

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО"

На правах рукописи

**Усанова Ксения Юрьевна**

**НАРУЖНЫЕ СТЕНОВЫЕ ПАНЕЛИ ИЗ БЕТОНА С ИСКУССТВЕННЫМ  
ЗАПОЛНИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩЕГО ИЗ  
ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент  
Барabanщиков Юрий Германович

Санкт-Петербург - 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .</b>	<b>14</b>
1.1. Конструктивные решения бетонных и железобетонных стеновых панелей 14	
1.2. Виды бетонов, используемых для производства бетонных и железобетонных наружных стеновых панелей.....	20
1.3. Бетоны с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия.....	26
1.4. Общие сведения о золах уноса.....	30
1.4.1. Классификации зол уноса.....	30
1.4.2. Высококальциевые золы уноса .....	31
1.5. Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования .....	33
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ УНОСА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВИДЕ ГРАВИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННЫХ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ .....</b>	<b>36</b>
2.1. Характеристика применяемых материалов .....	36
2.2. Методика исследований высококальциевой золы уноса для использования в бетонных наружных стеновых панелях.....	38
2.2.1. Регулирование расширения золы уноса.....	38
2.2.2. Рентгено-фазовый и дифференциально-термический анализ образцов....	39
2.2.3. Тепловыделение зольно-песчаного раствора полуадиабатическим методом 39	
2.2.4. Расчетное приведение результатов полуадиабатического тепловыделения к изотермическому режиму .....	42
2.2.5. Предел прочности при сжатии .....	43

2.3. Результаты проведенных исследований .....	43
2.3.1. Оценка возможности регулирования расширения золы уноса для использования в бетонных наружных стеновых панелях .....	43
2.3.2. Результаты рентгено-фазового и дифференциально-термического анализов образцов .....	49
2.3.3. Результаты определения тепловыделения .....	53
2.3.4. Определение предела прочности при сжатии .....	56
2.4. Подбор добавок, улучшающих свойства высококальциевой золы уноса, для использования в бетонных наружных стеновых панелях .....	57
2.4.1. Влияние добавок электролитов на расширение зольного теста.....	57
2.4.2. Влияние добавок ускорителей твердения на прочность при сжатии образцов из зольного теста .....	58
2.5. Выводы по главе 2 .....	67
<b>3. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНА С КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ БЕЗОБЖИГОВОГО ЗОЛЬНОГО ГРАВИЯ ДЛЯ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ.....</b>	<b>69</b>
3.1. Характеристика применяемых материалов .....	69
3.2. Методика исследований.....	70
3.2.1. Испытания традиционных компонентов бетонной смеси для производства наружных стеновых панелей .....	70
3.2.2. Испытания безобжигового зольного гравия как крупного заполнителя в бетоне для наружных стеновых панелей.....	72
3.2.3. Подбор состава и испытания бетона для наружных стеновых панелей....	76
3.3. Результаты испытаний традиционных компонентов бетонной смеси для наружных стеновых панелей .....	79
3.3.1. Результаты испытания песка.....	79

3.3.2. Результаты испытания цемента .....	80
3.3.3. Оценка эффективности суперпластификаторов.....	83
3.4. Результаты испытаний безобжигового зольного гравия как крупного заполнителя в бетоне для наружных стеновых панелей.....	84
3.4.1. Физико-механические характеристики безобжигового зольного гравия на основе низкокальциевой золы уноса .....	84
3.4.2. Физико-механические характеристики безобжигового зольного гравия на основе высококальциевой золы уноса.....	86
3.5. Результаты испытаний бетона с безобжиговым зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса .....	90
3.5.1. Состав бетонной смеси с безобжиговым зольным гравием.....	90
3.5.2. Результаты испытаний бетона на прочность.....	92
3.5.3. Коэффициент температурного линейного расширения .....	93
3.5.4. Модуль упругости бетона.....	94
3.5.5. Тепловыделение бетона .....	95
3.5.6. Деформация усадки .....	95
3.6. Результаты испытаний бетона с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса для наружных стеновых панелей .....	99
3.6.1. Состав бетонной смеси с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса.....	99
3.6.2. Результаты испытаний бетона на прочность.....	100
3.6.3. Коэффициент температурного линейного расширения .....	101
3.6.4. Модуль упругости бетона.....	102
3.6.5. Тепловыделение бетона .....	104
3.6.6. Деформация усадки .....	105

3.7. Выводы по главе 3 .....	107
<b>4. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ БЕТОНА С ИСКУССТВЕННЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ .....</b>	<b>109</b>
4.1. Технические решения наружной стеновой панели .....	109
4.2. Теплотехнические свойства наружной стеновой панели .....	114
4.2.1 Экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием .....	114
4.2.2 Определение толщины утеплителя наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы .....	115
4.2.3 Сравнение теплотехнических характеристик наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы с типовой трехслойной железобетонной панелью .....	118
4.3. Несущая способность наружной стеновой панели .....	120
4.3.1. Анализ несущей способности наружной стены .....	120
4.3.2. Расчетное обоснование несущей способности стеновой панели .....	122
4.4. Пример использования разработанной наружной стеновой панели в конструкции жилого многоэтажного здания .....	129
4.4.1. Описание конструктивного решения здания .....	129
4.4.2. Сбор нагрузок и анализ несущей способности наружной стены .....	131
4.5. Техничко-экономические показатели разработанной наружной стеновой панели и сравнение с существующими аналогами .....	132
4.6 Выводы по главе 4 .....	136
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>138</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>142</b>
Приложение 1. Схема арматуры, участвующей в расчетной схеме .....	159

Приложение 2. План типового этажа.....	160
Приложение 3. Продольный разрез здания.....	161
Приложение 4. Схема расположения наружных стеновых панелей .....	162
Приложение 5. Наружные панели типового этажа .....	163

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Опыт использования наружных стеновых панелей заводской готовности в строительстве жилых зданий свидетельствует о снижении себестоимости и сроков строительства.

Наиболее типовой конструкцией для наружных стеновых панелей является трехслойная железобетонная панель, состоящая из внутреннего и внешнего слоев бетона и эффективного слоя теплоизоляции между ними. Основным недостатком такой конструкции является увеличенная масса изделия, что приводит к значительным нагрузкам на фундамент.

Замена крупного заполнителя основного слоя наружной стеновой панели на более легкие заполнители (керамзит, аглопорит) хотя и уменьшает массу изделия, но также снижает уровень прочности и не обеспечивает необходимого экономического эффекта. Кроме этого, указанные выше заполнители не вписываются в концепцию эффективного подхода к «зеленому строительству» (sustainable building, green building).

В этой связи рационально использование высококальциевых зол уноса, которые хранясь в золоотвалах загрязняют окружающую среду и становятся угрозой для экологии городов, находящихся в непосредственной близости с ними. В бетонных и железобетонных конструкциях высококальциевые золы уноса не нашли своего применения из-за ограничения, связанного с содержанием оксида кальция в свободном состоянии ( $\text{CaO}_{\text{free}}$ ).  $\text{CaO}_{\text{free}}$  - частицы, покрытые стекловидной оболочкой, труднодоступной для контакта с водой в начальные сроки взаимодействия. Это приводит к гидратации оксида кальция в позднем возрасте, когда основная масса материала уже затвердела и может растрескаться при переходе  $\text{CaO}$  в  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , сопровождающимся увеличением объема. Нейтрализация деструктивного влияния расширения высококальциевой золы уноса позволит использовать ее в гранулированном виде в качестве крупного заполнителя для бетонных и железобетонных конструкций.

По этой причине разработка конструктивного решения наружной стеновой панели за счет использования бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы является актуальным, как с точки зрения снижения стоимости и сроков строительства, так и с точки зрения эффективного подхода к строительству, не оказывающему вредного воздействия на окружающую среду.

### **Степень разработанности избранной темы**

Исследованиями наружных бетонных стеновых панелей занимались Е.А. Король, Б.С. Соколов, С.В. Николаев, Д.Р. Маилян, Ю.Г. Граник, А.Ф. Юдина, Б.В. Ждановский, Б.С. Комиссаренко, Р.А. Хунагов, А.В. Грановский, А.В. Матвеев, А.А. Овчинников, В.В. Данель, D. Kumar, M. Alam, R. O'Hegarty, O. Kinnane, S. Al-Rubaye, T.J. Sorensen, M. Maguire, M. Flansbjer, N.W. Portal, A. Shams.

Над созданием бетонов с крупным заполнителем из зольного гравия работали В.М. Уфимцев, Ф.Л. Капустин, Ю.Г. Барабанщиков, Н.И. Ватин, И.Г. Коренина, I. Farina, F.F. Colangelo, N.U. Kockal, T. Ozturan, M. Gesoğlu, E. Güneyisi, P. Gomathi, S. Anandan, J. Thomas.

Одним из главных компонентов для создания бетона с искусственным зольным гравием является зола уноса. Исследованию влияния золы уноса на бетон посвящены работы Р.С. Федюка, Н.И. Ватина, А.И. Калачева, Ю.Г. Барабанщикова, С.В. Ключева, А.В. Аксенова, F. Aslam, X. Li, E. Khankhaje, A. Chaipanich, A. Biçer, A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, G. Xu, N. Zhang, A. Antoni, D. Hardjito, K.J. Folliard, S. Tsimas, S. Antiohos.

### **Связь работы с научными программами и планами**

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ «Аспиранты» № 20-33-90015 и грантом РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 21-19-00324. Работа поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации на 2021 - 2023 гг.

### **Цель и задачи диссертационного исследования**

**Целью** работы является совершенствование конструктивного решения наружной стеновой панели с использованием разработанного бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы уноса.

### **Задачи исследования**

1. Разработка безцементного вяжущего на основе высококальциевой золы Березовской ГРЭС с исключением ее расширения и повышением прочности с помощью химических добавок.

2. Разработка технологии и экспериментальные исследования безобжигового зольного гравия на основе разработанного вяжущего вещества.

3. Разработка состава бетона на основе безобжигового зольного гравия для использования в наружных стеновых панелях и экспериментальные исследования его физико-механических свойств.

4. Совершенствование и обоснование ограждающей конструкции из наружных стеновых панелей с использованием разработанного бетона: исследование теплотехнических свойств, несущей способности, технико-экономическое сравнение.

**Объектом исследования** является ограждающая конструкция наружных стеновых панелей из бетона с разработанным искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы уноса.

**Предмет исследования** – прочностные и теплотехнические характеристики наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы уноса Березовской ГРЭС.

### **Научную новизну работы** составляют:

1. Теоретически и экспериментально обоснованный состав бетона, обеспечивающий возможность в конструкции наружной стеновой панели снизить массу конструкции, нагрузку на фундамент, а также себестоимость конструкции.

2. Состав бесцементного вяжущего для безобжигового зольного гравия (Патент РФ № RU 2798801 С1), разработанный для бетона наружных стеновых панелей, и результаты его экспериментальных исследований.

#### **Теоретическая значимость**

В диссертации представлены научно обоснованные конструктивные, технико-экономические и технологические решения по усовершенствованной конструкции наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы. Работа содержит обоснование физико-механических свойств многослойных несущих и самонесущих железобетонных и бетонных конструкций с крупным заполнителем из искусственного зольного гравия, обширные экспериментальные исследования свойств бетонных композиций, включая искусственные крупные заполнители на основе вяжущего из высококальциевой золы уноса, использование которых позволяет отказаться от традиционного щебеночного крупного заполнителя.

#### **Практическая значимость:**

1. Усовершенствованная ограждающая конструкция наружной стеновой панели с использованием бетона с заменой щебня искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы уноса. Результаты могут быть использованы при проектировании многоэтажных жилых зданий с поперечно-стеновой конструктивной схемой.

2. Технология получения безобжигового зольного гравия для бетона наружных стеновых панелей, использование которого в строительстве снижает затраты ТЭЦ и ТЭС страны на обращение с отходами производства.

3. Предложена утилизация высококальциевой золы уноса в гранулированном виде в качестве замены традиционного крупного заполнителя бетонных конструкций, что обеспечивает возможность сокращения использования невозобновляемых природных ресурсов (щебня и гравия) и снижает воздействие строительной индустрии на окружающую среду.

Результаты диссертационного исследования нашли применение в инженерной практике АО «Стройинвест» (г. Санкт-Петербург), что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

### **Методология и методы научного исследования**

В работе выполнены экспериментальные исследования высококальциевой золы уноса, искусственных заполнителей из высококальциевой и низкокальциевых зол уноса и бетонов с искусственным заполнителем из указанных зол уноса. Обработка экспериментальных данных выполнена в соответствии с требованиями нормативных документов. Экспериментальные исследования проведены с целью использования разработанного бетона в наружных стеновых панелях. Несущая способность стеновой панели определена аналитическим методом и с использованием численных расчетов на основе метода конечных элементов (МКЭ).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный рациональный тип ограждающей конструкции в виде наружной стеновой панели, удовлетворяющий условиям прочности и применимый для многоэтажных сборных жилых зданий (до 16 этажей) с коэффициентом использования несущей способности стеновой панели для 16-этажного здания равным 39 %.

2. Уменьшение массы разработанной стеновой панели на 18,3 % в сравнении с широко применяемой трехслойной железобетонной панелью с крупным заполнителем из щебня, что обеспечивает снижение нагрузки на фундамент.

3. Целесообразность использования бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы для изготовления наружных стеновых панелей.

4. Состав безцементного вяжущего на основе высококальциевой золы Березовской ГРЭС с исключением ее расширения и повышением прочности с помощью химических добавок.

5. Рациональные составы бетона с применением искусственного заполнителя на основе высококальциевой золы уноса для использования в наружных стеновых панелях.

6. Результаты исследования физико-механических свойств бетонов с применением искусственного заполнителя на основе высококальциевой золы для использования в наружных стеновых панелях.

### **Апробация диссертационной работы**

Основные результаты диссертационной работы представлялись на международных и всероссийских научно-практических конференциях, в том числе: XX International Scientific Conference «Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies» (Воронеж, 2018), III Международный строительный форум «Строительство и архитектура» (Донецкая Народная Республика, 2019), «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering» (Санкт-Петербург, 2019), «Socio-Technical Construction and Civil Engineering» (Казань, 2021), «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (Владимир, 2021).

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность результатов исследования подтверждается применением методов испытаний, приведенных в действующих нормативных документа, использованием современных методов исследования структуры вяжущего вещества (РФА, ДТА), использованием аттестованного испытательного оборудования и лицензионного вычислительного комплекса (SCAD Office), необходимым количеством проведенных экспериментов для обеспечения адекватности результатов, а также путем сравнения аналитических результатов определения несущей способности стеновой панели с результатами вычислительного комплекса на базе МКЭ.

### **Личный вклад автора**

Вклад автора заключается в постановке и реализации задач диссертационной работы, анализе литературных данных, выборе методики исследования, в

подготовке программы экспериментальных испытаний, проведении и получении результатов исследования, обработке и анализе данных проведенных численных расчетов и экспериментальных исследований, и оформлении материалов публикаций.

### **Соответствие диссертации научной специальности**

Работа соответствует паспорту специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения п.2 Разработка физических и численных методов экспериментальных исследований конструктивных систем, несущих и ограждающих конструкций, конструктивных свойств материалов; п.8. Разработка новых и совершенствование рациональных типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 8 работ, включая 7 публикаций в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 1 публикация в издании, включенном в Перечень ВАК. Разработанное в диссертационном исследовании вяжущее вещество имеет патент на изобретение № RU 2798801 C1 «Вяжущее вещество на основе высококальциевой золы-уноса».

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, пяти приложений и списка литературы, включающего 170 источников. Текст работы изложен на 158 листах машинописного текста, объем приложений составляет 6 страниц. Работа включает 64 рисунка и 42 таблицы.

## **1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Конструктивные решения бетонных и железобетонных стеновых панелей**

Бетонные и железобетонные стеновые панели представляют собой конструкции заводского изготовления с высокой степенью отделочной готовности [1]. Область применения бетонных и железобетонных стеновых панелей охватывает различные виды зданий: жилые здания средней этажности и многоэтажные, индивидуальное строительство, промышленные здания и т.д. [2].

Доля многоэтажных зданий в России, строящихся с использованием бетонных и железобетонных стеновых панелей заводского изготовления, составляет 40% [3]. С каждым годом эта доля увеличивается в первую очередь благодаря быстрому монтажу конструкций и пониженной трудоемкости по сравнению с монолитными стенами или стенами из штучных материалов. Стеновые панели доставляются на стройплощадку, устанавливаются с помощью кранового оборудования и после в местах соединения панелей выполняют герметизацию швов [4].

Бетонные и железобетонные стеновые панели используют во всех конструктивных типах зданий.

В зданиях с полным каркасом, т.е. с остовом из колонн и ригелей, наружные стеновые панели могут быть самонесущими или ненесущими, в зависимости от этажности здания. Самонесущая стеновая панель передает нагрузку на нижерасположенную панель, а самая нижняя панель опирается на фундамент. Ненесущие стеновые панели опираются на смежные элементы каркаса. В зданиях с неполным каркасом наружные панели являются несущими, т.к. при такой схеме отсутствуют несущие колонны по периметру здания. В бескаркасных типах зданий, как с продольными, так и с поперечными несущими стенами, наружные стеновые панели могут быть несущими или самонесущими, в зависимости от своего расположения, конструктивной схемы и этажности здания.

К другим классификациям стеновых панелей относят:

По назначению (внутренние, наружные, для цокольных или технических этажей и т.п.).

По конструкции (составные и с цельной структурой).

По числу основных слоев (однослойные, двухслойные и трехслойные).

*Однослойные стеновые панели* могут выполняться из различных видов бетонов и использоваться как для внутренних стен, так и для наружных. Габаритные размеры и расположение проемов в панели могут быть различными и определяются на этапе проектирования в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений здания. Минимальный класс бетона по прочности - В15 [5].

Пример реализованного здания с наружными однослойными панелями представлен на рисунке 1.



Рисунок 1.1 - Строительство жилого комплекса "Зеленоградский" (г. Москва)

При возведении наружных стен здания из железобетонных стеновых панелей предполагается дальнейшее утепление стены на строительной площадке с использованием системы навесного вентилируемого фасада или штукатурки по

утеплителю. Такая отделка обеспечивает отсутствие швов на фасаде здания. С внутренней стороны панель может быть покрыта цементным или известково-цементным раствором для последующей внутренней отделки.

Известны решения однослойных наружных стеновых панелей без использования утеплителя, в этом случае используются различные виды легких и ячеистых бетонов (керамзитобетон, пенобетон и др.), обладающих пониженной теплопроводностью. С внешней стороны такие панели покрываются слоем декоративного бетона толщиной 20-40 мм или поризованного бетона с последующей механической обработкой, позволяющей получить различные фактуры бетона [6]. Из-за высоких требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций использование таких панелей возможно только в определенных климатических районах [7].

Перспективные исследования в области повышения сопротивления теплопередачи однослойной панели демонстрируют возможность покрытия ее внешней поверхности жидкой керамической теплоизоляцией [8], [9], или внедрения в панель материалов с фазовым переходом, которые в теплое время суток плавятся и накапливают теплоту, а в холодное время суток кристаллизуются с выделением теплоты [10]. Для панели из керамзитобетона возможно улучшение ее теплотехнических характеристик за счёт введения в смесь синтетического пенообразователя [11], а для панелей из традиционного бетона и шлакобетона - за счет использования перлитового песка [12]. В работе [13] Б.С.Комиссаренко подробно рассмотрел керамзитобетонные и керамзитопенобетонные эффективные стеновые панели.

*Двухслойные стеновые панели* используются для возведения ограждающих конструкций и состоят из двух слоев: внутреннего основного и наружного теплоизоляционного. Внутренний слой выполняют из легкого бетона с классом по прочности не менее В15 и толщиной от 100 мм или тяжелого бетона толщиной от 80 мм. В современных конструкциях двухслойных панелей теплоизоляционный слой выполняют из жестких теплоизоляционных плит, например, экструдированного пенополистирола [14] или минеральной ваты [15]. К другим

решениям исполнения теплоизоляционного слоя относится использование легкого или ячеистого видов бетонов [16].

С наружной стороны двухслойной панели выполняется защитно-декоративный слой из тяжелого бетона, который защищает конструкцию от внешнего климатического воздействия. В зависимости от принятых архитектурных решений здания защитно-декоративный слой может иметь облицовку плиткой или покрытие краской. Этот тип панели, как и предыдущий, при необходимости может иметь с внутренней стороны дополнительное покрытие заводского изготовления.

Пример реализованного здания с наружными двухслойными панелями представлен на рисунке 2.



Рисунок 1.2 - Строительство школы "Ньютон" (г. Челябинск)

Одним из вариантов двухслойной панели является вариант с системой вентилируемого фасада по методу укрупнительной сборки, который предполагает изготовление в заводских условиях не только основного слоя панели, но и всех элементов навесного вентилируемого фасада. Такое решение сокращает

трудозатраты по устройству 1 м<sup>2</sup> стены на 2 чел/час по сравнению сборки такого фасада на строительной площадке [17].

В исследовании [18] представлена разработанная авторами преднапряженная двухслойная стеновая панель, совмещающие несущие и ограждающие функции. Предварительное обжатие повышает жесткость и устойчивость стеновой панели.

Авторы [19] описали конструкцию универсальной панели, которую можно использовать, как для перекрытий, так и для стен. Она состоит из двух основных слоев - железобетона и теплоизоляции. Слой железобетона включает в себя контурные и внутренние ребра. С внешней стороны панели устраивается воздушный зазор и отделочный слой. Применение универсальной панели уменьшает трудоемкость изготовления панелей на 30-50% и увеличивает скорость монтажа на 35% по сравнению с традиционными решениями.

*Трехслойные стеновые панели* используются, как и предыдущие, в качестве ограждающих конструкций [20], [21]. В таких панелях внешний и внутренний слои выполнены из бетона, а промежуточный слой является теплоизоляционным [22]. В качестве теплоизоляции может выступать минеральная вата, экструдированный пенополистирол [23], пенобетон [24], [25], вспененный пенополистирол [26], [27], панели с вакуумной теплоизоляцией [28], [29].

Соединение бетонных слоев между собой осуществляют жесткими или гибкими связями. Жесткие связи — железобетонные шпонки (перемычки), проходящие сквозь слой утеплителя [30], [31]. Гибкие связи - отдельные стержни, диагональные связи и треугольные арматурные каркасы в виде решетчатых ферм. Стержни и диагональные связи выполняют из нержавеющей стали или композитной арматуры [32], [33], [34]. В случае использования гибких связей из стеклопластика наблюдается повышение сопротивления теплопередаче наружных стеновых панелей [35].

Трехслойные стеновые панели могут иметь защитно-декоративный слой с внешней стороны панели и цементный или известково-цементный раствор с внутренней стороны, как основание для последующей внутренней отделки.

Пример реализованного здания с наружными трехслойными панелями представлен на рисунке 3.



Рисунок 1.3 - Строительство многоквартирного жилого дома (г. Нягань)

В работе [36] экспериментально изучена конструкция наружной трехслойной панели с двумя слоями железобетона и слоем гипса между ними, который эффективно замедляет теплопередачу в стеновой панели из сборного железобетона. Наибольшей теплоизоляционной способностью среди испытанных образцов показали панели с пустотелым гипсовым слоем.

Производство трехслойных железобетонных панелей сопровождается большим выбросом  $\text{CO}_2$  по сравнению с производством других конструкций

наружных стен. Авторы [37] сравнили 20 трехслойных железобетонных панелей и определили, что наименьшим значением выбросов CO<sub>2</sub> обладает панель из двух тонких слоев железобетона и теплоизоляции из экструдированного пенополистирола, предлагаемая авторами [38].

В работе [39] представлены конструктивные решения трехслойных наружных стеновых панелей с повышенной несущей способностью для зданий повышенной этажности и цокольных этажей.

Конструированию и расчету элементов крупнопанельных зданий с несущими панелями посвящены работы Е.Ю.Шалыгиной [40], И.М.Куликова [41]. А.С.Чепуренко разработал универсальную методику расчета однослойных и трехслойных пластин и оболочек на силовые и температурные воздействия с учетом ползучести [42]. А.С.Шкутов разработал метод расчета прочности и конструирования железобетонных стен из панелей с проемами на основе моделирования сопротивления стен [43]. Р.А. Хунагов предложил метод расчета сжатых двухслойных железобетонных панелей с комбинированным армированием с использованием коэффициента приведения, представляющего собой отношение секущих модулей деформации тяжелого и легкого бетонов слоев [44].

В следующем параграфе рассмотрены основные виды бетонов для производства наружных стеновых панелей.

## **1.2. Виды бетонов, используемых для производства бетонных и железобетонных наружных стеновых панелей**

К настоящему времени исследователями выполнено большое количество разработок в области использования различных видов бетонов для производства наружных стеновых панелей.

Однослойные наружные панели с несущей функцией выполняют из конструктивных бетонов - железобетона или керамзитобетона плотностью 1600...1800 кг/м<sup>3</sup>, самонесущие и ненесущие наружные панели - из ячеистых и лёгких бетонов на пористых заполнителях, таких как керамзитобетон, пенобетон, аглопоритобетон и перлитобетон. Для трехслойных стеновых панелей наиболее

часто используют конструкционные бетоны - железобетон или керамзитобетон [45]. Для двухслойных стеновых панелей в качестве основного (внутреннего) слоя используют те же виды бетона, что и для основного слоя трехслойных стеновых панелей, а в качестве теплоизоляционного (внешнего) слоя - различные виды ячеистых бетонов.

*Керамзитобетон для наружных стеновых панелей* представляет собой бетон с крупным заполнителем из керамзита. В зависимости от своей плотности керамзитобетон может быть трех видов: теплоизоляционный (600-800 кг/м<sup>3</sup>), конструкционно-теплоизоляционный (800-1500 кг/м<sup>3</sup>), конструкционный (1500-1800 кг/м<sup>3</sup>). Коэффициент теплопроводности керамзитобетона лежит в диапазоне от 0,12 до 0,65 Вт/м<sup>2</sup>·°С в зависимости от его плотности, морозостойкость - от 50 до 100 циклов, паропроницаемость - от 0,09 до 0,3 мг/(м·ч·Па), водопоглощение - около 20% [46], прочность при сжатии от 7,5 МПа до 60 МПа [47], [48], [49], [50].

Для повышения эффективности стеновых панелей из керамзитобетона используют насыщение материала пеной или крупным пористым заполнителем [11].

Использование керамзитобетона в качестве несущего слоя наружных стеновых панелей распространено в зданиях малой и средней этажности, керамзитопенобетона - в малоэтажном строительстве. Установлено, что по сравнению с традиционными видами бетона керамзитобетон имеет лучшие показатели по удобоукладываемости бетонной смеси (~78,3%) [51], [52], [53]. В сравнении с несущим слоем из обычного бетона панели с несущим слоем из керамзитобетона снижают потребление тепловой энергии на 15% [50], обладают меньшим весом, что снижает нагрузки на фундамент.

К недостаткам стеновых панелей из керамзитобетона относят меньшую несущую способность в сравнении с панелями из обычного бетона [54], которая не подходит для возведения многоэтажных зданий.

*Пенобетон для наружных стеновых панелей* — это разновидность ячеистого бетона с замкнутой пористостью, получаемая в результате затвердевания раствора из цемента, песка, воды и пенообразователя [55]. Качество пенобетона напрямую

зависит от типа и качества пенообразователя [56], которых существует два вида: органический (из природных белковых компонентов) [57], [58] и синтетический [59]. Синтетический пенообразователь дешевле органического, но бетон на его основе имеет меньший срок службы [60] и меньшую прочность [61] в сравнении с бетоном на органическом пенообразователе. Этот материал, как и керамзитобетон, в зависимости от своей плотности подразделяют на три вида: теплоизоляционный (150-500 кг/м<sup>3</sup>), конструкционно-теплоизоляционный (500-900 кг/м<sup>3</sup>) и конструкционный (900-1200 кг/м<sup>3</sup>). Коэффициент теплопроводности пенобетона варьируется от 0,07 до 0,30 Вт/м<sup>2</sup>·°С [62], [63], [64]. Установлено, что при добавлении в пенобетон микросфер из перлита коэффициент теплопроводности уменьшается до 0,062 Вт/м<sup>2</sup>·°С [64], а при использовании в составе пенобетона добавок на основе волластонита и диоксида - до 0.069-0.097 Вт/м<sup>2</sup>·°С [65]. Морозостойкость пенобетона доходит до 50 циклов, паропроницаемость - 0,1 - 0,23 мг/(м·ч·Па), водопоглощение незначительное благодаря закрытой пористости материала, прочность при сжатии - 0,1 МПа – 12 МПа [56], [66], [67], [68].

О.А. Веревкин в своей работе [69] изучил механизма стабилизации пенобетона различными минеральными наполнителями и разработал многослойные стеновые панели с низкотеплопроводным пенобетоном в качестве утеплителя.

Стеновые панели из пенобетона часто на 20–40 % легче панелей из обычного бетона с сопоставимой прочностью [70]. В исследовании [71] сообщается о возможности изготовления стеновых панелей из самоуплотняющегося пенобетона плотностью 1830 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при сжатии бетона 24,83 МПа. Использование пенобетона низкой плотности от 200 кг/м<sup>3</sup> до 300 кг/м<sup>3</sup> в качестве теплоизолирующего слоя в наружных стеновых панелях вместо наиболее часто используемого пенополистирола демонстрирует улучшенные противопожарные свойства, так как при пожаре не выделяет дым и ядовитые газы [72].

К недостаткам стеновых панелей из пенобетона относят также меньшую несущую способность в сравнении с панелями из обычного бетона и повышенную усадку этого материала, которая может привести к образованию трещин в изделии.

*Пензолобетон для наружных стеновых панелей* представляет собой вспененный пенобетон на основе золы уноса ТЭЦ и ТЭС. Авторы [73], [74] исследовали различные составы пенобетона с плотностью от 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup> с частичной заменой цемента золой уноса (до 75% по массе). Установлено, что до 67% замены цемента не происходит значительного снижения прочности [73]. Пористость и водопоглощение пензолобетона не зависит от содержания золы, а паропроницаемость увеличивается с увеличением пористости и содержания золы [74]. Авторы [75] исследовали составы пенобетона с частичной заменой песка золой уноса и установили улучшенные реологические свойства и прочность при сжатии золопенобетона по сравнению с пенобетоном. Кроме этого, материал оказался невосприимчив к сульфатному воздействию.

Использование пензолобетона в наружных стеновых панелях сохраняет потребляемую энергию до 50% от общей тепловой мощности, подаваемой в здание [55].

Недостатки стеновых панелей из пензолобетона аналогичны недостаткам панелей из пенобетона.

*Аглопоритобетон для наружных стеновых панелей* представляет собой еще одну разновидность легкого бетона, в котором заполнителем является аглопорит - искусственные пористые гранулы, получаемые термической обработкой шихты из глинистых пород или отходов добычи, сжигания угля [76]. Плотность материала может достигать до 2000 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности варьируется от 0,6 до 0,75 Вт/м<sup>2</sup>·°С [77]. Установлено, что аглопоритобетон обладает высокими огнеупорными свойствами, и жаропрочностью, достаточным коэффициентом линейного термического расширения и пригоден для использования в качестве наполнителя в легких жаропрочных бетонах [78].

При использовании аглопоритобетона в однослойных панелях или в качестве теплоизоляции в двухслойных наружных стеновых панелях, предназначенных для надземных этажей, плотность материала, как правило, не превышает 1600 кг/м<sup>3</sup>. Возведение зданий с наружными стенами из аглопоритобетона актуально в районах, где нет природных заполнителей. Себестоимость панелей из

аглопоритобетона значительно ниже, чем у панелей из керамзитобетона или обычного бетона, т.к. аглопоритобетон изготавливается из углесодержащих отходов [77]. Кроме этого, панели из аглопоритобетона устойчивы к агрессивным воздействиям, т.к. марка по морозостойкости аглопоритобетона от F50 до F250 [79].

К недостаткам стеновых панелей из аглопоритобетона можно отнести повышенное выделение в атмосферу вредных веществ при производстве компонентов аглопоритобетона; к загрязнению окружающей среды от производства цемента добавляются выбросы в атмосферу от обжига гранул аглопорита.

*Перлитобетон для наружных стеновых панелей* — это вид легкого бетона, в котором заполнителем является вспученный перлит [80]. Максимальная усадка перлитобетона - до 1,5 мм/м, морозостойкость - более 25 циклов, водопоглощение - 25-30%, Производственная влажность после пропаривания - до 25% по массе. Возможно использование вспученного перлита вместо традиционных заполнителей в бетонах. Это уменьшает массу изделия из такого бетона, но приводит к снижению прочности на сжатие и модуля упругости по мере увеличения содержания вспученного перлита [81], [82].

Для использования в наружных стеновых панелях используется перлитобетон с плотностью от 600 до 1200 кг/м<sup>3</sup>, который отличается хорошими характеристиками по огнестойкости, имеет малую теплопроводность 0,17-0,41 Вт/(м К) в соответствии с объемной массой и высокую воздухопроницаемость.

К недостаткам наружных стеновых панелей из перлитобетона относят необходимость устройства изолирующего слоя из гидрофобизированного плотного бетона.

*Тяжелые бетоны для наружных стеновых панелей* — это группа бетонов с плотностью от 2000 до 2500 кг/м<sup>3</sup>. Из-за высокой плотности материала, он обладает значительной прочностью при сжатии, достаточной водонепроницаемостью, морозостойкостью и долговечностью [83], [84].

Известным недостатком наружных стеновых панелей из тяжелых видов бетона является повышенная нагрузка на фундамент и недостаточные

теплотехнические характеристики материала, что приводит к необходимости использования большей толщины утеплителя, чем для наружных стеновых панелей из бетона меньшей плотности.

