. Из-за этого в бетоне возникают внутренние напряжения, при котором заполнитель керамзит подвергается сжатию, а цементный камень – растяжению. При одинаковых значениях коэффициентов температурного расширения заполнителя и цементного камня возникают напряжения меньших значений. Температурные коэффициенты расширения керамзита и цементного камня не совпадают. Температурный коэффициент расширения керамзита в интервале температур от 20-1000 °С составляет  $(4,7 \div 6,8) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , а цементного камня находится в пределах от  $8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  до  $(10,5 \div 11) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Предварительный электроразогрев смеси до сушки при температуре 105 °С способствует увеличению реакционной способности более плотному обволакиванию зерен заполнителя и соответственно увеличению адгезии в зоне контакта керамзита и цементного камня. Пористая структура керамзита позволяет аккумулировать влагу, которая в дальнейшем при электроразогреве смеси способствует интенсификации процесса гидратации с эффектом самопропаривания. Эффект самопропаривания способствует снижению концентрации напряжения в зоне контакта керамзита и цементного камня за счет уменьшения усадки и деформации.

Разработанный состав конструкционно-теплоизоляционного жаростойкого керамзитобетона средней плотности  $\rho=1450-1500 \text{ кг/м}^3$  имеет термостойкость, отвечающая требованиям СП 27.13330.2011 за счет большой термостойкости цементного камня на основе композиционного вяжущего и большей толщины цементной пленки вокруг зерен заполнителя, которая способствует лучшему сопротивлению температурным воздействиям.

В таблице 4.9 приведены результаты испытания образцов жаростойкого керамзитобетона на термостойкость, изготовленных при различных режимах предварительного электроразогрева смеси.

Таблица 4.9 – Термостойкость керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси

| Средняя плотность кг/м <sup>3</sup> | Температура предварительного разогрева, °С | Температура испытания, °С | Количество воздушных теплосмен |                 |                        |
|-------------------------------------|--|---------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------------|
|                                     |  |                           | до появления                   |                 | до разрушения образцов |
|                                     |  |                           | волосяных трещин               | открытых трещин |                        |
| 1450-1500                           | 60   | 800                       | 5                              | 6               | 12                     |
|                                     | 80   |                           | 6                              | 8               | 14                     |
|                                     | 90   |                           | 7                              | 9               | 15                     |

Также достаточно большое влияние на термостойкость жаростойкого бетона оказывают различные значения коэффициента теплопроводности керамзита и цементного камня. Вследствие этого в теле образца бетона создается перепад температур. При охлаждении цементный камень в следствии большой плотности и теплопроводности охлаждается и сжимается, а керамзит – пористый материал с малой теплопроводностью расширяется в нагретом состоянии. Для увеличения адгезионной способности в процессе твердения в тонкомолотую добавку из обожженного аргиллита вводят пластифицирующую добавку с последующей активацией. Остаточная прочность после 15 теплосмен составляет 1,6 МПа.

Одним из важных показателей жаростойких бетонов, который характеризует способность бетонов противостоять одновременному воздействию температуры и нагрузки, является деформация под нагрузкой при высоких температурах. Исследования на определенную деформацию под нагрузкой были проведены в лаборатории строительных материалов НОЦ «Современные строительные технологии и строительные конструкции». Деформация под нагрузкой при высоких температурах характеризует предельную температуру применения материала. Испытания проводили согласно ГОСТ 23283-78. Как указано в работе [3] температура службы ненагруженного огнеупорного материала находится между точкой начала размягчения (НР) и точкой, соответствующей 4 % сжатия. Предельной температурой службы бетона принято считать при 4 % сжатии, так как при первом нагреве усадка бетона может совпасть с началом размягчения. Образцы-цилиндры диаметром 36 мм и высотой 50 мм, полученные с предварительным электроразогревом смеси при температуре 60, 80 и 90 °С,

испытывали после высушивания до постоянной массы при температуре 105 °С. Температура нагрева при испытании составила 1000 °С. Результаты испытания образцов приведены в таблице 4.10.

Результаты, полученные в данной работе, достаточно хорошо согласуются с результатами исследований, проведенными в работе [3].

Результаты исследования, приведенные в работе [3], показывают, что деформация легких жаростойких бетонов на портландцементе с керамзитовым заполнителем находятся в пределах температур 940-1050 °С, а конец деформации в пределах от 1100 до 1200 °С.

Таблица 4.10 – Деформация под нагрузкой при высоких температурах нагрева жаростойкого керамзитобетона

| Средняя плотность после высушивания, кг/м <sup>3</sup> | Температура предварительного электроразогрева, °С | Предел прочности при сжатии после сушки, МПа | Температура предварительного нагрева, °С | Температура, °С                      |      |            |      | Температурный интервал размягчения | Нагрузка, МПа | Данные                             |
|--|---|--|--|--------------------------------------|------|------------|------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|
|  |   |  |  | перехода от расширения к сжимаемости | НР   | деформация |      |                                    |               |                                    |
|  |   |  |  |                                      |      | 4 %        | 40 % |                                    |               |                                    |
| 1450   | 60  | 14,67  | 110                                      | 877                                  | 970  | 1100       | 1176 | 206                                | 0,2           | автора                             |
|  |   |  | 800                                      | 832                                  | 980  | 1110       | 1176 | 196                                | 0,2           |                                    |
| 1450   | 80  | 15,68  | 110                                      | 880                                  | 985  | 1135       | 1180 | 195                                | 0,2           | автора                             |
|  |   |  | 800                                      | 920                                  | 990  | 1120       | 1176 | 186                                | 0,2           |                                    |
| 1450   | 90  | 18,61  | 110                                      | 880                                  | 1000 | 1135       | 1182 | 182                                | 0,2           | автора                             |
|  |   |  | 800                                      | 920                                  | 1100 | 1120       | 1180 | 180                                | 0,2           |                                    |
| 1450   | 90  | 18,5   | 110                                      | 880                                  | 1010 | 1130       | 1200 | 190                                | 0,15          | К.Д. Некрасова, М.Г. Масленниковой |

#### **4.3.2. Исследование влияния температуры нагрева на теплопроводность жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе в зависимости от температуры предварительного электроразогрева смеси**

Известно, что теплопроводность бетона в основном зависит от коэффициента теплопроводности заполнителя и цементного камня. Теплопроводность цементного камня и бетона в большей степени зависит от общей пористости, размеров заполнителя, формы и размера пор, температуры эксплуатации, вида твердой фазы и средней плотности бетона [83, 88]. Средняя плотность исследуемого жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе колеблется в пределах от 1450 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Разница между большим и меньшим значением составляет всего около 6 %. С учетом этого факта исследования коэффициента теплопроводности выполнены на трех составах жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе, которые отличались температурой предварительного разогрева. Коэффициент теплопроводности определяли при нагреве образцов в диапазоне температур от 100 °С до 1000 °С с шагом 100 °С.

Исследования по определению коэффициента теплопроводности  $\lambda$  проводились в лаборатории строительных материалов научно-образовательного центра «Современные строительные технологии и строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» по методике ВНИИ «Теплопроект» на специальной установке, схема, вид и принцип действия которой приведены в главе 2 диссертации.

Теплопроводность определялась на образцах призмах размерами 250x200x 50 мм.

Для определения теплопроводности электрический нагреватель определенной мощности помещали внутрь образца. Испытуемый образец материала 5 (рисунок 2.9) устанавливали в рабочее пространство прибора (рисунок 2.8). Внутри образца располагался электрический нагреватель (2), сила тока в цепи измеряется амперметром (7), разность потенциалов – вольтметром (8). Температуры  $T_1$  и  $T_2$  измерялись термометрами (3), холодный спай которых

находился в термостате (6), и гальванометром (4), поочередно подключаемым с помощью переключателя (5) к каждой из термопар. После включения нагревателя дожидались наступления стационарного режима (показатели гальванометра перестают изменяться). Количество тепла, проходящего через образец, определялось по формуле:

$$Q=K \cdot E \text{ [ Вт/(м}^2 \cdot \text{е)],}$$

где: E – электродвижущая сила (ЭДС);

K – постепенная тепловая мера получения при градуировке.

Коэффициент теплопроводности материала рассчитывали по формуле:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{T_1 - T_2},$$

где:  $\delta$  – толщина образца, см;

$T_1$  – температура горячей поверхности образца, °C;

$T_2$  – температура холодной поверхности образца, °C.

Температуру поверхности образца измеряют с точностью до  $\pm 1$  °C, а теплопроводность до  $\pm 0,001$  Вт/(м·°C).

Результаты определения теплопроводности представлены на рисунке 4.15.

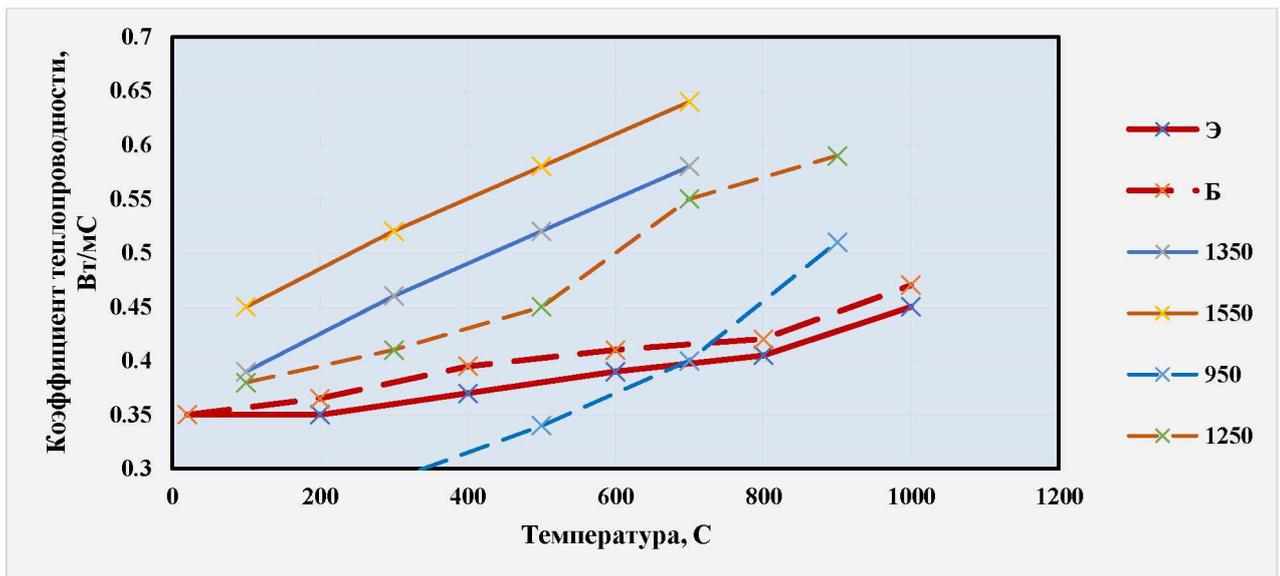


Рисунок 4.15 – Зависимость теплопроводности керамзитобетона от температуры нагрева

Б – без предварительного электроразогрева смеси;

Э – с предварительным электроразогревом смеси

Известно, что мелкопористые материалы имеют низкий коэффициент теплопроводности, чем крупнопористые материалы с замкнутыми порами, имеют низкие показатели теплопроводности, чем материалы с сообщающимися порами. Это объясняется тем, что в крупных и сообщающихся порах возникает связанное движение воздуха, которое способствует перепаду тепла и повышению теплопроводности. Как указано в работе [25] с повышением температуры коэффициент теплопроводности большинства жаростойких и огнеупорных материалов увеличивается вследствие повышения кинетической энергии молекул и повышения теплопроводности воздуха в порах.

Анализ зависимости коэффициента теплопроводности от температуры показывает, что для жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем коэффициент теплопроводности с повышением температуры увеличивается, как без предварительного электроразогрева смеси, так и с предварительным электроразогревом при температуре 80 °С. Показатели теплопроводности находятся в пределах от 0,35 до 0,37 Вт·1/°С при температуре до 100 °С. Полученные результаты исследования согласуются с данными результатов исследований, приведенных в работах [12, 23].

#### **4.4. Исследование влияния технологических факторов на свойства жаростойкого бетона с предварительным электроразогревом смеси**

Технологические факторы оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства жаростойких бетонов. Для производства работ и обеспечения высокого качества жаростойкого бетона в конструкции бетонная смесь должна иметь консистенцию, соответствующую условиям ее укладки. Вопросам влияния технологических факторов на свойства бетона посвящены следующие работы [36, 38, 80, 90, 91, 93, 94-97].

Основным технологическим показателем бетонной смеси является удобоукладываемость, которая количественно характеризуется подвижностью и жесткостью. Излишняя химически несвязанная вода может вызвать в конструкции деструктивные явления из-за увеличения порового давления в бетоне, а также

способствует возникновению трещин на поверхности перегородок растворной части бетона. Основными технологическими факторами, влияющими на свойства жаростойких бетонов, являются: водотвердое отношение, время перемешивания смеси, температура нагрева и технология формования, которые рассмотрены далее.

#### 4.4.1. Влияние В/Т отношения

В связи с тем, что в качестве заполнителя применяют керамзитовый гравий, водотвердое отношение выбирают с учетом пористости заполнителя для получения необходимой формовочной пластичности. Пластичность зависит от водопоглощения керамзитового заполнителя, соотношения крупного и мелкого заполнителя, минералогического состава композиционного вяжущего, которое состоит из портландцемента и минеральной добавки в виде обожженного аргиллита и от вида пластифицирующей добавки. Исследования влияния водотвердого отношения для получения оптимальной пластичности смеси в зависимости от гранулометрического состава, тонкости помола, активации вяжущего, а также минеральных и химических добавок приведены в работах [10, 69, 98-104]. В бетонной смеси вода может находиться в трех состояниях: в свободном, физически связанном и химически связанном. Как указано в работах [1, 5] химически связанная вода может находиться в:

- а) гидроксидах, в которых вода находится в составе химических элементов;
- б) кристаллогидратах, включая воду в виде молекул;
- в) гидрогелях, где вода является дисперсной средой;
- г) твердых телах, адсорбированная на их поверхности;
- д) капиллярах твердых тел, где она конденсируется при давлениях меньших, чем давление насыщенного пара.

При расчете состава жаростойкой бетонной смеси одной из основных характеристик является водотвердое отношение [48-50]. Водотвердое отношение оказывает большое влияние на подвижность и жесткость, которые являются основными характеристиками удобоукладываемости бетонной смеси. От водотвердого отношения также зависит пористость в структуре бетона.

На показатели удобоукладываемости и пористости большое влияние оказывает количество свободной и химически связанной воды. Для изготовления изделий в виде блоков из жаростойкого керамзитового бетона необходимо воды  $0,15 \div 0,2$  от массы твердых фаз для обеспечения подвижности по осадке конуса равной 2 см. [48, 49].

В данной работе диапазон изменения В/Т был принят в пределах  $0,15 \div 0,2$  с учетом результатов, полученных другими авторами [110, 122]. В связи с тем, что при таком водотвердом отношении бетонная смесь малоподвижна, для улучшения удобоукладываемости в состав смеси вводили суперпластификатор СП-1.

Для формования изделий из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе принят метод формования вибропрессованием с пригрузом из-за низкой подвижности бетонной смеси. Если интенсивность вибрирования в производственных условиях  $I_{пр}$  отличается от стандартной  $I_{ст}$ , то продолжительность вибрирования по данным [69, 105, 115] ориентировочно можно определить по формуле:

$$t_{в} = t_{в} \sqrt{I_{ст}/I_{пр}} ,$$

где:  $I=A^2 f^3$ ;  $A$  – амплитуда колебания;  $f$  – частота колебания;  $Af$  – путь, совершаемый колеблющейся частицей в единицу времени, т.е. скорость колебания;  $Af^2$  – ускорение колебаний.

Обычно продолжительность вибрирования принимают в 8...10 раз больше показателя жесткости смеси  $J_{ст}$ , определенном при стандартных условиях ( $f = (3000 \pm 200)$  кол/мин,  $A = 0,5$  мм).

В экспериментах при изготовлении образцов из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе укладка смеси в форму производилась вручную.

Уплотнение бетонной смеси производилось двумя альтернативными способами: виброформованием с пригрузом без пластифицирующей добавки и с пластифицирующей добавкой (суперпластификатор СП-1) без пригруза.

Имея характерные зависимости изменения первоначальной прочности  $R_{сж}$  и плотности  $\rho_{ср}$  жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе от В/Т, можно

рассчитать состав бетона со свойствами, соответствующими заданным эксплуатационным условиям.