*Мелкозернистый бетон для наружных стеновых панелей* — это вид бетона с максимальным размером крупного заполнителя до 10 мм. Такой материал имеет однородный состав, что придает ему высокую плотность, которая обеспечивает наружной стеновой панели достаточную прочность. Благодаря отсутствию крупных фракций бетонная смесь имеет высокую подвижность. Замена вяжущего золошлаковыми отходами увеличивает прочность мелкозернистого бетона, оптимальной дозировкой замены является - 10% [85].

На основе мелкозернистого бетона с использованием высококачественного текстиля можно получить облегченные многослойные теплоизоляционные композитные панели [86].

Недостатки стеновых панелей из мелкозернистого бетона аналогичны недостаткам панелей из тяжелого бетона.

*Железобетон для наружных стеновых панелей* представляет собой тяжелый бетон с рабочей арматурой. В типовых трехслойных стеновых панелях внутренний (основной) слой выполнен из железобетона, прочность такого слоя обеспечивается совместной работой арматуры и бетона. Внешний слой трехслойных стеновых панелей выполняется из бетона с конструктивной арматурой, которая воспринимает усилия, возникающие при перевозке и монтаже, по этой причине такие слои чаще всего называют бетонными.

Типовые трехслойные стеновые панели выполняют из тяжелого бетона с рабочей арматурой основного слоя. Конструкция имеет толщину около 300 мм [87], и соответствующий вес  $\sim 500$  кг на  $\text{м}^2$  площади стены [21]. Чтобы снизить нагрузку на фундамент необходимо уменьшить вес стеновых панелей. При этом прочностные характеристики стеновой панели должны остаться такими же, как у типовых панелей. Одним из путей решения этой проблемы является замена природного крупного заполнителя (щебня или гравия) на более легкие заполнители, к которым можно отнести аглопорит, керамзит и безобжиговый

зольный гравий. Последний из перечисленных наименее энергоемкий, имеет самую простую технологию изготовления и, следовательно, является экономически более выгодным. Другие преимущества от использования безобжигового зольного гравия в качестве крупного заполнителя для бетона рассмотрены в следующем параграфе.

### **1.3. Бетоны с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия**

Безобжиговый зольный гравий получают холодным гранулированием золы уноса путем ее окатывания во вращающихся емкостях. Гранулирование золы уноса может быть одноэтапным и двухэтапным, в котором формируют второй внешний слой на гранулах эквивалентном 40% от веса гранулы [88]. Основными компонентами для получения безобжигового зольного гравия являются низкокальциевая зола уноса и цемент. Эффективность гранулирования повышают путем механической активации золы уноса, получая меньшие по размеру частицы. В исследовании [89] более высокая удельная поверхность ( $621,15 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и меньший средний диаметр частиц ( $3,35 \text{ мкм}$ ) активированной золы привели к увеличению средней степени измельчения заполнителя на 33 % и обеспечили снижение водопоглощения и пористости примерно на 30 %.

В технологии бетона безобжиговый зольный гравий используют в качестве крупного заполнителя. Основные виды бетона с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия - высококачественные бетоны (High Performance Concrete), самоуплотняющиеся бетоны (Self-Compacting Concrete) [90] и легкие бетоны (Lightweight Concrete).

Для высококачественных бетонов применение зольного гравия позволяет уменьшить стоимость бетона при сохранении его основных свойств.

В самоуплотняющихся бетонах округлая форма зольного гравия и его относительно небольшой размер повышает подвижность бетона и его удобоукладываемость, особенно при густом армировании. Подобные смеси легче подаются бетононасосами.

Использование зольного гравия в легких бетонах снижает его плотность и улучшает его теплотехнические характеристики.

Примерами исследования бетона с безобжиговым зольным гравием являются работы [91,92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105].

В исследованиях [91,92] представлено влияние характеристик четырех типов крупных заполнителей, в том числе безобжигового зольного гравия на прочность бетона и модуль упругости. Установлено, что использование зольного гравия вместо обычных заполнителей несколько уменьшает его прочность [91,92]. Авторы [93] экспериментально установили, что бетон плотностью  $1780 \text{ кг/м}^3$  с крупным заполнителем из зольного гравия достигает прочности 21,3 МПа в течение 24 часов.

В исследовании [94] показано влияние нанокремнезема и стальной фибры на проводимость капилляров и прочность на сжатие геополимерного бетона. Результаты показали, что прочность на сжатие геополимерного бетона с безобжиговым зольным гравием составляет 28,23 МПа после 28 дней отверждения и 36,62 МПа после 90 дней отверждения. Добавление 2 % нанокремнезема и 1 % стальной фибры значительно улучшает исследуемые свойства бетона [94]. Исследование [95] подтверждает, что использование стальной фибры положительно влияет на физико-механические свойства бетона с безобжиговым зольным гравием. Кроме этого, экспериментально установлено, что стальная фибра повышает прочность сцепления арматурного стержня с бетоном [96].

Авторы [97] исследовали уменьшение усадочных трещин в легких бетонах с безобжиговым зольным гравием. Для испытаний было разработано восемь бетонных смесей с В/Ц равным 0,35 и 0,55 и различными типами безобжигового зольного гравия, отличающимися текстурой поверхности, плотностью, водопоглощением и прочностью. Результаты показали, что подбором свойств зольного гравия можно увеличить период трещинообразования бетона, что приведет к формированию в бетоне более мелких трещин, связанных с меньшей свободной усадкой. Также наблюдалось заметное увеличение прочности на растяжение, сжатие и срез, а также модуль упругости [97]. Исследование [98]

подтверждает возможность использования зольного гравия для уменьшения усадки бетона.

Авторы работы [99] исследовали влияние трещинообразования образцов из легкого бетона с безобжиговым зольным гравием. Был рассмотрен легкий бетон с добавкой микрокремнезема и без него при В/Ц от 0,32 до 0,55. Содержание безобжигового зольного гравия в смесях составляло 30 %, 45 % и 60 % от общего объема заполнителя. Результаты экспериментов показали раскрытие трещин на образцах более 2 мм для всех бетонов. Усилилась свободная усадка, потеря веса и максимальное раскрытие трещины, в то время как прочность на сжатие и на срез, модуль упругости и ползучесть уменьшились с увеличением содержания крупного заполнителя. Использование микрокремнезема улучшило механические свойства, но отрицательно сказалось на усадке легкого бетона. Усадочное трещинообразование легкого бетона оказалось значительно меньше, чем у обычного бетона.

И.Г. Коренева в своей работе [100] изучила свойства безобжигового зольного гравия и прочностные и деформативные свойства бетона на его основе. Установлено, что сопротивление безобжигового зольного гравия на растяжение значительно выше, чем сопротивление растяжению других заполнителей; прочность сцепления зольного гравия с раствором (от марки М300 и выше) больше прочности сцепления с раствором других видов заполнителей. Кроме этого, выявлено, что модуль упругости заполнителя и растворной части бетона с безобжиговым зольным гравием близки, что способствует уменьшению внутренней концентрации напряжений при силовых, температурных, влажностных и других воздействиях [100].

Работа [101] посвящена реологическому поведению самоуплотняющейся бетонной смеси с замещением обычного заполнителя безобжиговым зольным гравием. Увеличение содержания мелкого и/или крупного заполнителя уменьшило плотность и вязкость бетонной смеси и сделало ее менее восприимчивой к тиксотропности смеси. Между тем, увеличение содержания зольного гравия позволило уменьшить количество суперпластификатора, необходимого для

заданной удобоукладываемости. При полной замене зольным гравием удобоукладываемость снизилась на 25 % из-за плотности свежеуложенного самоуплотняющегося бетона [101].

Авторы исследования [102] разработали эмпирические модели для удобоукладываемости и прочности на сжатие бетона с безобжиговым зольным гравием посредством статистически разработанных экспериментов на основе методологии поверхности отклика в виде подбора параметров состава смеси, таких как расход цемента, расход воды и доля безобжигового зольного гравия от расхода заполнителя. Расход цемента принимался от 250 до 450 кг/м<sup>3</sup>. Было обнаружено, что помимо содержания воды, удобоукладываемость бетонной смеси сильно зависит от объемной доли безобжигового зольного гравия в его составе. Поверхность отклика указывает на то, что увеличение содержания цемента приводит к изменению преобладающего типа разрушения: от разрушения матрицы бетона до полного разрушения. При этом прочность бетона снижается с увеличением объемной доли заполнителя. Разработанные модели можно использовать для установления типовой взаимосвязи в подборе расхода смеси для бетона с безобжиговым зольным гравием [102].

Авторы [103] испытали образцы легкого бетона с различной долей безобжигового зольного гравия от массы крупного заполнителя. Результаты испытаний показали, что пластичность легких бетонов увеличивается при более высоком содержании крупного заполнителя. При использовании микрокремнезема пластичность такого бетона уменьшается.

Было обнаружено, что зольный гравий, содержащий различные вяжущие, обладает хорошими механическими свойствами и может быть использован для бетонов средней прочности [104]. Кроме этого, возможно использование зольного гравия в бетонах, подверженных воздействию высокой температуры [105].

Для лучшего понимания влияния безобжигового зольного гравия на характеристики бетона и бетонной смеси в следующем параграфе рассмотрены виды зол уноса для производства зольного гравия.

## 1.4. Общие сведения о золах уноса

### 1.4.1. Классификации зол уноса

Одно из направлений переработки золошлаковых отходов ТЭЦ и ТЭС – использование их в качестве сырья для бетона, а также для изготовления искусственных заполнителей. Использование золошлаковых отходов в технологии бетона является эффективным подходом к строительству, не оказывающему вредного воздействия на окружающую среду [106], уменьшает загрязнение природной среды и сохраняет месторождения истощаемых природных заполнителей для бетона (гравия, щебня).

Зола уноса — это промышленным побочный продукт сжигания минерального угля на ТЭС и ТЭЦ, состоящий из мелких частиц топлива, улавливаемых электрофильтрами [107]. Основные области использования золы уноса – дорожное строительство и стабилизация грунтов [108], [109] производство бетонов [110] и геополимеров [111], [112]. При производстве бетона зола уноса может использоваться как добавка [113], [114], в качестве частичной замены цемента [115], [116], [117] или в гранулированном виде в качестве крупного заполнителя [118], [119].

Частицы золы уноса, как правило, сферические, сплошные или полые по своей природе, в основном стеклообразные (аморфные), с размером частиц от <1 мкм до 150 мкм [120,121].

К основным классификациям зол уноса относят классификации по виду сжигаемого топлива и по химическому составу [122].

По виду сжигаемого угля золы уноса подразделяют:

1. на антрацитовые, образующиеся при сжигании антрацита, полуантрацита и тощего каменного угля;
2. каменноугольные, образующиеся при сжигании каменного угля, кроме тощего;
3. буроугольные, образующиеся при сжигании бурого угля.

По химическому составу золы уноса разделяют на следующие типы:

1. кислые - антрацитовые, каменноугольные и буроугольные, содержащие оксид кальция до 10% масс.;
2. основные (О) - буроугольные, содержащие оксид кальция более 10% масс.

Широко известна классификация золы уноса согласно Американскому стандарту ASTM C 618 [123], который разделяет золу уноса на две категории: класс С и класс F. Зола уноса класса F образуются в основном при сжигании антрацита или битуминозного угля, содержащего  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  более 70%. В то время как зола уноса класса С образуется при сжигании лигнита или полубитуминозного угля, состоящего на 50-70% из вышеупомянутых химических веществ [124].

#### 1.4.2. Высококальциевые золы уноса

Высококальциевая зола уноса (класс С) содержит значительное количество оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) до 40% и обладает как вяжущими, так и пуццолановыми свойствами [125].

В отношении использования высококальциевой золы уноса в технологии бетона существует ограничение, связанное с содержанием оксида кальция в свободном состоянии ( $\text{CaO}_{\text{free}}$ ).  $\text{CaO}_{\text{free}}$  представляет собой частицы, покрытые стекловидной оболочкой, труднодоступной для контакта с водой в начальные сроки взаимодействия. Это приводит к гидратации оксида кальция в позднем возрасте, когда основная масса материала уже затвердела и может растрескаться при переходе  $\text{CaO}$  в  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , сопровождающимся увеличением объема. Высокое содержание  $\text{CaO}_{\text{free}}$  (>10%), приводящее к сильному расширению и растрескиванию в период твердения, является серьезной проблемой, препятствующей использованию высококальциевых зол уноса в технологии бетона [126], [127], [128].

Ф.Л.Капустина исследовал гранулированные высококальциевые золы уноса и получил вяжущее на их основе. В исследовании [129] предложен способ снижения расширения гранулированной золы уноса, заключающийся в принудительном охлаждении гранул кратковременным просасыванием наружного воздуха через их слой. Вяжущее из высококальциевой золы уноса с добавкой 20 %

портландцемента показало прочность не ниже 15 МПа и равномерное изменение объема. Предложено использовать зольные гранулы в качестве активной минеральной добавки до 30 % к клинкеру при помоле портландцемента.

А.В.Аксенов в своей работе [130] предложил связать оксид кальция в свободном состоянии путем механохимической активации этой золы совместно с другими отходами производства, содержащими большое количество оксидов кремния и алюминия.

В работе [131] были определены добавки минимизирующие расширение и появление трещин на образцах, изготовленных из портландцемента с частичной заменой высококальциевой золой уноса от 30 до 70% по массе цемента. Установлено, что суперпластификатор в количестве 0.5%-1.0% снижает тепловыделение и расширение затвердевшего теста, что в свою очередь минимизирует появление трещин. Добавление микрокремнезема в смесь сводит к минимуму расширение и развитие трещин. Положительное влияние микрокремнезема на расширение высококальциевой золы уноса также подтверждено работами [132], [133], [134].

Авторы [135] сообщают, что производство смешанных цементов типа Сет IV/V с содержанием золы уноса до 50% возможно без какого-либо риска расширения или других повреждений. Для этого золу уноса с начальным содержанием свободного СаО до 16% необходимо измельчить, а золу уноса с большим содержанием свободного СаО - измельчить и предварительно гидратировать [136].

Положительное влияние в сдерживании расширения зольной пасты, состоящей из цемента и большого количества золы уноса с высоким  $\text{CaO}_{\text{free}}$  оказывают различные типы фибры. Например, это углеродная фибра [137] и стеклянная фибра [138], [139].

Однако, не так много исследований существует по нейтрализации деструктивного влияния бесцементного вяжущего, состоящего только из высококальциевой золы уноса. Предварительная гидратация золы уноса уменьшает образование этtringита и, как следствие, расширение затвердевшей пасты [140].

Таким образом, высокое содержание извести в сульфокальциевом компоненте превращается в портландит. В этом случае может быть достигнута более высокая механическая прочность без разрушения строительного раствора [141].

Авторы [142] предлагают использовать кавитационную технологию. Проведены эксперименты, показавшие, что явление кавитации, приводящее к образованию и схлопыванию полостей после скоростного пробега через систему специальных препятствий, является высокоэффективным для гидродинамического диспергирования и гашения избытка свободного  $\text{CaO}$  в золах уноса бурых углей. При использовании золы, содержащей 15%  $\text{CaO}_{\text{free}}$ , расширение зольного камня снизилось на 50% оптимальных параметрах ультразвуковой обработки.

В работе [143] установлено, что измельчение золы уноса улучшает свойства объемной стабильности пасты из отвержденной золы уноса. Это связано с тем, что измельчение золы уноса разрушает сульфатную оболочку, образующуюся при удалении  $\text{SO}_2$ , и уменьшает размер частиц, что ускоряет гидратацию ангидрита и извести.

Описанные выше способы усложняют производство бесцементного вяжущего на основе высококальциевой золы уноса с большим содержанием  $\text{CaO}_{\text{free}}$ . Поиск более простого способа нейтрализации расширения золы уноса значительно расширит возможности ее применения в технологии бетона, в виде вяжущего вещества, как альтернатива портландцементу, или в виде крупного заполнителя после грануляции.

Разработка способа регулирования расширения высококальциевой золы уноса с большим количеством  $\text{CaO}_{\text{free}}$  при её гидратации является одной из задач данного исследования. Решение этой задачи позволит гранулировать золу и использовать полученные гранулы в качестве крупного заполнителя для бетона наружных стеновых панелей.

## **1.5. Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования**

1. Выполнен обзор научно-технической литературы в области конструктивных решений бетонных и железобетонных наружных стеновых

панелей, и подходов по использованию зол уноса в различных видах бетонов. Особо следует подчеркнуть следующее. Уменьшить вес бетонной стеновой панели без ухудшения ее свойств возможно использованием вместо щебня или гравия безобжигового зольного гравия. При этом сокращается загрязнение природной среды и сохраняются месторождения истощаемых природных заполнителей для бетона.

2. Приведен обзор физико-механических свойств бетонов с заполнителем из безобжигового зольного гравия, показана возможность использования таких бетонов в наружных стеновых панелях. Показаны преимущества бетонов с заполнителем из безобжигового зольного гравия перед традиционными видами бетонов.

3. Показано, что отсутствует практика использования высококальциевой золы уноса с большим содержанием оксида кальция в свободном состоянии ( $\text{CaO}_{\text{free}}$ ) для производства крупного заполнителя для бетона наружных стеновых панелей. Ограничение использования золы с высоким содержанием  $\text{CaO}_{\text{free}}$  в технологии бетона связано с гидратацией оксида кальция в позднем возрасте, когда основная масса материала уже затвердела и может растрескаться при переходе  $\text{CaO}$  в  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , сопровождающемся увеличением объема.

На основании полученных выводов вытекает необходимость проведения диссертационного исследования в следующей постановке.

**Целью** работы является совершенствование конструктивного решения наружной стеновой панели с использованием разработанного бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы уноса

Для достижения обозначенной цели необходимо последовательно решить следующие **задачи исследования**:

1. Разработка бесцементного вяжущего на основе высококальциевой золы Березовской ГРЭС с исключением ее расширения и повышением прочности с помощью химических добавок.

2. Экспериментальные исследования состава и свойств зольно-кремнеземистого вяжущего вещества с добавками  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{MgCl}_2$  (испытания

на расширение в кольцах Ле Шателье, рентгенофазовый анализ, дифференциальный термический анализ, тепловыделение, прочность и усадка).

3. Разработка технологии и экспериментальные исследования безобжигового зольного гравия на основе разработанного вяжущего вещества.

4. Разработка состава бетона на основе безобжигового зольного гравия для использования в наружных стеновых панелях и экспериментальные исследования его физико-механических свойств.

5. Совершенствование и обоснование ограждающей конструкции из наружных стеновых панелей с использованием разработанного бетона: исследование теплотехнических свойств, несущей способности, технико-экономическое сравнение.

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ УНОСА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВИДЕ ГРАВИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННЫХ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ**

### **2.1. Характеристика применяемых материалов**

В работе использована высококальциевая зола уноса Березовской ГРЭС – филиала ПАО «Юнипро», расположенного в Шарыповском районе Красноярского края. С октября 2015 года установленная мощность Березовской ГРЭС составляет 2 400 МВт (3 энергоблока по 800 МВт). Станция работает на бурых углях Березовского месторождения и является самой мощной тепловой электростанцией Красноярского края. По итогам 2020 года выработка электроэнергии составила 4,3 млрд. кВт ч, отпуск тепла – 592 тыс. Гкал [144].

Березовская ГРЭС – единственная электростанция в России с энергоблоками мощностью 800 МВт, где в качестве топлива используется уголь [144], все остальные тепловые электростанции с блоками такой мощности работают на газе. Электростанция работает в составе объединенной энергетической системы Сибири.

На Березовской ГРЭС сжигается уголь разреза «Березовский-1» Канско-Ачинского угольного бассейна [144].

Электрофильтовая зола уноса углей Березовского месторождения минералогически представлена в основном силикатами, алюмосиликатами и ферритами кальция, оксидами кальция и магния, серным ангидридом [145]. В малых количествах присутствуют  $TiO_2$ ,  $MnO_2$ ,  $P_2O_5$ . Зола уноса гидратационно активна – она реагирует с водой и отвердевает. Химический состав золошлаков углей Березовского разреза отличается большим содержанием оксида кальция в свободном состоянии  $CaO_{free}$  (10-30 %), благодаря чему отвердевание ее сопровождается сильным расширением и растрескиванием. Средний состав золы представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Средний химический состав золы Берёзовской ГРЭС

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
15,8±6,9	8,0±0,2	0,7±1,0	7,0±1,7	4,9±0,8	46,7±5,4	7,2±4,8	0,76±0,4	1,28±0,9	3,61±1,88

Для исключения расширения высококальциевой золы уноса Берёзовской ГРЭС был опробован ряд добавок, используемых совместно с золой, представленных в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Виды использованных добавок в % от массы золы

№ состава	Вид добавки	Обозначение состава	Содержание добавки, %	Водо-твердое отношение
1	Без добавки	N	-	0,43
2	Кислота кремниевая водная, SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O, ЧДА	SS	18,4	0,8
3	Микрокремнезем МКУ-85	MS	20,0	0,42
4	Микрофибриллированная целлюлоза	MFC	32,0	0,39
5	Оксид железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – реактив Ч	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,0	0,35
6	Гидроксид кальция Ca(OH) <sub>2</sub> , реактив Ч	Ca(OH) <sub>2</sub>	17,4	0,33
7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – реактив ЧДА	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,0	0,48
8	Метакаолин Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	MK	42,9	0,5
9	Стекло натриево-жидкое 60 % раствор Na <sub>2</sub> O(SiO <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	LSG	6,6	0,51
10	Трепел Фокинского месторождения (Брянская обл.)	T	42,3	0,54

Добавки, используемые в комплексе с высококальциевой золой уноса Берёзовской ГРЭС и микрокремнеземом (MS) для улучшения свойств вяжущего вещества представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Добавки в комплексе с микрокремнеземом по отношению к золе

Номер состава	11	12	13	14	15	16	17
Вид добавок	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> O	MgCl <sub>2</sub>
	+MS	+MS	+MS	+MS	+MS	+MS	+MS
Основная добавка, %*	21,4	21,2	7,0	11,5	11,5	7,7	12,2
MS, %*	21,4	21,2	42,9	42,3	42,3	42,5	42,5
Водо-зольное отношение	0,71	0,77	0,71	0,70	0,85	0,93	0,90
Водо-твердое отношение	0,50	0,54	0,48	0,49	0,60	0,65	0,63

\* от массы золы

## 2.2. Методика исследований высококальцевой золы уноса для использования в бетонных наружных стеновых панелях

### 2.2.1. Регулирование расширения золы уноса

Испытание на расширение выполнялось с помощью колец Ле-Шателье (рисунок 2.1). Для заполнения одного кольца Ле-Шателье отвешивали 50 г золы и добавку в количестве, указанном в таблице 2.2. Тесто изготавливали вручную, сначала перемешивая сухую смесь золы и добавки, а затем малыми порциями добавляли воду до получения для всех составов примерно одинаковой консистенции, которую оценивали визуально и по усилию перемешивания. Испытания на расширение золы проводили, основываясь на методике ГОСТ 30744 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Кольца Ле Шателье устанавливали на стеклянные пластинки 3 и заполняли в один прием зольным тестом без уплотнения. Избыток теста срезали ножом, накрывали кольца сверху пластинками 3 с пригрузом 4, массой 100 г, и отверждали в воздушных условиях при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и относительной влажности воздуха 45-55 %. В отличие от указанных стандартов кипячения образцов не производили. Периодически измеряли штангенциркулем расстояние  $f$  между

концами индикаторных игл 2 с точностью до 0,5 мм и вычисляли разность  $\Delta f=f-d$ , где  $d$  – значение  $f$  до опыта.

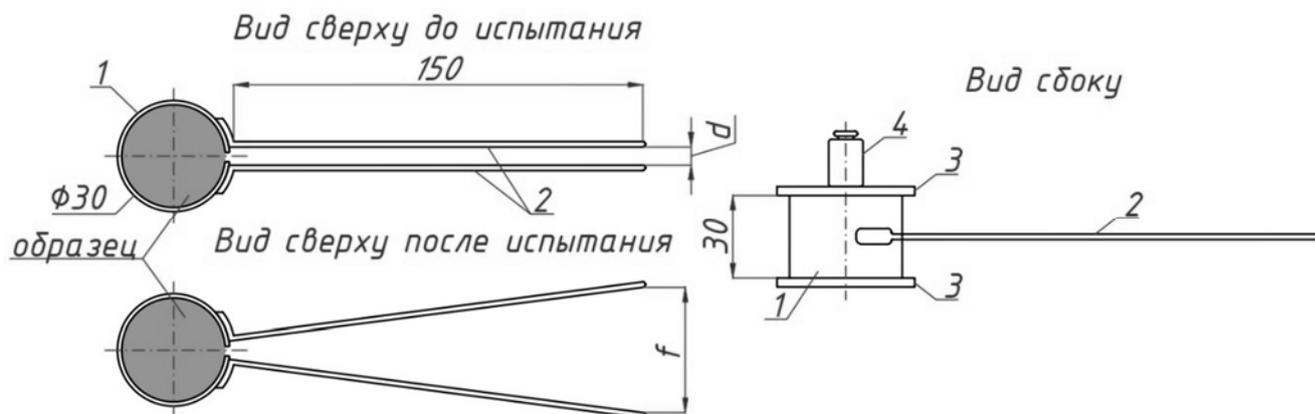


Рисунок 2.1 - Кольцо Ле-Шателье: 1 – разрезанное пружинящее кольцо; 2 – индикаторная стрелка; 3 – стеклянная пластинка; 4 – пригруз

### 2.2.2. Рентгено-фазовый и дифференциально-термический анализ образцов

Рентгено-фазовый (РФА) и дифференциально-термический (ДТА) анализы выполнялись на образцах зольного камня, испытанных ранее на расширение в кольцах Ле-Шателье. Пробы для РФА и ДТА готовились следующим образом. После соответствующих испытаний образцы измельчали и подвергали вакуумной сушке в течение 3 ч при остаточном давлении 0,3 Па. Высушенные пробы растирали в агатовой ступке до прохождения через сито 005.

Полуколичественный анализ кристаллических фаз в образцах проводили на рентгеновском дифрактометре Дрон 7 (CuK $\alpha$  излучение,  $\lambda=0,15406$  Å), диапазон съемки по  $2\theta$  от 8 до 94° с шагом 0,02° и экспозицией 3 и 5 с.

Дифференциально-термический анализ выполняли на приборе «Термоскан-2». Образцы для ДТА имели массу около 0,7-0,8 г. Нагрев образцов производился до температуры 950-1000 °С.

### 2.2.3. Тепловыделение зольно-песчаного раствора полуадиабатическим методом

Тепловыделение зольно-песчаного раствора определялось экспериментально полуадиабатическим (термосным) методом согласно [146].

Схема калориметра показана на рисунке 2.2. Зольно-песчаный раствор 1 укладывали в тонкостенный алюминиевый стакан 2 и помещали в термос (стеклянный сосуд Дьюара) 3. В центре образца размещали горячий спай дифференциальной термопары 4 и резервуар контрольного термометра 5. Для определения теплоемкости образец снабжали электрическим нагревателем в виде изолированной нихромовой проволоки 6, намотанной по цилиндрической поверхности стакана 2.

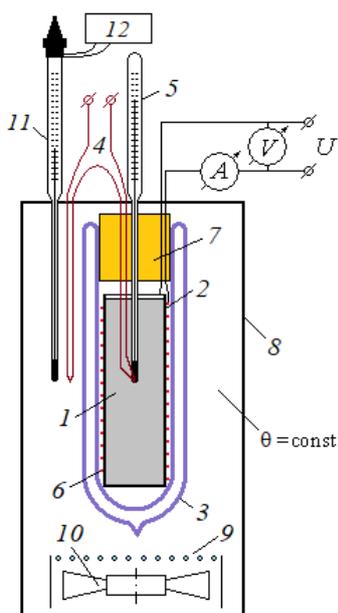


Рисунок 2.2 - Схема калориметра

Сосуд Дьюара с образцом, закрытый пенополистирольной пробкой 7, с выведенными наружу проводами нагревателя и термопары устанавливали в центре теплоизолированного корпуса термостата 8. Для регулирования температуры воздуха в термостате он снабжен охлаждающим устройством 9 и вентилятором 10. В процессе опытов температуру воздушной среды  $t_e$ , окружающей термос, поддерживали постоянной с помощью контактного термометра 11 и электронного терморегулятора 12. Колебания температуры среды относительно среднего значения составляли  $\pm 0,3$  °С. Регистрация температуры образца производилась автоматически каждые 30 минут с точностью 0,1 °С.

При измерении экзотермии образца нагревательный элемент не использовался или отсутствовал.

Теплота  $Q$ , выделяемая бетонным образцом при гидратации цемента, идет на нагрев содержимого в термосе ( $Q_1$ ) и потери в среду ( $Q_2$ ):

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (2.1)$$

Количество теплоты  $Q_1$  равно

$$Q_1 = C(t - t_0), \quad (2.2)$$

где  $C$  – аддитивная теплоемкость (Дж/°С) содержимого термоса, включающего: образец бетона, алюминиевый стакан, нагревательный элемент, концы термометра и термопары, часть теплоизолирующей пробки и внутреннюю

колбу сосуда Дьюара;  $t_0$  – начальная температура образца;  $t$  – температура образца в момент времени  $\tau$ .

Значение  $C$  определяли экспериментально, как описано ниже.

Количество теплоты, потерянной образцом за счет конвективного теплообмена термоса с окружающей воздушной средой вычисляется по формуле Ньютона:

$$Q_2 = \alpha S \int_0^{\tau} (t - \theta) d\tau, \quad (2.3)$$

где  $\alpha S$  – константа теплоотдачи термоса (количество теплоты, теряемое или приобретаемое термосом за 1 с при разности температур между образцом и средой в 1 К), определяемая экспериментально;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – площадь поверхности тела;  $\theta$  – температура среды (поддерживается постоянной);  $\tau$  – время.

Интегрирование было заменено суммированием по площади, заключенной между кривой зависимости температуры образца от времени  $t=f(\tau)$  и прямой, соответствующей постоянной температуре среды  $\theta=const$ .

Для определения аддитивной теплоемкости  $C$  после окончания опыта по определению тепловыделения образец нагревали и выдерживали при температуре 60 °С двое суток для завершения возможных физико-химических процессов. Затем

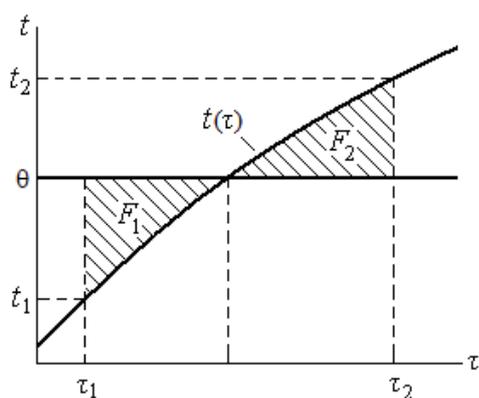


Рисунок 2.3 - График для определения температурного интервала нагрева образца

бетонный образец извлекали и охлаждали до температуры на 18-20 °С ниже температуры среды  $\theta$ . После установки в калориметр охлажденного образца его медленно в течение 1.5-2 суток нагревали до температуры на 20-22 °С выше температуры среды  $\theta$ , подавая стабилизированное напряжение ( $U=const$ ) в несколько вольт на нагреватель образца (рисунок 2.3). При этом регистрировали температуру образца  $t$ , силу тока  $I$

и напряжение  $U$ . Медленный нагрев необходим для выравнивания температуры внутри термоса. Из-за большого термического сопротивления сосуда Дьюара и пенопластовой пробки, при очень медленном нагреве можно считать температуру внутри термоса  $t$  одинаковой для всех элементов. Температура среды

поддерживалась постоянной. Пока температура образца  $t$  остается ниже температуры среды  $\theta$  ( $t < \theta$ ), образец получает от среды тепло  $Q_a$ , а при  $t > \theta$ , теряет определенное количество теплоты  $Q_b$ . Если выбрать температурный интервал нагрева  $t_2 - t_1$  так, чтобы соблюдалось равенство  $Q_a = Q_b$ , то баланс теплообмена со средой становится нулевым и аддитивная теплоемкость системы определяется по формуле

$$C = Q / (t_2 - t_1), \quad (2.4)$$

где  $Q$  – теплота, выделенная нагревателем, которая по закону Джоуля равна

$$Q = IU\tau. \quad (2.5)$$

Для равенства  $Q_a = Q_b$  моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  и соответствующие им температуры  $t_1$  и  $t_2$  нужно выбрать так, чтобы площади  $F_1$  и  $F_2$ , заменяющие значение интеграла в формуле (2.3), были равны  $F_1 = F_2$  (рисунок 2.3).

#### 2.2.4. Расчетное приведение результатов полуадиабатического тепловыделения к изотермическому режиму

Стеклянные сосуды Дьюара имеют некоторые различия в величине  $\alpha S$ , поэтому один и тот же состав бетона, испытанный в разных термосах, покажет не вполне совпадающий ход температурной кривой во времени. Это связано с зависимостью скорости тепловыделения от температуры. Для получения сопоставимых результатов тепловыделение бетона  $Q$ , полученное полуадиабатическим методом при начальной температуре бетона  $20^\circ\text{C}$ , расчетом приводилось к изотермическому режиму твердения при температуре  $20^\circ\text{C}$  с помощью гипотезы приведенного времени [147], согласно которой в моменты равных тепловыделений при  $Q_1 = Q_2$  отношение скоростей тепловыделения, а также соответствующих сроков  $\tau_2$  и  $\tau_1$  остается постоянным на протяжении всего процесса:

$$\frac{(dQ/d\tau)_1}{(dQ/d\tau)_2} = \frac{\tau_2}{\tau_1} = f_t = \text{const}. \quad (2.6)$$

Температурную функцию  $f_t$  вычисляли по формуле:

$$f_t = 2^{\frac{t_1 - t_2}{\varepsilon}}, \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon$  – характеристическая температурная разность. Если  $t_1 - t_2 = \varepsilon$ , то  $f_t = 2$ , то есть при повышении температуры на  $\varepsilon$  градусов скорость тепловыделения возрастает в 2 раза.