Как видно из рисунка 4.16, с увеличением В/Т 0,15 до 0,3 прочность на сжатие жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе увеличивается до оптимальных значений и составляет порядка 72 МПа, а при В/Т меньше 0,15 прочность на сжатие бетона начинает уменьшаться, что связано с недоуплотнением бетонной смеси при низких значениях величины В/Т. Интенсивный рост прочности при В/Т в пределах 0,15 до 0,3 объясняется достаточно высоким растворением частиц портландцемента, образованием гидроксида кальция при минимальной свободной воде в бетоне, а также более компактной упаковкой и сближением частиц бетонной смеси в результате вибрационных воздействий. Уменьшение значений  $R_{сж}$  с увеличением В/Т более 0,3 объясняется появлением физически связанной и временной свободной воды и, как следствие, образованием дополнительной пористости и трещин в бетоне при тепловой обработке.

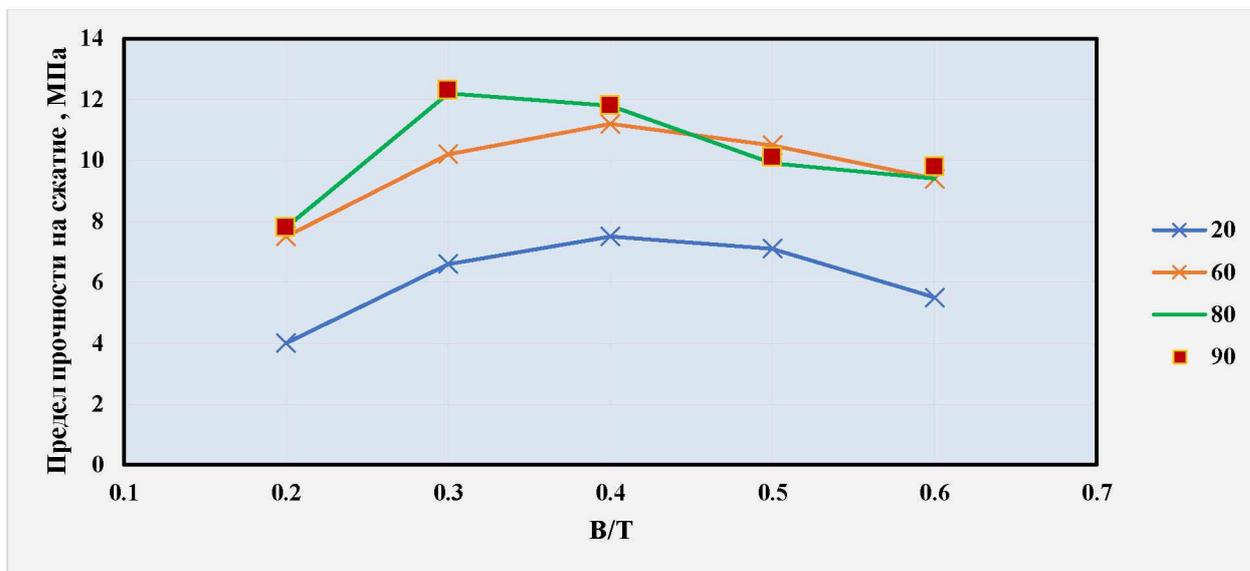


Рисунок 4.16 – Зависимость прочности от В/Т жаростойкого керамзитобетона при нагреве до 1000 °С

Анализ зависимостей предела прочности при сжатии жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе и композиционном вяжущем «портландцемент – тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита» от В/Т показывает, что прочность бетона базового состава без предварительного разогрева и с

предварительным разогревом при температуре 60, 80 и 90 °С возрастает до В/Т 0,38, если в состав вводить суперпластификатор, то В/Т можно снизить до принятых в СП значений от 0,15 до 0,2.

Уменьшение В/Т отношения сокращает количество свободной и физически не связанной воды в структуре бетона при твердении, снижает поровое давление и, тем самым, предотвращает появление микротрещин в бетоне, повышает его эксплуатационные свойства.

#### **4.4.2. Влияние способа и продолжительности перемешивания, метода уплотнения бетонной смеси на свойства жаростойкого керамзитобетона**

Основные свойства жаростойкого бетона зависят не только от состава, но и от технологических факторов: качества перемешивания бетонной смеси, способов приготовления бетона, формования и уплотнения бетонной смеси.

При перемешивании жаростойких бетонов в процессе их приготовления необходимо интенсифицировать этот процесс для того, чтобы добиться образования однородности смеси, так как неоднородность структуры ухудшает физико-механические, физико-химические, теплофизические и термомеханические свойства бетонов. Равномерность распределения зерен заполнителя и активированного композиционного вяжущего способствует формированию более плотной и однородной структуры бетона при твердофазовых реакциях в вяжущем, достижению максимальной термостойкости.

#### **Режим перемешивания компонентов бетонной смеси**

Перемешивание составляющих компонентов бетонной смеси – процесс, зависящий от многих факторов. Известно, что скорость и качество перемешивания во многом определяются размерами, зерновым составом, формой, числом смешиваемых компонентов, трением между частицами, способностью частиц к агрегации, влажностью смеси, степенью изменения зернового состава при смешивании в зависимости от прочности частиц. На эффективность перемешивания и его интенсивность влияет также конструкция смесителя,

определяющая скорость и траекторию перемещения частиц, порядок загрузки компонентов и др.

На прочностные и эксплуатационные характеристики жаростойкого бетона оказывают влияние также методы перемешивания в зависимости от бетоносмесительной установки.

В данной работе были применены два вида бетоносмесительной установки: принудительного и гравитационного действия.

Работа бетоносмесителей гравитационного действия основана на использовании силы гравитации. При вращении барабана бетонная смесь падает под воздействием силы гравитации, и скорость падения зависит от крупности зерен заполнителя. Чем больше размер зерен заполнителя, тем выше скорость падения, чем ниже крупность зерен, тем ниже скорость падения, и соответственно, трудно достичь равномерного гомогенного распределения заполнителей в бетонной смеси, особенно в жестких жаростойких бетонах.

Известно [108, 122], что для перемешивания жаростойких бетонных смесей наиболее эффективной является бетоносмесительная установка принудительного действия. Наибольший эффект достигается при использовании в процессе перемешивания вибрационного воздействия. При применении принудительного перемешивания с вибрацией даже жесткие бетонные смеси становятся более подвижными вследствие тиксотропного разжижения.

Целью данных исследований являлось определение влияния способа и режимов приготовления бетонной смеси на её однородность, для чего проведен ряд экспериментов.

В качестве критерия эффективности способа и длительности перемешивания компонентов при приготовлении жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе принят предел прочности на сжатие после 28 суток твердения образцов. Сушку проводят по следующему режиму: подъем температуры до 90 °С в течение 1 часа, выдержка – 2 часа, подъем температуры до 105 °С в течение 1 часа, выдержка – 2 часа, нерегулируемое охлаждение в шкафу. Такой режим

обеспечивает достаточно полную гидратацию вяжущего и удаление излишней влаги.

Для приготовления образцов были использованы базовые составы керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем без предварительного разогрева и с предварительным разогревом при температуре 60, 80 и 90 °С.

Для приготовления бетонной смеси были использованы два типа бетоносмесителей: принудительный и гравитационный. Подвижность бетонной смеси в экспериментах составляла 1,8-2 см.

В каждом случае применяли три режима перемешивания компонентов бетонной смеси.

Первый режим: загрузка всех компонентов бетона и воды одновременно и смешивание в течение 6-8 минут.

Второй режим: загрузка всех компонентов одновременно, сухое перемешивание в течение 2-3 минут, затворение водой и перемешивание в течение 3-4 минут. При этом общее время перемешивания компонентов бетона составляло 5-7 мин.

Третий режим: загрузка мелкой фракции заполнителя и композиционного вяжущего, перемешивание в течение 2-х минут, далее – загрузка крупной фракции заполнителя и перемешивание в течение 2-3 минут, далее – затворение водой и перемешивание в течение 3-4 минут. При этом общее время перемешивания составляло 7-9 минут.

Из полученных бетонных смесей вибропрессованием были изготовлены образцы – кубы размером 10×10×10 см без предварительного разогрева и с предварительным разогревом при температуре 60, 80 и 90 °С. Результаты испытаний приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Влияние способа и режимов приготовления бетонной смеси на прочность контрольных образцов керамзитобетона после их сушки

| Смесители      | Режимы перемешивания компонентов | Прочность контрольных образцов после сушки при температуре 105 °С, МПа |                              |           |           |
|----------------|----------------------------------|--|------------------------------|-----------|-----------|
|                |                                  | без предварительного разогрева   | с предварительным разогревом |           |           |
|                |                                  |  | при 60 °С                    | при 80 °С | при 90 °С |
| Принудительный | 1                                | 15,32  | 13,92                        | 15,87     | 16,77     |
|                | 2                                | 15,87  | 14,22                        | 16,11     | 17,92     |
|                | 3                                | 16,52  | 14,67                        | 16,58     | 18,61     |
| Гравитационный | 1                                | 13,82  | 13,17                        | 15,12     | 16,27     |
|                | 2                                | 14,27  | 13,87                        | 15,91     | 16,90     |
|                | 3                                | 15,55  | 14,15                        | 16,22     | 17,50     |

Анализ результатов показывает, что наиболее оптимальным является перемешивание компонентов бетонной смеси в бетоносмесителе принудительного действия. При этом оптимальным считается режим №3: начальная загрузка мелкой фракции заполнителя и композиционного вяжущего с перемешиванием в течение 2-х минут, последующая загрузка крупной фракции заполнителя и перемешивание в течение 2-3 минут, затем сухая бетонная смесь затворяется водой и перемешивается в течение 3-4 минут. При перемешивании по режиму 3 происходит тщательное сухое перемешивание компонентов, за счет чего достигается равномерное распределение вяжущего и мелкой фракции заполнителя, а также крупной фракции заполнителя в объеме бетонной смеси.

#### **Продолжительность перемешивания компонентов бетонной смеси**

В исследованиях для приготовления бетонной смеси применена бетоносмесительная установка принудительного действия без вибрации.

Результаты исследований влияния продолжительности перемешивания компонентов смеси после их загрузки в бетоносмесительную установку на прочность при сжатии и плотность приведены на рисунке 4.17.

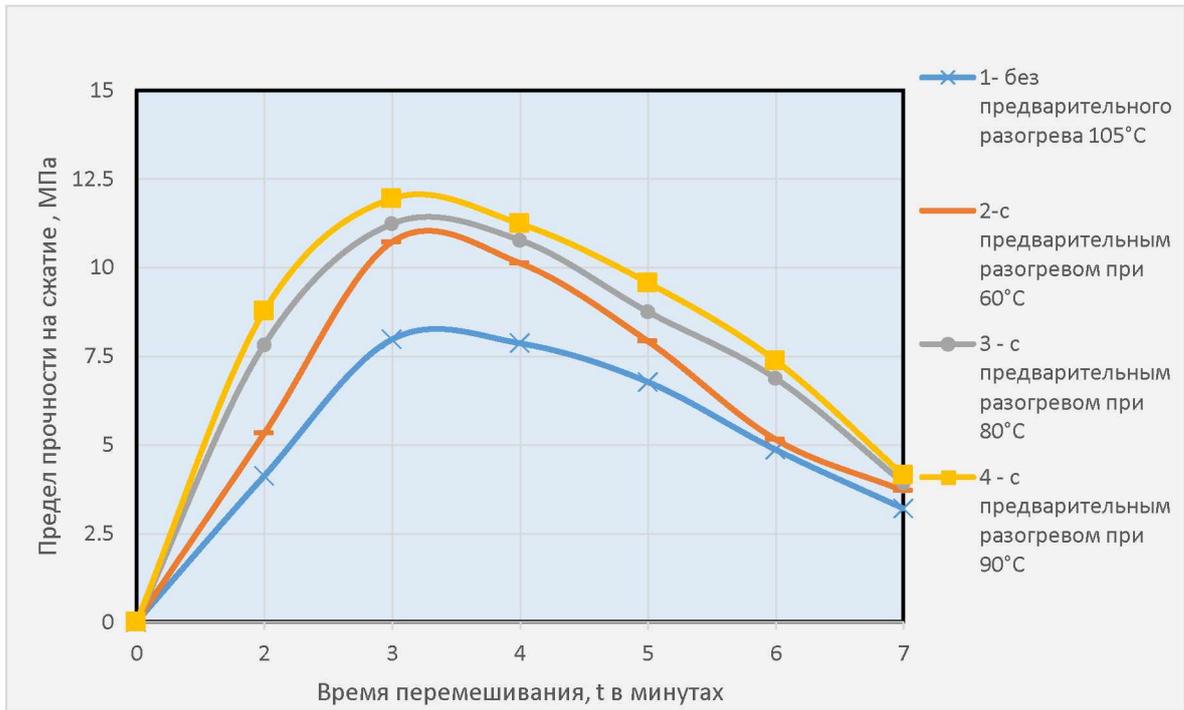


Рисунок 4.17 – Зависимости прочности жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе базового состава после сушки при 105 °С от времени перемешивания

Анализ полученных зависимостей показал, что максимальные значения плотности и прочности на сжатие жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе достигаются при продолжительности перемешивания компонентов бетона в течение 3-4 минут на установке принудительного действия. С увеличением продолжительности перемешивания показатели прочности и плотности этого бетона уменьшаются из-за расслоения бетонной смеси.

Из рисунка 4.17 видно, что максимальное значение предела прочности при сжатии 12-12,5 МПа обеспечивает жаростойкий бетон на керамзитовом заполнителе, изготовленный на основе активированного композиционного вяжущего при предварительном разогреве смеси до 90 °С и продолжительности

перемешивания в течение 3-4 минут, что на 25-30 % выше прочности бетонной смеси без предварительного разогрева.

Проведенные исследования в очередной раз доказали эффективность предварительного разогрева жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с активации композиционного вяжущего «портландцемент – тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита».

Анализ зависимостей прочности жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе от времени перемешивания свидетельствуют о том, что режим 3 перемешивания компонентов бетонной смеси является наиболее оптимальным.

### **Исследование влияния метода уплотнения бетонной смеси и величины пригруза на свойства жаростойкого керамзитобетона**

Важную роль в формировании структуры жаростойких бетонах играет уплотнение бетонной смеси. Бетонная смесь при укладке в форму разных конфигураций должна обладать достаточной деформативностью, чтобы при формовании приобрести сложную форму изделия, например, рассматриваемого в данной работе блок для футеровки стен туннельной печи обжига керамического кирпича с высокой плотной структурой.

Активированное композиционное вяжущее «портландцемент-тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита» представляет собой высокодисперсную систему с высокоразвитой поверхностью, большим запасом свободной энергии, которая появляется как указано в работах [98, 131, 135, 145] при механической или механохимической активации вяжущего.

В практике технологии бетона известны различные приемы формования жаростойких бетонов: прессование, трамбование и вибропрессование.

Анализ ранее проведенных исследований [80, 106-110] показывает высокую эффективность уплотнения формовочных смесей методом прессования. Уплотнение бетонной смеси способствует сближению частиц вяжущего и заполнителя, а также приводит к увеличению числа связей между частицами вяжущего за счет увеличения контактной площади. Так как в данной работе

предусматривается изготовление изделий правильной геометрической формы, прессование в технологическом отношении можно эффективно применять при изготовлении мелкоштучных изделий правильной формы, и это позволит получать жаростойкий бетон особо высокой плотности и прочности при минимальном расходе вяжущего.

Наиболее часто применяется способ вибрирования, но для жаростойких бетонных смесей этот способ не дает ощутимого эффекта. Изучению влияния вибрирования на свойства малоподвижных и жестких смесей посвящены работы [108, 110, 114], в которых приводятся результаты исследования методов уплотнения жестких смесей вибрированием. В них указана необходимость выбора методов уплотнения жаростойких бетонных смесей в зависимости от состава бетонной смеси, крупности зерен заполнителя, размеров и формы изделий из жаростойкого бетона. Известно [69, 111], что вибрируемая бетонная смесь в заданный момент характеризуется определенным коэффициентом пластической вязкости, который является функцией состава бетона (природы заполнителя, гранулометрии, водотвердого отношения, минеральных добавок и др.) и параметрами вибрации (частота направленных колебаний, амплитуда колебаний, время воздействия колебаний, которые определяют интенсивность уплотнения).

Существенное влияние на свойства бетона оказывает способ и режим уплотнения формовочных смесей. В технологии производства изделий из жаростойкого бетона наиболее распространенными методами уплотнения формовочных масс являются: вибрация, вибрация с пригрузом, прессование или вибропрессование, а также трамбование [107, 112, 150].

Предварительные испытания показали, что виброформование жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе без пригруза оказалось не эффективным. Так как в этом случае требуется увеличение водотвердого отношения в смеси, что приводит к снижению прочности бетона как указано в работе [105]. Формование трамбованием также неприемлемо из-за образования в процессе сушки на изделиях трещин, которые приводят к значительному снижению прочности бетона. Из практики технологии производства изделий из жаростойких бетонов [63, 64, 130]

установлено, что прессование и трамбование можно использовать только при изготовлении мелкогазобетонных блоков из жаростойких бетонов. При изготовлении крупногазобетонных блоков наиболее эффективным является вибрирование с пригрузом.

Как указывают авторы [114, 115, 150], в зависимости от удобоукладываемости смеси, которая характеризуется жесткостью и подвижностью для каждого состава бетонной смеси, необходимы индивидуальные конкретные способ и режим уплотнения. Формирование оптимальной структуры для жаростойкого керамзитобетона возможно только в том случае, если выбран конкретный режим уплотнения путем сравнения различных параметров. Как отмечают А. Е. Десов, В. И. Шмигальский, И. Н. Ахвердов, О. А. Савинов и др. при формировании изделий из малоподвижных и жестких бетонных смесей необходимо обоснованно выбрать параметры и величины пригруза.

Как указано в работах [120, 132, 133, 150] вибропрессованные керамзитобетоны характеризуются меньшим общим объемом пор и меньшим их средним радиусом. Вибропрессованный образец жаростойкого керамзитобетона характеризуется меньшим объемом пор и меньшим средним их радиусом. В работе [116] указано, что вибрированный керамзитобетон имеет плотную структуру с гидратационным новообразованием. В пустотах проявляются шестиугольные пластины  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Также заметны кристаллы эттрингата, а также гексагональные кристаллы гидроалюминатов кальция. На рисунке 4.18 представлена микроструктура вибропрессованного керамзитобетона, а на рисунке 4.19 контактная зона вибропрессованного керамзитобетона.



Рисунок 4.18 – Микроструктура вибропрессованного керамзитобетона

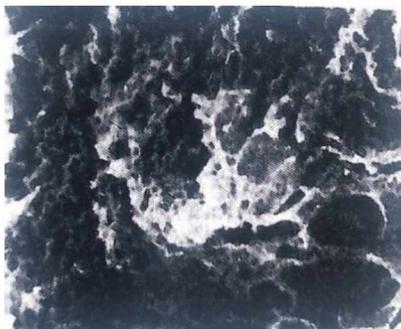


Рисунок 4.19 – Контактная зона вибропрессованного керамзитобетона

Увеличение контактной зоны между частицами при вибропрессовании существенно влияет на свойства бетона. При вибропрессовании керамзит имеет совершенный контакт с усиленным камнем путем вrastания в поры керамзита. Как видно из рисунка 4.19 контактная зона керамзитобетона при вибропрессовании имеет более совершенную структуру по сравнению с другими методами формования.

В данной работе проводилось исследование по определению прочности бетона в зависимости от интенсивности колебаний при вибропрессовании бетонной смеси для базового состава без предварительного разогрева, а также с предварительным разогревом при температуре 60, 80 и 90 °С.

Зависимость прочности от амплитуды колебаний приведены на рисунке 4.20.

Из рисунка 4.20 следует, что максимальное значение прочности на сжатии бетон имеет при интенсивности колебаний от 300-320 см<sup>2</sup>/сек<sup>3</sup>, для всех трех составов с различными режимами предварительного разогрева.

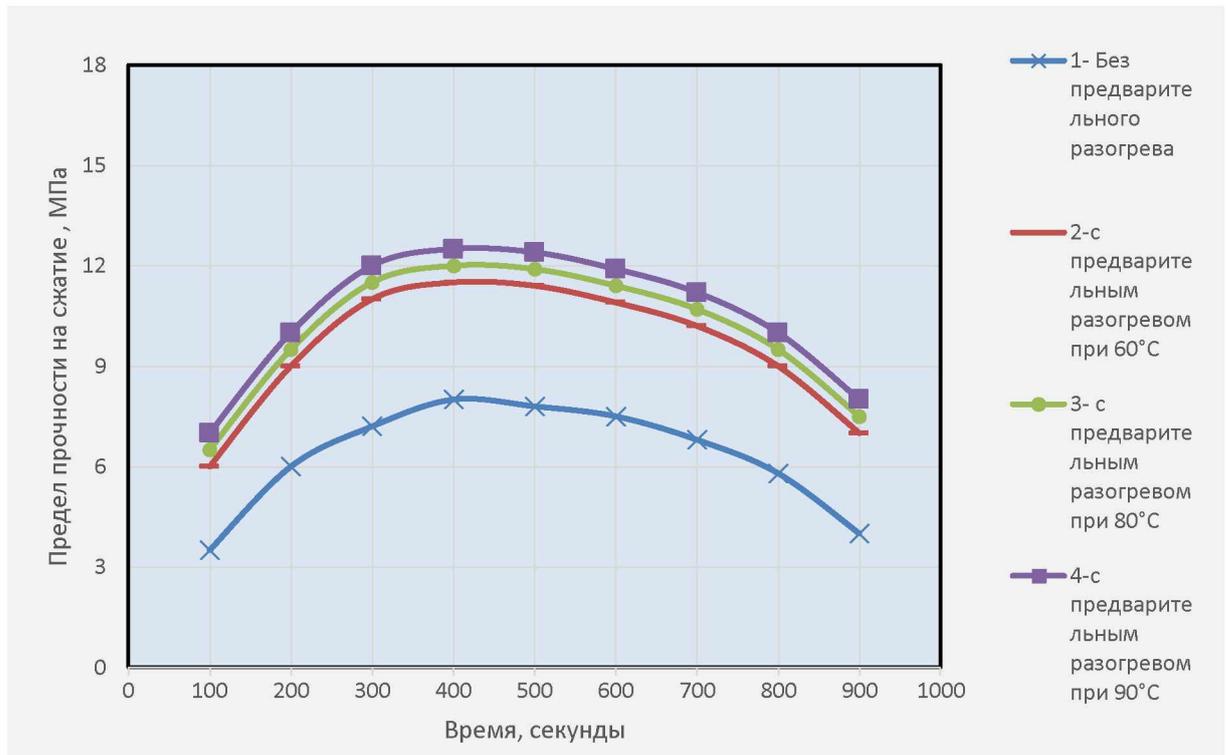


Рисунок 4.20 – Зависимость прочности жаростойкого бетона на композиционном вяжущем в зависимости от амплитуды колебаний при вибропрессовании

- без предварительного разогрева смеси;
- с предварительным разогревом смеси при температуре 60 °С;
- с предварительным разогревом смеси при температуре 80 °С;
- с предварительным разогревом смеси при температуре 90 °С.

Как указано в работе [134] с увеличением интенсивности вибропрессования возрастают физико-механические показатели бетона после сушки. Возрастание значений прочности бетона происходит после вибрационного воздействия с интенсивностью до значения 280-320 м<sup>2</sup>/сек<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение значений интенсивности вибропрессования приводит к небольшому снижению свойств бетона за счет снижения однородности в результате небольшого расслоения. Для мелкозернистых жаростойких бетонов таких, как керамзитобетон с крупностью зерен до 10 мм рационально применять невысокие частоты вибрационного

воздействия, тем более что в промышленном производстве основном применяются вибрирование бетонной смеси при частоте 50 Гц.

#### **4.5. Выбор режима тепловой обработки изделий из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе**

Выбор оптимального режима тепловой обработки блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе имеет большое значение для нормальной длительной эксплуатации теплового агрегата, в данном случае туннельной печи для обжига кирпича. Тепловые агрегаты из жаростойкого бетона до ввода в эксплуатацию должны подвергаться сушке и выводу в эксплуатацию до рабочей температуры по специально разработанному режиму [29, 48, 83, 84].

Режим тепловой обработки изделий зависит от ряда факторов и выбирается с учетом вида жаростойкого бетона, конструктивных особенностей теплового агрегата (толщины ограждений, наличия металлического кожуха), технологического режима работы агрегата, а также периода времени года строительства и ввода в эксплуатацию. Процессы, которые происходят в жаростойком бетоне при сушке и первом нагреве, зависят от его состава, влажности, конструктивных особенностей элементов теплового агрегата и нагрузки на них. Как указано в работах [1, 3, 48, 49,], на 1 м<sup>3</sup> жаростойкого бетона при затворении смеси вводят до 150÷250 л воды, которая, испаряясь при нагреве, превращается в пар со значительным увеличением в объеме, создавая напряжение в структуре бетона. Кроме того, при нестационарном нагреве в элементах из жаростойкого бетона появляются собственные температурно-влажностные напряжения. В результате в бетоне при изменении температурного режима из-за напряженного состояния могут появиться микро- и макротрещины, последствием которых может стать полное разрушение бетона. Нагрев и остывание жаростойкого бетона оказывает влияние на его свойства, а также нагрев вызывает дополнительную гидратацию, дегидратацию и реакцию в твердой фазе. В практике для ускорения твердения бетона применяется электро- или пароразогрев бетонных смесей. Более технологичным и низкочастотным для производственного

применения на базе действующих предприятий является метод предварительного электроразогрева смеси. При применении электроразогрева смеси миграционные процессы между цементирующим и пористым заполнителем станут слабее, так как воздух в порах заполнителя при повышении температуры увеличится в объеме и будет противодействовать капиллярным силам миграционного передвижения цементной суспензии. Вследствие этого электроразогретые легкобетонные смеси при температуре 60-80 °С становятся более однородными, быстро твердеют без дальнейшей тепловой обработки при ограниченных затратах энергоресурсов. Это позволяет повысить качество изделий, ускорить оборот форм, сократить производственный цикл. Исходя из этого следует, что для получения жаростойкого бетона заданного качества необходимо тепловые агрегаты нагревать по специально разработанным режимам.

#### 4.5.1. Технология сушки

В данной работе для сушки и первого нагрева применялось газообразное топливо. Так как жаростойкие составы бетона на керамзитовом заполнителе разрабатывались для футеровки стен тоннельной печи Махачкалинского кирпичного завода, технология сушки исследована именно для устройства футеровки стен.

Сушка жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе должна производиться не ранее, чем через семь суток или после тепловой обработки. В процессе сушки жаростойкого бетона удаление паров из рабочего пространства производится путем естественной и принудительной вентиляции. Для сушки стен используются газовые горелки, установленные в туннельной печи для обжига кирпича, а также электрокалориферы.

Сушку блоков для футеровки стен из разработанного состава жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе проводили во временных камерах, построенных на полигоне Кизилюртовского керамзитового завода. Для повышения долговечности конструкций необходимо снижать температуру при охлаждении блоков из жаростойкого до 600 °С со скоростью 50 °С/ч, а с температуры 600 °С до

100 °С – со скоростью 20 °С с отключением источников тепла по мере необходимости [142].

#### 4.5.2. Температурные режимы сушки первого нагрева

Обжиговые печи кирпичного завода Южной промышленной зоны в городе Махачкала были построены в 2010-2011 году по технологии немецкой компании «BRAER».

В качестве несущих конструкций печи применены монолитные, железобетонные и каменные конструкции, образующие каркас печи. Футеровка печи выполнена из монолитных шамотных огнеупорных блоков, футеровка пода вагонеток – из огнеупорных шамотных блоков. Температура обжига кирпича в печи доходит до 1150 °С.

В соответствии с договором с Кизилюртовским керамзитовым заводом №2442 на разработку и исследование состава жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с активированным композиционным вяжущим «портландцемент – тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита с предварительным разогревом смеси» состав бетона разрабатывался с учетом температуры эксплуатации до 1000 °С.

Блоки футеровки были смонтированы на объекте в августе 2019 года. Вид блоков для футеровки стен и схема поперечного разреза печи приведены на рисунках 4.21 и 4.22. Источником тепла в печи является природный газ, который подается через форсунки, установленные на уровне пода туннельной вагонетки.

Для первого нагрева блоков необходимо разработать режим сушки с учетом положения рекомендаций, а также результатов исследования, приведённых в работах [48, 47].

На полигоне ООО «СпецСтройМонтаж» в соответствии с разработанной технологией осуществляли предварительный электроразогрев в формах до сушки при температуре 105°С и дальнейшую сушку изделий при 105°С. Режим сушки и первого нагрева в соответствии рекомендациями выбирали в зависимости от тепловых агрегатов и условий эксплуатации.

Результаты исследований режима сушки и первого нагрева футеровок, проведенных в лаборатории жаростойких бетонов и огнестойкости железобетонных конструкций НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, представлены в работах [29, 39, 48, 84].

Режимы первого нагрева, разработанные в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, учитывают связь массопереноса с напряженным состоянием бетона. В основу этих исследований была заложена методика математического моделирования процесса интенсивного нагревания бетона.

Анализ работ НИИЖБ им. А. А. Гвоздева [29, 39, 48, 84] показывает, что при таких габаритных размерах блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе режим их нагрева должен удовлетворять следующим требованиям:

- скорость нагрева от начальной температуры до 100 °С должна составлять не более 25 °С/ч;
- скорость нагрева от 100 °С до 600 °С должна составлять не более 25 °С/ч;
- скорость нагрева от 600 °С до 700 °С должна составлять не более 20 °С/ч.

График первого нагрева блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на активированном вяжущем приведен на рисунке 4.23, из которого следует, что режим подъема температуры при первом разогреве теплового агрегата выдержан и соответствует базовым положениям бетоноведения в части сушки и первого нагрева тепловых агрегатов из жаростойких бетонов, приведенных в работах [29, 48, 83, 84].



Рисунок 4.21 – Общий вид печи с футеровкой из опытных блоков, изготовленных из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе и активированном композиционном вяжущем с предварительным разогревом смеси

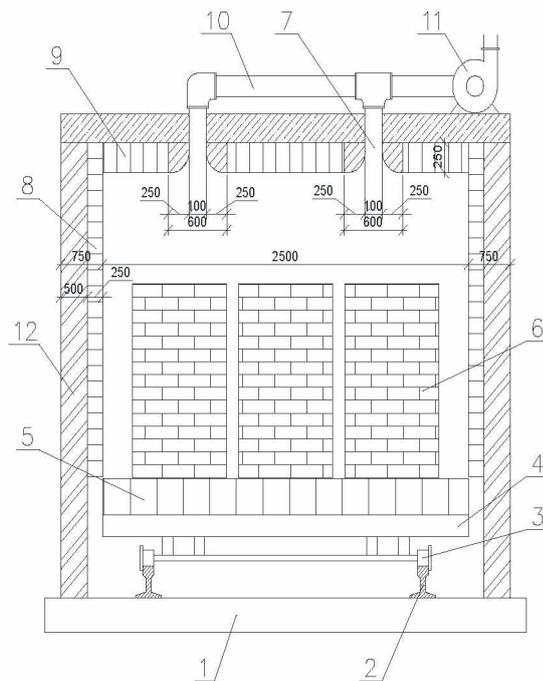


Рисунок 4.22 – Схема поперечного разреза туннельной печи для обжига кирпича

1 – фундаментная плита; 2 – рельсовый ход; 3 – колесная пода вагонетки; 4 – под вагонетки; 5 – футеровка пода вагонетки; 6 – кирпич на вагонетки; 7 – газоходы; 8 – футеровка вертикальной стены туннельной печи из керамзитовых блоков; 9 – футеровка перекрытия туннельной печи; 10 – воздуховод; 11 – вытяжной вентилятор; 12 – несущие стены туннельной печи

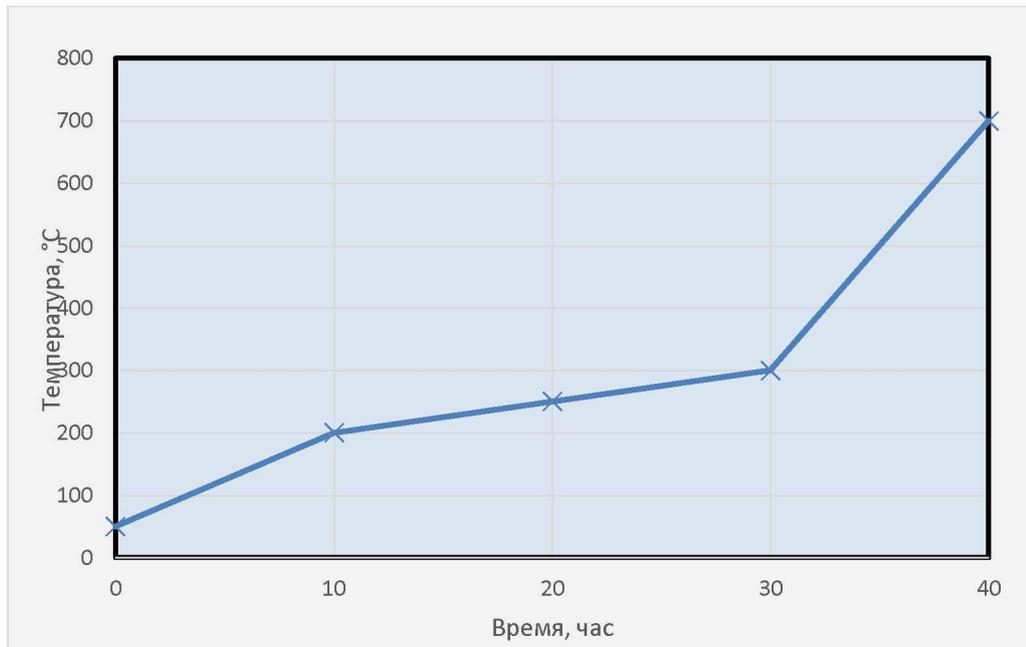


Рисунок 4.23 – График первого нагрева блоков из жаростойкого бетона на керамзитового заполнителя и активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси

### Выводы по четвертой главе

1. По результатам проведенных исследований подобран оптимальный состав жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе:

- вяжущее – портландцемент ПЦ1-500Н (ГОСТ 31108-2003) производства Себряковского завода Волгоградской области в количестве  $350 \text{ кг/м}^3$ ;
- керамзитовый заполнитель крупной фракции 5-10 мм (гравий) в количестве  $1050 \text{ кг/м}^3$  и мелкой фракции 0,1-2 мм (песок) (местные сырьевые материалы) в количестве  $950 \text{ кг/м}^3$ ,
- тонкомолотая добавка из обожженного серого аргиллита (местный сырьевой материал) в количестве  $120 \text{ кг/м}^3$ ;
- суперпластификатор СП-1 по ТУ 6-36-0204229-625-90 в количестве  $2 \text{ кг/м}^3$ ;
- вода затворения по ГОСТ 23732-2011 в количестве  $175 \text{ л/м}^3$ .