Величину  $\varepsilon$  получают по экспериментальным данным тепловыделения бетона при трех (не менее) температурах. Установлено, что характеристическая температурная разность  $\varepsilon$  не постоянна, а зависит от температуры. Эту зависимость аппроксимируют линейной функцией  $\varepsilon = kt + l$ , где  $k \approx 0,13$ ;  $l \approx 8$  – эмпирические характеристики процесса.

Приведенное время для каждого значения тепловыделения вычисляется по формуле:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot f_t. \quad (2.8)$$

### **2.2.5. Предел прочности при сжатии**

Составы зольно-песчаного раствора, испытанные на тепловыделение, были также испытаны на прочность при сжатии в возрасте 28 суток. Образцы кубической формы, в количестве 3 штук на одно испытание, имели размеры 3,2х3,2х3,2 см. Образцы хранили в помещении лаборатории с температурой  $(20 \pm 2)$  °С, первые 7 суток в укрытых формах, а остальное время в эксикаторе над водой. Образцы перед испытанием при визуальном осмотре не имели признаков расширения и растрескивания.

## **2.3. Результаты проведенных исследований**

### **2.3.1. Оценка возможности регулирования расширения золы уноса для использования в бетонных наружных стеновых панелях**

Виды использованных добавок и их содержание в тесте по отношению к золе представлены в таблице 2.2, расширение зольного теста с добавками после

испытания в кольцах Ле-Шателье - на рисунке 2.4, влияние добавок на кинетику расширения теста - на рисунке 2.5.

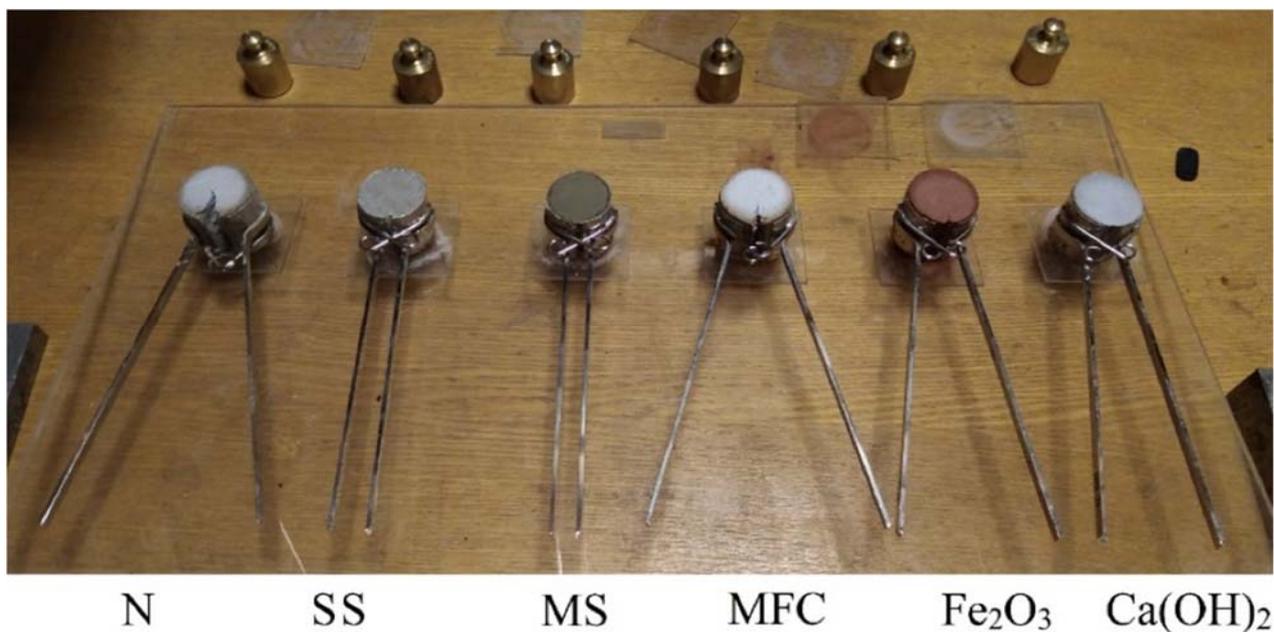


Рисунок 2.4 - Расширение теста с добавками (обозначения см. в таблице 2.2)

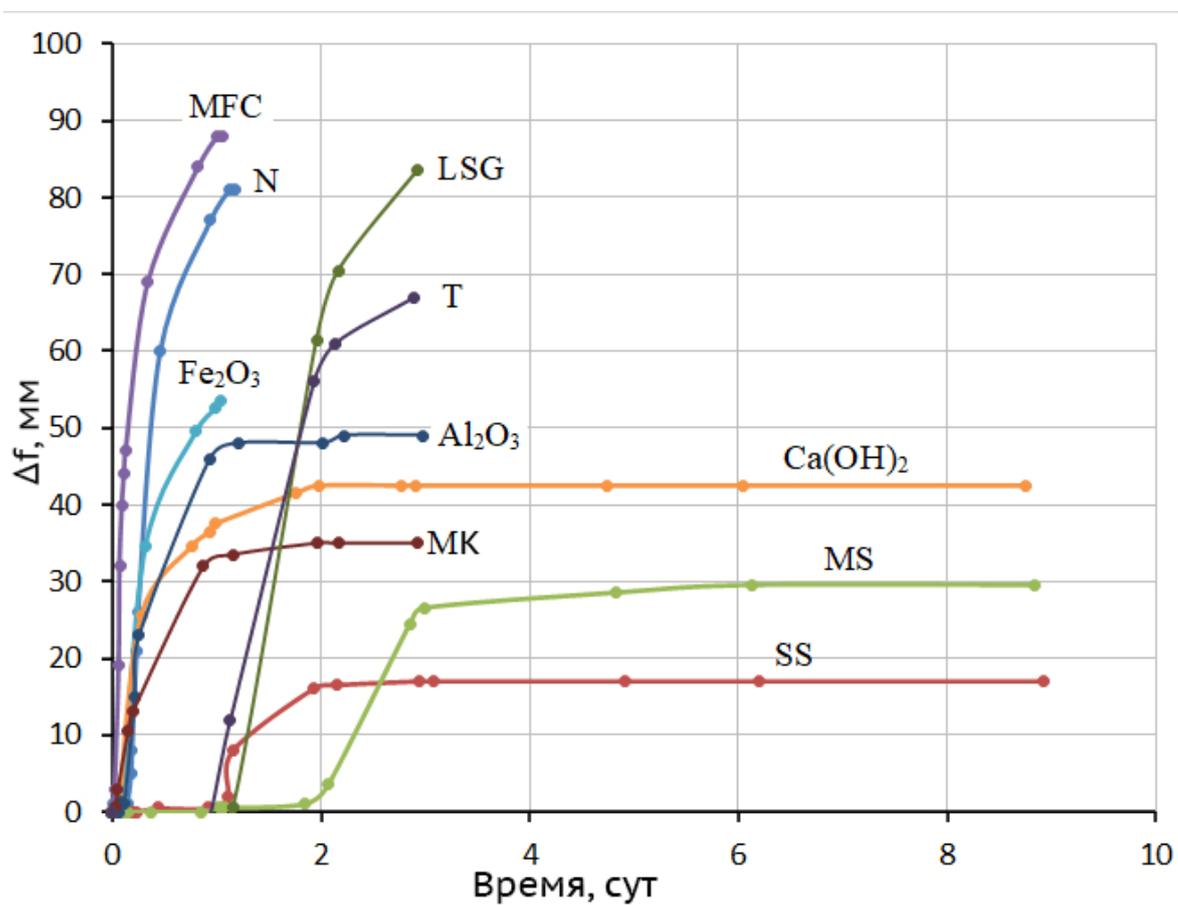


Рисунок 2.5 - Влияние добавок на кинетику расширения зольного теста

Контрольный состав (N), включающий в себя золу без добавок и воду, как это видно из рисунков 2.4 и 2.5, характеризуется очень высоким расширением. Опыт с этим составом и двумя другими пришлось прервать примерно через 1 сутки, в избежание порчи колец Ле-Шателье. Добавка микроцеллюлозы (MFC) по предположению должна была сдерживать расширение за счет армирования теста, однако этого не произошло. Наоборот, расширение образцов с микроцеллюлозой началось раньше и оказалось выше расширения контрольного состава. Добавка оксида железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) несколько снижает расширение возможно за счет частичного связывания извести в гидроферрит кальция. Влияние гидроксида кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), понижающего деформацию расширения более значительно, чем добавка  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , можно объяснить с помощью принципа Ле-Шателье, согласно которому повышение концентрации продукта реакции, которым является  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , тормозит реакцию. В случае близких по составу микрокремнезема (MS) и кремнекислоты (SS) видно, что расширение начинается не сразу, а спустя некоторое время. В течение этого времени кремнезем связывает свободную известь в аморфный гидросиликат кальция и тормозит ее гидратацию. Когда известь кремнеземом израсходован, начинается реакция извести с водой, сопровождающаяся расширением. Более продолжительный период задержки расширения теста с микрокремнеземом, чем с кремнекислотой, объясняется большим необходимым количеством микрокремнезема. Однако кремнекислота более эффективна, так как за меньшее время связывает больше извести. Это вытекает из того обстоятельства, что конечное значения деформации расширения у образцов с кремниевой кислотой меньше. Следовательно, меньше остается свободной извести для реакции с водой.

Высоким расширением, не уступающем контрольному составу, имеют образцы, содержащие добавки жидкого натриевого стекла (LSG) и трепела (T). Однако в отличие от контрольного (N) эти составы имеют задержку расширения в течение примерно 1 суток, что может указывать на реакцию нейтрализации некоторого количества свободной извести. Следует обратить внимание, что эти вещества также содержат  $\text{SiO}_2$  в своем составе. Наличие кремнезема в метакаолине (МК) способствует снижению конечного расширения золы по сравнению с чистой

окисью алюминия. Поведение состава с метакаолином оказалось весьма любопытным. Объемное расширение образцов составило в среднем 30,3 % от первоначального объема, однако, растрескивания не наблюдалось. При этом предел прочности при сжатии составил 9,9 МПа.

В том, что период задержки (инкубационный период) и конечное расширение зависит от количества микрокремнезема, можно убедиться на основании следующего опыта. Из золы и микрокремнезема при одинаковом водо-твердом соотношении (В/Т) равном 0,42 было приготовлено 6 составов зольного теста, отличающихся содержанием MS, составляющим 5,3; 11,1; 17,6; 25,0; 33,3 и 42,9 % от массы золы. Указанные составы испытывали на расширение в кольцах Ле Шателье. Результаты испытания приведены на рисунках 2.6 - 2.8.

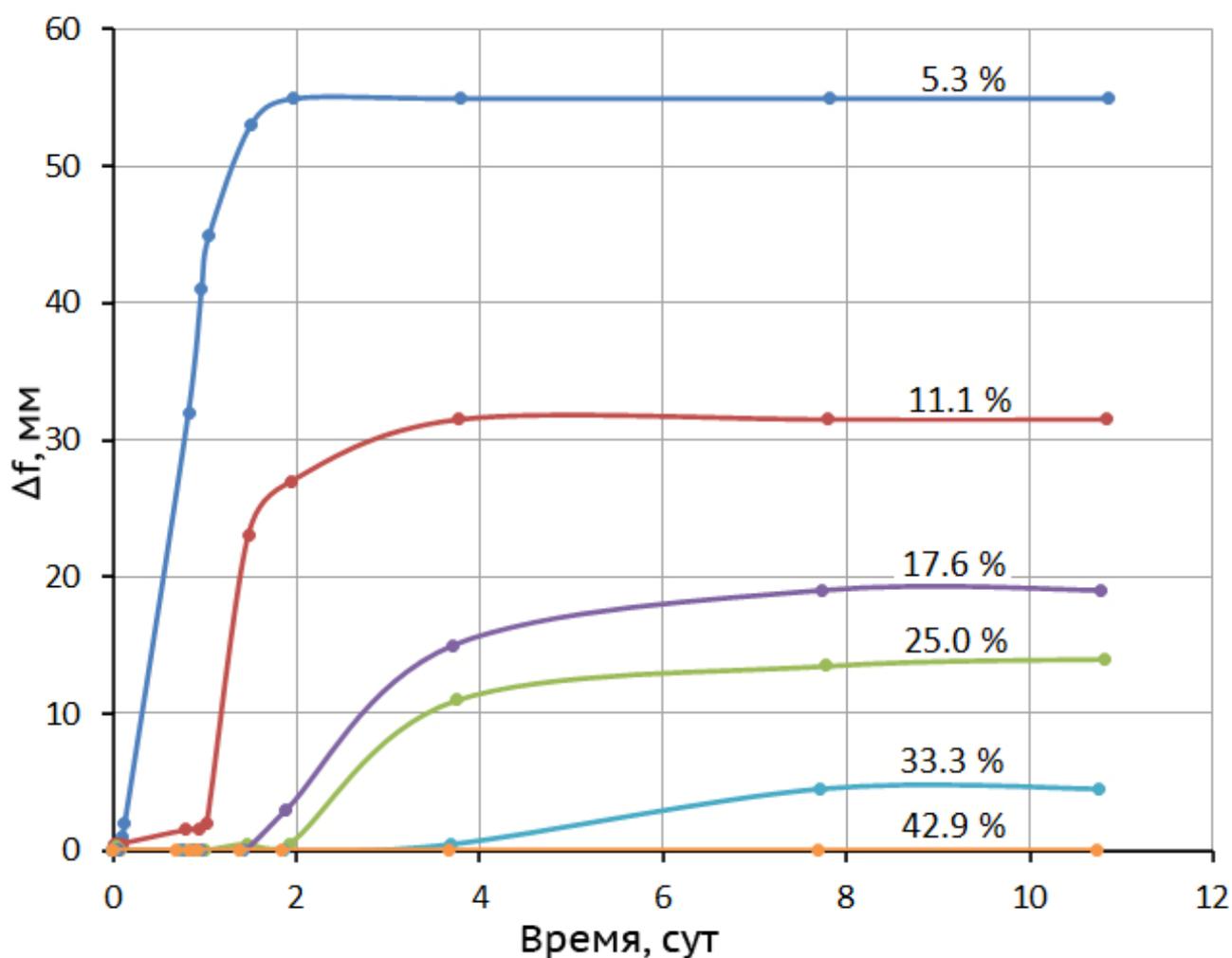


Рисунок 2.6 - Влияние микрокремнезема на деформацию расширения золы

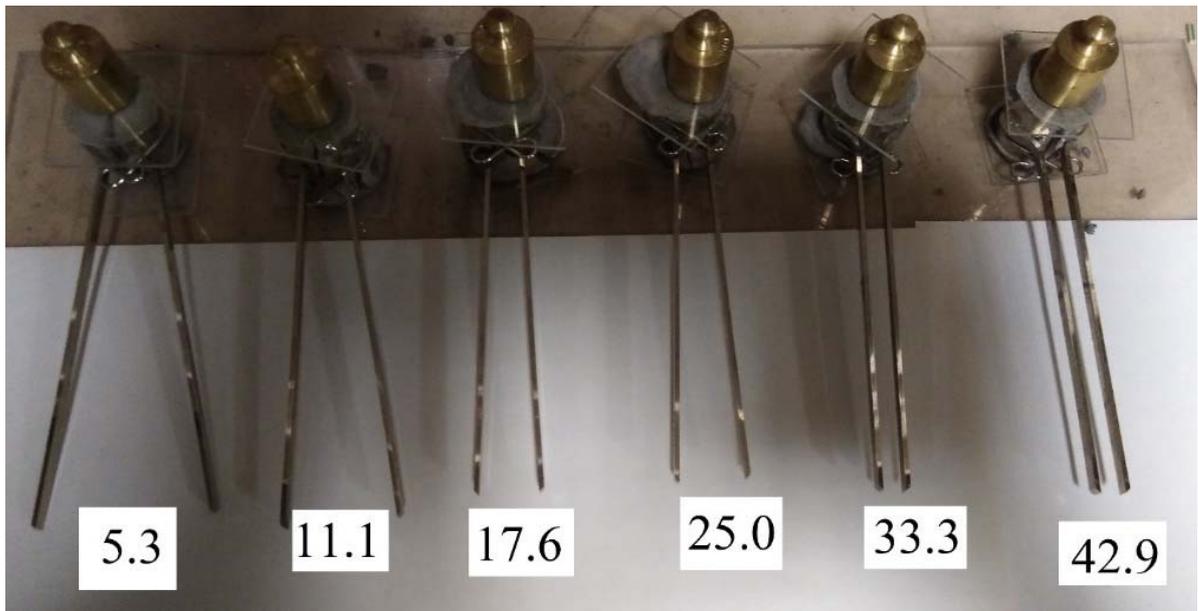


Рисунок 2.7 - Расширение зольного теста с содержанием добавки микрокремнезема от 5,3 до 42,9 % от массы золы через 4 суток твердения

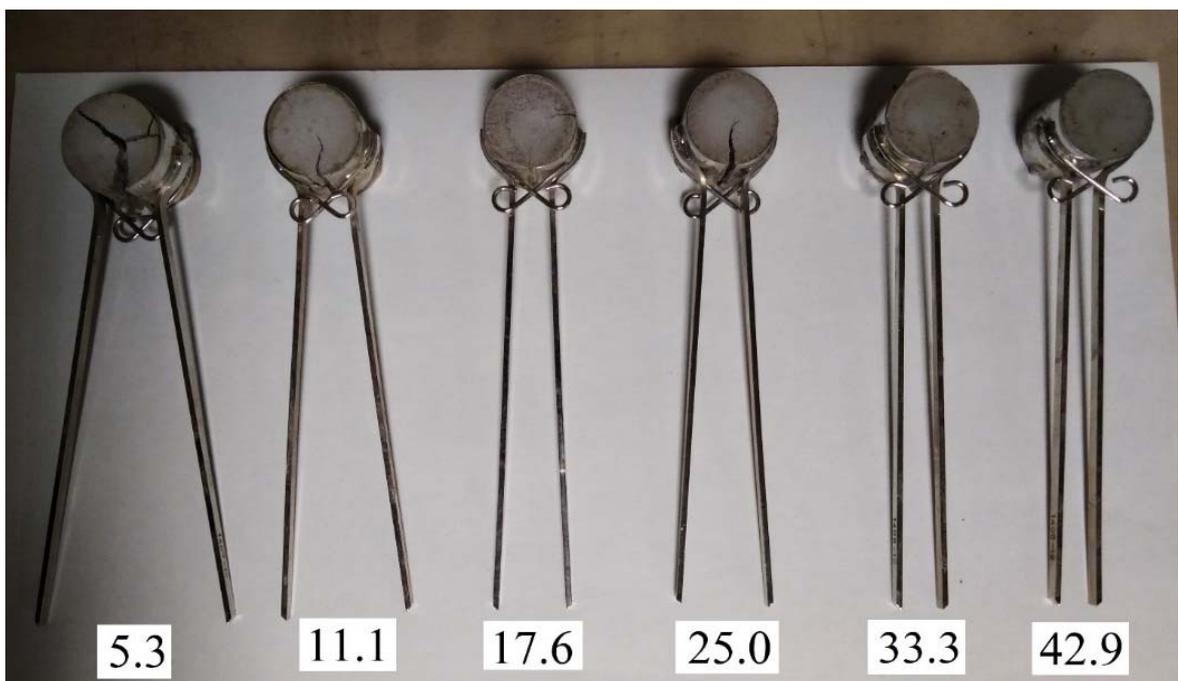


Рисунок 2.8 - Расширение зольного теста с содержанием добавки микрокремнезема от 5,3 до 42,9 % от массы золы через 11 суток твердения

Из рисунков 2.6-2.8 можно видеть, что процессы расширения образцов практически прекратились на четвертые сутки твердения.

На кривых расширения (рисунок 2.6) можно выделить три характерных участка: 1) инкубационный период, который тем длиннее, чем больше содержание MS; 2) период интенсивного роста деформации, продолжительность которого

увеличивается с ростом содержания MS; 3) период стабилизации, когда дальнейшее расширение прекращается.

Из шести составов только образцы, содержащие 42,9 % микрокремнезема, сохранили первоначальный объем и не имели трещин. В остальных случаях, расширение и растрескивание возрастало с уменьшением количества микрокремнезема.

После 11 суток твердения, когда расширение всех образцов стабилизировалось, образцы были извлечены из колец Ле-Шателье и помещены в воду на двое суток, в результате чего расширение возобновилось. Произошло значительное разбухание образцов, про котором они принимали бочкообразную форму и разделялись на две части благодаря поперечной трещине по середине высоты. При попытке извлечь образцы из воды они рассыпались в пальцах. Здесь также наблюдалась обратная зависимость от содержания MS, однако, состав с 33,3 % MS в отличие от других образцов полностью развалился. В наименьшей степени пострадали образцы, содержащие 42,9 % MS (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 - Образцы из зольного теста с содержанием MS от 5,3 до 42,9 % от массы золы через 11 суток воздушного твердения и 2 суток пребывания в воде

Таким образом, из испытанных минеральных веществ микрокремнезем показал наибольшую эффективность, как ингибитор расширения

высококальциевой летучей золы. Микрокремнезем при содержании 42,9 %, обеспечивая трещиностойкость и отсутствие расширения на воздухе, не сообщает составу водостойкости.

### 2.3.2. Результаты рентгено-фазового и дифференциально-термического анализов образцов

В испытанной пробе золы идентифицированы следующие фазы (таблица 2.4).

Таблица 2.4 - Фазовый состав золы уноса Берёзовской ГРЭС

Химический состав соединений	Усл. содерж. %	Химический состав соединений	Усл. содерж. %
CaO	42,6	$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	3,4
SiO <sub>2</sub>	9,7	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,4	$2\text{CaO} \cdot 0,7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,3\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,7
MgO	4,6	$4\text{CaO} \cdot 2\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	2,2
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	5,6	$2\text{CaO} \cdot 0,2\text{MgO} \cdot 0,5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0,2\text{SiO}_2$	3,3
$3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	2,6	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	2,6
$\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	4,2	TiO <sub>2</sub>	1,7
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	2,8	C	7,7

Соответствующая рентгенограмма приведена на рисунке 2.10.

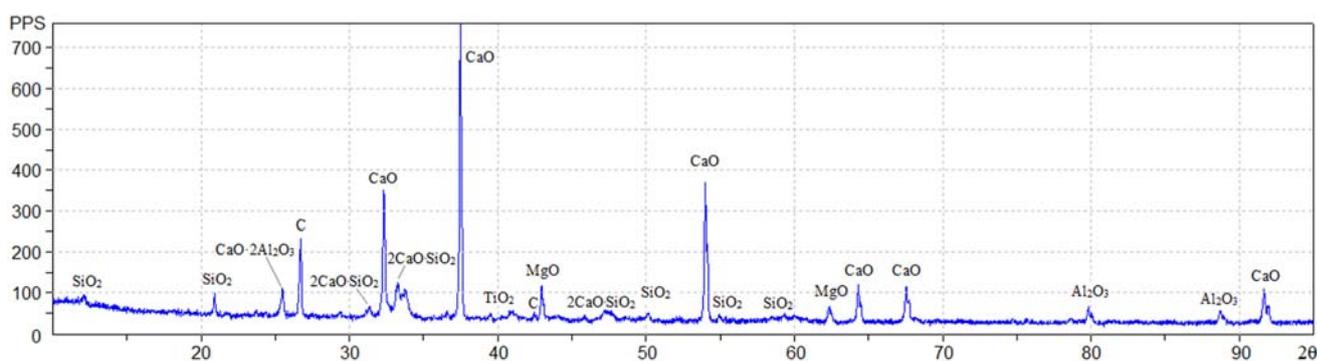


Рисунок 2.10 - Рентгенограмма золы уноса Берёзовской ГРЭС

Рентгенограммы образцов зольного камня с добавкой микрокремнезема (MS) после гидратации в течение 11 суток приведены на рисунке 2.11.

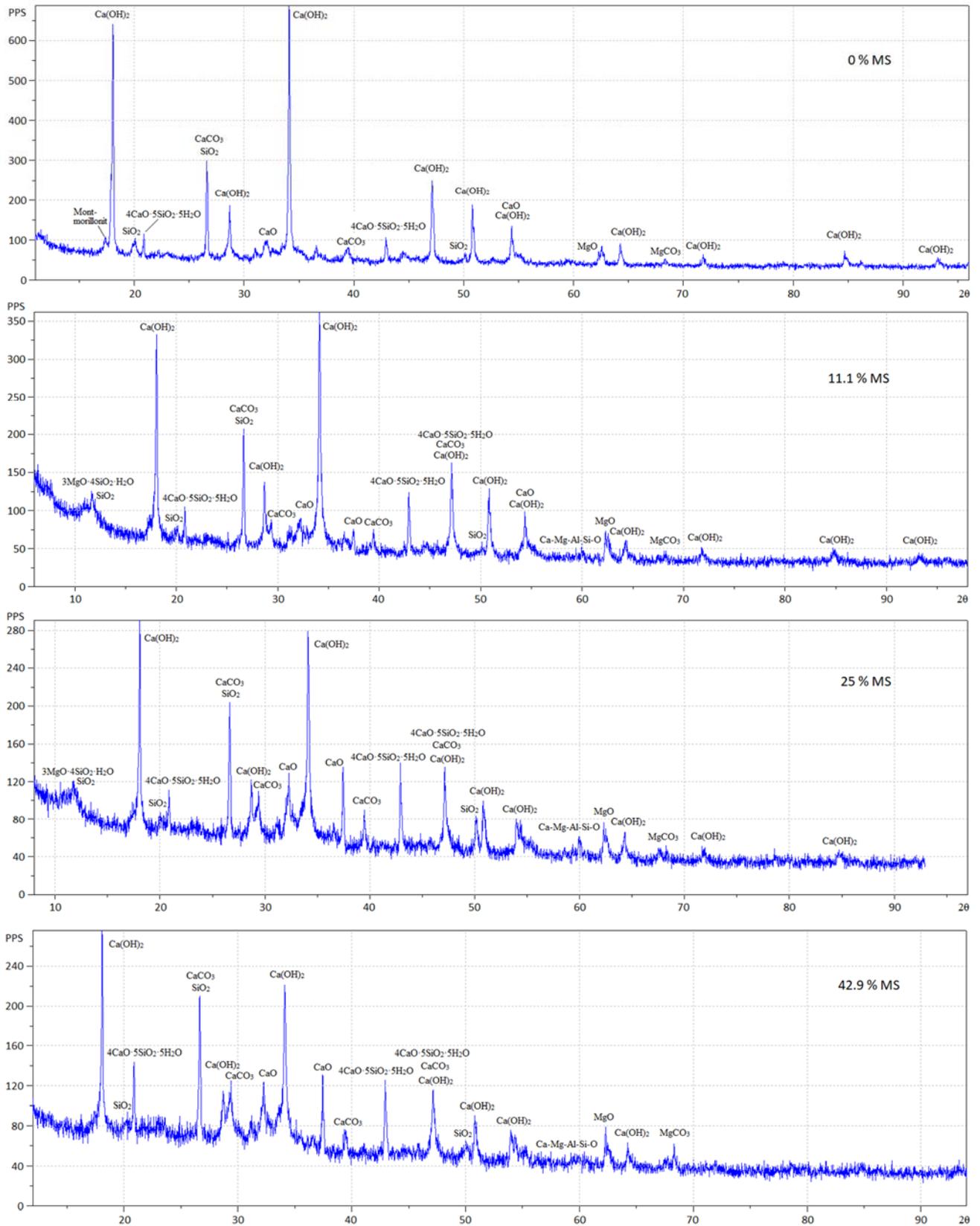


Рисунок 2.11 - Рентгенограммы образцов зольного камня с добавкой микрокремнезема в количестве 0; 11,1; 25,0 и 42,9 % от массы золы

В пробе гидратированной золы без добавок из кристаллогидратов присутствует, главным образом,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и незначительное количество гидросиликата кальция состава  $4\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , относящегося к тобермориту.

Продукты гидратации золы в присутствии 11,1 % микрокремнезема (MS) представлены меньшим содержанием гидроксида кальция и бóльшим количеством тоберморита. При содержании MS 25 и 42,9 % в небольшом количестве идентифицируются также гидросиликаты  $1,5\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$  и  $2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ . В присутствии MS рентгенограммы показали наличие в пробах непогашенной CaO. Соотношение между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , свободной CaO и гидросиликатами в зависимости от содержания микрокремнезема представлено в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Соотношение между кристаллическими фазами

Вид пробы	Содержание фаз, %		
	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CaO	Гидросиликаты
Зола уноса исходная	-	100	-
Зола уноса после гидратации	96,2	-	3,8
Зола уноса +11,1 % MS после гидратации	80,1	8,1	11,8
Зола уноса +25 % MS после гидратации	67,8	17,9	14,3
Зола уноса +42,8 % MS после гидратации	63,3	18,2	18,6

Как видно из таблицы 2.5 свободная известь в золе без добавок за 11 суток полностью гидратируется. Кроме гидроксида кальция образуется также небольшое количество тоберморита  $4\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  в результате гидратации  $2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$ , присутствующего в золе. В присутствии микрокремнезема гидратация извести происходит не полностью. В системе остается от 8,1 до 18,2 % непогашенной извести. Чем больше к золе добавлено MS, тем больше образуется гидросиликатов и тем больше количество непрореагировавшего остатка свободной CaO, тем меньше содержится в системе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Данное обстоятельство объясняет, почему образцы воздушного твердения без признаков расширения, помещенные в воду, испытывают разбухание и растрескивание. По всей видимости, при введении микрокремнезема возникает нехватка воды для полного погашения свободной

известии, так как вода в этом случае расходуется дополнительно на образование гидросиликатов кальция, количество которых растет с увеличением дозировки MS.

Результаты РФА подтверждаются данными дифференциально-термического анализа. На рисунке 2.12 представлены кривые ДТА для золы уноса Берёзовской ГРЭС до (кривая 1) и после (кривая 2) гидратации в течение 11 суток.

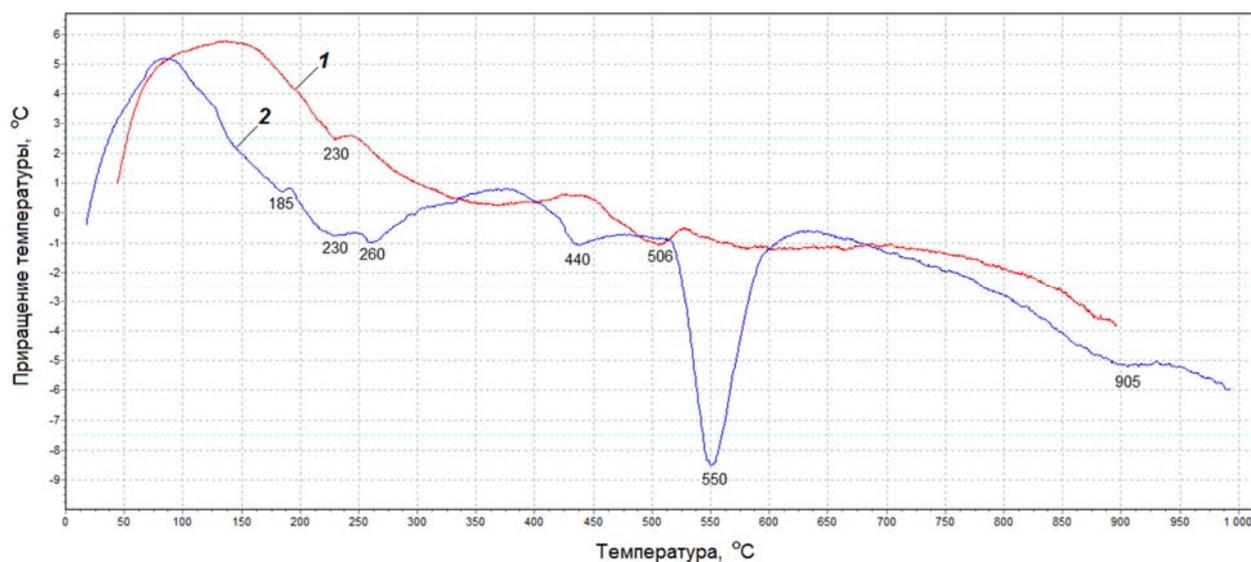


Рисунок 2.12 - Кривые ДТА золы уноса до (1) и после (2) гидратации

На термограмме 1 не наблюдается существенных термоэффектов. Небольшие эндотермические пики при 230 и 506 °C могут быть приписаны потере воды частично гидратированными при хранении, соответственно, гидросиликатом и гидроксидом кальция. Глубокий эндотермический эффект при 550 °C свидетельствует о большом количестве  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образовавшегося в результате гидратации свободной извести. Широкая эндотермическая впадина в интервале 150-370 °C с отдельными мелкими эффектами, вероятно, связана с потерями адсорбционной воды различными гидратами. Эндотермический эффект при 440 °C, предположительно, соответствует дегидратации гидросиликата кальция. Неширокую впадину при 905 °C, с высокой долей вероятности, можно отнести к декарбонизации извести.

Термограммы, показанные на рисунке 2.13 характеризуют влияние микрокремнезема на гидратацию золы уноса Берёзовской ГРЭС.

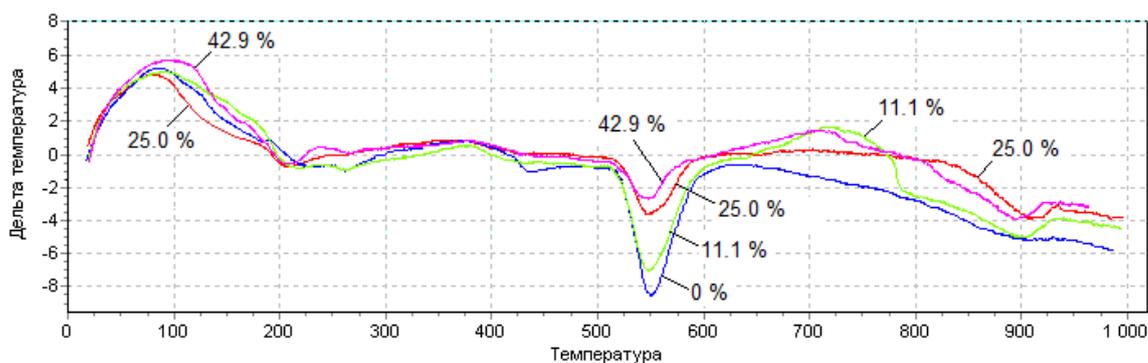


Рисунок 2.13 - Кривые ДТА золы уноса с различным содержанием микрокремнезема

Как видно из рисунка 2.13 с увеличением содержания микрокремнезема уменьшается глубина эндотермического пика при 550 °С, связанного с разложением  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , что подтверждает полученные выше данные РФА.

Кинетику реакции между микрокремнеземом, свободной известью золы уноса и водой можно проследить по кривым тепловыделения смеси при гидратации.

### 2.3.3. Результаты определения тепловыделения

Тепловыделение вяжущего определялось в составе раствора с полифракционным песком на трех образцах-близнецах каждого состава. Показания термопар записывались многоканальным измерителем-регистратором каждые 30 минут. Испытывали 4 состава зольно-песчаного раствора (Q1-Q4) с одинаковым количеством золы и различным содержанием микрокремнезема, составляющим 0, 11.1, 25.0 и 42.9 % от массы золы (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Составы образцов зольно-песчаного раствора

Материалы	Расходы материалов, кг/м <sup>3</sup>			
	Q1	Q2	Q3	Q4
Зола уноса Берёзовской ГРЭС	210	210	210	210
Микрокремнезем МКУ-85	0	23 (11,1 %)	53 (25 %)	90 (42,9 %)
Песок полифракционный	1645	1623	1558	1476
Вода	318	316	327	340
Сумма	2173	2172	2147	2116

Удельное тепловыделение зольно-песчаного раствора в расчете на 1 кг золы при температуре 20 °С в зависимости от содержания микрокремнезема показано на рисунке 2.14.

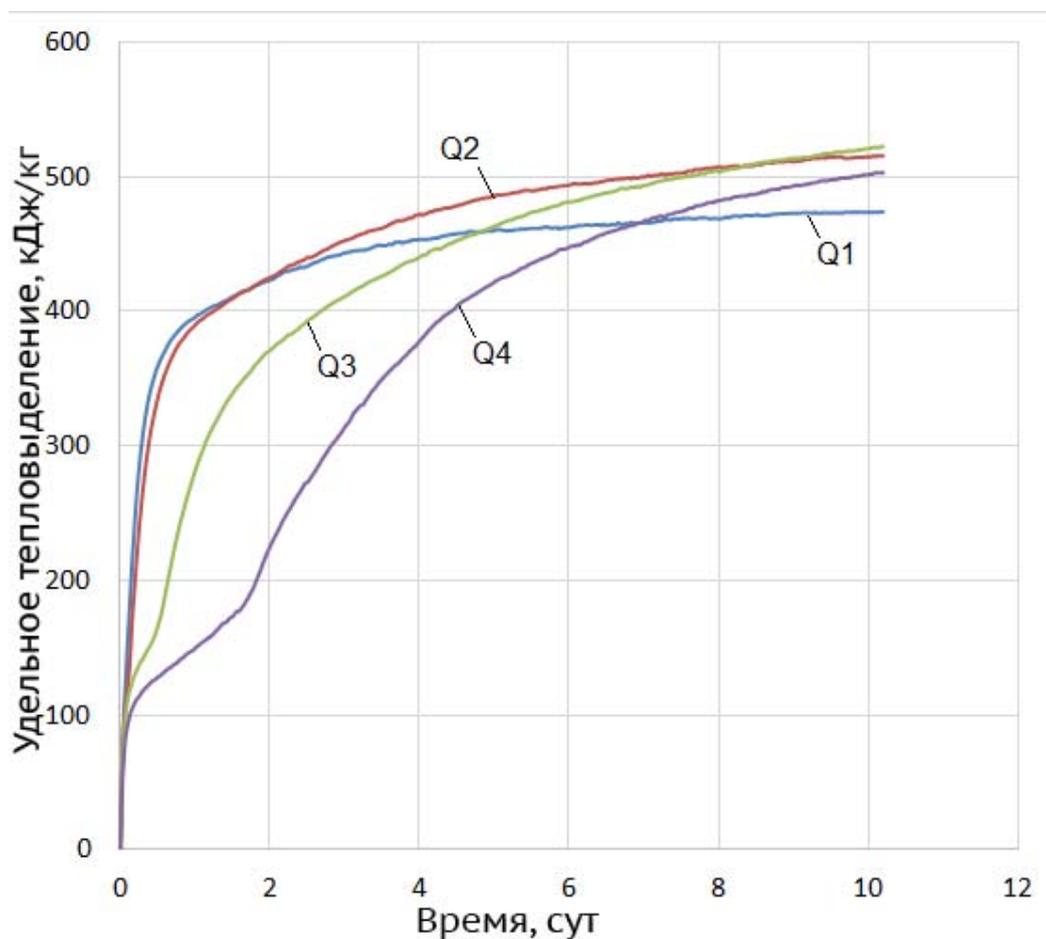


Рисунок 2.14 - Удельное тепловыделение зольно-песчаного раствора в расчете на 1 кг золы при температуре 20 °С в зависимости от содержания добавки микрокремнезема: Q1 – без добавки; Q2 – 11,1 %; Q3 – 25 %; Q4 – 42,9 %;

Чистая зола уноса (кривая Q1) реагирует с водой очень бурно благодаря гашению свободной извести. Примерно через 1 сутки после интенсивного тепловыделения процесс резко замедляется и к четвертым суткам приходит к своему завершению. В присутствии 11.1 % микрокремнезема (кривая Q2) скорость реакции в начальном периоде до 1 суток незначительно уступает чистой золе, но затем начинает превышать последнюю и к 10 суткам тепловыделение примерно на 9 % выше, чем у состава Q1. В случае содержания MS 25 и, тем более 42,9 % наблюдается резкое замедление процесса тепловыделения, а, следовательно, и реакции гашения извести, и к 11 суткам свободная известь еще остается в системе

непогашенной, как мы видели по результатам РФА. Однако далее скорость реакции возрастает и к концу опыта она выше, чем у состава Q2. Наблюдается следующая закономерность – чем выше содержание в золе микрокремнезема, тем ниже скорость тепловыделения в начальном периоде твердения (до 0,5-1,5 суток) и, тем выше в дальнейшие сроки.

Опыты по тепловыделению требуют определенного времени на приготовление смеси, подготовку образцов, установку образцов в термосы и т.п. В нашем случае это время составляло около 30 минут. В этот период происходит интенсивное тепловыделение, однако, в опыте оно не фиксируется. Поэтому были произведены дополнительные испытания, состоящие в следующем. На дно стеклянного термоса (сосуда Дьюара) помещали 30 г тщательно перемешанной сухой смеси золы и микрокремнезема. Над этой смесью в термосе размещали закрытую емкость с водой, подвешенную на тонкой нити. Количество воды брали из расчета  $V/T=0,65$ . Закрытый термос и стеклянный термометр с ценой деления  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  выдерживали 1 сутки в помещении с постоянной температурой. Перед началом опыта измеряли температуру сухой смеси в термосе и принимали ее за начальную температуру образца. Сухую смесь в термосе затворяли подготовленной водой и быстро перемешивали концом термометра, фиксируя температуру. Первый отсчет снимали через 30 с от момента затворения. Каждый состав испытывали дважды и брали среднее значение. Результаты измерения температуры зольно-кремнеземистого теста приведены на рисунке 2.15, из которого видно, что с увеличением содержания кремнезема скорость гидратации извести резко падает, начиная с первого момента реакции. Здесь наблюдается та же закономерность влияния микрокремнезема, что и в начальном периоде твердения зольно-песчаного раствора (рисунок 2.15).

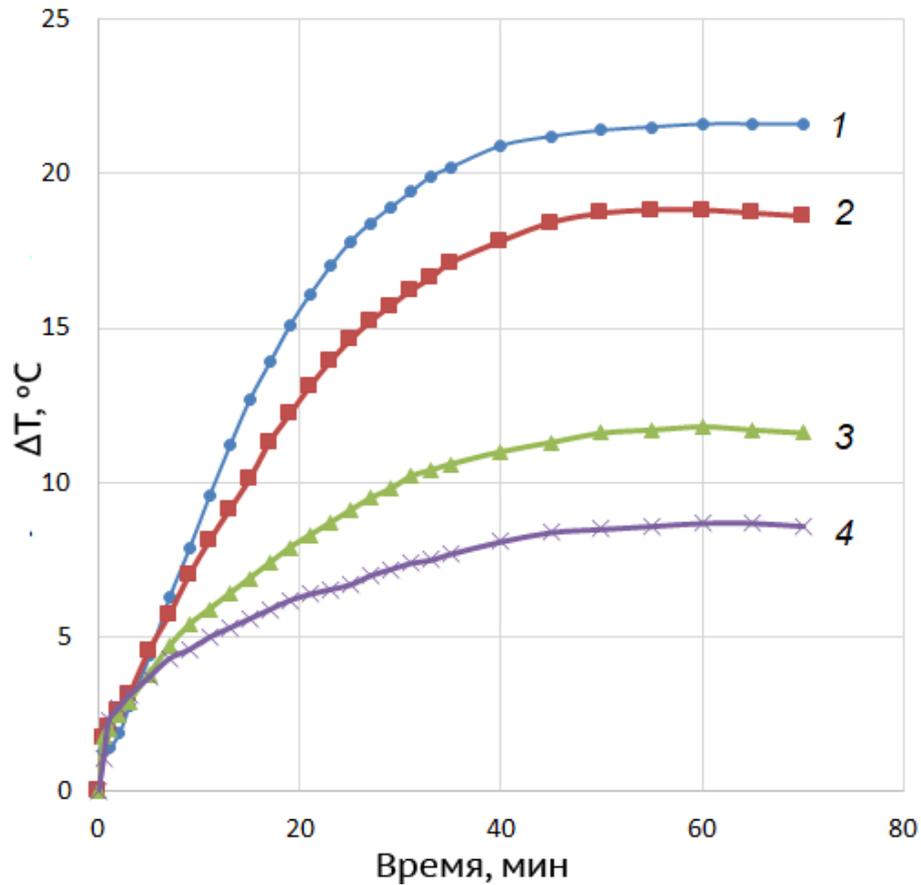


Рисунок 2.15 - Повышение температуры пасты в зависимости от содержания микрокремнезема: 1 – 0%; 2 – 11,1%; 3 – 25%; 4 – 42,9%

### 2.3.4. Определение предела прочности при сжатии

Результаты определения предела прочности при сжатии образцов приведены на диаграмме рисунке 2.16.

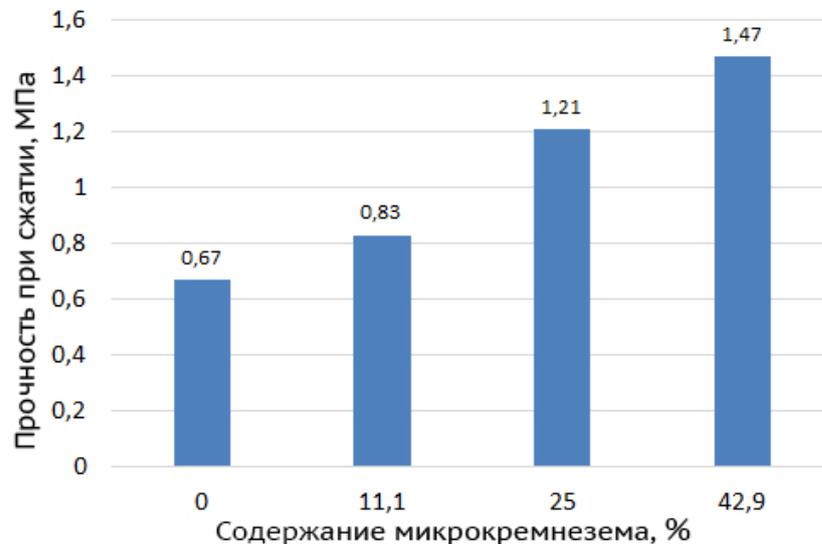


Рисунок 2.16 - Результаты определения предела прочности при сжатии образцов зольно-песчаного раствора Q1-Q4

Из рисунка 2.16 видно, что прочность образцов растет с увеличением содержания микрокремнезема. В среднем на каждый процент введенного микрокремнезема предел прочности при сжатии возрастает на 2,7 %. Увеличение прочности золы при добавлении к ней 42,9 % микрокремнезема составило 119 %, т.е. более, чем в 2 раза. Следует отметить низкую прочность испытанных составов зольно-песчаного раствора, однако, надо иметь в виду, что соотношение зола уноса/песок в этих растворах составляет от 1:7 до 1:7,8.

## 2.4. Подбор добавок, улучшающих свойства высококальциевой золы уноса, для использования в бетонных наружных стеновых панелях

### 2.4.1. Влияние добавок электролитов на расширение зольного теста

Для повышения прочности и водостойкости вяжущего из золы был опробован ряд добавок в их сочетании с микрокремнеземом (таблица 2.3). Результаты испытаний приведены на рисунке 2.17.

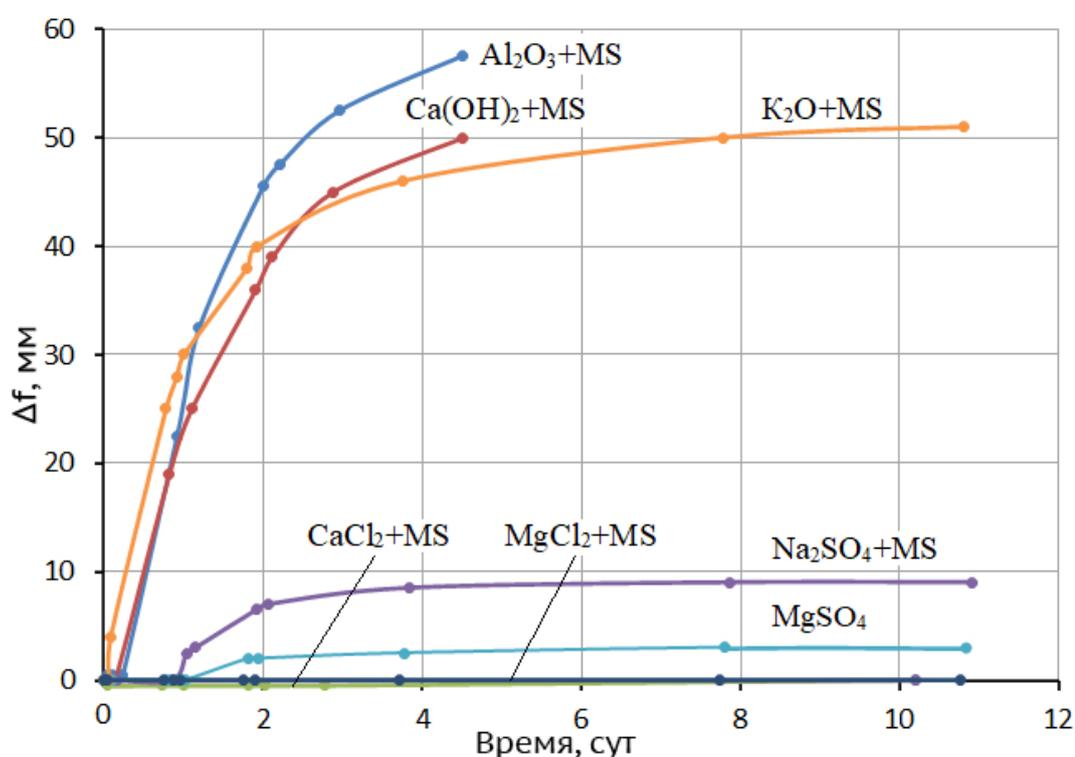


Рисунок 2.17 - Влияние добавок электролитов в комплексе с микрокремнеземом (MS) на расширение зольного теста

Высокое расширение составов с добавкой  $Al_2O_3$ , добавкой  $Ca(OH)_2$  и добавкой  $K_2O$  связано с реакциями нейтрализации микрокремнезема, с образованием в случае оксида алюминия и MS соединения  $Al_2(SiO_3)_3$ , в двух других случаях – гидросиликатов калия и кальция.

Хорошие результаты показали добавки хлористых и сернокислых солей. Расширение золы с этими добавками оказалось в пределах нормы, принятой для цемента (10 мм). Особенно высокий эффект показали хлориды – практически полное отсутствие расширения. Как будет показано ниже, такое действие хлоридов сохраняется и при водной выдержке образцов. В связи с действием этих солей напрашивается гипотеза о том, что дополнительное сильное расширение и растрескивание образцов, возникающее при помещении их в воду вызвано образованием этtringита, так как известно, что присутствие хлоридов замедляет или прекращает расширение бетона под действием сульфатных растворов. Это связано с повышением растворимости гидросульфатоалюмината кальция в растворах хлоридов. Действительно, при твердении на воздухе образование этtringита ограничено недостатком воды. При помещении образцов в воду это ограничение снимается.

#### **2.4.2. Влияние добавок ускорителей твердения на прочность при сжатии образцов из зольного теста**

Для определения прочности из зольно-кремнеземного вяжущего (зола уноса + 30,4 % микрокремнезема от массы золы) с добавками минеральных солей (1,5-11,8 % от массы золы) были приготовлены образцы кубической формы, размерами 32x32x32 мм, по 6 образцов каждого состава. Распалубка образцов производилась через двое суток. Сразу после распалубки три образца из 6 помещали в воду, а три других оставляли твердеть на воздухе в лаборатории при температуре  $(20 \pm 2)^\circ C$  и относительной влажности 45-55 %. Все образцы были испытаны на прочность при сжатии через 7 суток с момента изготовления. Перед испытанием визуально оценивали состояние образцов – наличие расширения и трещин. Добавки с расширением более 5 мм в дальнейшем не применялись. Дополнительно к

добавкам с низким расширением ( $\text{CaCl}_2$ ;  $\text{MgSO}_4$ ;  $\text{MgCl}_2$ ) испытывались  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , как сильный ускоритель, и  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , как ингибитор коррозии. Влияние этих добавок на расширение и растрескивание оценивалось визуально по внешнему виду образцов. Результаты испытаний приведены ниже в таблицах 2.7 - 2.13.

Как показали испытания добавка  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  не обеспечила относительно высокой прочности, но показала весьма высокую способность смеси к расширению и растрескиванию и в сухих условиях и, особенно, при замачивании. За 5 суток пребывания в воде образцы полностью расплылись (таблица 2.7).

Таблица 2.7 - Прочность при сжатии образцов с добавкой  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Показатели	Составы			
	26	27	28	30
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , % от массы золы	11,8	8,2	4,7	1,5
Вода, % от массы золы	74,5	72,2	56,5	54,8
Расширение и трещины при воздушном твердении	+	+	++	+++
Расширение и трещины при твердении в воде	+++++	+++++	+++++	+++++
Предел прочности при сжатии образцов воздушного твердения, МПа	5,6	4,2	3,8	5,9
Предел прочности при сжатии образцов, твердевших в воде, МПа	0	0	0	0
Коэффициент размягчения	0	0	0	0

(+) - незначительные трещины и/или расширение.  
 (+++++) – полное разрушение образцов

Образцы с  $\text{MgSO}_4$ , имели прочность практически такую же, как составы с  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , но более высокую водостойкость (коэффициент размягчения - от 0.23 до 0.44). Образцы с  $\text{MgSO}_4$ , не имели трещин и расширения в сухом состоянии. Прочность образцов уменьшалась с увеличением дозировки добавки. В связи с этим можно считать, что добавка  $\text{MgSO}_4$  снижает прочность вяжущего. Наибольшую прочность имел состав с содержанием  $\text{MgSO}_4$  1.5 %, однако образцы этого состава, в отличие от остальных, полностью расплылись в воде (таблица 2.8).

Таблица 2.8 - Прочность при сжатии образцов с добавкой MgSO<sub>4</sub>

Показатели	Составы			
	22	23	24	25
MgSO <sub>4</sub> , % от массы золы	11,8	8,2	4,7	1,5
Вода, % от массы золы	53,4	40,6	39,4	38,3
Расширение и трещины при воздушном твердении	нет	нет	нет	нет
Расширение и трещины при твердении в воде	+++	+++	++	+++++
Предел прочности при сжатии образцов воздушного твердения, МПа	5,0	4,4	6,1	8,2
Предел прочности при сжатии образцов, твердевших в воде, МПа	1,2	1,2	2,7	0
Коэффициент размягчения	0,23	0,26	0,44	0

(+) - незначительные трещины и/или расширение.

(+++++) – полное разрушение образцов

Хлористый кальций при дозировках 8.2 и 11.8 % вызвал мгновенное схватывание. В результате укладки в форму загустевшей смеси прочность этих составов оказалась низкой. Однако в воде эти составы не имели трещин и расширения, в отличие от образцов, содержащих 1.5 и 4.7 % CaCl<sub>2</sub>, которые полностью растеклись. В воздушных условиях все образцы сохранили свою форму и сплошность (таблица 2.9).

Таблица 2.9 - Прочность при сжатии образцов с добавкой CaCl<sub>2</sub>

Показатели	Составы			
	31	32	33	34
CaCl <sub>2</sub> , % от массы золы	11,8	8,2	4,7	1,5
Вода, % от массы золы	41,9	40,6	39,4	38,3
Расширение и трещины при воздушном твердении	нет	нет	нет	нет
Расширение и трещины при твердении в воде	нет	нет	+++++	+++++
Предел прочности при сжатии образцов воздушного твердения, МПа	4,6	7,9	8,8	5,8
Предел прочности при сжатии образцов, твердевших в воде, МПа	1,15	1,53	0	0
Коэффициент размягчения	0,25	0,20	0	0

(+) - незначительные трещины и/или расширение.

(+++++) – полное разрушение образцов

Добавка  $MgCl_2$ , введенная совместно с микрокремнеземом, показала относительно высокий результат при сжатии образцов твердевших в сухих условиях в течение 7 дней. Предел прочности при содержании добавки 11,8 % от массы золы составил 15,2 МПа. Однако при помещении образцов в воду прочность резко снизилась до 2,3 МПа, а коэффициент размягчения составил 0,15 (таблица 2.10).

Внешний вид образцов с добавкой  $MgCl_2$  показан на рисунке 2.18, из которого видно, что образцы сухого твердения при малом содержании хлористого магния (1,4 %) подверглись трещинообразованию. В воде образцы этого состава расплылись в жидкообразные массы. Образцы с высоким содержанием  $MgCl_2$  (8,2-11,8 %) выдержали испытание без растрескивания, как на воздухе, так и в воде, однако, в воде имело место небольшое расширение образцов. Поскольку на данном этапе  $MgCl_2$  является лучшим решением было продолжено исследование этой добавки.

Таблица 2.10 - Прочность при сжатии образцов с добавкой  $MgCl_2$

Показатели	Составы			
	18	19	20	21
$MgCl_2$ , % от массы золы	11,8	8,2	4,7	1,5
Вода, % от массы золы	76,8	74,4	72,2	70,1
Расширение и трещины при воздушном твердении	нет	нет	нет	+
Расширение и трещины при твердении в воде	нет	нет	++++	+++++
Предел прочности при сжатии образцов воздушного твердения, МПа	15,2	9,8	8,3	2,9
Предел прочности при сжатии образцов, твердевших в воде, МПа	2,30	1,92	0	0
Коэффициент размягчения	0,15	0,20	0	0

(+) - незначительные трещины и/или расширение.  
 (+++++) – полное разрушение образцов

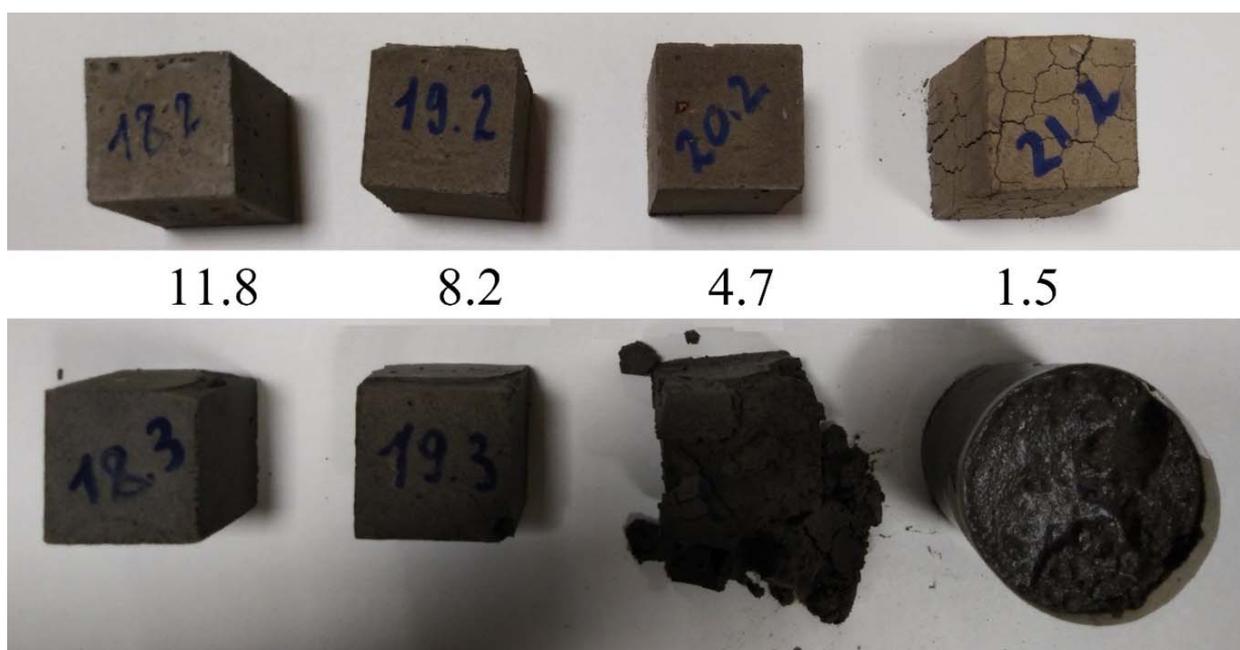


Рисунок 2.18 - Образцы с добавкой  $MgCl_2$  в количестве, указанном на фото в % от массы золы. Верхний ряд – при твердении на воздухе; нижний ряд – при твердении в течение 2 дней в форме и 5 дней в воде

В связи с тем, что хлористые соли вызывают коррозию арматуры было решено использовать совместно с этой добавкой  $Ca(NO_3)_2$  в качестве ингибитора коррозии арматуры. Добавка  $Ca(NO_3)_2$  уступает по прочности хлориду магния, но имеет прочность выше всех других составов (таблица 2.11)

Таблица 2.11 - Прочность при сжатии образцов с добавкой  $Ca(NO_3)_2$

Показатели	Составы			
	35	36	37	38
$Ca(NO_3)_2$ , % от массы золы	11,8	8,2	4,7	1,5
Вода, % от массы золы	41,9	40,6	39,4	38,3
Расширение и трещины при воздушном твердении	нет	нет	нет	нет
Расширение и трещины при твердении в воде	+	++	+++	++++
Предел прочности, МПа /воздушное твердение	10,4	8,8	2,7	3,5
Предел прочности, МПа / твердение в воде	1,15	0,38	0	0
Коэффициент размягчения	0,11	0,04	0	0

(+) - незначительные трещины и/или расширение.

(+++++) – полное разрушение образцов

Нитрат кальция не вызывает растрескивания и расширения при достаточных дозировках (8,2-11,8 %) и сухих условиях твердения, однако, не обеспечивает водостойкости (рисунок 2.19). Коэффициент размягчения составляет 0,04-0,11.

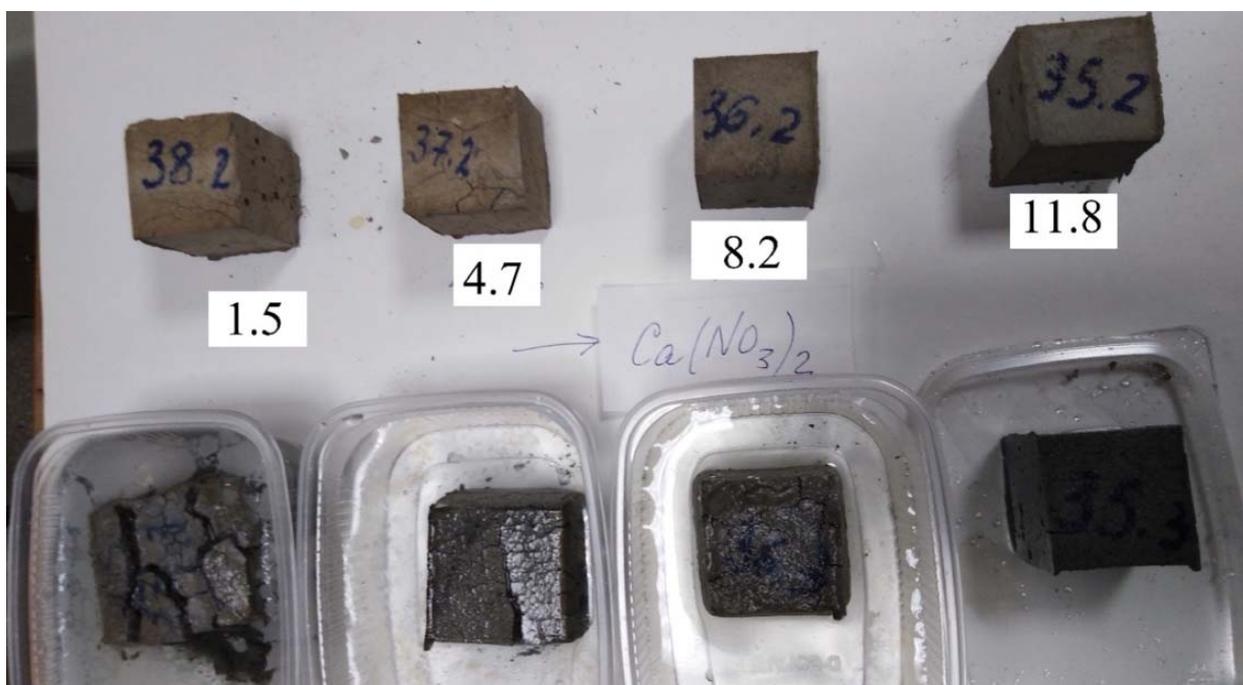


Рисунок 2.19 - Образцы с добавкой  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Верхний ряд – при твердении на воздухе; нижний ряд – при твердении в течение 2 дней в форме и 5 дней в воде

При совместном использовании двух добавок  $\text{MgCl}_2 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  прочность при сжатии оказалась выше, чем при раздельном применении каждой из них. В таблице 2.12 показаны результаты оценки влияния на прочность различного соотношения между  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . При этом суммарное содержание этих солей сохранялось постоянным, равным 11.6 % от массы золы. С увеличением содержания  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и соответствующем уменьшением содержания  $\text{MgCl}_2$  прочность возрастала. Наибольшую прочность имели образцы состава 39, с соотношением  $\text{MgCl}_2 : \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  равным 1:3.8 (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Прочности при сжатии образцов с добавкой  $\text{MgCl}_2 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Показатели	Составы			
	39	40	41	42
1	2	3	4	5
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , % от массы золы	9,2	7,0	4,6	2,4

1	2	3	4	5
MgCl <sub>2</sub> , % от массы золы	2,4	4,6	7,0	9,2
Вода, % от массы золы	52,1	56,1	57,1	57,3
Расширение и трещины при воздушном твердении	нет	нет	нет	нет
Расширение и трещины при твердении в воде	+++	++++	++++	++++
Предел прочности при сжатии образцов воздушного твердения, МПа	16,5	11,1	10,4	9,6
Предел прочности при сжатии образцов, твердевших в воде, МПа	1,53	0,38	0,77	1,15
Коэффициент размягчения	0,09	0,03	0,07	0,12

(+) - незначительные трещины и/или расширение.

(+++++) – полное разрушение образцов

Образцы с добавкой MgCl<sub>2</sub>+Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> при твердении на воздухе сохранили свою целостность и объем. При помещении в воду произошло их растрескивание и расширение (рисунок 2.20).