2. Анализ работ по подбору оптимальной гранулометрии для зернового состава жаростойких бетонов на керамзитовом заполнителе и зависимости свойств от крупности зерен заполнителя и компактной его упаковки позволяют сделать

вывод, что верхний предел крупности зерен заполнителей жаростойких бетонов для изготовления штучных блоков для футеровок стен рационально применять равным 10 мм, с включением фракции до 20 мм не более 15-20 %.

3. Предложен способ повышения прочностных и деформативных свойств жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с помощью нового технологического приема: путем механической активации (тонкость помола  $3500 \text{ см}^2/\text{г}$ ) композиционного вяжущего «портландцемент – тонкомолотая добавка из обожженного серого аргиллита» на планетарной мельнице «Активатор-4м». Сущность механической активации композиционного вяжущего «портландцемент – тонкомолотая добавка из обожжённого серого аргиллита» заключается в дополнительном совместном помоле портландцемента и тонкомолотой добавки.

4. Установлено, что предварительный электроразогрев бетонной смеси с керамзитовым заполнителем из-за пористой структуры керамзитового гравия в котором происходит накопление влаги в процессе твердения растворной части за счет миграции приводит к эффекту самопропаривания. В следствии чего уменьшается миграция влаги при рабочем подъеме температуры, что позволяет уменьшить давление на поверхности перегородок в структуре бетона и снять напряжение, и соответственно снижает процесс образования микротрещин.

5. Выявлено, что линейная деформация жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе проявляется в виде температурной усадки до температуры нагрева  $680 \text{ }^\circ\text{C}$ , при нагреве выше проявляются деформации температурного расширения бетона. Линейная усадка при предварительном электроразогреве смеси снижается от  $-0,12 \%$  до  $-0,06 \%$  за счет более стабильной структуры и повышенной прочности вследствие уменьшения давления на межпоровых перегородках и снижения уровня напряжения и процесса образования микротрещин. Предварительный электроразогрев до сушки при температуре  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  вызывает эффект самопропаривания за счет влаги, которая накапливается в порах керамзитового гравия в процессе водозатворения и перемешивания смеси.

6. Анализ исследования микроструктуры образцов жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе при температурах нагрева  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $1000$

°С показывает, что увеличение температуры не приводит к образованию трещин в бетоне. Вокруг зерен керамзитового гравия выявлена реакционная кайма, которая сохраняется и после обжига при температуре до 1000 °С. Кайма образуется в результате химического взаимодействия кремнеземистой фазы керамзитового заполнителя с гидроксидом кальция алюминатной фазы тонкомолотой добавки. Это приводит к формированию структуры гидросиликатных и гидроалюмосиликатных новообразований, которые способствуют увеличению адгезии заполнителя к цементирующей матрице, повышению прочностных и эксплуатационных показателей бетона.

7. В результате исследований теплопроводности выявлено, что с увеличением температуры нагрева теплопроводность жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе, что без предварительного разогрева, так и с предварительным разогревом увеличивается и составляет соответственно при 105 °С – 0,34 Вт/1°С и 0,33 Вт/1°С, при 600 °С – 0,42 Вт/1°С и 0,39 Вт/1°С, при 1000 °С – 0,46 Вт/1°С и 0,44 Вт/1°С. Низкие значения теплопроводности керамзитобетона при воздействии высоких температур способствуют уменьшению тепловых потерь при работе силовых агрегатов. Для оптимального состава жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным разогревом и без предварительного разогрева показатели теплопроводности не претерпевают значительных изменений. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси ниже на 1,5-2 %.

8. Установлено, что коэффициент линейного температурного расширения жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе в рабочем диапазоне температур до 1000 °С изменяется в пределах до 7-8 %. Предварительный электроразогрев позволяет снижать показатели КЛТР за счет уменьшения концентрации напряжения в перегородках растворной части бетона, связанное снижением миграции влаги в процессе подъема температуры.

9. Выявлен оптимальный способ приготовления жаростойкой бетонной смеси на керамзитовом заполнителе. Сначала осуществляется загрузка мелкой

фракции заполнителя и композиционного вяжущего с перемешиванием в бетоносмесителе принудительного действия в течение 2-3 минут, затем производится загрузка крупной фракции заполнителя и перемешивание смеси в течение 2-3 минут, на последней стадии сухая бетонная смесь затворяется водой и перемешивается в течение 3-4 минут.

10. В результате исследования способа формования жаростойкой керамзитобетонной смеси с предварительным электроразогревом смеси установлены оптимальные параметры вибропрессования: амплитуда колебания виброустановки, продолжительность вибрирования, усилия прессования.

## **ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖАРОСТОЙКОГО БЕТОНА НА КЕРАМЗИТОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ**

### **5.1. Опытнo-промышленное производство жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с композиционным вяжущим**

Выпуск опытно-промышленной партии бетонов для футеровки стен туннельной печи из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе был организован на производственной площадке ООО «СпецРемСтройМонтаж» в п. Карабудахкент Карабудахкентского района РД, которая находится южнее г. Махачкалы. Керамзитовый заполнитель для опытной партии блоков был получен из ООО Кизилюртовский завод керамзитового гравия Республики Дагестан. В качестве вяжущего был использован портландцемент марки ПЦ-500Н Серебряковского цементного завода Волгоградской области. Тонкомолотую добавку для опытной партии готовили на планетарной мельнице «Активатор-4М» в лаборатории Центра экспертизы и аудита в строительстве (ныне НОЦ «Современные строительные материалы и строительные конструкции») Дагестанского государственного технического университета. Для выпуска опытной партии из жаростойкого бетона было проанализировано состояние промышленных предприятий Республики Дагестан, где имеется необходимость замены дорогостоящих шамотных огнеупорных изделий на блоки из жаростойкого бетона на основе местного минерального сырья. Теоретические исследования и мониторинг действующих предприятий промышленности строительной индустрии показал, что для защиты конструкций эксплуатируемых при воздействии высоких температур, применяют в основном привозные, шамотные, огнеупорные изделия. Для футеровки стен туннельной печи и для защиты других конструкций подверженных температурным воздействиям до 1000 - 1100°С можно использовать жаростойкие керамзитовые блоки на композиционном вяжущем из местного минерального сырья. Блоки стен туннельной печи на основе жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе соответствуют рекомендациям [48 - 50], по

эксплуатации изделий при температуре до 1000 °С.

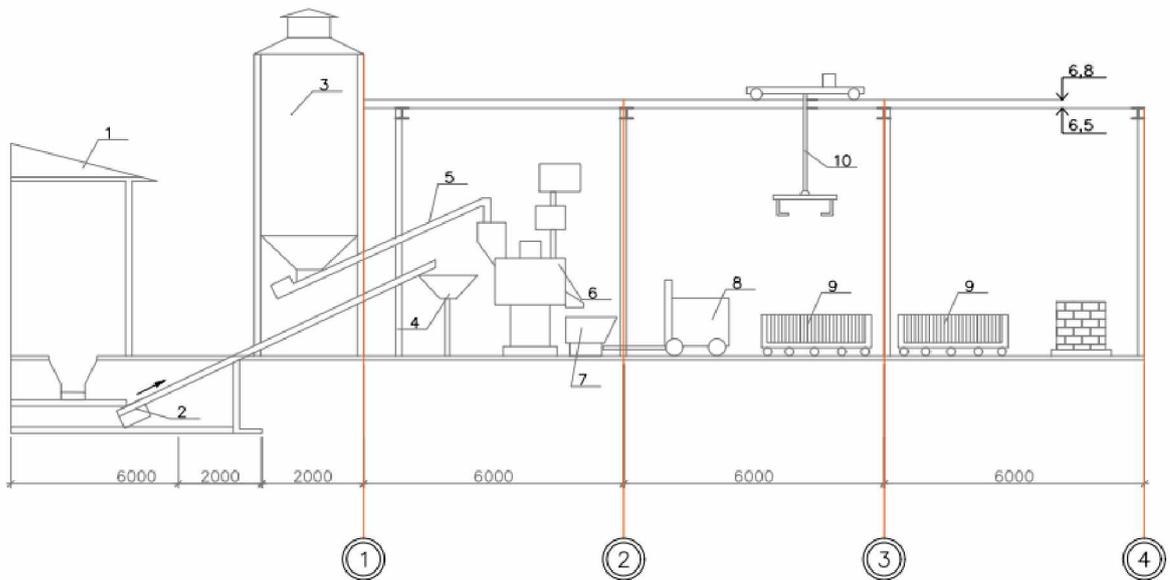
### 5.1.1. Организация опытного участка

Опытный участок для выпуска блоков был организован на производственном полигоне ООО «СпецРемСтройМонтаж» в п. Карабудахкент Карабудахкентского района РД, для опытного участка была отведена площадка размерами 30×10 м. Опытный участок был укомплектован технологическим оборудованием, которое приведено на общем виде и технологической схеме.

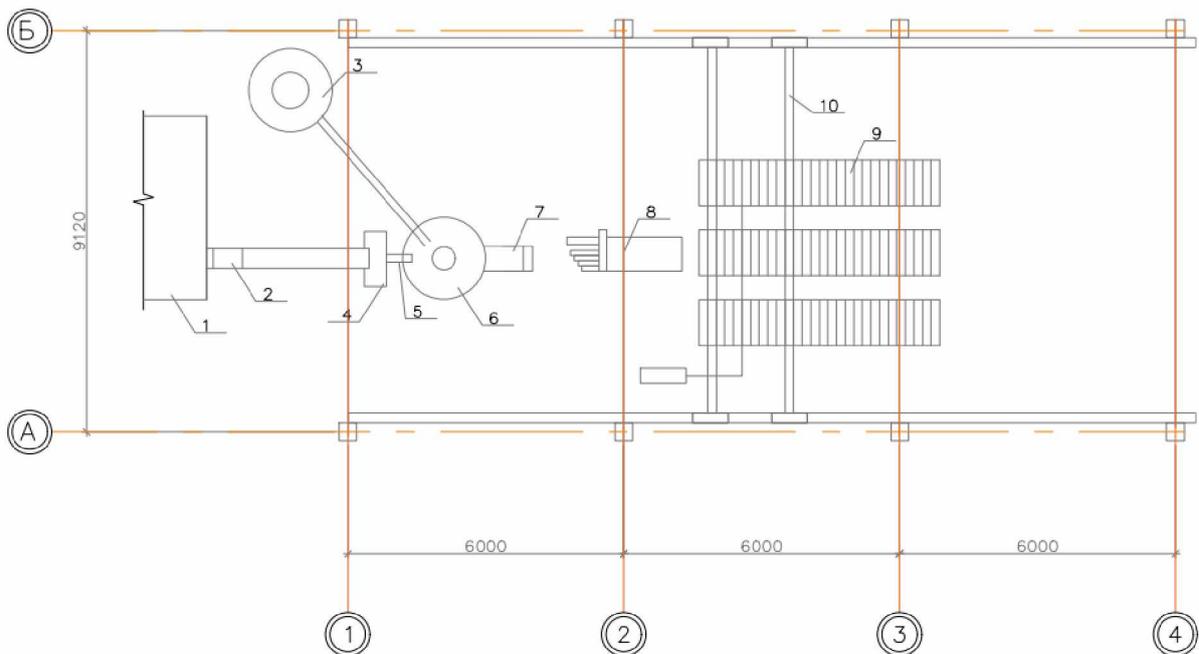
Общий вид и технологическая схема приведены на рисунках 5.1. и 5.2.



Рисунок 5.1 – Общий вид формовочного пресса для изготовления блоков и вид блоков после формования



а) разрез технологической схемы



б) план технологической схемы

Рисунок 5.2 – Технологическая схема изготовления блоков для футеровки тоннельной печи жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе

- 1 – склад керамзита; 2 – емкость для композиционного вяжущего; 3 – дозатор для композиционного вяжущего; 4 – емкость для воды; 5 – дозатор для воды; 6 – бетоносмеситель; 7 – бадья для бетона; 8 – скиповый загрузчик; 9 – формы кассеты с системой для предварительного электроразогрева смеси; 10 – стенд дозревания до сушки при температуре 105 °С; 11 – кран-балка грузоподъемностью до 2 тонн; 12 – траверса с автоматическим захватом; 13 – электрокар

### **5.1.2. Технология производства жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с композиционным вяжущим**

Технология изготовления изделий из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с композиционным вяжущим включает в себя следующие основные операции: подготовку заполнителя, приготовление вяжущего, приготовление бетонной смеси, формование изделий, электроразогрев смеси в формах и складирование. Композиционное вяжущее готовят в соответствии с технологическим регламентом по схеме производства работ из портландцемента и минеральной добавки измельченной в дробилке в последующим предварительным помолом шаровой мельницы тонкостью помола до 1800 – 2000 см<sup>2</sup>/г. Затем компоненты вяжущего в соотношении зависимости от температуры эксплуатации изделий минеральная добавка в пределах от 30 до 50% и портландцемент в пределах от 50% подают планетарную мельницу для последующего совместного помола и активации до удельной поверхности 3500 см<sup>2</sup>/г. После активации вяжущее подают в бетоносмесительную установку. Распределенный на фракции заполнитель керамзитовый гравий подают в бункера-накопители. Герметичный бункер для хранения активированного вяжущего и бункера-накопители оборудуют весовыми дозаторами. Вяжущее и заполнитель после дозировки подают в бетоносмесительную установку принудительного действия по определенной последовательности. Сперва подают заполнитель мелкой фракции, затем композиционные вяжущие и крупный заполнитель, которые перемешивают в сухом состоянии в течение двух минут. После перемешивания в сухом добавляют воду и перемешивают в течение двух-трех минут. Такая последовательность подачи крупного и мелкого заполнителя, а также композиционного вяжущего способствует равномерному распределению компонентов бетонной смеси в процессе перемешивания. После приготовления бетонная смесь из бетоносмесительной установки при помощи бетоноукладчика подают в формы с устройством для предварительного электроразогрева смеси, установленной на стенде, оборудованный виброустановками и вибрируют с пригрузом. Размеры пригруза зависят от формы оснастки. Размер плиты для пригруза был принят

размерами 750×750 мм с нагрузкой 0,1 МПа.

Готовые изделия направляются на площадки складирования.

Электроразогрев смеси проводят при температуре 80-90 °С. После предварительного электроразогрева смеси изделия направляются на склад готовой продукции.

Для обеспечения требуемого качества при изготовлении изделий из жаростойкого керамзитобетона технический контроль необходимо осуществлять с учетом требований (ГОСТ 10180 – 78 \*; СНиП 2.03.01 – 84\*; СНиП 2.03.04 – 84\*; ГОСТ 18105 – 86\*; СНиП 2.03.04 – 4\*; ГОСТ10180 – 78\*).

Не реже одного раза в сутки необходимо осуществлять контроль технологии изготовления изделий, начиная с приготовления бетонной смеси (хранение исходных материалов, правильность дозирования и контроль времени перемешивания), а также проверяют предварительный электроразогрев до сушки при температуре 105°С применяемый режим твердения, контроль остаточной прочности бетона на сжатие, средней плотности и специальных свойств бетона (температурной усадки, теплопроводности и термической стойкости), контроль качества готовых изделий по ГОСТ 1.0315.1 – 81\*; контроль качества монтажа сборных блоков для туннельной печи обжига кирпича; контроль режимов сушки и первого разогрева.

### 5.1.3. Внедрение результатов работы

Опытно-промышленную проверку разработанного жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем с предварительным электроразогревом смеси на основе активированного вяжущего проводили на кирпичном заводе ООО «СпецРемСтройМонтаж» в п. Карабудахкент Карабудахкентского района РД.

Блоки из разработанного состава жаростойкого бетона были использованы для футеровки стен туннельной печи обжига кирпича. Работы по футеровке стен были проведены в сентябре 2021 года. Эксплуатация футеровки из блоков жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с сентября 2021 по сентябрь 2022 г. показала, что футеровка отвечает всем предъявляемым эксплуатационным

требованиям, и она соответствует тем показателям, которые были получены в лабораторных условиях. Вид блоков опытной партии для футеровки стен тоннельной печи приведен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Вид блоков опытной партии

По результатам опытно-промышленной проверки жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси из местного минерального сырья для тоннельной печи разработана технология изготовления изделий со следующими основными свойствами (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Основные свойства жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси в форме

| Основные свойства   | Показатели   |
|---|--|
| Средняя плотность   | 1500 кг/м <sup>3</sup>                                 |
| Прочность при сжатии, МПа<br>а) после предварительного электроразогрева смеси<br>б) после нагрева до<br>100 °С,<br>400 °С,<br>600 °С,<br>800 °С,<br>1000 °С | 20,41<br><br>21,06<br>14,77<br>14,17<br>13,51<br>11,34 |
| Термическая стойкость, водяных теплосмен при 700 °С   | 15   |
| Теплопроводность, Вт/(м °С) при<br>20 °С,<br>200 °С,<br>400 °С,<br>600 °С,<br>800 °С,<br>1000 °С  | 0,34<br>0,36<br>0,38<br>0,39<br>0,42<br>0,44           |
| Коэффициент линейного температурного расширения при 1000 °С ( $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )   | 4,4  |
| Усадка в % при температуре<br>200 °С,<br>400 °С,<br>600 °С,<br>700 °С,<br>1000 °С   | 0,022<br>0,031<br>0,042<br>0,083<br>0,188              |

## 5.2. Техничко-экономическое обоснование эффективности применения жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси

Разработанная технология получения блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на основе местного минерального сырья с предварительным электроразогревом смеси может быть внедрена на предприятиях строительной индустрии Республики Дагестан и Северо-Кавказского региона при

минимальных затратах.

В Республике Дагестан в настоящее время отсутствует производство изделий и сухих смесей для возведения конструкций, которые эксплуатируются при воздействии повышенных и высоких температур. Регион обладает богатой минералогической базой, достаточной для производства блоков из жаростойкого бетона с различными заполнителями с температурой применения до 1000°C. С учетом этих факторов организация производства по выпуску блоков из жаростойкого керамзитобетона является целесообразным и экономически оправданным. Для организации технологической линии по производству жаростойких блоков можно использовать существующие производственные площади различных предприятий индустрии строительных материалов Республики Дагестан, а также полигоны строительных организаций.

Использование в качестве тонкомолотой минеральной добавки обожжённого аргиллита, запасы которых в Республике Дагестан имеются в достаточном количестве позволяют получить композиционные вяжущие при приготовлении бетонной смеси для конструкции подверженных воздействию высоких температур. Производство блоков для футеровки стен тоннельной печи из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на основе местного минерального сырья по безобжиговой технологии позволяет уменьшить энергозатраты за счет предварительного электроразогрева изделий в формах до сушки при 105°C, которые позволяют интенсифицировать процесс гидратации и сокращает время набора прочности бетона по сравнению с обычной технологией.

Применение изделий и конструкций из жаростойкого бетона на основе местного минерального сырья позволяет в процессе возведения тепловых агрегатов, такие как туннельные печи, печи для обжига извести и других конструкций, подверженных воздействию высоких температур промышленных предприятий строительной индустрии получить достаточно высокий экономический эффект.

Капитальные вложения предприятия ООО «СпецРемстройМонтаж», где налажен выпуск опытной партии из разработанного жаростойкого керамзитобетона приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Затраты при внедрении в производство технологии изготовления блоков для футеровки стен тоннельной печи жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе из местного минерального сырья

| Оборудование  | Объем    |        | Сметная стоимость |        |                |               |
|---|----------|--------|-------------------|--------|----------------|---------------|
|   | ед. изм. | кол-во | на ед. изм.       |        | на весь объем  |               |
|   |          |        | оборуд.           | монтаж | оборуд.        | монтаж        |
| Прокат (двутавры, уголки, швеллера и трубы)                         | п.м      | 150    | 562               | 80     | 84300          | 16 000        |
| Бункера-накопители на 1 тонну изделия                               | шт.      | 4      | 43750             | 7 000  | 175000         | 28 000        |
| Емкость для воды на 2 тонны   | шт.      | 1      | 31250             | 1 000  | 25 000         | 1 000         |
| Бетоносмеситель   | шт.      | 1      | 18375             | 1 000  | 10 500         | 1 000         |
| Дозатор весовой   | шт.      | 4      | 243000            | 3 000  | 972 000        | 12 000        |
| Мельница шаровая  | шт.      | 1      | 235381            | 10 000 | 235381         | 10 000        |
| Планетарная мельница  | шт.      | 1      | 1 712500          | 15 000 | 1 712500       | 15 000        |
| Конвейеры ленточные   | п/м      | 15     | 43750             | 5 000  | 656250         | 125 000       |
| Ковшовый конвейер   | шт.      | 1      | 662500            | 7 000  | 662500         | 7 000         |
| Дробилка  | шт.      | 1      | 67500             | 12 000 | 67500          | 12 000        |
| Механическое сито   | шт.      | 1      | 18750             | 1 500  | 18750          | 1 500         |
| Блок-форма с пластинами для предварительного электроразогрева смеси | шт.      | 5      | 67000             | 2 000  | 335000         | 2 000         |
| <b>Итого:</b>   |          |        |                   |        | <b>4954681</b> | <b>230500</b> |

Технологическое оборудование устанавливается на специально отведенном участке производственной площадки ООО «СпецРемстройМонтаж», затраты на капитальное строительство не нужны. Калькуляция себестоимости изготовления изделий из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на основе местного минерального сырья приведена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Калькуляция себестоимости на 1 м<sup>3</sup> изделия из жаростойкого керамзитобетона на местном минеральном сырье

| Наименование   | Объем          |             | Обоснование   | Себестоимость тыс. руб. |               |
|--|----------------|-------------|---|-------------------------|---------------|
|  | ед. изм.       | количество  |   | ед. изм.                | на весь объем |
| Сырьевые ресурсы<br>а) Керамзитовый гравий<br>ООО «Керамзит №1» г.<br>Кизилюрт                                 | 1т.            | 1,5         | ООО «Керамзит №1» г.<br>Кизилюрт прайс-лист<br><a href="http://kizilurt.kupitkeramzit.ru">kizilurt.kupitkeramzit.ru</a> | 2450                    | 3675          |
| б) тонкомолотая минеральная<br>добавка (обожжённый аргиллит)   | 1т.            | 0,13        | ООО ХК «Атлан-<br>цемент» г. Буйнакск<br>прайс-лист <a href="mailto:bcpk@mail.ru">bcpk@mail.ru</a>                      | 6500                    | 845           |
| Пластификатор  | 1т.            | 0,11        | INFO@BETONZONE.CO<br>М<br>прайс-лист  | 61466                   | 6761          |
| Портландцемент М500  | 1т.            | 0,277       | Серебряковцемент<br><a href="http://makhachkala.regmarkets.ru">makhachkala.regmarkets.ru</a><br>прайс-лист              | 10900                   | 3019          |
| Вода   | 1т.            | 175         | ФЕРр 65-23-01   | 350                     | 50            |
| Транспортные расходы на<br>доставку минерального сырья<br>а) керамзитового гравия.<br>б) тонкомолотой добавки. | 1т.р.<br>1т.р. | 1,5<br>0,13 | ФСЦП310-3010-1  | 500<br>500              | 750<br>65     |
| <b>Итого:</b>  |                |             |   |                         | <b>15165</b>  |

По данным интернет ресурса [stroyportal](http://stroyportal) стоимость светло-желтого шамотного кирпича ШБ-5 размерами 230x114x65 мм на 14.07.2023 года равно 83 рубля. Для футеровки 1 м<sup>3</sup> необходимо 588 штук огнеупорного кирпича. Стоимость шамотного кирпича для футеровки 1 м<sup>3</sup>  $C=588,23 \times 83 = 48,823$  без учета транспортных расходов.

Экономический эффект производства и применения блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе из местного минерального сырья по сравнению с привозными штучными огнеупорами составляет 33,658 тыс. руб. на 1 м<sup>3</sup> футеровки.

**Выводы по пятой главе**

1) Анализ запасов минерального сырья, а именно керамзитовой глины в Республике Дагестан и производственные мощности ООО «Кизилюртовский завод керамзитового гравия», наличия большого месторождения серого аргиллита показывает, что в регионе может быть налажено промышленное производство жаростойких блоков из керамзитового заполнителя для теплоизоляции различных инженерных сооружений эксплуатируемых под воздействием высоких температур.

2) Разработанная технология изготовления блоков для футеровки стен туннельной печи обжига кирпича из жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем из местного минерального сырья с предварительным электроразогревом смеси в формах до сушки при температуре 105 °С позволяет получить экономический эффект по сравнению с привозными шамотными огнеупорными изделиями 33,658 тыс. руб. на 1 м<sup>3</sup> футеровки за счет низкой стоимости составляющих бетонной смеси и уменьшения транспортных расходов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Развита научные представления о количественном изменении содержания несвязанных оксидов  $\text{SiO}_2$  до 74 %,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  до 2,7 раза при реализации предварительного электроразогрева смеси в формах жаростойкого портландцементного керамзитобетона с тонкомолотой добавкой из обожженного аргиллита, доказано формирование в этих условиях повышенного содержания несвязанных оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ , алюмината магния  $\text{Mg}(\text{AlO}_2)_2$ , гидроксида алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и катоита  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$ , что вследствие их высокой стойкости к температурным и химическим воздействиям и формирования контактного слоя «пористый наполнитель – цементный камень» повышенной плотности обеспечивается рост механической прочности жаростойкого портландцементного керамзитобетона с тонкомолотой добавкой из обожженного аргиллита.

2. Определена рациональная дозировка тонкомолотой добавки из обожженного аргиллита, определены параметры обжига, разработаны составы композиционного вяжущего, содержащие 30...50 % тонкомолотой добавки и определены технологические параметры получения композиционного вяжущего посредством совместного помола до удельной поверхности  $3500 \text{ см}^2/\text{г}$ .

3. Определены параметры целесообразного режима приготовления бетонной смеси с рациональными дозой тонкомолотой добавки из обожженного аргиллита и величиной В/Т в диапазоне 0,3...0,44 в смесителях принудительного и гравитационного типа с продолжительностью перемешивания 5-7 минут, включая загрузку компонентов, сухое перемешивание 2-3 минуты, затворение, 3-4 минуты перемешивания и параметры уплотнения смеси – интенсивность колебаний  $300\text{-}320 \text{ см}^2/\text{сек}^3$  независимо от режима предварительного разогрева при величине пригруза  $(13 \div 14) 10^{-2} \text{ МПа}$ .

4. Подтверждена характерная для бетонов на пористых наполнителях экстремальная зависимость предела прочности на сжатие жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем после кратковременного нагрева до  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  от величины В/Т, повышение предела прочности на сжатие в случае

предварительного электроразогрева смеси в формах с рациональным В/Т составляет 50...90 % при температуре разогрева до 80...90 °С и 40...45 % при температуре разогрева до 60 °С относительно эталона без электроразогрева.

5. Термостойкость жаростойкого керамзитобетона, изготовленного с использованием различных режимов предварительного электроразогрева смеси в формах, составляет от 12 до 15 воздушных теплосмен, что соответствует требованиям СП 27.13330.2017. Температурный интервал размягчения, установленный при исследовании деформаций под нагрузкой жаростойких керамзитобетонов при высоких температурах в зависимости от температуры предварительного нагревания, составил 180...206 °С, что достаточно хорошо согласуется с данными (190 °С) Некрасова К.Д. и Масленниковой М.Г.

6. Усадка жаростойкого керамзитобетона, изготовленного с предварительным электроразогревом смеси в формах, плавно возрастает до значений 0,04 % при температуре 600 °С, далее фиксируется ускорение роста усадочных деформаций до значений 0,12 % при 1000 °С. Для жаростойкого керамзитобетона, изготовленного без предварительного электроразогрева смеси, зависимость усадки от температуры носит более сложный, хотя и подобный характер, а значения достигают 0,1 % при 600 °С и 0,24 % при 1000 °С, т.е. имеет место удвоение величины деформаций усадки.

7. Применение механически активированного композиционного вяжущего «портландцемент + тонкомолотая добавка из обожженного аргиллита» в исследованных жаростойких керамзитобетонах со средней плотностью 1450...1500 кг/м<sup>3</sup> обеспечило существенное качественное различие, особенно при кратковременном нагреве до 500 °С, закономерности изменения от температуры нагрева величины КЛТР в сравнении с данными СП 27.13330.2017. В рабочем диапазоне температур до 200...500 (600)...1000 °С КЛТР жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе изменяется в пределах  $(3,9...5,8...2 \times 10^{-6})$  1/°С.

8. Рост коэффициента теплопроводности в исследованных жаростойких керамзитобетонах на композиционном вяжущем с тонкомолотой добавкой из обожженного аргиллита до 800 °С имеет практически линейный характер, при

более высокой температуре теплопроводность возрастает более интенсивно, сохраняя линейный характер, в результате при повышении температуры до 1000 °С рост коэффициента теплопроводности составил 29...34 %, тогда как по СП 27.13330.2017 при росте температуры до 900 °С повышение составляет 55...90 %.

9. Разработаны составы композиционного вяжущего, жаростойкого керамзитобетона класса по предельно допустимой температуре применения И10 и класса по прочности на сжатие В10, установлены технологические параметры предварительного электроразогрева смеси и режима сушки при разработке технологического регламента на производство жаростойких изделий – блоков размером 700×400×200 мм для футеровки стен туннельной печи на кирпичном заводе ООО «СпецРемСтройМонтаж» в п. Карабудахкент Республики Дагестан с общим экономическим эффектом 33,658 тыс. руб. на 1 м<sup>3</sup> футеровки.

**Предпосылки дальнейшей разработки темы.** Данная диссертационная работа не исчерпывает всего круга вопросов, связанных с исследованием жаростойкого керамзитобетона с предварительным электроразогревом смеси для футеровки стен туннельной печи обжига кирпича в условиях силовых и температурных воздействий. Дальнейшие исследования планируется направить на расширение области применения предложенной технологии жаростойкого керамзитобетона на железобетонные конструкции различных конфигураций и условий эксплуатации.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Некрасов К. Д. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур [Текст] / К. Д. Некрасов, В. В. Жуков, В. Ф. Гуляева. М.: Стройиздат. 1972. – 128 с.
2. Некрасов К. Д. Развитие технологии жаростойких бетонов [Текст] / сб. тр. – НИИЖБ – 1981. – С. 3. – 11.
3. Некрасов К. Д. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях [Текст] / К. Д. Некрасов, М. Г. Масленникова. – М: Стройиздат, 1982 – 162 с.
4. Хлыстов А. И. Повышение эффективности и улучшение качества футерованных конструкций из жаростойкого бетона [Текст]: А. И. Хлыстов, А. В. Божко, С. В. Соколова, Р. Т. Рязов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – №3. – С.26-31.
5. Hlystov, A.I. Efficiency improvement of heat-resistant concrete through the use of sludge technogenic raw material / A.I. Hlystov, V.A. Shirokov, A.V. Vlasov// Procedia Engineering. -2015. Т.III. P. 290-296.
6. Батырмурзаев Ш. Д. Жаростойкий шамотный бетон на силикат-натриевом композиционном вяжущем [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Батырмурзаев Шахабудин Даудович. – М., 1987. – 200 с.
7. Буров В. Ю. Жаростойкие бетоны для футеровки зоны спекания цементных вращающихся печей: дисс. ... д-ра.техн. наук: 05.23.05 / Буров Владимир Юрьевич. – М., 1994. – 268 с.
8. Григорьева А. Д. Жаростойкий бетон на шлаковой пемзе [Текст] Григорьева // сб. трудов НИИЖБ. – 1981. С. 59-69.
9. Жданова Н. П. Особо легкий жаростойкий бетон быстротвердеющем портландцементе и силикат глыбе [Текст] / Н. П. Академия наук СССР. – М., – 1986. – С. 67-73.
10. Жуков В. В. Жаростойкий мелкозернистый бетон на основе смешанного вяжущего [Текст] / В. В. Жуков, Н. П. Жданова, Т. И. Близгарева. Материалы XXIII Международной конф. в области бетона и железобетона. – 1991. – С. 68-74.