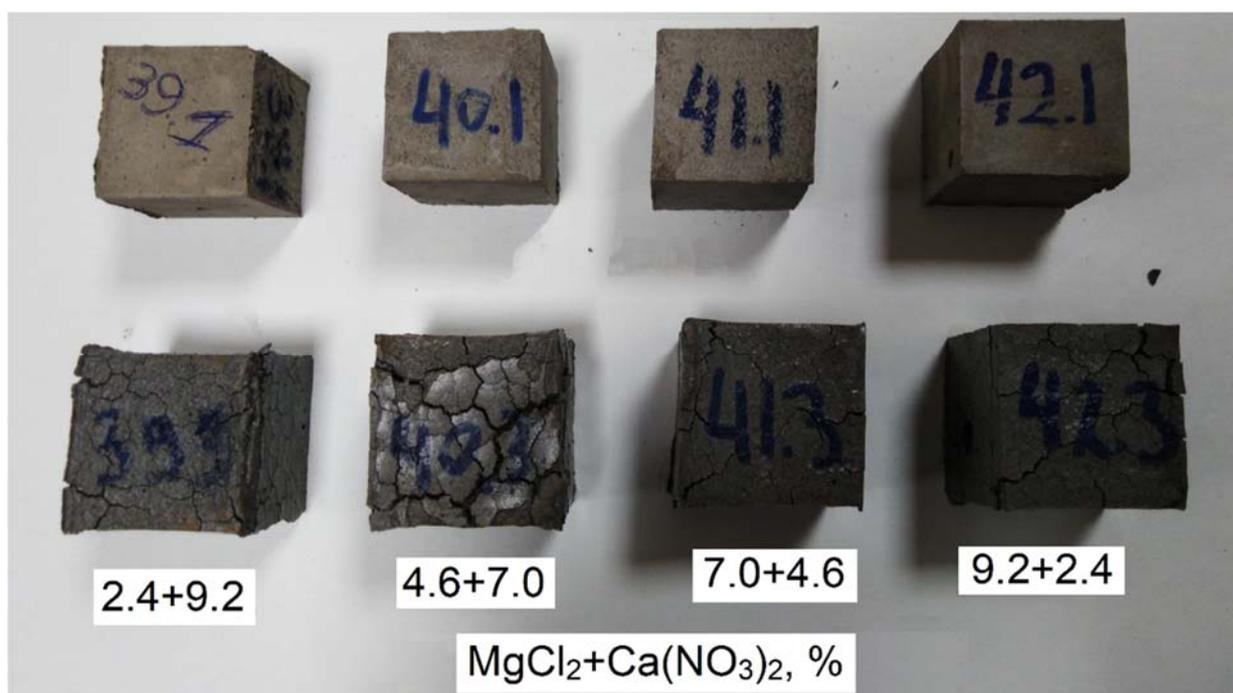


Рисунок 2.20 - Образцы с добавками MgCl<sub>2</sub> и Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> в различном соотношении, указанном на фото в % от массы золы. Верхний ряд – при твердении на воздухе; нижний ряд – при твердении в течение 2 дней в форме и 5 дней в воде

Для сравнительной оценки на рисунке 2.21 приведена гистограмма прочности всех испытанных добавок в зависимости от их дозировки. При малой дозировке 1.5 % максимальную прочность обеспечила добавка MgSO<sub>4</sub>, а

минимальную -  $MgCl_2$ . С увеличением дозировки прочность образцов, содержащих  $MgSO_4$  снижается, а образцов с  $MgCl_2$  возрастает и достигает наибольших значений при дозировках 8,2 и 11,8 %. При этих дозировках относительно высокой прочностью характеризуется состав с добавкой  $Ca(NO_3)_2$ , уступающий только образцам, содержащим  $MgCl_2$ . Сочетание последних двух солей в соотношении 3,8 к 1 позволяет получить синергический эффект, что показывает последний столбик на гистограмме рисунка 2.21. Совместное применение этих добавок позволяет также снизить коррозионную активность хлорида в отношении стальной арматуры.

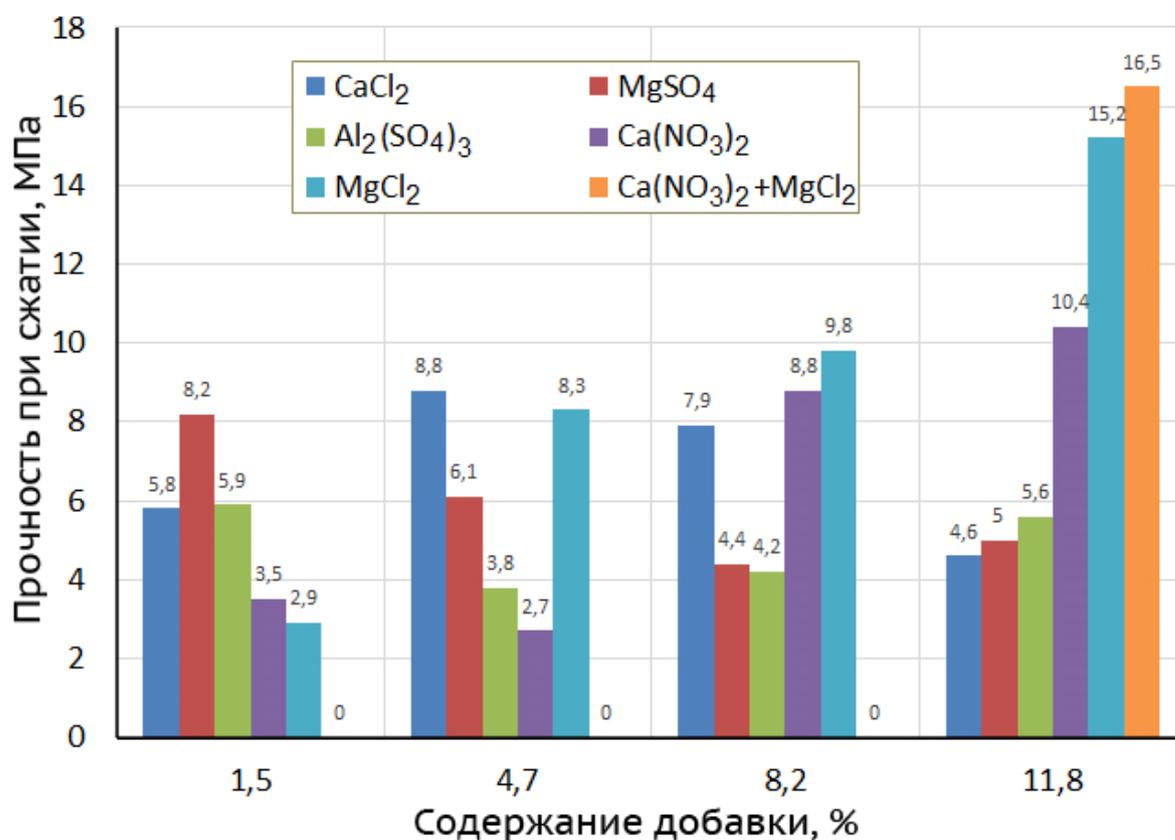


Рисунок 2.21- Предел прочности при сжатии 7-дневных образцов воздушного твердения зольно-кремнеземного вяжущего с добавками минеральных солей

Для оценки кинетики набора прочности и влияния возраста образцов на водостойкость зольно-кремнеземного вяжущего был испытан состава № 39, содержащий комплексную добавку  $MgCl_2+Ca(NO_3)_2$  в соотношении 1:3,8. Все образцы после распалубки на вторые сутки были помещены в пластиковые контейнеры и плотно закрыты крышкой, то есть были изолированы от

окружающего воздуха. Образцы, предназначенные для оценки водостойкости, за 2 дня до испытания на прочность извлекались из контейнера и помещались в воду.

Влияние возраста образцов из зольно-кремнеземного вяжущего с добавками  $MgCl_2+Ca(NO_3)_2$  на предел прочности при сжатии и водостойкость показано в таблице 2.13.

Таблица 2.13 - Прочность при сжатии образцов из зольно-кремнеземного вяжущего с добавками  $MgCl_2+Ca(NO_3)_2$  в разном возрасте

Номер состава	Соотношение $MgCl_2:Ca(NO_3)_2$	Условия при твердении	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сутки		
			7	14	28
39	1:3,8	воздушные	14,3	17,3	27,5
		в воде в течение 2 суток перед испытанием	6,5	12,8	16,5
Коэффициент размягчения			0,45	0,73	0,60

Внешний вид образцов воздушно-сухого твердения с последующим твердением в воде в течение двух суток представлен на рисунке 2.22.

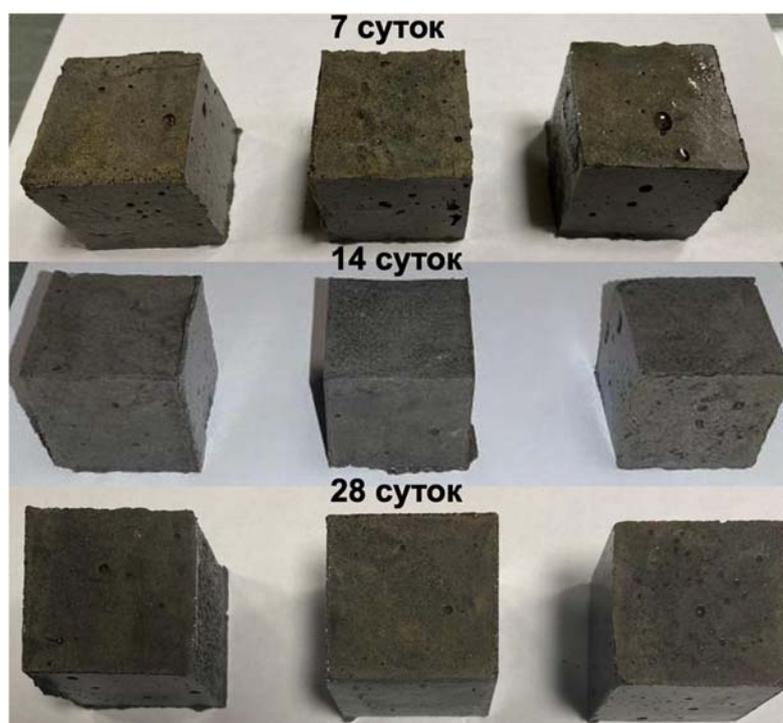


Рисунок 2.22 - Образцы с добавкой  $MgCl_2+Ca(NO_3)_2$  в соотношении 1:3,8

## 2.5. Выводы по главе 2

1. Установлено, что высококальциевая зола уноса Берёзовской ГРЭС благодаря своему химическому составу способна к самостоятельному схватыванию и твердению. Из-за большого количества свободной извести твердение высококальциевой золы уноса сопровождается сильным расширением и растрескиванием, из-за чего эта зола уноса не находит применения в технологии бетона.

2. Осуществлен поиск добавок к золе, которые могли бы предотвратить расширение. Были испытаны в кольцах Ле Шателье следующие вещества: кремниевая кислота  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , микрокремнезем МКУ-85,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – реактив, гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – реактив, метакаолин  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , трепел Фокинского месторождения, жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ , микрофибриллированная целлюлоза. Наибольший эффект получен от кремниевой кислоты и микрокремнезема, а наименьший от жидкого стекла, трепела и микроцеллюлозы.

3. Установлено, что расширение и растрескивание золы уноса Берёзовской ГРЭС можно полностью предотвратить добавкой микрокремнезема в количестве примерно 40 % от массы золы уноса. При меньших значениях наблюдается расширение и, тем большее, чем меньше содержание добавки. Микрокремнезем, позволяя золе нормально твердеть и набирать прочность в воздушных условиях, не обеспечивает отвержденным составам достаточной водостойкости. При помещении в воду образцы разбухают и растрескиваются.

4. Установлено на основании результатов РФА и ДТА, что при отсутствии микрокремнезема свободная известь в золе за 11 суток полностью гидратируется, давая наибольшую степень расширения. В присутствии микрокремнезема гидратация извести к указанному сроку происходит не полностью и расширение уменьшается. В системе остается непогашенная свободная известь. Её количество растет с увеличением содержания микрокремнезема, а содержание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , соответственно, уменьшается. Данное обстоятельство могло бы объяснить низкую водостойкость нехваткой воды для полного погашения свободной извести, так как

вода расходуется дополнительно на образование гидросиликатов кальция, количество которых растет с увеличением дозировки микрокремнезема. Однако данные по экзотермии показывают, что микрокремнезем тормозит гидратацию CaO с первых секунд протекания реакции.

5. Осуществлен поиск добавок к зольно-кремнеземному вяжущему, повышающих прочность и водостойкость образцов. На расширение испытаны  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2$ . Наименьшее расширение показали хлориды и сульфаты. На прочность были испытаны добавки-электролиты, такие как  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Наиболее высокую прочность обеспечили добавки  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , особенно их совместное применение в соотношении  $\text{MgCl}_2 : \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  равном 1 : 3,8. Прочность при сжатии в последнем случае составила за 28 суток 27,5 МПа.

### 3. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНА С КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ БЕЗОБЖИГОВОГО ЗОЛЬНОГО ГРАВИЯ ДЛЯ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

#### 3.1. Характеристика применяемых материалов

Для разработки составов бетонов с крупным заполнителем из зольного гравия используются следующие материалы:

1. Портландцемент СЕМ I 42,5 N производства ЗАО «Мордовцемент». Состав цемента представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Состав цементов, %

Минералогический состав, %				Содержание примесей, %				S <sub>уд</sub> , см <sup>2</sup> /г
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	R <sub>2</sub> O	
60,1	18,3	5,27	13,4	1,12	2,73	0,005	0,77	3420

2. Песок для строительных работ (M<sub>к</sub>=2,15).

3. Микрокремнезем МКУ-85.

4. Безобжиговый зольный гравий на основе золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5, изготовленный на кафедре материаловедения в строительстве ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Состав смеси для производства гранул представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Состав безобжигового зольного гравия, %

Зола уноса, %	Портландцемент ЦЕМ 1 42,5Б, %	Сульфат натрия, % от массы цемента	Вода, % от массы твердых компонентов
88-90	10-12	2	22

Гравий имеет серый цвет, округлую форму и шероховатую поверхность. Внешний вид безобжигового зольного гравия представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 - Безобжиговый зольный гравий на основе золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5

5. Высококальциевая зола уноса Березовской ГРЭС (см. п. 2.1). Средний химический состав золы представлен в таблице 2.1.

6. Добавки к высококальциевой золе уноса Березовской ГРЭС:  $MgCl_2$  и  $Ca(NO_3)_2$ , применяемые для нейтрализации расширения золы уноса и повышения физико-механических характеристик зольного гравия на основе данной золы.

### **3.2.Методика исследований**

Для подбора составов бетонов были проведены экспериментальные исследования традиционных компонентов бетонной смеси: песка, цемента и суперпластификаторов, исследования крупного заполнителя в виде безобжигового зольного гравия на основе золы Новосибирской ТЭЦ-5, разработка и последующие исследования зольного гравия на основе высококальциевой золы Березовской ГРЭС.

#### **3.2.1. Испытания традиционных компонентов бетонной смеси для производства наружных стеновых панелей**

*Испытания песка* проведены в соответствии с ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Определение зернового состава песка проведено путем отсева песка на стандартном наборе сит, было испытано 3 навески песка.

Содержание глины в комках определено путем отбора частиц, отличающихся от зерен песка вязкостью. Содержание пылевидных и глинистых частиц определено по разности массы песка до и после отмучивания частиц крупностью до 0,05 мм. Было испытано 3 пробы песка.

Истинная плотность песка получена путем определения объема дистиллированной воды, вытесненной высушенной до постоянной массы пробы песка из пикнометра при кипячении. Насыпная плотность определена по массе и объему высушенной до постоянной массы пробы, насыпанной в литровый сосуд без уплотнения с высоты 10 см от верхнего края сосуда. Для определения истинной плотности и насыпной плотности было испытано 2 навески песка на каждый вид испытания.

*Испытания цемента* проведены в соответствии с ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Определение нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания цемента проведено с помощью прибора Вика. За нормальную густоту цементного теста принимали консистенцию, при которой пестик прибора, погруженный в течение 30 секунд в заполненное цементным тестом кольцо, не доходит на 5-7 мм до пластинки, на которой установлено кольцо. Для определения начала схватывания длинную иглу прибора Вика погружали в цементное тесто через каждые 10 мин, для определения конца схватывания в тесто погружали короткую иглу через каждые 30 мин. За начало схватывания принимали время от начала затворения цемента до момента, когда длинная игла при проникновении в цементное тесто не доходит до пластинки на 3-5 мм. За конец схватывания принимали время от начала затворения цемента до момента, когда короткая игла проникает в цементное тесто не более чем на 0,5 мм. Для определения нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания цемента испытано по 3 пробы на каждый вид испытания.

Равномерность изменения объема цемента определено как разность расстояний между индикаторными иглами кольца Ле-Шателье, заполненного цементным тестом нормальной густоты, до и после кипячения в воде в течение 3 часов. Для определения расширения образцов было использовано 2 образца.

Тонкость помола цемента определяли путем просеивания через сито № 009, остаток на сите взвешивали и выражали в процентах к начальной массе цемента. Для определения тонкости помола было испытано 3 пробы цемента.

Определение предела прочности при изгибе и сжатии проведено на образцах-балочках размерами 40x40x160 мм, выполненных из цементного раствора. Образцы испытывались в возрасте 2 и 28 суток. На растяжение при изгибе испытано по 3 образца и на осевое сжатие - по 6 образцов на каждый указанный возраст.

*Проверка эффективности суперпластификаторов* была проведена в цементно-песчаном растворе состава 1:3, В/Ц=0,50 с эталонным песком Вольского месторождения. Изготовление раствора производилось согласно ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Добавка суперпластификаторов вводилась сверх суммарного количества компонентов. Действие добавок оценивалось по расплыву конуса Хегерманна после 15 падений на встряхивающем столике. Измерения проводились сразу после приготовления растворной смеси и спустя 2 часа.

### **3.2.2. Испытания безобжигового зольного гравия как крупного заполнителя в бетоне для наружных стеновых панелей**

*Испытания безобжигового зольного гравия Новосибирской ТЭЦ-5* были проведены с целью определения его основных физико-механических характеристик для производства аналогичного гравия из высококальцевой золы уноса на основе разработанного вяжущего вещества (см. п. 3.6). Испытания безобжигового зольного гравия проведены в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Истинная плотность безобжигового зольного гравия получена путем определения объема дистиллированной воды, вытесненной заполнителем из пикнометра при кипячении. Насыпная плотность определена по массе и объему высушенной до постоянной массы пробы, насыпанной в сосуд объемом 5 л без уплотнения с высоты 10 см от верхнего края сосуда. Среднюю плотность зерен крупного заполнителя определяли гидростатическим методом по разности масс контейнера с навеской до и после насыщения ее водой при взвешивании в воде и на воздухе. Для определения истинной плотности, насыпной и средней плотностей было испытано 2 навески безобжигового зольного гравия на каждый вид испытания.

Водопоглощение по массе безобжигового зольного гравия определено по разности масс навески до и после насыщения ее водой в течение 1 ч. Для определения водопоглощения по массе было испытано две навески безобжигового зольного гравия. Водопоглощение по объему безобжигового зольного гравия вычислено по предварительно установленному значению средней плотности зерен безобжигового зольного гравия по формуле:

$$V_o = V_m \cdot \frac{p_k}{p_v}, \quad (3.1)$$

где  $p_k$  - средняя плотность зерен безобжигового зольного гравия ( $\text{г/см}^3$ );  $p_v$  — плотность воды, равная  $1 \text{ г/см}^3$ ;  $V_m$  - водопоглощение по массе безобжигового зольного гравия за 1 ч (%).

Определение зернового состава безобжигового зольного гравия проведено путем его отсева на стандартном наборе сит, было испытано 2 навески песка.

Прочность при сдавливании в цилиндре безобжигового зольного гравия определена по нагрузке, соответствующей погружению пуансона на 20 мм в слой испытываемой пробы заполнителя со скоростью 0,5— 1,0 мм/с. Для определения прочности при сдавливании в цилиндре было испытано 2 пробы безобжигового зольного гравия.

Морозостойкость определена по потерям массы навески безобжигового зольного гравия до и после проведения 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

Истинная пористость зерен безобжигового зольного гравия (полная пористость) вычислена по формуле:

$$P_0 = \left(1 - \frac{p_k}{p}\right), \quad (3.2)$$

где  $p_k$  - средняя плотность зерен безобжигового зольного гравия ( $\text{г/см}^3$ );  $p$  — истинная плотность зерен безобжигового зольного гравия ( $\text{г/см}^3$ ).

Открытая пористость зерен безобжигового зольного гравия (доля капиллярных пор от всего объема) численно приравнена к водопоглощению по объему. Замкнутая пористость (доля замкнутых пор от всего объема) вычислена как разность между истинной пористостью и открытой пористостью.

Гигроскопичность зерен безобжигового зольного гравия определено по разности масс навески до и после нахождения при 100% влажности в течение 120 суток. Для определения гигроскопичности было испытано две навески безобжигового зольного гравия.

*Безобжиговый зольный гравий Березовской ГРЭС* был произведен из высококальциевой золы уноса, микрокремнезема и комплексной добавки  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Состав вяжущего для получения гранул представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Состав вяжущего для получения гранул, мас. %

Зола уноса	Микрокремнезем	$\text{MgCl}_2$	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
64,6	27,8	1,6	6

Золу уноса и микрокремнезем отвешивали в определенном количестве и перемешивали вручную до получения однородной смеси. Добавки  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  переводили в раствор. Смесь из золы уноса и микрокремнезема частично увлажняли раствором  $\text{MgCl}_2$  и раствором  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , перемешивали в течение 2 минут и выгружали на тарель гранулятора (рисунок 3.2) диаметром 0,7 м и высотой борта 0,15 м, при угле наклона тарели  $55^\circ$ . Начальную скорость вращения 25 об/мин уменьшали на 3 об/мин через 2-3 минуты после начала грануляции. Скорость вращения 22 об/мин поддерживали в течение 4 минут, оставшееся время скорость вращения составляла 18-20 об/мин.



Рисунок 3.2 - Внешний вид лабораторного гранулятора

Окомковывание проводили в течение 6-8 минут. В процессе окомковывания смесь дополнительно увлажняли через распылительное устройство. После завершения грануляции смеси полученные гранулы выгружали и подвергали воздушно-влажному хранению в течение 28 суток. Внешний вид безобжигового зольного гравия представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Безобжиговый зольный гравий на основе золы уноса Березовской ГРЭС

Произведенный зольный гравий имел серый цвет, округлую форму и шероховатую поверхность. Для оценки использования безобжигового зольного гравия на основе высококальциевой золы уноса в качестве крупного заполнителя в бетоне через 28 дней воздушно-влажного хранения были определены его физико-механические свойства. Экспериментальные исследования безобжигового зольного гравия Березовской ГРЭС аналогичны экспериментальным исследованиям безобжигового зольного гравия Новосибирской ТЭЦ-5.

### **3.2.3. Подбор состава и испытания бетона для наружных стеновых панелей**

*Подбор состава бетона* осуществлялся согласно ГОСТ 27006-86 «Бетоны. Правила подбора состава». Предварительно расчетным путем были вычислены параметры состава бетона. Затем полученные параметры корректировались путем пробных замесов.

Было подобрано два состава бетонов с безобжиговым зольным гравием на основе золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5. В один из составов добавляли сухой зольный гравий, в другой состав - зольный гравий, предварительно насыщенный водой. Предварительное насыщение водой зольного гравия оказало положительное влияние на физико-механические свойства бетона, как будет показано далее, поэтому следующие составы с зольным гравием на основе золы уноса Березовской ГРЭС изготавливались с водонасыщенными гранулами. Был подобран состав с безобжиговым зольным гравием на основе золы уноса Березовской ГРЭС. В дополнение было исследовано влияние тепловой обработки зольного гравия на физико-механические свойства бетона. Для этого зольный гравий после 7 суток воздушного хранения подвергали пропариванию в течение 8 часов при температуре 80 °С. После проводилось сравнение образцов бетона, изготовленного с гранулами после тепловой обработки, и образцов бетона с использованием гранул после 28 суток воздушного хранения.

*Испытания бетона* проводились с целью определения прочности при сжатии, прочности на растяжение при изгибе, коэффициента температурного линейного расширения, тепловыделения, модуля упругости и деформации усадки.

Прочность бетона определялась на образцах-кубах 70,7x70,7x70,7 мм согласно ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Снятие формы с образцов происходило через 24 часа после их изготовления. До испытания образцы хранились в камере при относительной влажности воздуха ( $95\pm 5\%$ ) и температуре ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ). Образцы каждого состава, в количестве 3 штук на одно испытание, были испытаны с помощью прессы гидравлического ПГМ-1000МГ4. Значение предела прочности при сжатии с помощью масштабного коэффициента приводилось к прочности образцов базового размера 150x150x150 мм.

Предел прочности на растяжение при изгибе определялся на образцах-призмах квадратного сечения размером 40x40x160 мм согласно ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».

Коэффициент температурного линейного расширения определялся на дилатометре при одновременном измерении изменения длины и температуры испытуемого образца. Испытание проведено на двух образцах-призмах размерами 70x70x280 мм.

Тепловыделение бетона определялось термосным методом при начальной температуре  $20^\circ\text{C}$  и расчетом приводилось к изотермическому режиму твердения при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Образцы для испытаний цилиндрической формы, объемом 0,5 л, изготавливались в алюминиевом стаканчике массой около 15 г. Ход эксперимента и методика расчета подробно представлена в пп. 2.2.3-2.2.4.

Модуль упругости определялся по ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» на образцах-призмах размерами 70x70x280 мм. Измерение продольных деформаций производилось на базе 18 см со смещением 5 см от оснований образцов-призмы. Индикаторы часового типа ИЧ-1 0,001 для измерения

продольных деформаций были установлены по четырем граням образца на металлических рамках, закрепленных на образце винтами (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 - Испытание на модуль упругости

Деформация усадки образцов бетона определялась в соответствии с ГОСТ 24544-81 «Методы определения деформаций усадки и ползучести». Были испытаны образцы с воздушно-сухими гранулами и образцы с водонасыщенными гранулами на деформацию усадки на воздухе при относительной влажности воздуха  $(60 \pm 5) \%$  и температуре  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Измерительное устройство показано на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 - Испытание на деформацию усадки

### 3.3. Результаты испытаний традиционных компонентов бетонной смеси для наружных стеновых панелей

#### 3.3.1. Результаты испытания песка

Результаты испытаний зернового состава песка представлены в таблице 3.4.

По зерновому составу песок удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и относится к среднему по крупности песку 2 класса с модулем крупности 2,15 (норма 2-2,5). Содержание зерен крупнее 10 мм – 1,06 % (норма  $\leq 5$ ); содержание зерен крупнее 5 мм – 3,69 % (норма  $\leq 15$ ); полный остаток на сите 0,63 – 37,3 % (норма 30-45); Содержание зерен менее 0,16 мм – 11,3 % (норма  $\leq 15$ ).

Таблица 3.4 - Зерновой состав песка

Размер отверстий сит, мм	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0	Сумма
Остаток, г. Проба 1	47,5	35,9	159,3	259,2	445,3	885,2	504,1	288,1	2624,6
Остаток, г. Проба 2	22,5	95,7	22,5	305,8	698,2	922,2	400,9	301,5	2769,3
Остаток, г. Проба 3	14,0	76,6	139,5	323,9	488,8	620,2	551,8	307,7	2522,5
Остаток, г. Среднее	28,0	69,4	107,1	296,3	544,1	809,2	485,6	299,1	2638,8
Остаток, %	1,06	2,63	4,06	11,23	20,62	30,67	18,40	11,33	100,0
Частные остатки, %		0	4,21	11,66	21,41	31,84	19,11	11,77	100,0
Полные остатки, %		0	4,21	15,87	37,28	69,12	88,23	100,00	215
Проходы, %		100	95,79	84,13	62,72	30,88	11,77	0,00	-
<b>Модуль крупности</b>									<b>2,15</b>

Результаты испытаний истинной плотности песка представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Истинная плотность зерен песка

№ пробы	Масса песка, г	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	29,24	2785
2	29,34	2795
Среднее		2790

Среднее значение истинной плотности зерен песка составляет 2790 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты испытаний насыпной плотности песка представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Насыпная плотность зерен песка

№ пробы	Масса, г	Объем, см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	1605	1000	1605
2	1596	1000	1596
Среднее			1600

Среднее значение насыпной плотности зерен песка составляет 1600 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты испытаний на определение содержания пылевидных и глинистых частиц песка и содержания глины в комках представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Пылевидные, глинистые частицы песка и содержание глины в комках

Номер пробы	Масса до отмучивания, г	Остаток после отмучивания, г	Содержание глины в комках, %	содержание пылевидных и глинистых частиц, %	
				фактическое	норма
1	1000	982,8	Нет	1,72	2,0
2	1000	986,2	То же	1,38	
3	1000	985,2	«	1,48	
Среднее	1000	984,7	«	1,53	

По содержанию глины в комках и пылевидных и глинистых частиц песок удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

### 3.3.2. Результаты испытания цемента

Результаты испытаний по определению нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания цемента представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Нормальная плотность цементного теста и сроки схватывания цемента

Номер пробы	Нормальная плотность, %	Сроки схватывания, ч-мин	
		Начало	Конец
1	25,25	2:55	6:15
2	25,75	2:50	6:30
3	25,25	3:00	6:40
Среднее	25,40	2:55	6:28

По срокам схватывания цемент удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Результаты испытаний на определение равномерности изменения объема цемента представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Равномерность изменения объема цемента

Номер пробы	Расстояние между указателями, мм		Показатель равномерности изменения объема, мм
	До испытания	После испытания	
1	14	15	1
2	12	12	0
Среднее			0,5

По показателю равномерности изменения объема цемент удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Результаты испытаний по определению тонкости помола цемента представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Тонкость помола цемента

Номер пробы	Масса пробы, г		Остаток на сите 009, %
	До просеивания	После просеивания	
1	10,00	8,95	10,5
2	10,00	8,73	12,7
3	10,00	8,81	11,9
Среднее			11,7

По тонкости помола цемент удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Результаты испытаний на определение предела прочности при изгибе и сжатии образцов-балочек из цементного раствора в возрасте 2 суток представлены в таблице 3.11, результаты испытаний образцов в возрасте 28 суток – в таблице 3.12.

Таблица 3.11 - Предел прочности образцов-балочек в возрасте 2 суток

№ п/п	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа
1	1,94	18,0
2	2,06	19,4
3	2,00	19,0
4	-	18,6
5	-	18,3
6	-	19,4
Среднее	<b>2,00</b>	<b>18,8</b>

Таблица 3.12 - Предел прочности образцов-балочек в возрасте 28 суток

№ п/п	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа
1	5,06	48,2
2	4,95	48,4
3	5,16	49,1
4	-	48,8
5	-	49,0
6	-	48,4
Среднее	<b>5,06</b>	<b>48,7</b>

Испытанный цемент удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» и соответствует классу 42,5Н.

### 3.3.3. Оценка эффективности суперпластификаторов

Поскольку заполнители в бетоне влияют на поведение поликарбоксилатов, была проведена проверка эффективности добавок серий Muraplast, Power Floy, Glenium, Sika ViscoCrete в цементно-песчаном растворе состава 1:3, В/Ц=0,50 с эталонным песком Вольского месторождения. Результаты этих испытаний приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 - Эффективность суперпластификаторов

Вид добавки	Содерж. в % от массы цемента	Распływ после 15 встряхиваний, мм		Плотность кг/л	Воздухововлечение, %
		Сразу	Через 2 ч		
Power Flow PF-1130	0,9	220	170	2,13	7,4
Muraplast FK-63.30	0,9	245	205	2,06	10,5
Power Flow PF-2695	0,9	235	215	2,40	0
Power Flow 3100	0,9	210	175	2,38	0
Glenium 430	0,9	205	200	2,41	0
Muraplast FK-88	0,9	220	210	1,94	15,5
Power Flow PF-1180	0,9	206	190	2,10	9,0
Sika ViscoCrete 571	0,9	230	200	2,25	5,9

Согласно данным таблицы 3.12 добавка PF2695 остается наиболее эффективной с точки зрения пластификации бетонной смеси. В то же время эта добавка показала отсутствие воздухововлечения. Следует отметить, что пластифицирующая способность добавки Muraplast FK-63.30 несколько выше, однако это следует отнести к воздухововлечению, повышающему подвижность смеси.

### 3.4. Результаты испытаний безобжигового зольного гравия как крупного заполнителя в бетоне для наружных стеновых панелей

#### 3.4.1. Физико-механические характеристики безобжигового зольного гравия на основе низкокальцевой золы уноса

Безобжиговый зольный гравий на основе низкокальцевой золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5 исследован с целью определения его основных физико-механических характеристик. Определение основных свойств данного заполнителя позволят произвести подобный гравий на бесцементном вяжущем, разработанном на основе высококальцевой золы уноса (см. п. 3.6). Испытания безобжигового зольного гравия проведены в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Результаты испытаний безобжигового зольного гравия представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 - Физико-механические свойства безобжигового зольного гравия на основе низкокальцевой золы уноса

Наименование показателя		Ед. из.	Результаты испытаний
1		2	3
Фракция		мм	5-15
Зерновой состав, остатки на ситах	15 мм	%	4,8
	10 мм		59,3
	5 мм		37,2
	Меньше 5 мм		1,7
Насыпная плотность		кг/м <sup>3</sup>	970
Истинная плотность		г/см <sup>3</sup>	2,50
Средняя плотность		г/см <sup>3</sup>	1,53
Прочность при сдавливании в цилиндре		МПа	6,2
Морозостойкость		-	не менее F25

1	2	3
Гигроскопичность при влажности воздуха 100%	%	8,14
Водопоглощение <b>по массе</b> за 1 час	%	15
Водопоглощение <b>по объему</b> за 1 час	%	23
Истинная пористость	%	38,8
открытая пористость		23
замкнутая пористость		15,8

Размеры частиц 5-15 мм характерны для безобжигового зольного гравия и близки к размерам в работах [88], [25], [29], [148], [149].