11. Жуков В. В. Жаростойкий шлакопемзобетон на высокоглиноземистом цементе [Текст] / В. В. Жуков, Г. Н. Хаджишалапов // «Строительные материалы» 2004г., – № 6. – С. 10-12.
12. Жуков В. В. Легкие жаростойкие бетоны для шахты реактора нового поколения [Текст] / В. В. Жуков, Г. Н. Хаджишалапов. – Махачкала: ГУП «Типография Дагестанского научного центра РАН», – 2006 г. – 293 с.
13. Масленникова М. Г. Легкие жаростойкие бетоны на заполнители из залы ТЭС и из отходов бумажной промышленности [Текст] / М. Г. Масленникова, А. Л. Карпова, С. Г. Василькова и др. // сб. тр. НИИЖБ – М., Госстрой СССР, –1981. С. 43-53.
14. Месеняшин Г. В. Использование керамзита в жаростойком бетоне на ВГЦ в ограждающих конструкциях тепловых агрегатов. [Текст] / Г. В. Месеняшин, Е. В. Зализовский // Жаростойкие материалы, изделия и конструкции. – Челябинск, – 1987. – С. 43-44.
15. Милованов А. Ф, Жаростойкий железобетон [Текст] / А. Ф. Милованов. – М.: Госстройиздат, 1963. – 235 с.
16. Милонов В. М. Жаростойкий бетон и железобетон в тепловых агрегатах химической промышленности [Текст] / В. М. Милонов // Бетон железобетон, – 1972. – № 2. – С. 11-15.
17. Москвин В. М. Кислотостойкий бетон [Текст] / В. М. Москвин. – М. Л. Госстройиздат. 1935. – 98с.
18. Некрасов К. Д. Легкие жаростойкие бетоны на фосфатной связке [Текст] / К. Д. Некрасов, А. П. Тарасов, Г. Н. Александрова, А. Д. Гаврилова // сб. трудов НИИЖБ. – М., – 1975. – № 25. – С. 5-11.
19. Некрасов К. Д. Жароупорный бетон [Текст] / К. Д. Некрасов. – М.: Промстройиздат, – 1957. – 283 с.
20. Некрасов К. Д. Жаростойкий бетон на основе металлургических шлаков [Текст] / К. Д. Некрасов, А. Н. Абызов // Обзор ЦИНИС. М. – 1980. – С. 17-23.

21. Гоберис С. Ю. Работа жаростойких бетонов в условиях циклических температур / С. Ю. Гоберис, Л. И. Мерлинская // Бетон и железобетон. – 1981. – № 12. – С. 12-13.
22. Некрасов К. Д. Теплоизоляционный и конструктивный жароупорный керамзитобетон на жидком стекле [Текст] / К. Д. Некрасов, М. Г. Масленников // сб. тр. – НИИЖБ. – 1964. – С. 34-46.
23. Курбанов Р.М., Жаростойкое активированное вяжущее на основе портландцемента [Текст] / Р.М. Курбанов, Г. Н. Хаджишалапов, Т.А. Хежев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 175-182.
24. Шипулин В. И. Повышение эффективности жаростойких бетонов за счет применения отходов нефтехимического производства / В.И. Шипулин, Т. И. Шаравина, Е. И. Вальтер, В. В. Вальтер, В.В. Жуков // Монтажные и специальные строительные работы: Науч.-техн. реф. Сборник. Сер. III. Тепломонтажные и изоляционные работы. – М.: Стройиздат. – Вып. 2. – 1979. – С. 9-12.
25. Некрасов К. Д. Жаростойкий бетон на портландцементе [Текст] / К. Д. Некрасов, А. П. Тарасова. – М.: Стройиздат. 1969, – С. 191.
26. Некрасов К. Д. Жаростойкие бетоны на основе шлаков ферросплавов [Текст] / К. Д. Некрасов, А. Н. Абызов // Наука. – 1986. – № 6. – С.102-107.
27. Некрасов К. Д. Исследование и опыт применения жаростойких бетонов [Текст] / К. Д. Некрасов, С. Ю. Гоберис // Обзор по материалам межд. Симпозиума ЦИНИС Госстроя СССР. – 1974. – С. 18-27.
28. Хаддадин И. Д. Легкий жаростойкий керамзитобетон на композиционном вяжущем : технология и свойства [Текст]: дисс... к-та тех. наук : 05.23.05. / Хаддадин Икаб Джирис – Москва, 1990. – 121 с.
29. Некрасов К. Д. Исследование крупных блоков из жаростойкого бетона при одностороннем нагреве [Текст] / К. Д. Некрасов, В. В. Жуков, В. И. Шевченко // Огнеупоры. – 1967. – № 6. – С. 21-26.

30. Ремнев В. В. Жаростойкие бетоны на основе модифицированного портландцемента [Текст] / В. В. Ремнев, С. П. Горкуненко // Строительные материалы. – 1996. № 10. – С. 17-20.
31. Ремнев В. В. Перспективное вяжущее для жаростойких бетонов [Текст] / В. В. Ремнев // Строительные материалы. – 1995. – №10. – С. 2-3.
32. Горлов Ю.П. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол [Текст] / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, М.И. Зйфман, Б.Д. Тотурбиев – М.: Стройиздат, 1986. – 144 с.
33. Хаджишалапов Г. Н. Технологические факторы легких жаростойких бетонов при применении в шахте ядерных реакторов нового поколения [Текст]: дисс... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович. – Ростов-на-Дону, 2006. – 368 с.
34. Хаджишалапов Г. Н. Модифицированный жаростойкий цирконовый бетон с повышенными эксплуатационными характеристиками [Текст] / Г. Н. Хаджишалапов, А. М. Даитбеков, Ю. А. Алхасова, С. А. Даитбеков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 76-81.
35. Пустовалов Д. В. Модифицированный жаростойкий бетон / Строительные материалы [Текст] / Пустовалов Д. В., Ремнев В. В. – 1996. – № 3. – С. 14- 15.
36. Накрасов К.Д, Основные направления технического прогресса в технологии жаростойких бетонов / К. Д. Некрасов. – Научно-технический реферативный сборник. Серия III. Тепломонтажные и изоляционные работы. Выпуск 2. – М.: 1979. – С 1-3.
37. Хлыстов А. И. Теоретические и технические принципы повышения долговечности огнеупорных футеровочных материалов [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. 05.23.05 / Хлыстов Алексей Иванович. – Самара, 2004. – 50 с.
38. Хуснияров, М. Х. Жаростойкий бетон для монолитной футеровки нагревательной печи [Текст] / М. Х. Хуснияров, А. Тимохин // Известия Вузов. Нефть и газ, – 1997. – №4. – С.19-26

39. Жуков В. В. Режимы нагрева элементов из жаростойких бетонов: Отчет о НИР [Текст] / Жуков В. В., Райнхард Б. – М: НИИЖБ, 1971. – 93 с.
40. Месеняшин Г. В. Использование керамзита в жаростойком бетоне на ВГЦ в ограждающих конструкциях тепловых агрегатов [Текст] / Г. В. Месеняшин, Е. В. Зализовский // Жаростойкие материалы, изделия и конструкции. – Челябинск, – 1987. – С. 43-44.
41. Коновалов В. М., Гликин Д. М., Соломатова С. С. Использование аргиллитов в производстве смешанных цементов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2.; [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22244> (дата обращения: 28.10.2021).
42. Ратинов В. Б., Шейкин А. Е. Современные воззрения на процессы твердения портландцемента и пути их интенсификаций. Доклады всесоюзного совещания по современным проблемам технологии бетона в промышленности сборного железобетона. Стройиздат, 1965.
43. Крылов Б. А., Ли А. И. Механизм воздействия форсированного подъема температуры на физико-химические процессы в бетоне при электропрогреве [Текст] / Б. А. Крылов, А. И. Ли // Вопросы общей технологии и ускорения твердения бетона. – Москва, – 1970. – С. 134-137.
44. Крылов Б. А., Копылов В. Д. Кинетика потерь влаги бетонами в процессе электропрогрева [Текст] Б. А. Крылов, В. Д. Копылов // Вопросы общей технологии и ускорения твердения бетона. – Москва, – 1970. – С. 186-194.
45. Федоров А. Е., Михальчук П. А. Разработка режимов электропрогрева жаростойких бетонов. [Текст] А. Е. Федоров, П. А. Михальчук // Жаростойкие бетоны. – Москва, – 1964. – С. 214-216.
46. Федоров А. Е., Михальчук П. А. Влияние электропрогрева на свойства жаростойкого бетона на портландцементе с тонкомолотой шамотной добавкой и шамотным заполнителем. [Текст] А. Е. Федоров, П. А. Михальчук // Жаростойкие бетоны. – Москва, – 1964. – С. 299-300.
47. Хаджишалапов Г. Н. Влияние предварительного разогрева на термомеханические свойства жаростойкого шамотного бетона на силикат-

- натриевом композиционном вяжущем [Текст]: дисс...канд. техн. наук: 0523.05 / Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович. – М., – 1995. – С. 160
48. СН-156-79 Инструкция по технологии приготовления жаростойких бетонов. – М.: Стройиздат. – 1979. 40 с.
49. |Справочное пособие по технологии изготовления жаростойких бетонов к СНиП 3.09.01-85 и СНиП 3.03.01-87 [Текст]: – М.: Стройиздат, 1991. – 96 с.
50. Технология изготовления жаростойких бетонов / Н.-и., проект.-конструкт. и технол. ин-т бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1991. – 63 с.
51. СП 27.13330.2011 Бетоны и железобетонные конструкции предназначенные для работы в условиях повышенных и высоких температурю. – М.: Минрегион России, 2010. – 114с.
52. Новопашин А. А., Пименов В. А. Легкие жароупорные растворы и бетоны на фосфатных связках [Текст] / А. А. Новопашин, В. А. Пименов // Сборник трудов: «Керамзит и керамзитобетон», вып. 6. – М., 1972. – С 115-122.
53. Литовский Е. Я. Переносные свойства вещества. Тепло и массоперенос. – Минск АН БССР, 1972. т. 7. – С. 424-432.
54. Тотурбиев Б. Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций [Текст] / Б. Д. Тотурбиев. – М.:Стройиздат, 1988-203 с.
55. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объемов. – М.: Издательство стандартов. 1976 г. – 8 с.
56. ГОСТ2409 – 2014 Огнеупорны. Методы определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. – М.: Стандартиформ 2014. – 6 с.
57. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартиформ 2020.
58. ГОСТ 24544 – 81. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. – М.: Издательство стандартов 1981 – 25 с.
59. ГОСТ 20910-90 . Бетоны жаростойкие. Технические условия [Текст] / – М.: Издательство стандартов, 1991 г. – 17 с.

60. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартиформ, 2013. – 36 с.
61. Меркин А. П. Подбор состава жаростойкого по высокотемпературной деструкции [Текст] / А. П. Меркин., В. В. Жуков., В. П. Комаков. М.: ВНИИЭ газпром, 1973. – 59 с.
62. Тарасова А. П. Подбор состава жаростойкого бетона и методы их расчета [Текст] / А. П. Тарасова. Н. П. Жданова // Новые в технологии жаростойких бетонов. Сб. трудов НИИЖБ. – 1981. – С. 34-43.
63. Горлов Ю. П. Технология теплоизоляционных материалов [Текст] / Ю. П. Горлов., А. П. Меркин., А. А. Устенко. – М.: Стройиздат, – 1980. – 499 с.
64. Горлов Ю. П. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы [Текст] / Ю. П. Горлов., Н. Ф. Еремин, Б. У. Седунов. – М.: Стройиздат, – 1979. – 193 с.
65. Жданова Н. П. Экономическая эффективность применения жаростойких бетонов на глиноземистых цементах [Текст] / Н. П. Жданова, А. П. Тарасова, Т. А. Лютикова, А. А. Арзуманян // Бесцементные жаростойкие бетоны на основе природного и техногенного сырья. – 1981. 117 с.
66. Соков В. В. Способ монолитной футеровки тепловых агрегатов [Текст] / В. Н. Сычев. – М.: Стройиздат, 1996. – 180с.
67. Ремнев В. В. Жаростойкие бетоны и возможности их применения для тепловых агрегатов [Текст] / В. В. Ремнев // Строительные материалы. – 1996. – № 3. – С. 18-19.
68. Хаджишалапов Г. Н. Технология устройства монолитной футеровки шахтной печи для обжига извести применением автоматизированного модуля использующей опалубки [Текст] / Г. Н. Хаджишалапов., Р. М. Курбанов., А. М. Гаджиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – № 23. – 2011. – С. 112-117.
69. Баженов Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны [Текст] / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 289 с.
70. Бедунов Б. У. Влияние верхнего предела крупности заполнителя на термическую стойкость жаростойких бетонов [Текст] / Б. У. Бедунов,

- В. Е. Журавлев // Сер. 3. Тепломонтажные и изоляционные работы, – 1982. – № 2. – С.22-23.
71. Гоберис С. Ю. Влияние максимального крупного заполнителя на термическую стойкость бетона на жидком стекле [Текст] / С. Ю. Гоберис, Л. И. Меркин // Сер. 3 Тепломонтажные и изоляционные работы. – 1982. – № 2. – С. 20-22.
72. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Усейнер. Под. ред. Э. И. Григолока. – М.: Мир. 1970. – 290 с.
73. Гончарова М. А. Структурообразование и технология композитов общестроительного и специального назначения на основе малоиспользуемых отходов металлургии [Текст]: автореф. дисс. .... д-ра техн. наук: 25.05.23 / Гончарова Маргарита Александровна. – Воронеж, 2012. – 39 с.
74. Боженков П. И. Метод расчета зернового состава мелкозернистого заполнителя для плотных автоклавных материалов [Текст] / П. И. Боженков //Межвузовский тематический сборник. Сб. МИСИ – 1976. – № 1. – С. 118-123.
75. Зоткин А. Г. О влиянии состава бетона на снижение прочности при неуплотнении [Текст] / А. Г. Зоткин, О. А. Гершберг // Изв. Вузов. Строительство и архитектура. – 1971. – № 4. – С. 36-38.
76. Красильников К. Г. Физико-химические особенности адгезии и контактного взаимодействия цементного вяжущего и заполнителей в бетонах [Текст] / К. Г. Красильников, С. Х. Ярлушкина // Наука и техника. Минск. – 1977. – С. 222-223.
77. Рамачандран В. С. Наука о бетоне; Физико-химическое бетоноведение / [перевод с английского Т. И. Розенберг, Ю. Б. Рапиновой.] В. С. Ромачандар, Р. Фельдман, Д. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
78. Ребиндер П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика [Текст] / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 381 с.
79. Шевченко В. И. Трещиностойкость и долговечность жаростойких бетонов [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Шевченко Виталий Иванович. – М., 1987. – 368 с.

80. Ярлушкина С. Х. Формирование контактной зоны цементного камня с заполнителями при твердении бетонов в различных температурных условиях [Текст] / С. Х. Ярлушкина // Сб. трудов НИИЖБ. – М.: Стройиздат. – 1975. – № 17. – С. 88-96.
81. Еременко В. В, Масленникова М. Г., Кабанова М. К. Керамзит специального назначения с улучшенными термическими и пиропластическими свойствами / Промышленность керамических стеновых материалов и пористых заполнителей. – Куйбышев: НИИКерамзит, 1972. – Вып. 3. – С. 34-36.
82. Мантуров З. А., Ахматов М. А. Определение рационального состава жаростойкого керамзитобетона на силикат-натриевом композиционном вяжущем с использованием ЭВМ / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 21 (11). – С. 138 1 47\_23.
83. Некрасов К. Д. Сушка и первый нагрев тепловых агрегатов из жаростойких бетонов [Текст] / К. Д. Некрасов, В. В. Жуков, В. Ф. Гуляева. – М.: Стройиздат. 1976. – 96 с.
84. Некрасов К. Д. Выбор режима нагрева бетона с учетом их деформативности и напряженного состояния [Текст] / К. Д. Некрасов, В. В. Жуков, Б. Райнхард // Труды международного симпозиума по жаростойким бетонам. Карловы Вары. – 1971. – С. 22-27.
85. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280с.
86. Ахназарова С. А. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст] / С. А. Ахназарова., В. В. Кафаров. – М.: Изд-во. «Высшая школа»., 1985. – 327 с.
87. Прядко В. М. Исследование технологии формования и тепловой обработки блоков из жаростойкого бетона / В. М. Прядко, А. А. Бородин. – В кн.: Опыт применения жаростойких бетонов в промышленности и строительстве: Тез. докл. респ. конф., Днепрпетровск, 1978. – С.18-19.