Насыпная плотность безобжигового зольного гравия составила 970 кг/м<sup>3</sup>. Исследования [150], [151], [149] показывают, что насыпная плотность обжигового и безобжигового зольных гравиев обычно лежит в диапазоне от 700 до 1000 кг/м<sup>3</sup>. В соответствии с ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия» насыпной плотности 970 кг/м<sup>3</sup> соответствует марка по плотности М1000.

Истинная плотность других легких пористых заполнителей (например, щебень из пористых горных пород, топливные и доменные шлаки, керамзит, перлит, шунгезит) обычно составляет 2,6 - 2,7 г/см<sup>3</sup>. Из таблицы 3.14 видно, что истинная плотность заполнителя из безобжигового зольного гравия чуть ниже перечисленных заполнителей.

Средняя плотность безобжигового зольного гравия составила 1,53 г/см<sup>3</sup>, что является характерным для легких заполнителей. Средняя плотность безобжигового зольного гравия лежит в диапазоне 1,27 - 1,87 г/см<sup>3</sup> [88], [152], [153], [154].

Прочность при сдавливании в цилиндре показала значение 6,2 МПа, что соответствует марке по прочности П250 согласно ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия». Согласно европейским нормам EN 13055:2016 «Lightweight aggregates» гранулы минерального происхождения имеют истинную плотность, не превышающую 2000 кг/м<sup>3</sup>, или насыпную плотность, не превышающую 1200 кг/м<sup>3</sup>. Следовательно изучаемый

безобжиговый зольный гравий соответствует требованиям европейских норм, в качестве легкого крупного заполнителя для бетонов.

Марка по морозостойкости гравия и щебня должна быть не ниже F15 в соответствии с ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия». Потеря массы после 15 циклов переменного замораживания и оттаивания не должна превышать 8 %.

Гигроскопичность зольного гравия при 100% влажности воздуха за 120 суток составила 8,14 %. Гигроскопичность требуется учитывать при длительном хранении безобжигового зольного гравия и его перевозке.

Водопоглощение по массе за 1 час зольного гравия составляет 15 %, что сопоставимо с водопоглощением других легких заполнителей: керамзитового гравия (8-18 %) [155] или обжигового зольного гравия (7 - 21%) [156], [152], [154]. Высокое водопоглощение объясняется отсутствием стекловидной оболочки на поверхности гранул, которая присутствует при получении обжигового зольного гравия [157]. В случае необходимости уменьшения водопоглощения безобжигового зольного гравия его погружают в жидкое стекло на 30 мин, а затем оставляют на 10 мин для просачивания избытка раствора [158].

Истинная пористость безобжигового зольного гравия составила 38,8%. Большая часть пор открыта для доступа воды. Данные результаты говорят о возможности применения водонасыщенного безобжигового зольного гравия в бетоне, что может привести к уменьшению трещинообразования и усадки бетона при начальном наборе прочности.

### **3.4.2. Физико-механические характеристики безобжигового зольного гравия на основе высококальциевой золы уноса**

Безобжиговый зольный гравий на основе высококальциевой золы уноса Березовской ГРЭС (см. рисунок 3.3) отличается от других разновидностей безобжигового зольного гравия, в том числе от рассмотренного в п.3.4.1 использованием золы уноса с большим содержанием  $\text{CaO}_{\text{free}}$ . Расширение зольного камня в процессе гидратации приводит к появлению трещин и разрушению

материала, что удается нейтрализовать добавками к золе уноса (см. таблицу 3.3).  
Производство безобжигового зольного гравия описано в п.3.2.2.

Испытания безобжигового зольного гравия проведены в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Результаты испытаний безобжигового зольного гравия представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 - Физико-механические свойства безобжигового зольного гравия на основе высококальциевой золы уноса

Наименование показателя		Ед. из.	Результаты испытаний
Фракция		мм	5-20
Зерновой состав, остатки на ситах	20 мм	%	0
	15 мм		7,3
	10 мм		30,2
	5 мм		60,8
	Меньше 5 мм		1,7
Насыпная плотность	смесь	кг/м <sup>3</sup>	800
	фракция 5-10		790
	фракция 10-20		780
Средняя плотность	смесь	г/см <sup>3</sup>	1,42
	фракция 5-10		1,42
	фракция 10-20		1,39
Истинная плотность		г/см <sup>3</sup>	2,65
Морозостойкость		-	не менее F25
Водопоглощение по массе за 1 час	смесь	%	23
	фракция 5-10		22
	фракция 10-20		24

1		2	3
Водопоглощение <b>по объему</b> за 1 час	смесь	%	33
	фракция 5-10		33
	фракция 10-20		33
Истинная пористость/открытая/замкнутая	смесь	%	46/33/13
	фракция 5-10		46/33/13
	фракция 10-20		48/33/15
Прочность при сдавливании в цилиндре		МПа	1,0
Гигроскопичность при влажности воздуха 100%		%	35

Размеры зерен произведенного зольного гравия от 5 мм до 20 мм, что является более удобным, чем у исследуемого в п. 3.4.1 зольного гравия, т.к. данная фракция дает возможность разделения на две подгруппы с размерами зерен 5 - 10 мм и 10 - 20 мм. Использование крупного заполнителя в виде отдельно дозируемых фракций позволяет подобрать наиболее компактную упаковку зерен заполнителя в бетоне.

Средняя плотность безобжигового зольного гравия составила 1,42 г/см<sup>3</sup>, что несколько ниже, чем у исследуемого в п. 3.4.1 зольного гравия. Это объясняется большим количеством пор в составе произведенного гравия (46%) по сравнению с аналогом (38,8%).

Насыпная плотность безобжигового зольного гравия составила 800 кг/м<sup>3</sup> и оказалась меньше, чем у исследуемого в п. 3.4.1 зольного гравия. Это объясняется размерами зерен безобжигового зольного гравия, которые оказались больше в произведенном гравии по сравнению с аналогом. В соответствии с ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия» насыпной плотности 800 кг/м<sup>3</sup> соответствует марка по плотности М800.

Гигроскопичность зольного гравия при 100% влажности воздуха за 120 суток составляет 35%, что существенно выше, чем у исследуемого в п. 3.4.1 зольного гравия. Это объясняется большим количеством открытых (капиллярных) пор в зернах зольного гравия (33%), чем у аналога в п.3.4.1 (23%).

Прочность при сдавливании в цилиндре - 1,0 МПа, что соответствует марке по прочности П50 согласно ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия». Такая прочность значительно меньше, чем прочность зольного гравия на основе низкокальциевой золы уноса (п. 3.4.1). Это объясняется отсутствием цемента в составе гранул на основе высококальциевой золы уноса в отличие от гранул на основе низкокальциевой золы.

Пористость безобжигового зольного гравия - 43% сопоставима с работой [159], где зольный гравий был получен также на основе золы с высоким содержанием  $\text{CaO}_{\text{free}}$ . Пористость произведенного гравия несколько выше, чем у исследуемого в п. 3.4.1 зольного гравия, который был произведен на основе низкокальциевой золы уноса. Обычно, зольный гравий на основе низкокальциевых зол уноса имеет меньшую пористость от 25% до 39% [156]. Большая часть пор произведенного зольного гравия, как и у аналога в п. 3.4.1., является открытой, что приводит к быстрому и эффективному поглощению воды при водонасыщении.

Водопоглощение зольного гравия за час составляет 23 %, что существенно больше, чем у исследуемого в п. 3.4.1 зольного гравия (15%). Более пористая структура получается путем меньшего нахождения гранул на тарели гранулятора во время производства. Аналогичные результаты определения водопоглощения (22-29%) были получены для других безобжиговых зольных гравиев [150], [153].

Прирост массы гранул зольного гравия представлен на рисунке 3.5.

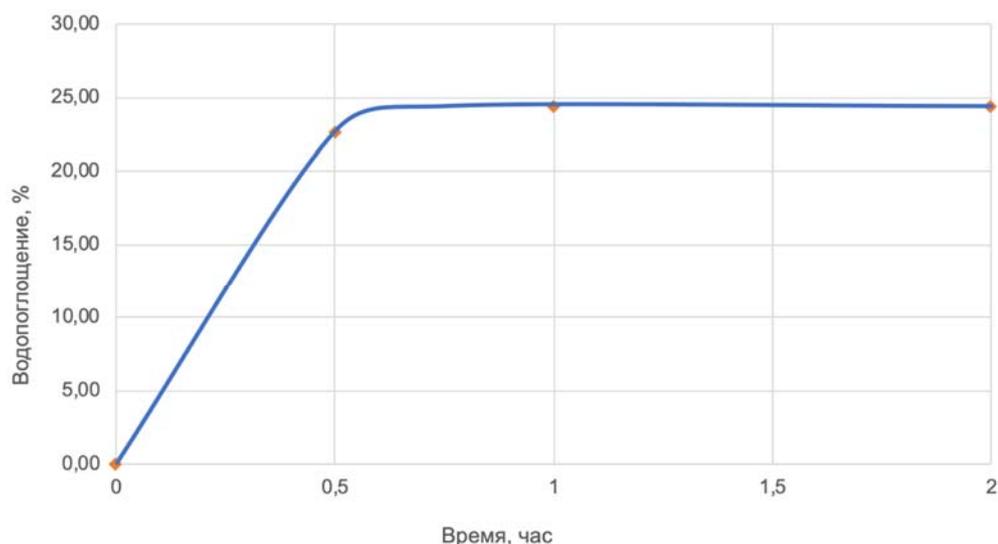


Рисунок 3.5 - Прирост массы гранул при водонасыщении

Для внутреннего ухода за бетоном оптимальным временем водонасыщения зольного гравия является 45 мин, т.к. после этого времени прирост массы гранул не происходит (рисунок 3.5). Требованиям ASTM C1761 «Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete» заполнитель должен иметь водопоглощение более 5 % для внутреннего ухода за бетоном. Безобжиговый зольный гравий на основе высококальциевой золы уноса Березовской ГРЭС удовлетворяет требованиям для использования в этих целях.

### **3.5. Результаты испытаний бетона с безобжиговым зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса**

#### **3.5.1. Состав бетонной смеси с безобжиговым зольным гравием**

Подбор состава осуществлялся согласно ГОСТ 27006-86 «Бетоны. Правила подбора состава». Было приготовлено два состава бетонных смесей (таблица 3.16). Особенность приготовления смеси №2 заключалась в том, что безобжиговый зольный гравий предварительно насыщался водой путем замачивания в емкости. Предварительно расчетным путем были вычислены параметры состава бетона. Затем полученные параметры корректировались путем пробных замесов.

Таблица 3.16 - Состав бетонных смесей с безобжиговым зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса

Материалы	Расходы материалов (кг/м <sup>3</sup> )	
	Состав №1	Состав №2 (с водонасыщенным гравием)
Цемент	360	360
Песок	720	720
Безобжиговый зольный гравий	780	770
Вода	160	180
Суперпластификатор MC-PowerFlow 2695	2	2
Итого	2022	2032
В/Ц отношение	0,44	0,50

После определения расходов компонентов бетонной смеси была определена подвижность бетонной смеси в соответствии с ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний». Подвижность бетонной смеси измерялась в сантиметрах глубиной погружения в нее эталонного конуса (конус СтройЦНИЛ).

Подвижность бетонной смеси представлена на рисунке 3.6а. Максимальная подвижность – 10,4 см достигается через 20 минут после затворения бетонной смеси. Через 80 минут после затворения смесь становится менее подвижной, чем в ее исходном состоянии и начинается твердение бетонной смеси.

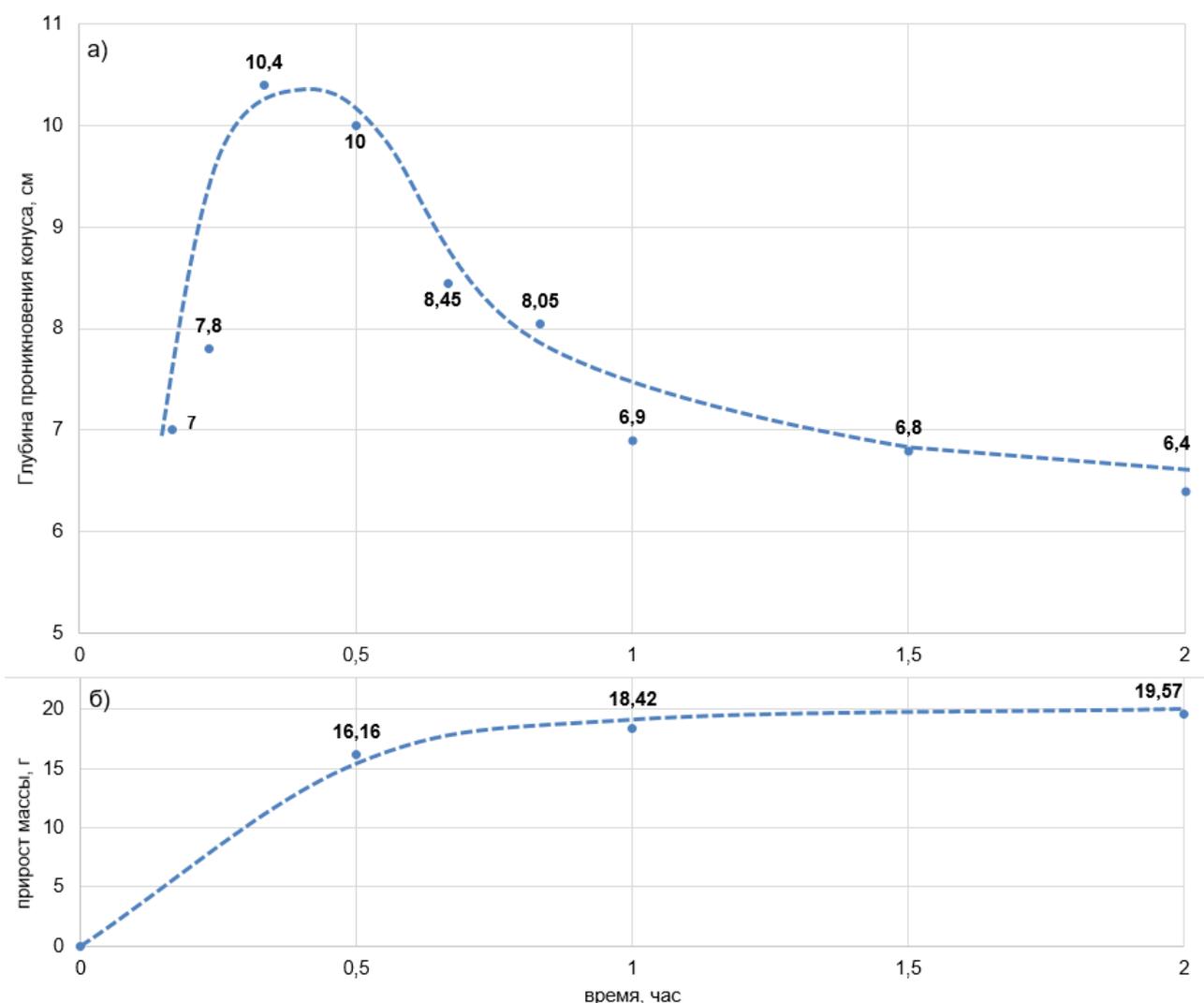


Рисунок 3.6 - Влияние поглощения воды затворения зольным гравием на изменение подвижности бетонной смеси во времени: а) изменение подвижности смеси; б) прирост массы гранул при водонасыщении

Уменьшение количества свободной воды в бетонной смеси в результате поглощения ее сухими гранулами безобжигового зольного гравия должно

приводить к потере подвижности. Однако, как это видно из графиков на рисунке 3.6, в течение первых 30 минут подвижность возрастает и только после этого начинает снижаться. Эффект разжижения бетонной смеси в первые минуты после ее изготовления является характерным при использовании поликарбоксилатов. Вероятно, в данном случае этот эффект перекрывает потерю подвижности от уменьшения количества воды, придающей подвижность бетонной смеси. С другой стороны, водопоглощение гранул при свободном неограниченном доступе воды в условиях стандартного испытания происходит значительно быстрее, чем в конкурентной среде бетонной смеси, где водные прослойки находятся под влиянием удерживающих сил развитой поверхности цемента и песка.

Для проверки равномерности распределения безобжигового зольного гравия по объему бетонной смеси был выполнен разрез испытанного на сжатие кубика размером 7х7х7 см (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 - Разрез кубикового образца бетона после испытания на сжатие

Из рисунка 3.7 видно, что крупный заполнитель из безобжигового зольного достаточно равномерно распределился по объему бетонной смеси.

### **3.5.2. Результаты испытаний бетона на прочность**

Результаты испытаний не показали существенного различия между прочностью бетонных образцов, изготовленных с использованием водонасыщенных гранул, и изготовленных с использованием сухих гранул.

Результаты испытаний образцов бетона на сжатие в возрасте 7, 28 и 65 суток представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 - Прочность на сжатие бетонных образцов

Возраст образцов, сутки	Среднее значение предела прочности образцов 70,7x70,7x70,7 мм, МПа	Среднее значение предела прочности, приведенное к образцам 150x150x150 мм, МПа
7	35,7	30,3
28	44,5	37,8
65	50,1	42,6

Полученная прочность на сжатие в возрасте 28 суток соответствует классу В30 и позволяет использовать этот бетон как конструктивный.

Предел прочности на растяжение при изгибе составил 4,9 МПа.

### 3.5.3. Коэффициент температурного линейного расширения

Коэффициент температурного линейного расширения определялся на образцах-призмах размерами 70x70x280 мм и составил  $14,4 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Относительное удлинение образца в зависимости от температуры представлено на рисунке 3.8.

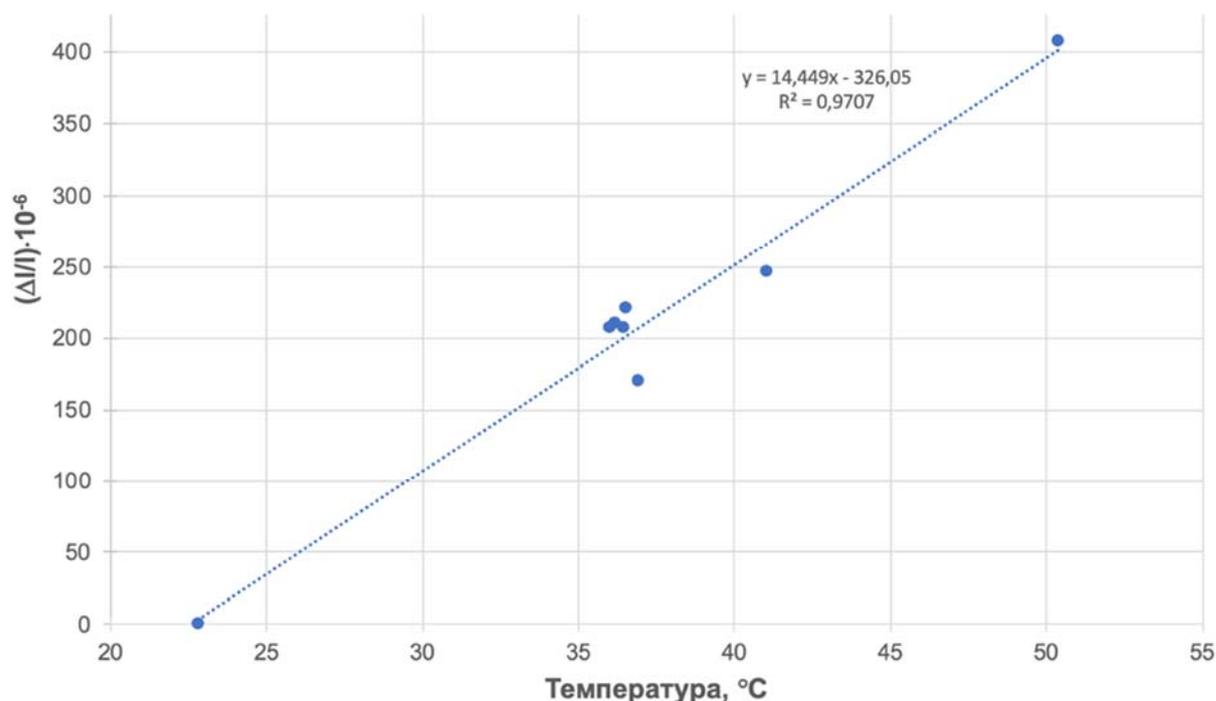


Рисунок 3.8 - Относительное удлинение образца при нагревании

Полученное значение коэффициента температурного линейного расширения следует использовать для определения расчетного расстояния между температурными деформационными швами в монолитных железобетонных конструкциях с использованием данного типа бетона.

### 3.5.4. Модуль упругости бетона

Модуль упругости бетона составил 18 ГПа. Плотность исследуемого бетона в сухом состоянии  $1860 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует марке по средней плотности - D1900. Начальный модуль упругости бетона с маркой по средней плотности D1900 и классом по прочности B30 согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» должен составлять 20,75 ГПа. Полученное значение модуля упругости бетона несколько ниже, чем в указанном стандарте.

График зависимости напряжения от относительной продольной деформации бетона представлен на рисунке 3.9.

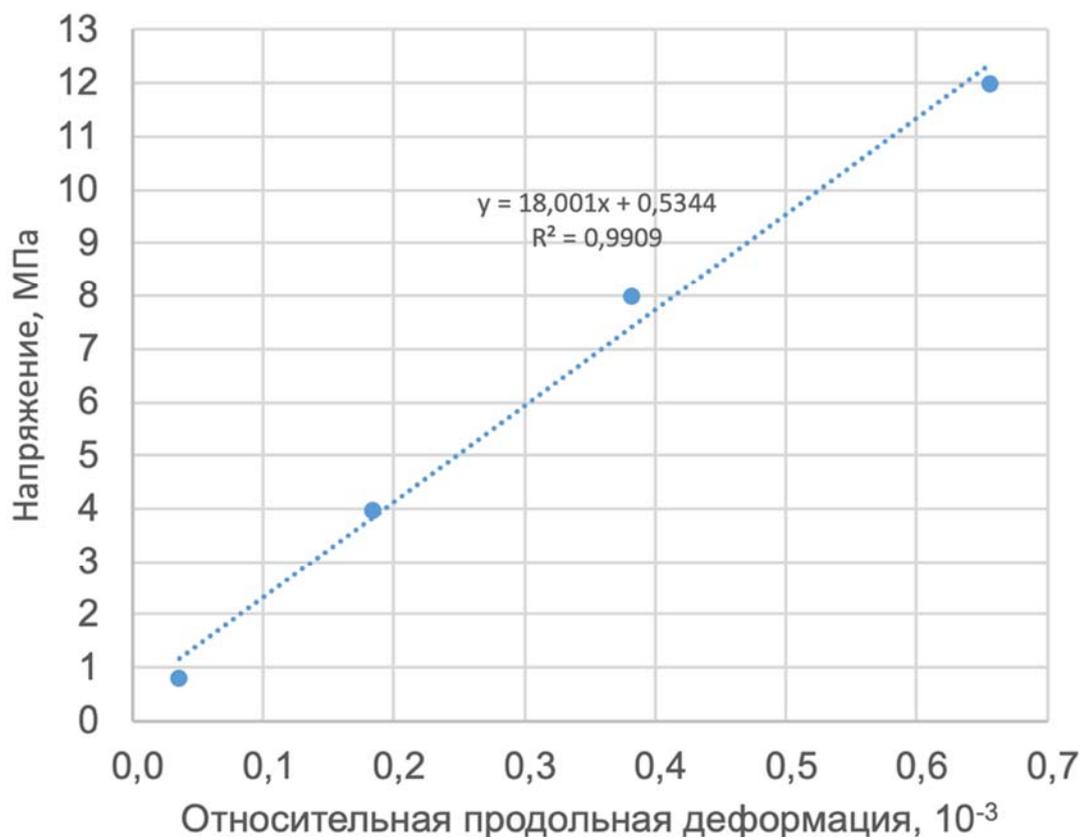


Рисунок 3.9 - Напряжение и относительная деформация бетона

### 3.5.5. Тепловыделение бетона

Были испытаны два образца с сухими гранулами безобжигового зольного гравия и два образца с предварительно водонасыщенными гранулами безобжигового зольного гравия. Результаты испытания приведены на рисунке 3.10.

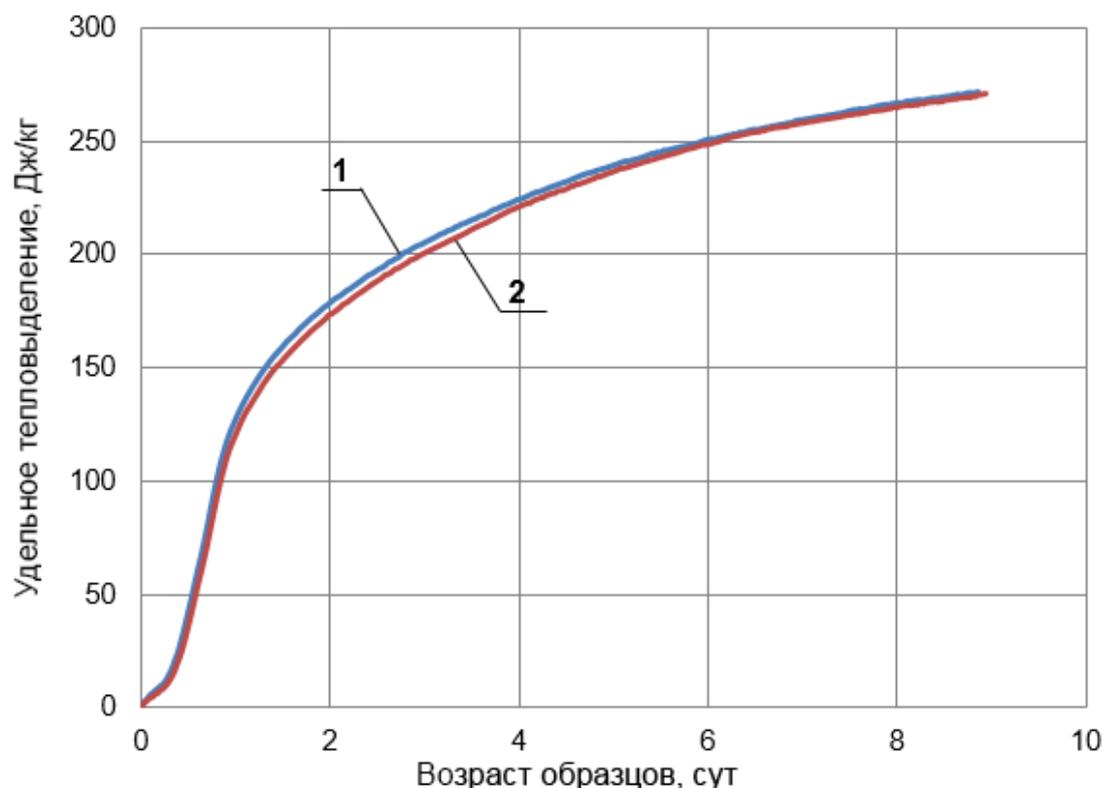


Рисунок 3.10 - Удельное тепловыделение цемента в бетоне: 1 – на сухих гранулах; 2 – на водонасыщенных гранулах

Как видно из рисунка 3.10 насыщение гранул водой не повлияло на кинетику тепловыделения и, следовательно, гидратацию цемента.

### 3.5.6. Деформация усадки

Деформация усадки образцов бетона определена для образцов с воздушно-сухими гранулами и образцов с водонасыщенными гранулами при относительной влажности воздуха  $(60 \pm 5) \%$  и температуре  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

Результаты испытания приведены на рисунке 3.11.

Деформация усадки бетона на воздушно-сухом заполнителе оказалась выше, чем на заполнителе, предварительно насыщенном водой. Поскольку составы бетона отличались только водонасыщением гранул, то предполагается, что

контракционная часть усадки у двух составов одинакова, а различие состоит в усадке при высыхании бетона.

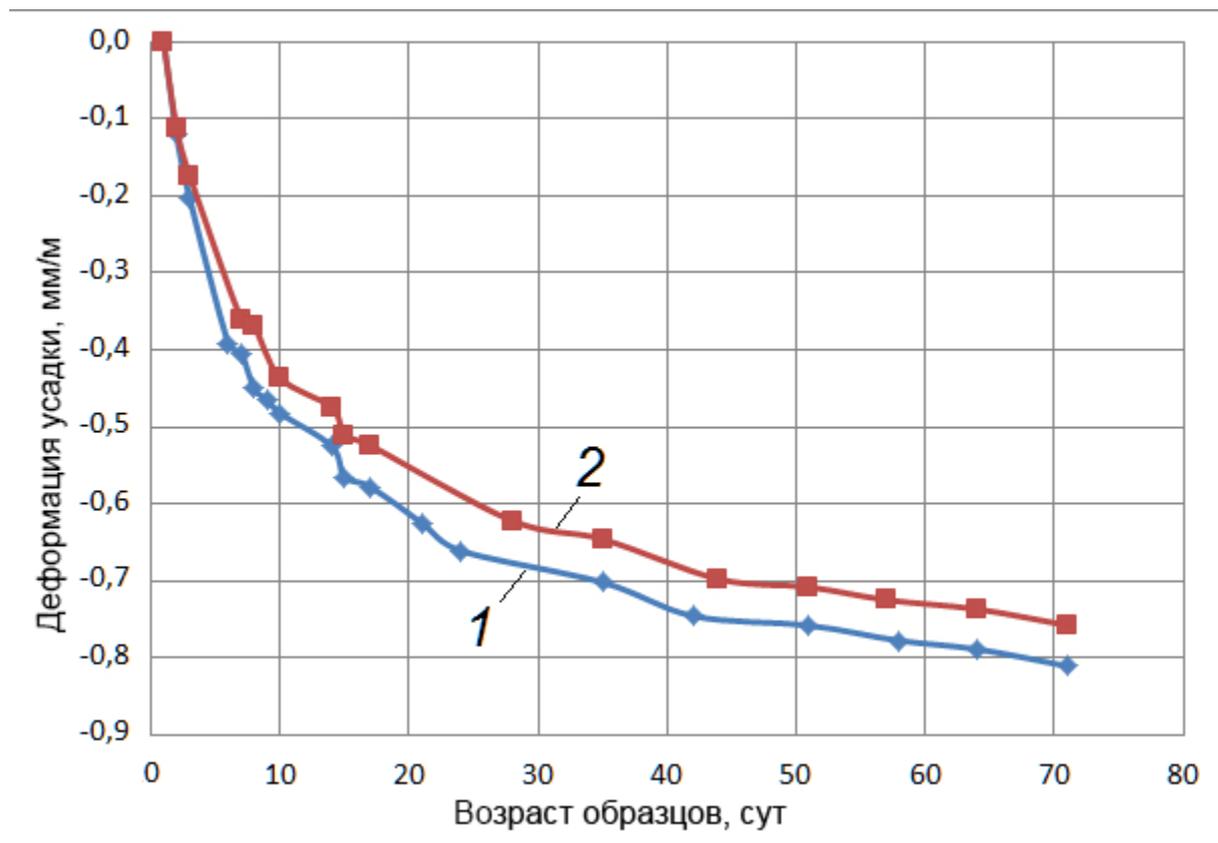


Рисунок 3.11 - Деформация воздушной усадки бетона: 1 – на сухих гранулах (состав №1); 2 – на водонасыщенных гранулах (состав №2)

Следует отметить, что водоцементное отношение состава № 2, равное 0,50 с учетом воды в заполнителе, было более высоким, чем у состава № 1 ( $B/C=0,44$ ). Это связано с необходимостью получения равноподвижных бетонных смесей, т.к. вода, удерживаемая в безобжиговом зольном гравии, практически мало влияет на консистенцию бетонной смеси. В процессе твердения бетона сухие гранулы частично отбирают воду у цементного камня, обезвоживание которого происходит, таким образом, не только за счет испарения воды. Отсасывание воды заполнителем ускоряет усадку. Водонасыщенные гранулы, наоборот, отдают свою воду цементной фазе, понижая усадку. Это явление известно и получило название «внутренний уход за твердеющим бетоном».

Следовало ожидать, что потери воды на испарение у бетона на сухих гранулах будут меньше, чем в случае их предварительного насыщения водой. Для проверки этого предположения образцы при испытании на усадку периодически

взвешивались, и вычислялась потеря массы в процентах от исходной массы образца. Результаты испытания подтвердили предположение (рисунок 3.12).