88. Harmathy T. Z. thermal Propertues of Coucreteat Eleyated Tempera tures. National Pegarch Couucil of Canada, Division of building Research, Rese arch Paper No 426, NRCC 11266.1970.
89. Биргер И. А. Остаточные напряжения [Текст] / И. А. Биргер. – М.:Машгиз. 1963. – 296 с.
90. Соломатов В. И. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, А. Н. Бобрышев, А. П. Прошин // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1983. – № 4. – С. 56-61.
91. Сычев А. М. Твердение вяжущих веществ [Текст] / А. М. Сычев. – М.: Стройиздат. – 1974. – 370 с.
92. Янчиков В.Ф. Технологические свойства и водный баланс бетонной смеси при разогреве. Непрерывный электроразогрев бетонной смеси в строительстве [Текст] / В. Ф. Янчиков // Тезисы докладов совещания – семинара. Ленинград., – 1991. – С. 22-24.
93. Жуков В.В. Технология первого разогрева тепловых агрегатов из жаростойкого бетона до рабочей температуры при одностороннем нагреве [Текст] / В.В. Жуков, В.В. Перегудов // Жаростойкий бетон и железобетон в строительстве: Сб. тр. М.: Стройиздат. – 1966. С. 72-77.
94. Соков В. Н. Безобжиговая высокотемпературная теплоизоляция, синтезируемая в гидросиловом поле: монография [Текст] / В. В. Соков. – М.: Типография МГСУ, 1999. – 164 с.
95. Жуков В. В. Основы стойкости бетона при действии повышенных температур: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Жуков Владимир Васильевич. – М., 1983. – 437 с.
96. Жуков В. В. Определение допускаемых скоростей нагрева тепловых агрегатов [Текст] / В. В. Жуков, Б. Райнхард. Бетон и железобетон. – 1973. – № 9. – С. 14-19.
97. Жуков В. В. Определение скорости нагрева конструкций из жаростойкого бетона [Текст] / В. В. Жуков, Б. Райндхард // Сб. трудов международной конференции по жаростойкому бетону. Варна. – 1972 г. С. 53-59.

98. Ибрагимов Р. А. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона [Текст] / Р. А. Ибрагимов, С. И. Пименов, В. С. Изотов // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 2. – С. 63-68.
99. Липилин А. Б. Селективная дезинтеграторная активация портландцемента [Текст] / А. Б. Липилин, Н. В. Коренюгин, М. В. Векслер // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 74-76.
100. Юдович Б. Э. Цемент низкой водопотребности новые результаты и перспективы [Текст] / Б. Э. Юдович., С. А. Зубехин., В. Р. Фаликман // Всеросс. межд. конференция по бетону и железобетону – пути развития. Т. 3. Технология бетона. – 2005. – С. 603-622.
101. Овчинников Р. В. Модификация структуры цементных бетонов наполнителями из золошлаковых отходов Новогорской ГРЭС [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / Овчинников Роман Валерьевич. – Новочеркасск., –2014. – 180 с.
102. Бисултанов Р. Г. Цементы низкой водопотребности на основе активной минеральной добавки различного происхождения [Текст] / Р. Г. Бисултанов, А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2016. – 1. – С. 98-107.
103. Бикбау М. Я. Производство механохимически активированных цементов (вяжущих) низкой водопотребности [Текст] / М. Я Бикбау, В. Н Могалов, Л. Н. Чень // Цемент и его применение. – 2008. – а3. – С. 80-89.
104. Дмитриев А. М. Развитие нормативной документации на вяжущее низкой водопроводности [Текст] / А. М. Дмитриев., Б. Э. Юдович., В. Ю. Рубенчик // Тр. Института. Вяжущее низкой водопотребности (химия, технология, производство и применение). – 1992. – N9104. – С. 205-207.
105. Шмигальский В. Н. Виброуплотнение и контроль качества смесей и бетонов [Текст] / В. Н. Шмигальский. – Новосибирск: – 1966. – 108 с.
106. Боженков П. И. Технология автоклавных материалов [Текст] / П. И. Боженков. – Л.: Стройиздат, 1978. – 357 с.

107. Белоусов О. В. Жаростойкие бетоны уплотненные невибрационными способами [Текст]: автореф. дисс. .... канд. техн. наук: 25.05.23 / Белоусов Олег Викторович. – М., 1969. – 24 с.
108. Гершберг О. А. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / О. А. Гершберг. – М.: Стройиздат, – 1971. – 395 с.
109. Стрелов К. К. Теоретические основы технологий огнеупорных материалов [Текст] / К. К. Стрелов. – М.: Metallurgia, 1979. – 180 с.
110. Савинов О. А. Вибрационная техника уплотнения и формования бетонных смесей [Текст] / О. А. Савинов, Е. В. Лавринович. – Л.: Стройиздат. – 1986. – 280 с.
111. Баженов Ю. М. Технология бетона [Текст] / Ю. М. Баженов. – М.: Изд. АСВ. 2003. – 499 с.
112. Десов А. Е, Экспериментальные данные о распространении колебаний различных частей в бетонных смесях при станковом вибрировании [Текст] / А. Н. Десов, В. И. Шмигальский // Сб. трудов НИИЖБ. – 1961. – Вып. 19. – С. 33-37.129.
113. Шестоперов С.В. Технология бетона [Текст] / С.В. Шестоперов – Высшая школа. 1977. - 432 с.
114. Баженов Ю. М. Повышение Эффективности и экономичности технологии бетонов [Текст] / монография: Бетоны и железобетоны. – 1978. – № 9. – С. 14-16.
115. Баженов Ю. М. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / Ю. М. Баженов, А.Г. Комар. – М.: Стройиздат. 1984. – 672 с.
116. Орендлихер Л. П. Бетоны на пористых заполнителях в сборных железобетонных конструкциях [Текст] Л. П. Орендлихер. – М: Стройиздат, 1983. С. 65-68.
117. Алиев Э. А. Моделирование систем с переменными во времени параметрами в прикладных задачах радиоэлектроники и медицины [Текст]: монография / Э. А. Алиев. – Махачкала: ИЦ ФГБОУ ВО «ДГТУ», 2017. – 148 с.
118. Руденко Д. Н. Методы расчета параметров прогрева бетона при помощи греющих проводов [Текст] / Д. Н. Руденко. – СПб.: СПбГАСУ, 2017. – 11 с.
119. Будников П. П. Технология керамики и огнеупоров [Текст] / П. П. Будников, А. С. Бережной, А. И. Булавин. – М.: Стройиздат, 1962. – 249 с.

120. Пирадов К. А. Физико-механические силовые, энергетические и структуроформирующие параметры бетона [Текст] // К. А. Пирадов, Т. Л. Мамаев, Т. А. Кожабеков, С. М. Марченко // Бетон и железобетон. – 2002. – № 2. – С. 10-12.
121. Poole J. L., Riding K. A., Juenger M. C. G., Folliard K. J., Schindler A. K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy. *Journal of ASTM international*. – 2010. – Vol. 7. – No. 9
122. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М.: Стройиздат, – 1979. – 480 с.
123. Воробьев В. А. Строительные материалы [Текст] / В. А. Воробьев, А. Г. Комар. – М.: Стройиздат, – 1979. – 475 с.
124. Даукнис В. И. Исследование термической стойкости огнеупорной керамики [Текст] / В. И. Даукнис, К. А. Каракевичюс, Г. А. Пронукявичюс. Вильнюс, Минтис, – 1971. – 151 с. (49)
125. ГОСТ 31108-2003 Цементы общестроительные. Технические условия, – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 20 с. (47)
126. Государственные стандарты. Сборник огнеупоры и огнеупорные изделия. – М.: Издательство стандартов. 1975. – 672 с.
127. Сулименко Л. М. Механохимическая активация вяжущих композиций [Текст] / Л. М. Сулименко, Н. И. Шалуненко, Л. А. Урханова // Известия вузов. Строительство. – 1995. – № 11. – С. 63-67.
128. Mtschedlow – Petrossion O. P., Pola A. F. On the law of phasbuilgling in chemical reaction – silibattchinik. 22.2. – Pp. 59-60, – 1970
129. Ананьев В. П. Основы геологии, минералогии и петрографии [Текст] / В. П. Ананьев. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1999. – 451 с.
130. Аристов Г. Г. Огнеупорные изделия разливки [Текст] / Г. Г. Аристов. – М.: Metallurgia, 1969. – 261 с.
131. Плотников В. В. Повышение эффективности механохимической активации цементных композиций в жидкой среде [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Плотников Валерий Викторович. – М., 2000. – 386с.

132. Мамонов Н.В. Опыт применения керамзитобетона в виброгидропрессованных напорных трубах [Текст] / Н.В. Мамонов, Л.П. Орентлихер // Промышленное строительство – 1978 – № 7 – С. 12-14.
133. Орентлихер Л. П., Оценка эффективности применения рядового и мелкого керамзита в конструкционных бетонах [Текст] / Л. П. Орентлихер, Е. П. Устименко, В. Г. Довжик // Промышленность сборного железобетона. Реф. инф. ВНИИЭСМ – 1979, вып. 10.
134. Горшков В. С. Методы физико-химического анализа [Текст] / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Соловьев. – М.: Изд-во. «Высшая школа», – 1981. – 334 с.
135. Болдырев В. В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механических технологий [Текст] / В. В. Болдырев, Е. Г. Аввакумов, Е. В. Болдырева. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009. – 343 с.
136. Масленникова М. Г. Легкие жаростойкие бетоны на специальных пористых заполнителях из отходов промышленности [Текст] / М. Г. Масленникова, Н. В. Скобелева // сб. трудов физико-химические и технологические основы жаростойких цементов и бетонов. Москва. – 1986. 136-143 с.
137. Симонов М. З. Основы технологии легких бетонов [Текст] / М. З. Симонов. – М.: Стройиздат, – 1973. – 584 с.
138. Горчаков Г. И. О комплексной характеристике структуры бетона [Текст] // Г. И. Горчаков, И. А. Иванов // Бетон и железобетон. – 1980. – № 1. С. 22
139. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях [Текст]: [Учеб. пособие по специальности «Производство строит. изделий и конструкций» строит. вузов и фак.] / И. А. Иванов, д-р техн. наук, проф. – Москва: Стройиздат, 1974. – 287 с.: ил.; 21 см.
140. Тотурбиев Б. Д. Безобжиговый жаростойкий пеношамот-силикат –натриевый теплоизоляционный материал [Текст] / Б. Д. Тотурбиев, Ш. М. Зайналов. Махачкала, типография Дагестанского научного центра РАН, – 2001. – 143 с.
141. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона [Текст] / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, – 1981. – 464 с.

142. Инструкция по сушке и первому нагреву тепловых агрегатов из жаростойкого бетона. ВСН 199-74 [Текст]: Взамен 199-69 / ММСС СССР: – Москва : ЦБНТИ ММСС СССР, 1975. – 22 с.

143. СП 27.13330.2011 Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур.

144. Лесовик, В. С. Сырьевая база промышленности строительных материалов : учеб. пособие / В. С. Лесовик, В. М. Воронцов. - Белгород: Издво БГТУ им. В. Г. Шухова, 2015. - 207 с.

145. Лесовик, В. С. Композиционное вяжущее на основе комплексного органоминерального модификатора для сухих ремонтных смесей [Текст] / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, А.В Шамшуров, Д.А. Беликов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – №5 – 2014. С. 25-31.

146. Перцев В.Т. Исследование и разработка термостойких бетонов для повышения огнестойкости строительных конструкций зданий и сооружений военного назначения [Текст] / Леденев А.А., Внуков А.Н., Загоруйко Т.В., Перцев В.Т. // Воздушно-космические силы. Теория и практика. ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Технология материалов. –№6.– 2018. – С.198-206.

147. Перцев В.Т. Моделирование структуры и свойств термостойких материалов, применяемых для огнезащиты строительных конструкций [Текст] / Леденев А.А., Загоруйко Т.В., Расторгуева А.И., Перцев В.Т. // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – С.515-517.

148. Курбанов Р.М Жаростойкие базальтовые бетоны на композиционном вяжущем [Текст]: дисс...канд. техн. наук: 05.23.05/ Курбанов Рамазан Магомедович. – М., – 2017. – С. 193.

149. Хаджишалапов Г.Н. Исследование влияния электроразогрева керамзитобетонной смеси на структуру и свойства легких керамзитобетонов,

подверженных воздействию высоких температур [Текст] / Г.Н. Хаджишалапов, Т.А. Хежев, А.М. Гаджиев, У.И. Раджабов, У.И. Исаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.- 2021.-№2.- Т.46.-С.187-196.

150. Хаджишалапов Г.Н. Влияние вакуумной обработки и технологических факторов на прочность жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем [Текст] / Г.Н. Хаджишалапов, Т.А. Хежев, А.М. Гаджиев Ш.А.Алимурадов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.- 2019.-№3.-Т.45.-С.158-166.

**Приложения**

## Приложение А

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»



«Согласовано»

И.о. директора по НИИД  
Ирзаев Г.Х.  
«11» / 05 / 2023.

«Утверждено»

Ген. директор ООО  
«СпецРемСтройМонтаж»  
Гасангусейнов М.Т.  
«11» / 05 / 2023.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских,  
опытно-конструкторских и технологических работ

Заказчик ООО «СпецРемСтройМонтаж» в лице генерального директора Гасангусейнова М.Т. настоящим актом подтверждается, что результаты работы по х/д № 2442 (этапы 1,2 и 3), выполненного ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» стоимостью 100000 (сто тысяч рублей) с 22.04.2019 по 30.12.2020 г.

внедрены в ООО «СпецРемСтройМонтаж»:

1. Вид внедренных результатов: блоки для футеровки стен тоннельной печи с предварительным электроразогревом смеси из жаростойкого бетона на композиционном вяжущем из местного минерального сырья.
2. Характеристика масштабов внедрения: футеровано фрагмент печи длиной 12 м.
3. Форма внедрения: при ремонте и реконструкции тоннельной печи.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: состав жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с активированным вяжущем из минерального сырья с улучшенными эксплуатационными характеристиками с предварительным электроразогревом смеси.
5. Практическое применение: при ремонте футеровки тоннельной печи для обжига керамического кирпича.
6. Годовой экономический эффект: от внедрения при ремонте фрагмента тоннельной печи длиной 12 м составил 45216 руб.
7. Социальный и научно-технический эффект: возможность применения местного минерального сырья, низкая себестоимость по сравнению с огнеупорами из других регионов, улучшенные эксплуатационные свойства.

Руководитель НИР  
Зав. каф. «ТиОСП»  
Хаджишалапов Г.Н.

Главный инженер  
ООО «СпецРемСтройМонтаж»  
Гаджиев И.М.

Исполнитель НИР  
Ст. преподаватель кафедры «ТиОСП»  
Гаджиев А.М.

## Приложение Б

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

«Согласовано»

И.о. проректора по НИИД

Ирзаев Г.Х.

«12» 05 2023г.

«Утверждено»

И.о. ректора

Баламирзоев Н.Л.

«17» 05 2023г.

## АКТ

## О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

Результаты: Разработана технология изготовления керамзитовых блоков из жаростойкого керамзитобетона для футеровки туннельной печи обжига керамического кирпича. Оптимизирован состав жаростойкого бетона и композиционного вяжущего. Научно-исследовательская работа выполнялась в рамках х/д № 2242 «Разработка и исследование состава жаростойкого керамзитового бетона на основе композиционного вяжущего» и по теме диссертационной работы «Структура и свойства жаростойкого керамзитобетона с предварительным электронагревом смеси»

Результаты научно-исследовательской работы в 2021 году внедрены в учебный процесс на основании решения методического Совета и ученого Совета архитектурно-строительного факультета при проведении занятий на кафедрах «Технология и организация строительного производства», «Транспортные сооружения и строительные материалы» и в лаборатории строительных материалов и научно-исследовательской лаборатории НОЦ «Современные строительные материалы и строительные конструкции».

Указанные результаты включены в методические указания по выполнению лабораторных работ по строительным материалам, курсового и дипломного проектирования по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство». По результатам исследований разработан и изготовлен лабораторный стенд для предварительного электронагрева бетонной смеси.

Декан АС факультета

Омаров А.О.

Зав. кафедрой ТиОСП

Хаджишалапов Г.Н.

Доцент  
кафедры ТСиСМ

Алхасова Ю.А.

Ст. преподаватель  
кафедры ТиОСП

Гаджиев А.М.

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
"Дагестанский государственный технический университет" (ИНН: 0562044246 / КПП: 057201001)

Адрес (юридический): Адрес: МАХАЧКАЛА, ШАМИЛЯ, д. 70, тел.;;  
Телефоны:

**Акт № 00000213 от 30.12.2020**  
об оказании услуг

Заказчик: ООО "Кизилюртовский завод керамзитового гравия"  
Основание: Договор 2442 от 22.04.2019  
Валюта: Российский рубль

| №                            | Наименование работы (услуги)   | Ед. изм. | Количество | Цена       | Сумма             |
|------------------------------|--|----------|------------|------------|-------------------|
| 1                            | Выполнение НИР: "Разработка и исследование состава жаростойкого керамзитового бетона на основе композиционного вяжущего "портландцемент-тонкомолотая добавка из керамзитового песка" |          | 1,000      | 100 000,00 | 100 000,00        |
| <b>Итого:</b>                |  |          |            |            | <b>100 000,00</b> |
| <b>В том числе НДС</b>       |  |          |            |            | <b>Без НДС</b>    |
| <b>Всего (с учетом НДС):</b> |  |          |            |            | <b>100 000,00</b> |

Всего оказано услуг на сумму: Сто тысяч рублей 00 копеек, в т.ч.: НДС - Ноль рублей 00 копеек

Вышеперечисленные услуги выполнены полностью и в срок. Заказчик претензий по объему, качеству и срокам оказания услуг не имеет.