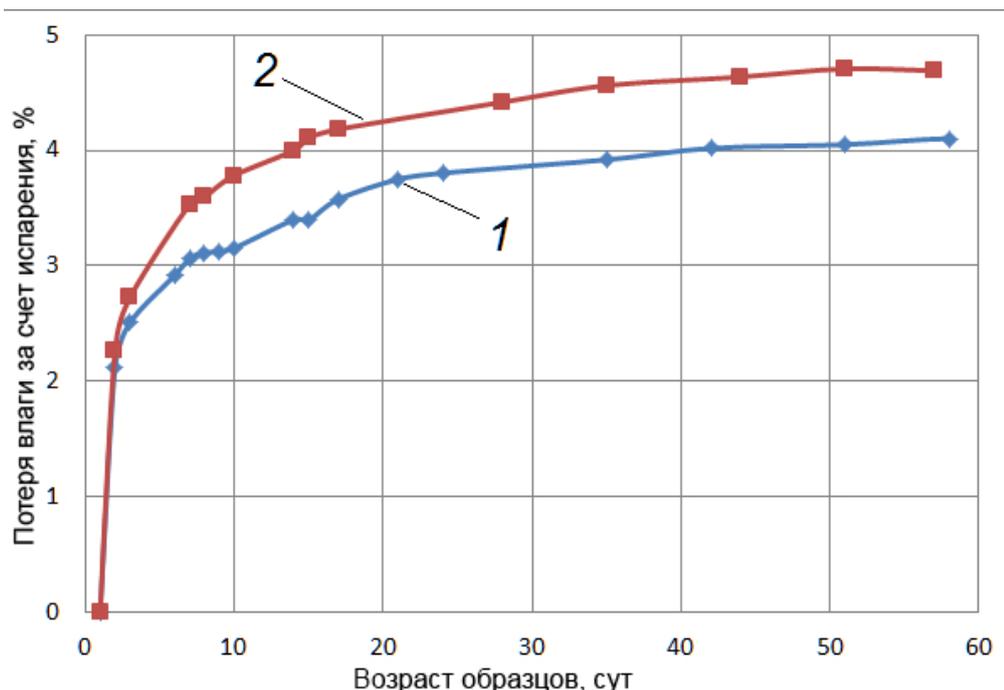


Рисунок 3.12 - Потеря воды бетоном при твердении на воздухе с относительной влажностью  $(60\pm 5)\%$  и температурой  $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 – на сухих гранулах (состав №1); 2 – на водонасыщенных гранулах (состав №2)

Полученная зависимость усадки бетона от потери воды представлена в виде экспериментальных кривых на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 - Зависимость деформации усадки от потери воды на испарение: 1 – на сухих гранулах (состав №1); 2 – на водонасыщенных гранулах (состав №2)

На этих кривых можно выделить два участка А и В с резким переломом между ними. На участке А потеря воды значительная, а усадка мала. На участке В – наоборот. Так для кривой 1 потеря воды на участке А составила около 2,2 %, а усадка – 0,12 мм/м. На участке В при практически такой же потере влаги усадка составила 0,71 мм/м. Обычно, воздушную усадку связывают с капиллярным давлением, которое возникает с образованием менисков жидкой фазы в структуре цементного камня. В начальном периоде твердения вода заполняет практически все свободное пространство в бетоне (воздухововлечение обычно составляет не более 1-2 %), мениски отсутствуют, и усадка развивается главным образом за счет контракции. По мере испарения воды общий объем жидкой фазы, как единого континуума, уменьшается. В определенный момент этот объем достигает критического значения и континуум распадается с образованием многочисленных менисков. Этим объясняется резкий перелом графика. При дальнейшем уменьшении количества воды в бетоне число менисков растет, а их радиусы уменьшаются, что приводит к росту капиллярного давления и стягивания частиц твердой фазы силами поверхностного натяжения жидкости.

При сравнении кривых 1 и 2 на рисунке 3.13 видно, что при одной и той же потере влаги усадка бетона на водонасыщенном заполнителе значительно меньше, чем на сухом заполнителе. Данный результат может быть использован в производственных условиях для защиты бетона от высыхания с целью предотвращения усадочных трещин.

Исходя из того, что на участке В рисунка 3.13 кривые хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, можно предложить удобную характеристику бетона в виде коэффициента воздушной усадки, равного производной от деформации усадки  $\varepsilon$  по количеству потерянной воды  $c$  в виде:  $K=d\varepsilon/dc$ .

В нашем случае более предпочтительным является бетон состава №2, т.к. имеет меньшее значение коэффициента  $K=0,28$ , против  $K=0,34$  у состава №1.

### 3.6. Результаты испытаний бетона с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса для наружных стеновых панелей

#### 3.6.1. Состав бетонной смеси с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса

Подбор состава осуществлялся согласно ГОСТ 27006-86 «Бетоны. Правила подбора состава». Был приготовлен состав бетонной смеси (таблица 3.18) с водонасыщенными гранулами, т.к. предыдущие исследования (п.3.5.6) показали положительное влияние предварительного насыщения водой легкого заполнителя на свойства бетона. В дополнение были выполнены исследования образцов бетона с зольным гравием, твердевшим в условиях тепловой обработки в течение 8 часов при температуре 80 °С.

Таблица 3.18 - Состав бетонной смеси с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса

Материалы	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>
Цемент	360
Песок	650
Безобжиговый зольный гравий	710
Вода	144
Суперпластификатор MC-PowerFlow 2695	6
Итого	1870
В/Ц отношение	0,4

Для проверки равномерности распределения безобжигового зольного гравия по объему бетонной смеси был выполнен разрез испытанного на сжатие кубика размером 7х7х7 см (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 - Разрез кубикового образца бетона после испытания на сжатие

Из рисунка 3.14 видно, что крупный заполнитель из безобжигового зольного достаточно равномерно распределился по объему бетонной смеси.

### 3.6.2. Результаты испытаний бетона на прочность

Результаты испытаний показали существенное различие между прочностью бетонных образцов, изготовленных с использованием зольного гравия, твердевшего в воздушных условиях и бетонных образцов с использованием зольного гравия после 7 суток воздушного хранения и последующей тепловой обработкой в течение 8 часов при температуре 80 °С. Результаты испытаний образцов бетона на сжатие в разном возрасте представлены в таблицах 3.19-3.20.

Таблица 3.19 - Прочность на сжатие бетона с безобжиговым зольным гравием, прошедшим тепловую обработку

Возраст образцов, сутки	Среднее значение предела прочности образцов 70,7x70,7x70,7 мм, МПа	Среднее значение предела прочности, приведенное к образцам 150x150x150 мм, МПа
7	12,54	10,66
28	20,04	17,03
54	23,75	20,19

Как видно из таблицы 3.19 прочность бетона оказалось низкой. Тепловая обработка зольного гравия не оказала влияния на ускорение в наборе прочности

сырых гранул. Для использования зольного гравия на основе золы уноса Березовской ГРЭС не рекомендуется тепловая обработка сырых гранул.

Таблица 3.20 - Прочность на сжатие бетона с безобжиговым зольным гравием после хранения в воздушных условиях в течение 28 суток

Возраст образцов, сутки	Среднее значение предела прочности образцов 70,7x70,7x70,7 мм, МПа	Среднее значение предела прочности, приведенное к образцам 150x150x150 мм, МПа
7	27,36	23,26
28	34,02	28,92

Полученная прочность на сжатие в возрасте 28 суток соответствует классу В22,5 и позволяет использовать этот бетон для производства наружных стеновых панелей.

Предел прочности на растяжение при изгибе составил 4,0 МПа.

### 3.6.3. Коэффициент температурного линейного расширения

Коэффициент температурного линейного расширения определялся на образцах-призмах размерами 70x70x280 мм и составил  $14,5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Относительное удлинение образца в зависимости от температуры представлено на рисунке 3.15.

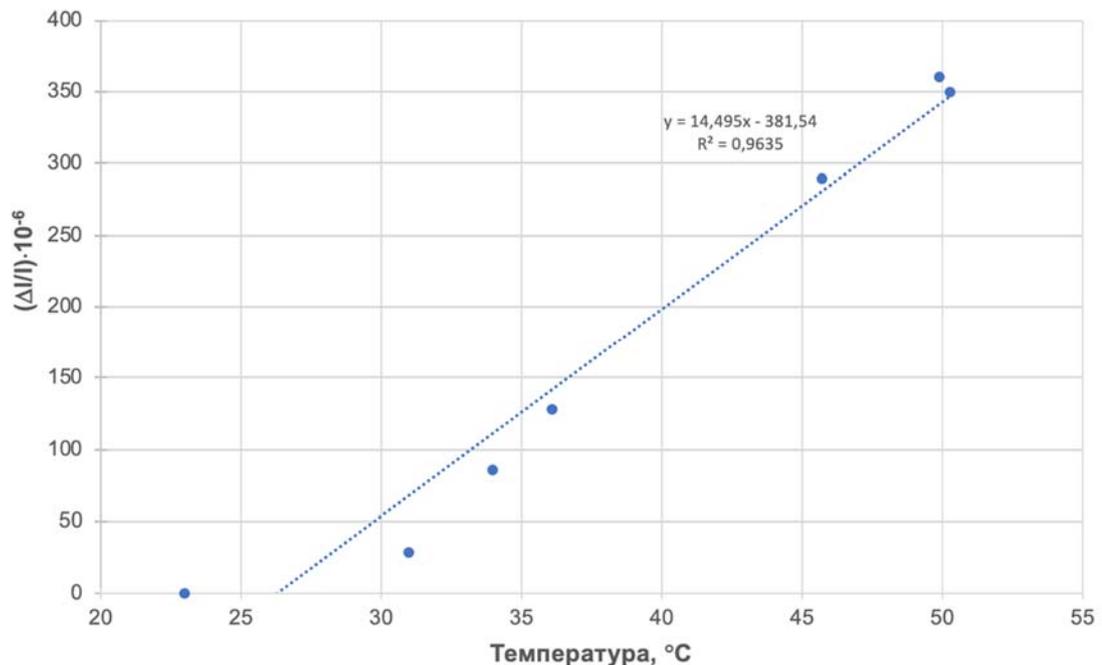


Рисунок 3.15 - Относительное удлинение образца при нагревании

Полученное значение коэффициента температурного линейного расширения не отличается от коэффициента температурного линейного расширения других видов бетонов, в том числе экспериментально исследованного в п.3.5.3.

### 3.6.4. Модуль упругости бетона

По результатам испытаний получено два значения модуля упругости: 16,1 ГПа и 9,3 ГПа. В первом случае при изготовлении бетонной смеси в нее добавлялся зольный гравий после хранения в воздушных условиях в течение 28 суток. Во втором случае - зольный гравий после 7 суток хранения в воздушных условиях и последующего пропаривания в течение 8 часов при температуре 80 °С. И в том, и в другом случае перед приготовлением бетонной смеси зольный гравий предварительно насыщался водой в течение 45 минут.

График зависимости напряжения от относительной продольной деформации бетона с зольным гравием после хранения в воздушных условиях в течение 28 суток представлен на рисунке 3.16.

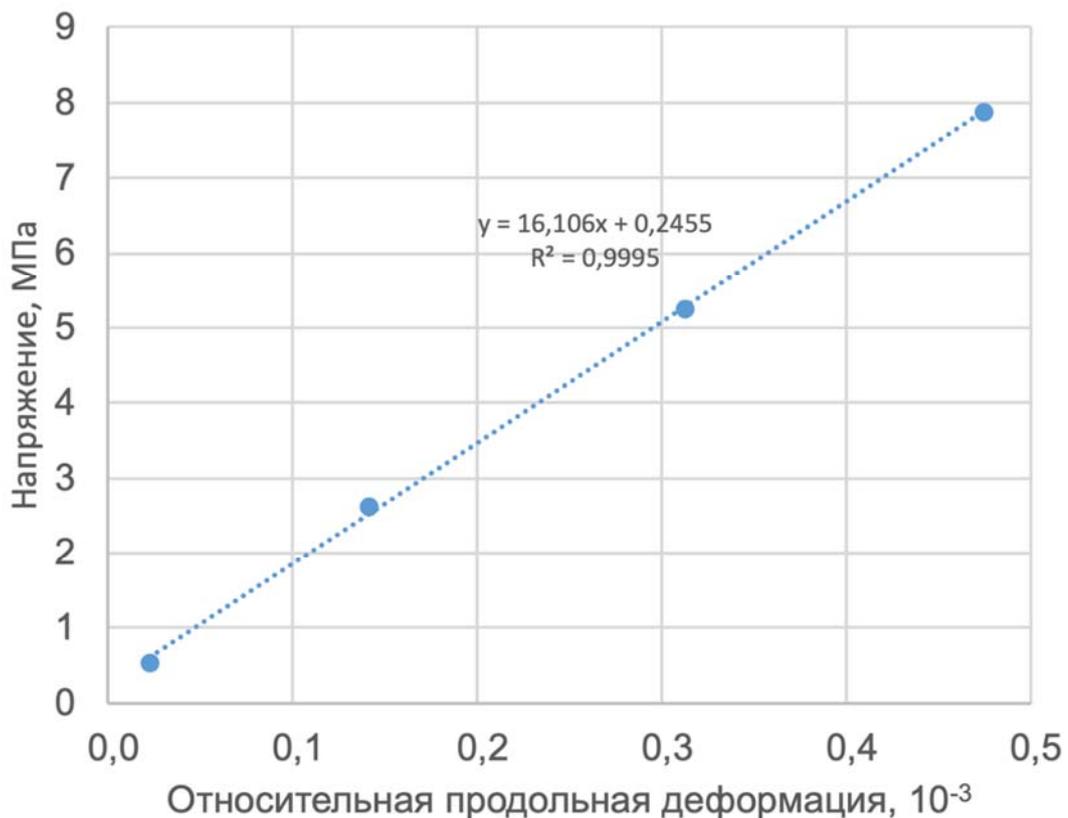


Рисунок 3.16 - График «напряжения-деформации» бетона с зольным гравием после хранения в воздушных условиях в течение 28 суток

Значение модуля упругости бетона с гранулами, хранившимися 28 суток в воздушных условиях, 16,1 ГПа, класс прочности - В22,5, марка по средней плотности D1700. Начальный модуль упругости бетона согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» должен составлять 16,9 ГПа. Полученное значение модуля упругости близко к значению в указанном стандарте. Похожие результаты модуля упругости от 16 до 19 ГПа для различных составов с зольным гравием были получены авторами [160].

График зависимости напряжения от относительной продольной деформации бетона с зольным гравием после хранения в воздушных условиях в течение 28 суток представлен на рисунке 3.17.

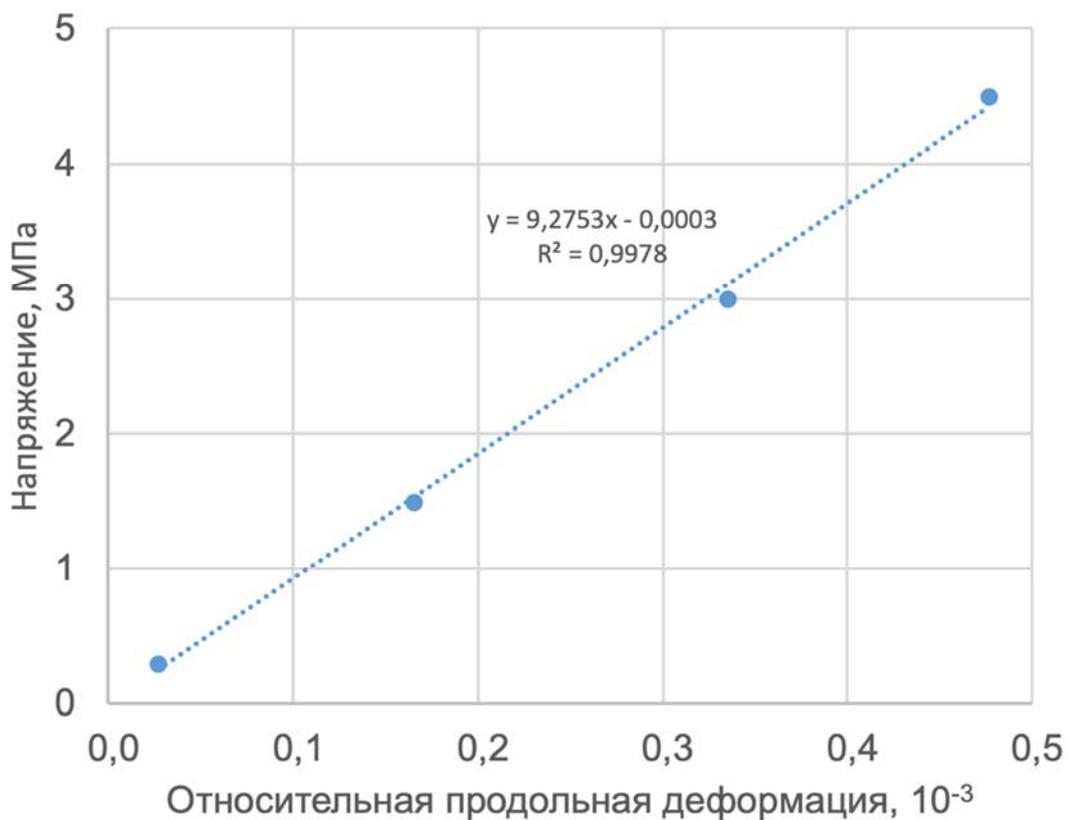


Рисунок 3.17 - График «напряжения-деформации» бетона с зольным гравием, прошедшим тепловую обработку

Тепловая обработка зольного гравия не оказала влияния на ускорение в наборе прочности сырых гранул, по этой причине бетон с такими гранулами не показал высоких результатов по прочности или значению модуля упругости. Для

использования зольного гравия на основе золы уноса Березовской ГРЭС рекомендуется набор прочности гранул в воздушных условиях, в течение 28 суток.

### 3.6.5. Тепловыделение бетона

Удельное тепловыделение бетона с крупным заполнителем на основе высококальциевой золы уноса и бетона с крупным заполнителем на основе низкокальциевой золы уноса в расчете на 1 кг цемента при температуре 20 °С показано на рисунке 3.18.

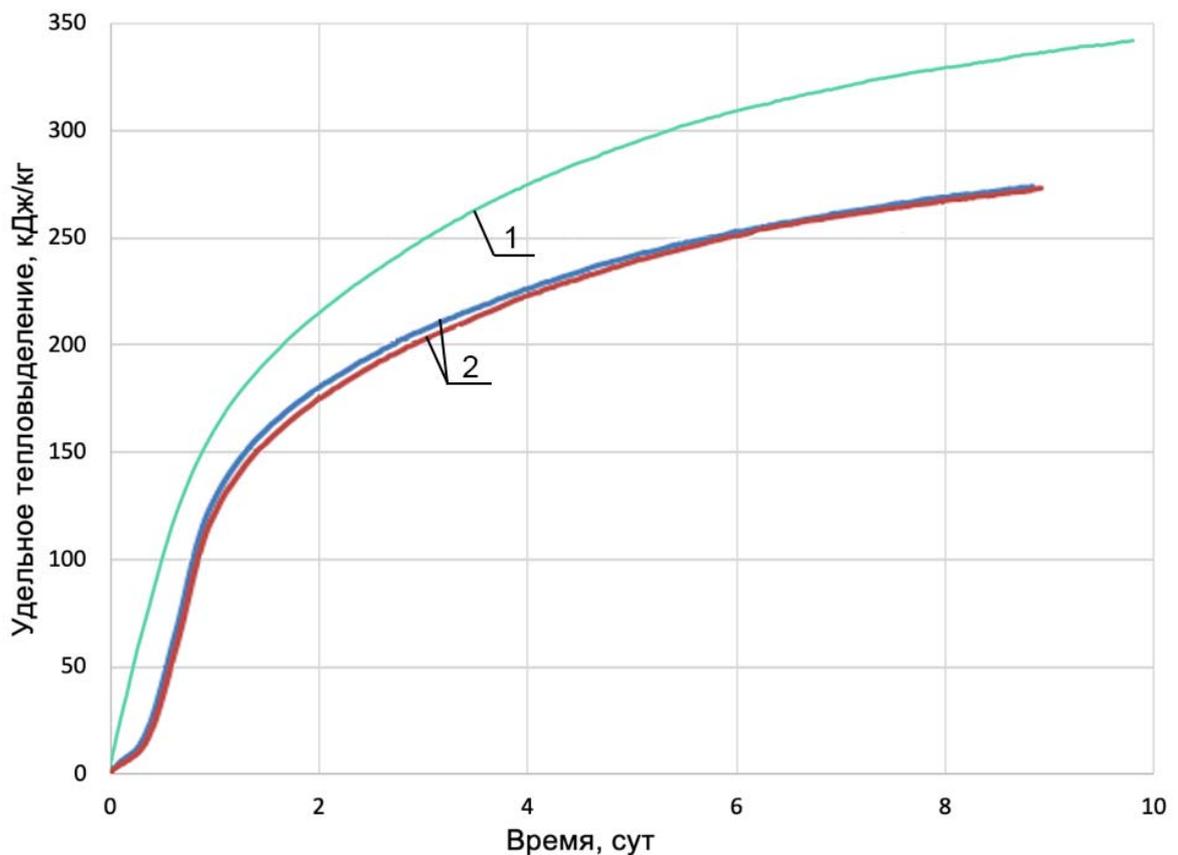


Рисунок 3.18 - Удельное тепловыделение цемента в бетоне: 1 – на гранулах из высококальциевой золы; 2 – на гранулах из низкокальциевой золы

Тепловыделение бетона с крупным заполнителем на основе высококальциевой золы уноса оказалось примерно на 20% выше, чем у бетона с крупным заполнителем на основе низкокальциевой золы уноса. В начальном периоде тепловыделения до 2 суток оба бетона показали одинаковое тепловыделение, около 60% от конечного значения. Через 2 суток после интенсивного тепловыделения процесс замедляется и к шестым суткам приходит к

своему завершению. Большое тепловыделение бетона с зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса связано с активностью используемой золы, которая сохраняется в крупном заполнителе на ее основе. Кроме этого, тепловыделение данного бетона происходит без начального участка задержки тепловыделения, который ликвидирован за счёт ускорителей твердения, использованных при производстве зольного гравия.

В сравнении с традиционным бетоном или бетоном состава 2 (см. рисунок 3.18) более высокое значение тепловыделения у бетона с зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса может ускорить производственный процесс на заводе по изготовлению стеновых панелей. Набор прочности у такого бетона происходит быстрее, что позволяет сэкономить энергию при пропаривании изделий, которое осуществляют для ускорения набора прочности и освобождения формовочной для новой партии изделий.

### 3.6.6. Деформация усадки

Деформация усадки определена на трех образцах бетона с водонасыщенными гранулами при относительной влажности воздуха  $(60\pm 5)\%$  и температуре  $(20\pm 2)$  °С. Результаты испытания приведены на рисунке 3.19.

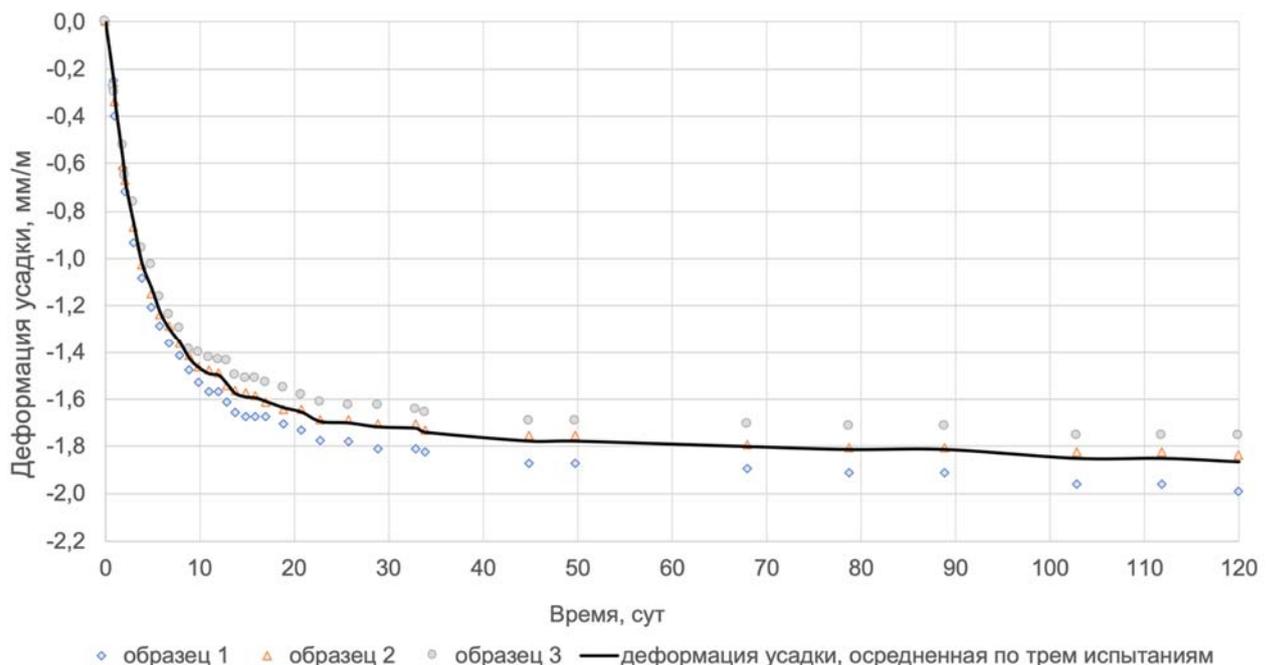


Рисунок 3.19 - Деформация воздушной усадки бетона

При производстве сборных железобетонных стеновых панелей из бетона с крупным заполнителем из гранул на основе высококальциевой золы уноса, изделиям с номинальным размером в серии от 2500 мм до 4000 мм можно присвоить класс точности 5, в серии от 4000 мм до 8000 мм - класс точности 6 согласно [161].

Во время испытания на усадку образцы периодически взвешивались, и вычислялась потеря массы в процентах от исходной массы образца. Результаты испытания представлены на рисунке 3.20.

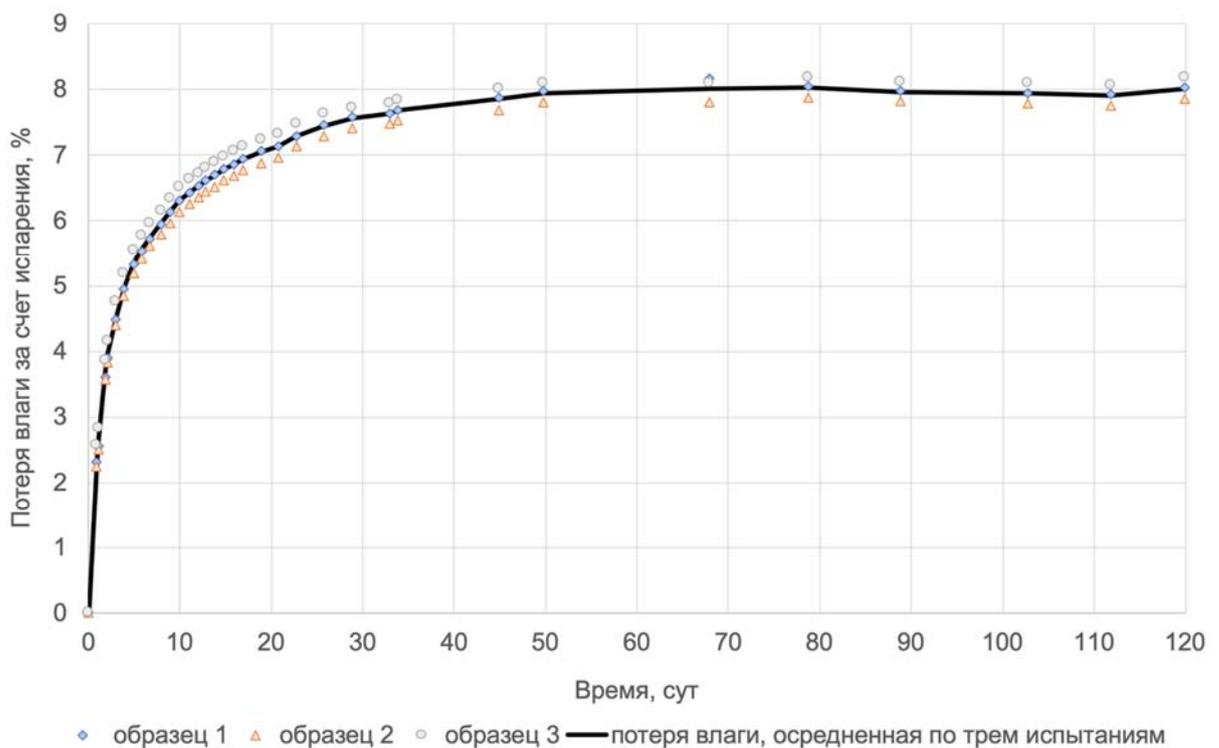


Рисунок 3.20 - Потеря воды бетоном при твердении на воздухе с относительной влажностью  $(60\pm 5)\%$  и температурой  $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$

Потеря влаги образцами за 120 суток составила 8%. При использовании данного бетона для производства стеновых панелей отклонение их фактической массы при отпуске потребителю не должно превышать  $\pm 10\%$  [162].

Зависимость усадки бетона от потери воды представлена в виде экспериментальных кривых на рисунке 3.21.

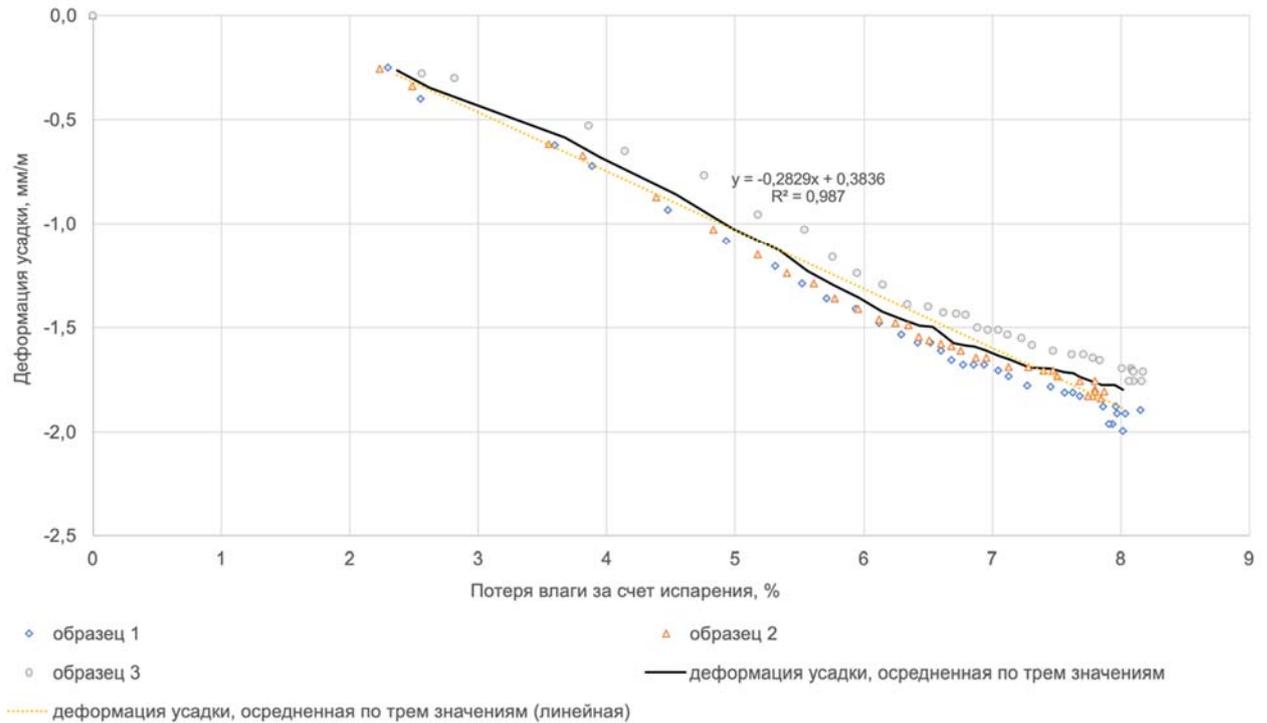


Рисунок 3.21 - Зависимость деформации усадки от потери воды на испарение

Из рисунка 3.21 видно, что значение коэффициента воздушной усадки ( $K=d\varepsilon/dc$ ), предложенного в п. 3.5.6, составляет 0,28. Аналогичные результаты получены для водонасыщенного бетона с гранулами на основе низкокальциевой золы уноса (см. п. 3.5.6). Установлено, что при одной и той же потере воды деформация усадки бетона с гранулами из низкокальциевой золы уноса и бетона с гранулами из высококальциевой золы уноса одинаковая.

### 3.7. Выводы по главе 3

1. Определены физико-механические характеристики искусственных заполнителей на основе зол уноса. Заполнитель на основе низкокальциевой золы уноса имеет истинную плотность – 2,50 г/см<sup>3</sup>, среднюю плотность – 1,53 г/см<sup>3</sup>, морозостойкость - не менее F25, водопоглощение по массе - 15 %, пористость - 38,8%, в т.ч. открытую – 23 %; заполнитель на основе высококальциевой золы уноса имеет истинную плотность – 2,65 г/см<sup>3</sup>, среднюю плотность – 1,42 г/см<sup>3</sup>, морозостойкость - не менее F25, водопоглощение по массе - 23 %, пористость - 46 %, в т.ч. открытую – 33 % .

2. Определены физико-механические характеристики бетонов с безобжиговым зольным гравием. Прочность при сжатии составила 37,8 МПа и 28,92 МПа, прочность при изгибе – 4,9 МПа и 4 МПа, коэффициент температурного линейного расширения -  $14,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $14,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , модуль упругости -  $18 \times 10^9 \text{ Па}$  и  $16 \times 10^9 \text{ Па}$  для бетона с зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса и бетона с зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса, соответственно.

3. Установлено, что предварительное насыщение гранул водой не повлияло на кинетику тепловыделения и, следовательно, гидратацию цемента.

4. Установлено, что усадка бетона на сухом заполнителе выше, чем у бетона на водонасыщенном заполнителе; при этом потери воды на испарение меньше у бетона на сухих гранулах. При одинаковой потере влаги усадка бетона на водонасыщенном зольном гравии значительно меньше, чем на сухом заполнителе.

5. Предложена характеристика бетона в виде коэффициента воздушной усадки, равного производной от деформации усадки  $\varepsilon$  по количеству потерянной воды  $c$  в виде:  $K = d\varepsilon/dc$ . Коэффициент воздушной усадки составил 0,28 и 0,34 для бетона на водонасыщенном заполнителе и сухом заполнителе, соответственно.