От исполнителя: Ректор



(подпись)

Н. С. Суракатов

(расшифровка подписи)

От заказчика

(должность)

М.П.



(расшифровка подписи)

## Приложение Г

Утверждаю

Ген. Директор ООО

«СпецРемСтройМонтаж»

Гасангусейнов М.Т.

2023г.



## СПРАВКА

Выдана старшему преподавателю кафедры «Технология и организация строительного производства» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» Гаджиеву А.М. в том, что разработанные ими составы жаростойких бетонов используются при изготовлении блоков для футеровки стен тоннельной печи.

Гл. инженер ООО «СпецРемСтройМонтаж»  
Гаджиев И.М.

## Приложение Д

Утверждаю  
Главный инженер ООО  
«СпецРемСтройМонтаж»  
Гаджиев И.М.  
24.05.2023

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ**

На изготовление блоков для жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе  
с предварительным электронагревом смеси

## РАЗРАБОТЧИКИ:

д-р. тех. наук, профессор, зав. кафедрой

ТиОСП ФГБОУ ВО «ДГТУ»

Хаджишалапов Г. Н.

ст. преподаватель кафедры ТиОСП

Гаджиев А. М.

канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры ТиОСП

Курбанов Р. М.

## **Назначение технического регламента и общая характеристика производства**

Регламент устанавливает технологические параметры изготовления блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси. Требования к ним содержат: исходные сырьевые материалы, их подготовка, составы жаростойких бетонных смесей и режимы их приготовления, формования изделий и их твердение.

В основу разработки технологического регламента легли результаты НИР по оптимизации составов и технологии изготовления блоков для туннельной печи из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси, выполненной кафедрой технологии и организации строительного производства ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Регламент разработан для производства блоков для футеровки стен туннельной печи из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на композиционном вяжущем.

Изготовление изделий из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на композиционном вяжущем осуществляется по агрегатно-поточной технологии методом прессования с пригрузом.

### **1. Характеристика изделий**

Блоки для футеровки стен туннельной печи из жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем имеют размеры: 400х200х200 мм.

Блоки из жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси предназначены для футеровки стен туннельной печи.

Значения отклонений геометрических параметров и показателей внешнего вида не должны превышать предельных, указанных в таблице 1.

| Отклонения от линейных размеров                    | Предельные отклонения, мм |
|--|---------------------------|
| По высоте  | ±2                        |
| По длине и ширине                                  | ±3                        |
| От прямоугольной формы (разность длины диагоналей) | 3                         |
| Искривления ребер и граней                         | 2                         |

Блоки для футеровки стен туннельной печи из жаростойкого керамзитового бетона на композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Средняя плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) в высушенном до постоянной массы состоянии, не более.....1500
2. Предел прочности образцов при сжатии (МПа) в возрасте 28 сут. воздушно-сухого твердения, не менее .....15
3. Остаточная прочность после нагрева и выдержки при температуре  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  не менее .....70%
4. Отпускная влажность по массе после сушки при температуре  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , %, не более.....5
5. Коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/(м К)}$ , при температуре  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .....0,45

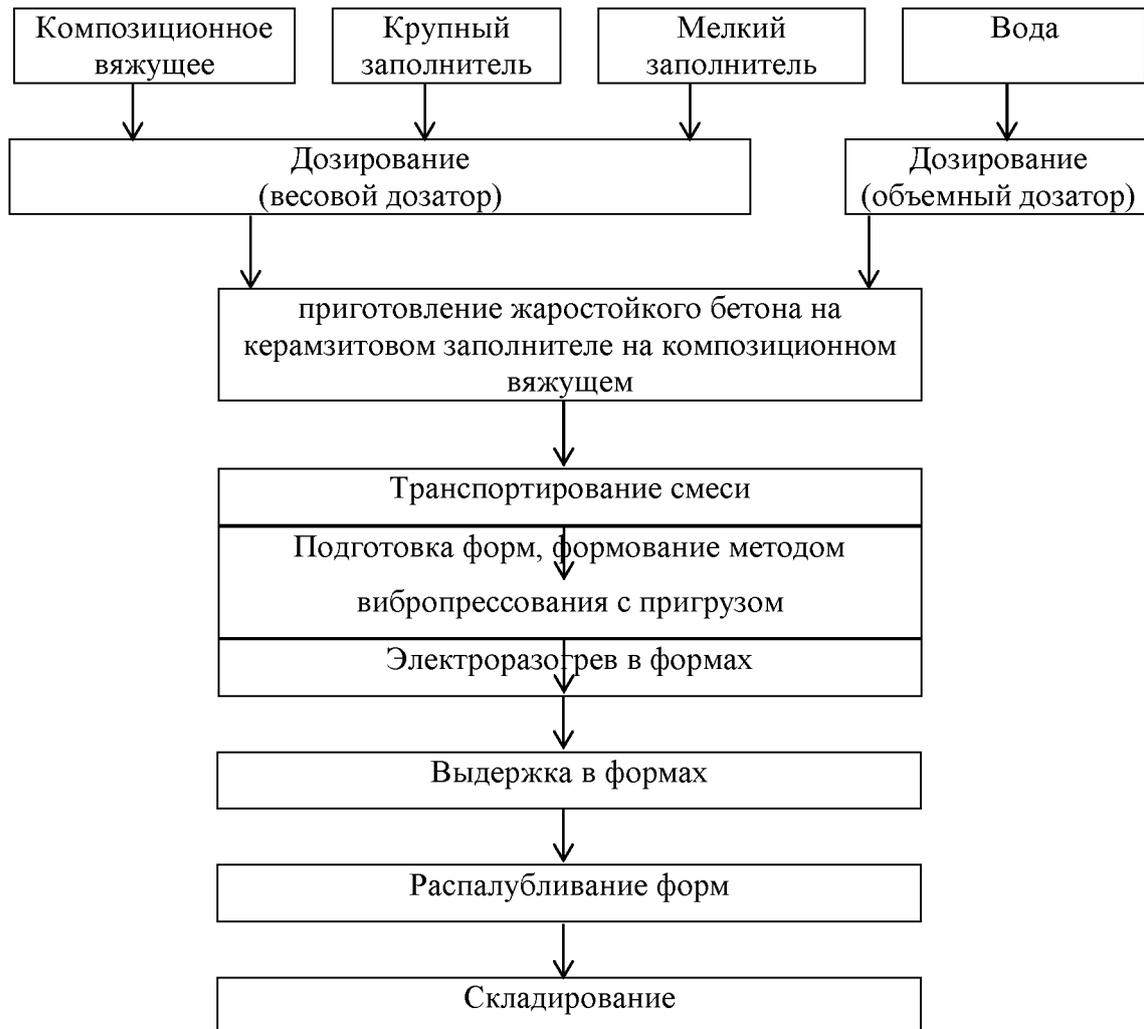
## **2. Характеристика исходных материалов**

Для изготовления блоков из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе на активированном композиционном вяжущем с предварительным электроразогревом смеси применяют следующие материалы:

- портландцемент ПЦ 500-ДО по ГОСТ 31108-2020;
- керамзитовый гравий крупностью до 10 мм;
- керамзитовый песок крупностью до 2 мм;
- тонкомолотый обожжённый серый аргиллит;
- суперпластификатор СП-1;
- водопроводная вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011

### 3. Технологическая схема производства блоков для футеровки стен туннельной печи из жаростойкого бетона

Технологический процесс производства блоков для стен туннельной печи из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси.



## **4. Технологический процесс изготовления блоков для футеровки стен из жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе с предварительным электроразогревом смеси**

### **4.1. Подготовка исходных материалов**

Цемент и тонкомолотую добавку после помола необходимо активировать в планетарной мельнице Активатор-4М.

Керамзитовый заполнитель перед подачей в дозирующее устройство смесительной установки следует просеивать через соответствующие сита для получения требуемых фракций.

Суперпластификатор СП-1 добавляют в процессе активации вяжущего.

### **4.2. Приготовление жаростойкого бетона смеси**

Все составляющие дозируются с точностью, %

- цемент (по массе).....±1;
- тонкомолотая добавка .....±1;
- керамзитовый гравий .....±1;
- фракции..... до 2 мм;
- суперпластификатор СП-1.....±1;
- вода (по объему)..... ±1;

Приготовление жаростойкой бетонной смеси на керамзитовом заполнителе осуществляется в бетоносмесителе принудительного действия, обеспечивающем требуемую однородность смеси.

Жаростойкая бетонная смесь на керамзитовом заполнителе приготавливается следующим образом: в работающий смеситель загружают отдозированные активированные с суперпластификатором СП-1 композиционное вяжущее, крупный и мелкий заполнитель перемешивают до получения однородной сухой смеси, после добавляют воду и продолжают перемешивание до получения однородной массы. Время приготовления смеси находится в пределах 3-4 мин.

Подача смеси к месту укладки должна производиться непосредственно из смесителя или с минимальным количеством перегрузок по кратчайшему пути. Рационально устанавливать смеситель непосредственно над постом формования изделий. Высота свободного падения смеси при перегрузках не должна превышать 1 м.

### **4.3. Формование изделий**

Процессу формования предшествует этап подготовки форм, предусматривающий:

- устранение обнаруженных дефектов;
- очистку и смазку поверхностей, соприкасающихся с бетонной смесью;

- сборку форм и, при необходимости, герметизацию стыков;
- проверку электродов и электропроводки для предварительного электроразогрева смеси.

Формование изделий осуществляется вибропрессованием с пригрузом. Для этого подготовленные формы устанавливаются в строго горизонтальном положении на формовочном посту. При необходимости устанавливаются упоры против сдвижки форм относительно основания.

#### 4.4. Твердение изделий

Изделия извлекают из форм вручную или механизированным способом с применением специальных устройств при достижении требуемой прочности.

После формирования и предварительной выдержки изделия подвергаются предварительному электроразогреву с температурой изотермического прогрева 80-900 °С. Предельная скорость подъема и снижения температуры приведена на рисунке 1. Рекомендуется следующий режим электроразогрева смеси: подъем температуры – 2 часа, изометрический прогрев – 2 часа, снижение температуры – 2 часа. Перед проведением тепловой обработки изделие необходимо выдерживать для набора бетоном пластической прочности, равной 0,035...0,5 МПа.

Твердение жаростойких блоков может осуществляться в естественных условиях при температуре окружающего воздуха не ниже +15 °С в пакетах или штабелях, защищенных навесом или в закрытом помещении. Зазор между плитами должен быть не менее 5 см.

#### 5. Таблица технологического оборудования

| № п/п | Оборудование                          | Завод-Изготовитель   | Марка, тип   |
|-------|---------------------------------------|--|--------------|
| 1     | Бункера накопители на 1 тонну изделия | ООО  | БН-1         |
| 2     | Емкость для воды на 2 тонны           | ООО «Стройтехплюс»   | ЭВЛ5000      |
| 3     | Бетоносмеситель                       | ООО «Стройтехплюс»   | СБ           |
| 4     | Дозатор весовой                       | ООО «Стройтехплюс»   | ДЦ-200       |
| 5     | Дозатор воды                          | ООО «Стройтехплюс»   | ДВ-180       |
| 6     | Мельница шаровая                      | ООО «Промкомплекс»   | МШМП12       |
| 7     | Планетарная мельница                  | ООО «Активатор»  | Активатор-4М |
| 8     | Конвейеры ленточные                   | ООО «КАНМАШс»  | КМ КЛ 0,65/5 |
| 9     | Ковшовый конвейер                     | ООО «СтройМеханика»  | ЭКЛ-300      |
| 10    | Дробилка                              | ООО «Карбокор»   | ЩДС-1-4х9    |
| 11    | Механическое сито                     | ООО «Lemk»   | -----        |
| 12    | Электроды                             | ООО «Энергопром - Новосибирский электродный завод (ЭПМ - НовЭЗ)» | ПК-4,2э      |

|    |                     |   |  |
|----|---------------------|---|--|
| 13 | Трансформатор       | ООО «Завод электротехнического оборудования» (ЗЭТО) |  |
| 14 | Формы металлические | ССМ-Холдинг   |  |

Для изготовления блоков для газоходов можно использовать технологическое оборудование российского и иностранного производства.

### 6. Контроль производства и управление

Контроль качества производства изделий должен осуществляться путем входного, операционного контроля всех производственных процессов и приемочного контроля качества изделий при отпуске их потребителю в соответствии с действующей нормативно-технической документацией (табл. 2).

Таблица 2

| Наименование операции                    | Контролируемый параметр                          | Частота контроля  | Нормы и технологические показатели            | Метод испытания и средства контроля   |
|--|--|-------------------|---|---------------------------------------|
| 1  | 2  | 3                 | 4   | 5                                     |
| <b>Входной контроль</b>                  |  |                   |   |                                       |
| Хранение и подготовка исходных           | активность портландцемента                       | 1 раз в месяц     | Марка не ниже ПЦ500-ДО                        | По ГОСТ 10178-85                      |
|  | Насыпная плотность                               | Для каждой партии | Не более 2100 кг/м <sup>3</sup>               | Весы, сосуд объемом 1л                |
|  | Насыпная плотность обожжённого аргиллита.        | Для каждой партии | Не более 1200 кг/м <sup>3</sup>               | Весы, сосуд объемом 1л                |
|  | Влажность керамзитового гравия                   | 1 раз в смену     | Не нормируется                                | Весовой метод, весы, сушильный шкаф   |
|  | Температура воды                                 | 1 раз в смену     | Не более +25°C                                | термометр                             |
| <b>Операционный контроль</b>             |  |                   |   |                                       |
| Приготовление жаростойкой бетонной смеси | Соотношение компонентов                          | 1 раз в смену     | Рабочий состав смеси                          | Проверка правильности дозирования     |
|  | Средняя плотность                                | Каждый цикл       | Расчетный показатель                          | Весовой метод, весы, сосуд объемом 1л |
| Формование                               | Размер форм                                      | 1 раз в смену     | Отклонение размеров не более установленных НД | Рулетка                               |
|  | Положение основание формы относительно горизонта | Каждая форма      | Отклонения не допускаются                     | Уровень                               |
| Твердение изделий                        | Естественное твердение                           | 1 раз в смену     | Температура не ниже +15°C                     | Термометр                             |

|                           |                                       |                   |  |                                   |
|---------------------------|---------------------------------------|-------------------|--|-----------------------------------|
|                           | Предварительный электроразогрев смеси | 1 раз в смену     | Температура в соответствии с заданным режимом                                      | Термометр                         |
| Приемочный контроль       |                                       |                   |  |                                   |
| Приемка готовой продукции | Средняя плотность в сухом состоянии   | Для каждой партии | Не более 1500 кг/м <sup>3</sup>  | Сушильный шкаф, весы, линейка     |
|                           | Предел прочности на сжатие            | Для каждой партии | Не менее МПа при температуре 20°C  | Пресс                             |
|                           | Отпускная влажность                   | Для каждой партии | Не более 10%   | Сушильный шкаф, весы              |
|                           | Показатели внешнего вида              | Для каждой партии | Отклонение размеров от формы и размеров, качество поверхности в соответствии с НТД | Внешний осмотр, линейка, угольник |

### 7. Хранение, складирование и транспортирование продукции

Хранение блоков должно осуществляться в помещениях с сухим и нормальным влажностным режимом с соблюдением требований охраны труда и сохранности продукции. Блоки должны быть уложены на поддоны по ГОСТ 33757-2016 и упакованы в полиэтиленовую пленку по ГОСТ 10354-82. Упаковка блоков должна обеспечивать сохранность их при хранении, транспортировании и при проведении погрузо-разгрузочных работ. Допускается по согласованию с потребителем применять пакетирование или упаковочные материалы других видов, обеспечивающих сохранность блоков при погрузо-разгрузочных работах, транспортировании и хранении, при этом ответственность за надежность упаковки несет потребитель. По согласованию с потребителем допускается транспортировать блоки в непакетированном виде при укладывании их на ребро, длинной стороной по направлению движения, вплотную друг к другу с расклиниванием. При погрузке, разгрузке, транспортировании и хранении должны применяться меры, исключающие возможность их повреждения и увлажнения. Блоки транспортируются всеми видами транспорта с соблюдением Правил перевозок грузов, установленных для транспорта данного вида, и требований другой документации, утвержденной в установленном порядке.

### **8. Использование некондиционной продукции**

Некондиционная продукция используется предприятием в собственных целях или перерабатывается в крошку для использования в качестве засыпок. Утилизация отходов производится в соответствии с требованиями СанПин 2.1.7.1322-03 по договору с организациями, имеющими лицензию по обращению с промышленными отходами, в места, согласованные с Роспотребнадзором.

### **9. Охрана окружающей среды**

Производство блоков для футеровки туннельной печи является безотходным, не загрязняющим окружающую среду, является экологически безопасным. Охрана окружающей среды обеспечивается контролем за соблюдением допустимых выбросов в атмосферу по ГОСТ 17.2.3.02-2014 и предельно допустимых концентраций по ГОСТ 12.1. 005-88.