6. Подтверждена целесообразность в производственных условиях, в качестве «внутреннего ухода», предварительно насыщать водой гранулы безобжигового зольного гравия для снижения вероятности образования усадочных трещин при высыхании.

## 4. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НАРУЖНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ БЕТОНА С ИСКУССТВЕННЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВОЙ ЗОЛЫ

### 4.1. Технические решения наружной стеновой панели

Разработанные наружные стеновые панели представляют собой готовые заводские изделия для строительства бескаркасных многоэтажных жилых зданий (до 16 этажей) с поперечно-стеновой конструктивной схемой.

Разработанные наружные стеновые панели предназначены для строительства в 1 зоне влажности согласно карте зон влажности Российской Федерации, в случае, когда из условия энергосбережения требуемое сопротивление теплопередачи наружной конструкции не менее  $R_o^{mp} = 2,97 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Наружные стеновые панели соответствуют требованиям, предъявляемым к ним [162], [163], [164].

Разработанные панели являются несущими и используются для надземных этажей. Принятый тип панели - ЗНСЖ (трехслойная, наружная стеновая несущая панель с жесткими связями) в соответствии с [162].

Наружные стеновые панели состоят из трех слоев: внутреннего (несущего) - толщиной 180 мм, внешнего - толщиной 70 мм, теплоизоляционного (среднего) слоя толщиной 150 мм. Общая толщина панелей - 400 мм. Конструкция наружной несущей трехслойной железобетонной панели представлена на рисунке 4.1.

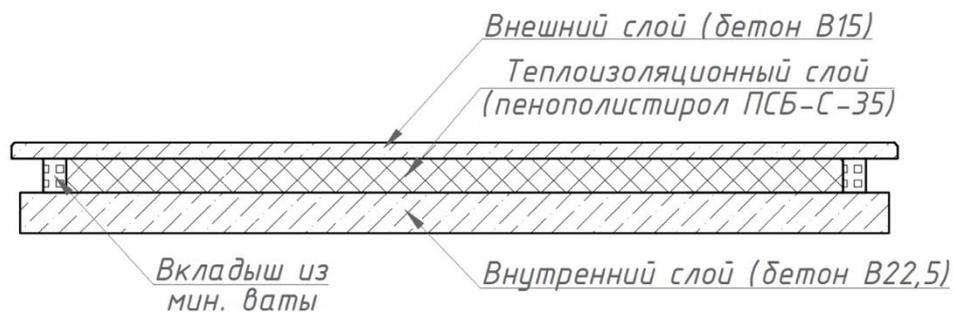


Рисунок 4.1 - Конструкция трехслойной железобетонной панели (вид сверху)

Внешний слой выполнен из тяжелого бетона с плотностью  $2100 \text{ кг}/\text{м}^3$ , классом по прочности В15, маркой по водонепроницаемости W4, маркой по

морозостойкости F1000, армированного в один ряд сетками и отдельными стержнями.

Внутренний слой выполнен из бетона с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия, разработанного состава (см. п. 3.6.1, таблица 3.18) с плотностью бетона в сухом состоянии – 1700 кг/м<sup>3</sup>, классом по прочности В22,5, армированного плоскими каркасами и отдельными стержнями из ненапряженной арматуры классов А240, А500С, Вр-I.

Теплоизоляционный слой выполнен из пенополистирола ПСБ-С-35 (ГОСТ 15588-86) толщиной 150 мм с защитой по торцам и в проемах вкладышами из минеральной ваты группы горючести «НГ» (ГОСТ 30244-94) в полиэтиленовой пленке. Возможно использование каменной или минеральной ваты с толщиной, принятой согласно теплотехническому расчету.

Жесткие дискретные связи выполнены из бетона В15 W4 F100 армированы сварным каркасом из арматуры Ø10 А240/Ø6 Вр-I.

Фасадная поверхность наружных стеновых панелей может быть выполнена без отделочного слоя, либо иметь один из следующих вариантов фасадных решений: покраска по бетонному слою; формирование наружной поверхности с использованием листов-матриц, имитирующих различные фасадные материалы (кирпич, камень, деревянный брус); слой облицовки керамическими плитками или плитками из декоративного бетона; слой из раствора или декоративного бетона, обработка наружной поверхности внешнего слоя панели по «свежему» бетону.

Обращенная в помещение сторона панели может быть выполнена как без внутреннего отделочного слоя, так и с цементным или известково-цементным раствором, который служит основанием для последующей отделки стены.

Горизонтальный стык несущих стеновых панелей выполнен с обжимаемым при установке панелей тепловетрозащитным вкладышем из пенополистирола ПСБ-С-35 (ГОСТ 15588-86). В швы горизонтального стыка между наружными слоями панелей устанавливается теплоизолирующая прокладка «Вилатерм» Ø30-40 мм, с последующей герметизацией стыка отверждающейся мастикой «Тэктор» марки 103. Стык внутреннего слоя стеновых панелей по горизонтали - платформенный.

Шов толщиной 20 мм из цементно-песчаного раствора марки М200 с центрирующими элементами, состоящими из монтажных петель нижней панели, закладных деталей верхней панели и арматурных соединительных элементов из пластичной стали марок СтЗпс, СтЗсп.

Горизонтальный стык несущих наружных стеновых панелей представлен на рисунке 4.2. Место проведения сечений 1-1 и 2-2 указано на стеновой панели рисунка 4.4.

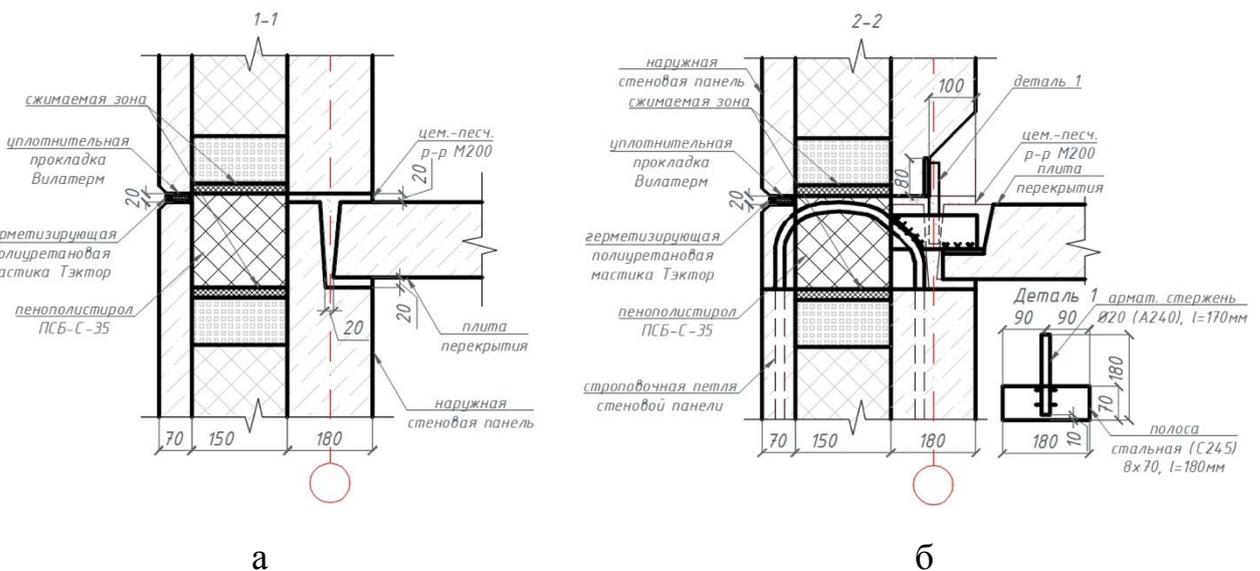


Рисунок 4.2 - Горизонтальный стык несущих наружных стеновых панелей без центрирующих элементов (а) и с центрирующими элементами (б)

Вертикальный стык наружных стеновых панелей выполнен с установкой после монтажа в зону утеплителя тепловетрозащитного вкладыша из ПСБ-С-35 (ГОСТ 15588-86). Стык внутреннего слоя стеновых панелей по вертикали - с монолитной бетонной шпонкой из бетона с классом по прочности В25 и монтажными связями, привариваемыми к закладным деталям в торцах панелей. Швы между плитами (шпонки) заполняются цементно-песчаным раствором марки М200. В швы вертикального стыка между наружными слоями панелей устанавливается теплоизолирующая прокладка «Вилатерм» Ø30-40 мм, с последующей герметизацией стыка отверждающейся мастикой «Тэктор» марки 103.

Вертикальный стык наружных стеновых панелей представлен на рисунке 4.3а, несущей наружной стеновой панели с ненесущей наружной стеновой панелью - на рисунке 4.3б.

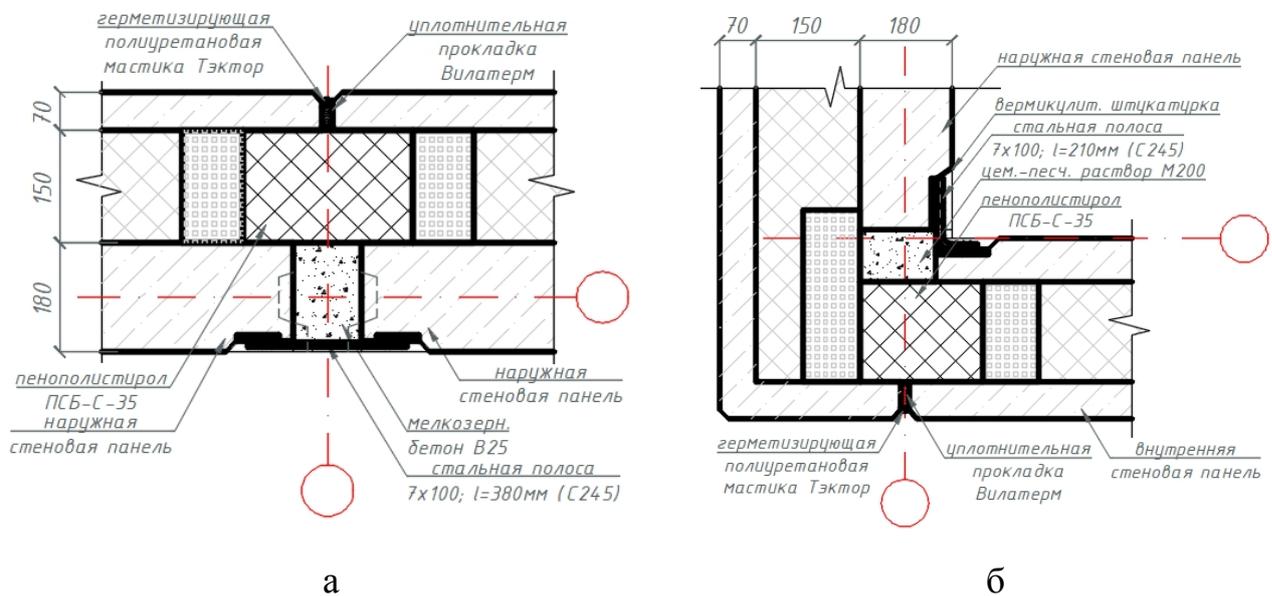


Рисунок 4.3 - Вертикальный стык несущих наружных стеновых панелей (а) и несущей с ненесущей наружных стеновых панелей (б)

Максимально возможные размеры наружных стеновых панелей в заводском изготовлении - 16 м (длина) x 4 м (высота). Исходя из соблюдения требований к стандартным грузоперевозкам максимальная длина панели принимается 7,5 м, а максимальная высота - 3,3 м. Размеры панелей под каждый объект капитального строительства разрабатывается индивидуально.

По конструктивному решению наружные стеновые панели можно разделить на три основные группы: глухая панель, панель с проемом под оконный блок и панель с проемом под балконный блок (рисунки 4.4-4.6).

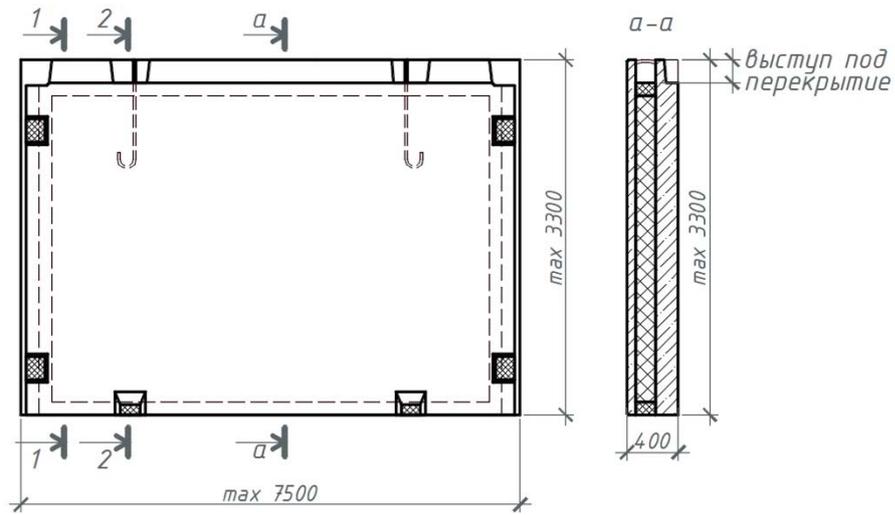


Рисунок 4.4 - Схема глухой наружной стеновой панели

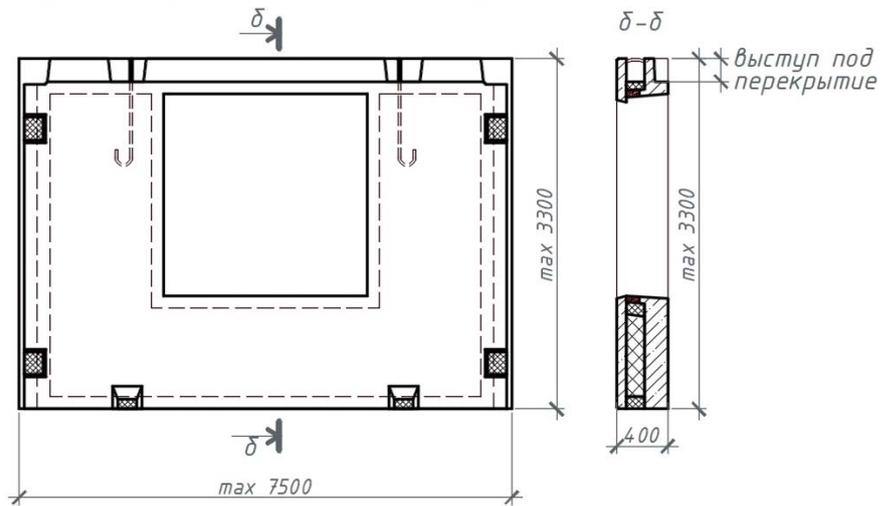


Рисунок 4.5 - Схема наружной стеновой панели с оконным проемом

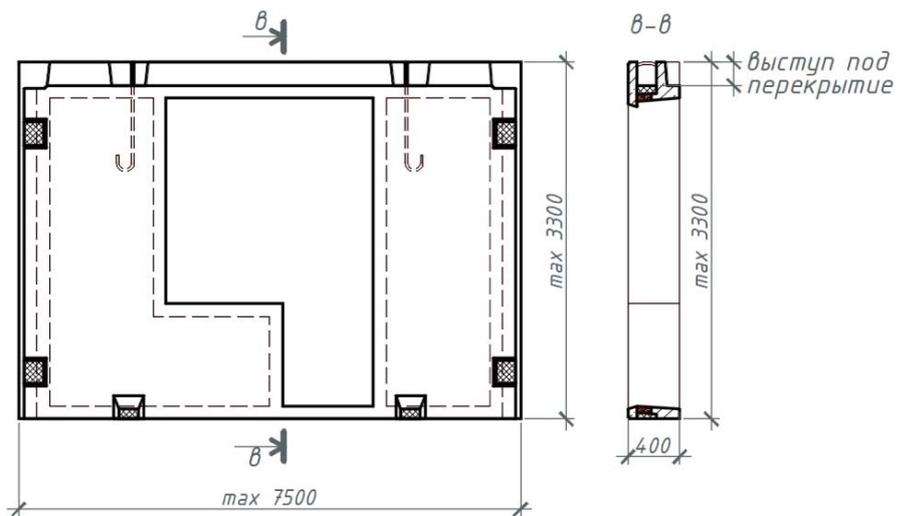


Рисунок 4.6 - Схема наружной стеновой панели с проемом под балконный блок

## 4.2. Теплотехнические свойства наружной стеновой панели

### 4.2.1 Экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием

Для теплотехнического расчета наружной стеновой панели экспериментальным путем был определен коэффициент внутренней теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием. Испытание проведено в соответствии с ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» с помощью Измерителя теплопроводности ИТС-1 «150». Образцы для испытания на теплопроводность изготавливались в виде плит размерами 150x150x30 мм. Формы для образцов заливались в вертикальном положении. Распалубка производилась на 2 сутки после изготовления образцов. Последующее время образцы хранились в нормальных условиях при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха не ниже 60 %. До и после испытания образцы взвешивались.

Для определения коэффициента внутренней теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием было использовано два состава смесей, подобранных п.3.5.1 (Таблица 3.16, состав №1) и п.3.6.1 (Таблица 3.18). В один из составов добавлялся безобжиговый зольный гравий на основе низкокальциевой золы уноса, в другой - на основе высококальциевой золы уноса. На рисунке 4.7 представлен образец, установленный в измеритель теплопроводности.

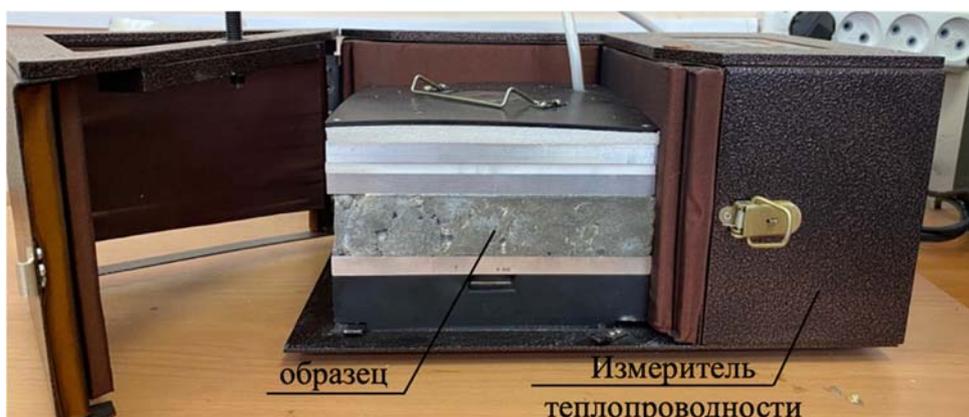


Рисунок 4.7 - Образец перед началом испытания

Результаты испытаний бетона представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты определения теплопроводности бетона

Состав бетона	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С)
Бетон с безобжиговым зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса	0,898
	0,879
	0,904
Среднее значение	0,894
Бетон с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса	0,655
	0,639
	0,650
Среднее значение	0,648

Коэффициент теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса, предлагаемого для использования в наружных стеновых панелях, составил 0,648 Вт/(м·°С). Сравнивая это значение с другим бетоном с безобжиговым зольным гравием из низкокальциевой золы уноса видно, что коэффициент теплопроводности предлагаемого бетона меньше на 27,5%.

#### 4.2.2 Определение толщины утеплителя наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы

Расчетное значение коэффициента теплопроводности ( $\lambda_w$ ) для бетона с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса при условиях эксплуатации Б определено по формуле:

$$\lambda_w = \lambda_0 + \Delta\lambda \cdot w, \quad (4.1)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность в сухом состоянии, для бетона разработанного состава равная 0,648 Вт/(м·°С) (см. Таблицу 4.1);  $\Delta\lambda$  – значение приращения теплопроводности на 1% влажности материала, принятое 0,022 Вт/(м·°С·%)

согласно [165] (таблица 6.8);  $w$  – влажность строительного материала равная 8% при условиях эксплуатации Б согласно [166] (приложение Т).

Расчетное значение коэффициента теплопроводности, определенное по формуле 4.1:

$$\lambda_w = 0,648 + 0,022 \cdot 8 = 0,824 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Определим толщину утеплителя для наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы. Состав конструкции наружной стеновой панели представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Теплотехнические показатели наружной стеновой панели

№ слоя	Назначение слоя и материал	Толщина, мм	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м °С)
1	Внутренний слой. Бетон с безобжиговым зольным гравием (1700 кг/м <sup>3</sup> )	180	0,824
2	Теплоизоляция. Экструдированный пенополистирол (35 кг/м <sup>3</sup> )	по расчету	0,033
3	Внешний слой. Тяжелый армированный бетон (2100 кг/м <sup>3</sup> )	70	2,04

Тепловая защита основных строительных элементов и конструкций рассчитана в соответствии нормативной документации [166], [167], [168]

Климатические и микроклиматические условия для Санкт-Петербурга согласно [166]:

1. Продолжительность отопительного периода  $z_{om} = 211$  дней.
2. Средняя температура наружного воздуха отопительного периода  $t_{om} = -1,2$ °С.
3. Зона влажностного режима - 1 (влажная).
4. Расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 – «минус» 24.
5. Условия эксплуатации ограждающих конструкций - Б.

6. Температура внутри помещений -  $t_e = +20$  °C [167].

Определение градусо-суток отопительного периода [168]:

$$ГСОП = (t_b - t_{от})z_{от} = (20 + 1,2) \times 211 = 4673,2 \text{ °C} \cdot \text{сут} \quad (4.2)$$

Нормативное значение приведенного сопротивления теплопередаче следует принимать не менее нормируемых значений, определяемых по [168] в зависимости от градусо-суток района строительства:

$$R_o^{mp} = a \cdot ГСОП + b = 0,00035 \times 4673,2 + 1,4 = 2,97 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} \quad (4.3)$$

Для теплотехнически неоднородных наружных ограждающих конструкций требуемое условное сопротивление теплопередаче:

$$R^{усл. mp_o} = R_o^{mp} / r \quad (4.4)$$

где  $r$  - коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции, учитывающий влияние стыков, обрамляющих ребер, жестких связей и других теплопроводных включений, определяемый согласно [169] и равный 0,6;  $R^{усл. mp_o}$  - требуемое сопротивление теплопередаче конструкции без учета теплопроводных включений,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

$$R^{усл. mp_o} = 2,97 / 0,6 = 4,95 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$$

Из приведенных выше вычислений за требуемое сопротивление теплопередачи из условия энергосбережения выбираем  $R^{усл. mp_o} = 4,95 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

Для каждого слоя заданной стены необходимо рассчитать термическое сопротивление по формуле:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (4.5)$$

где  $\delta_i$  - толщина слоя, м;

$\lambda_i$  - расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м °C)

Расчет термического сопротивления по первому слою:

$$R_1 = \frac{0,18}{0,824} = 0,218 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Расчет термического сопротивления по третьему слою:

$$R_3 = \frac{0,07}{2,04} = 0,034 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Термическое сопротивление участка стены определяем по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum Ri + \frac{1}{\alpha_{н}}, \quad (4.6)$$

где  $\alpha_{в} = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), принимаемый согласно [168];  $\alpha_{н} = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), принимаемый согласно [168];

Без учета утеплителя термическое сопротивление стены равно:

$$R_o = 1/8,7 + (0,218 + 0,034) + 1/23 = 0,41 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

Таким образом термическое сопротивление слоя теплоизоляции должно быть не менее  $R_{\text{усл.мп}_o} - R_o = 4,95 - 0,41 = 4,54$  (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Тогда минимальная толщина теплоизоляции должна быть:

$$\delta_{\text{тепл}} \geq R \cdot \lambda_{\text{тепл}} = 4,54 \cdot 0,033 = 0,15 \text{ м}.$$

Принимаем толщину экструдированного пенополистирола 150 мм.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче равно:

$$R_{\text{пр}} = (1/8,7 + (0,218 + 0,034 + 4,55) + 1/23) \cdot 0,6 = 2,98 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

Из полученного результата можно сделать вывод, что  $R_{\text{пр}} = 2,98$  (м<sup>2</sup>·°С/Вт) >  $R_{\text{мп}_o} = 2,97$  (м<sup>2</sup>·°С/Вт), следовательно, толщина утеплителя подобрана правильно.

Общая толщина стены в данном случае будет равна 400 мм.

#### **4.2.3 Сравнение теплотехнических характеристик наружной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы с типовой трехслойной железобетонной панелью**

Ближайшим аналогом панели из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы является трехслойная железобетонная панель. Это изделие, как и разработанное, состоит из трех слоев: внутреннего железобетонного слоя, внешнего бетонного или железобетонного слоя и промежуточного теплоизоляционного слоя. Для сравнения с разработанной панелью была выбрана конструкция панели, отличающаяся только материалом внутреннего несущего слоя. Состав конструкции наружной стеновой панели представлена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Теплотехнические показатели трехслойной железобетонной панели

№ слоя	Слой	Толщина, мм	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м °С)
1	Внутренний слой. Железобетон (2500 кг/м <sup>3</sup> )	180	1,86
2	Теплоизоляция. Экструдированный пенополистирол (35 кг/м <sup>3</sup> )	расчет	0,033
3	Внешний слой. Тяжелый армированный бетон (2100 кг/м <sup>3</sup> )	70	2,04

Расчет термического сопротивления по первому слою:

$$R_1 = \frac{0,18}{1,86} = 0,097 \text{ м}^2\text{°С/Вт.}$$

Расчет термического сопротивления по третьему слою:

$$R_3 = \frac{0,07}{2,04} = 0,034 \text{ м}^2\text{°С/Вт.}$$

Без учета утеплителя термическое сопротивление стены равно:

$$R_o = 1/8,7 + (0,097 + 0,034) + 1/23 = 0,289 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт.}$$

Таким образом термическое сопротивление слоя теплоизоляции должно быть не менее  $R_{\text{усл.тп}_o} - R_o = 4,95 - 0,289 = 4,661 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт. (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт.}$  Тогда минимальная толщина теплоизоляции должна быть:

$$\delta_{\text{тепл}} \geq R \cdot \lambda_{\text{тепл}} = 4,661 \cdot 0,033 = 0,154 \text{ м.}$$

Принимаем толщину экструдированного пенополистирола 160 мм.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче равно:

$$R_{np} = (1/8,7 + (0,097 + 0,033 + 4,85) + 1/23) \cdot 0,6 = 3,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт.}$$

Из полученного результата можно сделать вывод, что  $R_{np} = 3,08 \text{ (м}^2\text{°С/Вт)} > R_{\text{тп}_o} = 2,97 \text{ (м}^2\text{°С/Вт)}$ , следовательно, толщина утеплителя подобрана правильно.

Общая толщина стены в данном случае будет равна 410 мм.

### 4.3. Несущая способность наружной стеновой панели

#### 4.3.1. Анализ несущей способности наружной стены

Для определения несущей способности рассматривается трехслойная железобетонная панель, представленная на рисунке 4.8.

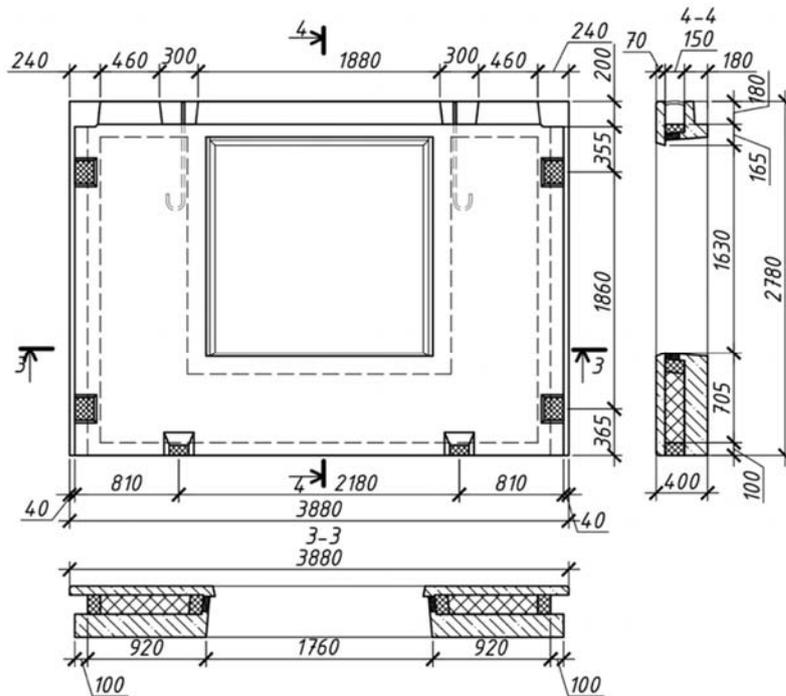


Рисунок 4.8 - Наружная стеновая панель

Несущий слой панели выполнен из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы. Модуль упругости бетона и прочность при сжатии, полученные экспериментально (п.3.6.4 и п. 3.6.2, Таблица 3.20), составляют 16,1 ГПа и 28,92 МПа, соответственно. Класс бетона по прочности - В22,5.

Расчетное сопротивление бетона для предельных состояний первой группы при классе бетона В22,5 по прочности на сжатие составляет 13 МПа [163].

В качестве расчетного сечения примем сечение простенка несущего слоя панели с размерами 180 мм x 1020 мм (рисунок 4.9).

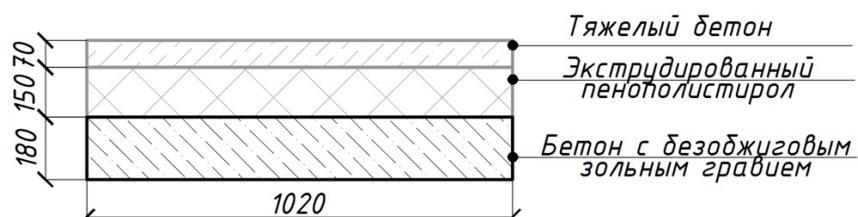


Рисунок 4.9 - Схема расчетного сечения

Несущую способность стеновой панели определим по формуле 4.7.

$$N \leq 2 \cdot R_b \cdot A_b, \quad (4.7)$$

где  $N$  – несущая способность стеновой панели;

$R_b$  – расчетное сопротивление бетона класса В22,5 по прочности на сжатие, определенное согласно [163] (Таблица 6.8) и равное 13,0 МПа;

$A_b$  – площадь сжатой зоны бетона, определяемая для элементов прямоугольного сечения по формуле (4.8).

2 - коэффициент, учитывающий количество простенков в панели (см. рисунок 4.9).

$$A_b = b \cdot h \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_0 \cdot \eta}{h}\right), \quad (4.8)$$

где  $b$  – ширина расчетной части сечения простенка;

$h$  – высота части сечения простенка;

$e_0$  – эксцентриситет продольной силы, состоящий из случайного эксцентриситета, равного 1 см согласно [163] и эксцентриситета действия результирующей силы с учетом опирания перекрытия по закону треугольника (0,36 см);

$\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние прогиба на значение эксцентриситета продольной силы, определенный по формуле 4.9.

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}, \quad (4.9)$$

где  $N$  – нагрузка на простенок (см. сбор нагрузок далее);

$N_{cr}$  – условная критическая сила, определяемая по формуле 4.10.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_0^2}, \quad (4.10)$$

где  $E$  – модуль упругости бетона;

$I$  – момент инерции сечения элемента относительно его центра тяжести, определяемый как  $\frac{b \cdot h^3}{12}$  и равный 49572 см<sup>4</sup>;

$l_0$  – расчетная длина элемента, равная высоте стены.

Расчет условной критической силы по формуле 4.10:

$$N_{cr} = \frac{3,14^2 \cdot 161 \cdot 10^4 \cdot 49572}{260^2} = 11640 \text{ кН.}$$

Тогда коэффициент, учитывающий влияние прогиба на значение эксцентриситета продольной силы, рассчитанный по 4.9:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{716}{11640}} = 1,07.$$

Площадь сжатой зоны бетона, определенная по формуле 4.8:

$$A_b = 102 \cdot 18 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 1,36 \cdot 1,07}{18}\right) = 1539 \text{ см}^2.$$

Несущая способность стеновой панели, определенная по формуле 4.7:

$$N = 2 \cdot 1300 \cdot 1539 = 4001 \text{ кН.}$$

### 4.3.2. Расчетное обоснование несущей способности стеновой панели

#### *Описание модели исследования для численного расчета*

Цель численного расчета - определение максимального эквивалентного напряжения в наиболее нагруженном простенке наружной стеновой панели при внецентренно приложенной сжимающей «штамповой» нагрузке.

Несущий слой наружной стеновой панели моделируется в программном комплексе «SCAD Office». Расчетная модель состоит из объемных элементов типа 34 и типа 36, моделирующих разработанный бетон (см. п.3.6.1), и стержней, моделирующих рабочую арматуру.

Арматура, участвующая в расчетной схеме, включает в себя:

- две сетки Ø5 Вр-I с шагом 150 мм, расположенные на расстоянии 110 мм друг от друга;
- отдельные арматурные стержни Ø14 А500С, расположенные вокруг оконного проема, вдоль нижней и верхней сторон панели.
- армирование зоны контактного стыка двумя сетками Ø5 Вр-I, расположенными на расстоянии 30 мм друг от друга.

Расположение арматуры, участвующей в расчетной схеме, стеновой панели принято по чертежу КР (Приложение 1).

Расчетная модель выполнена в упругой постановке.

Рассматриваемая задача решалась три раза с различной величиной сетки конечных элементов: 3x3 (см) и 1,5x3 (см); 1,5x1,5 (см); 1x1 (см) и 1,5x1 (см).

Расчетная модель представлена на рисунке 4.10.

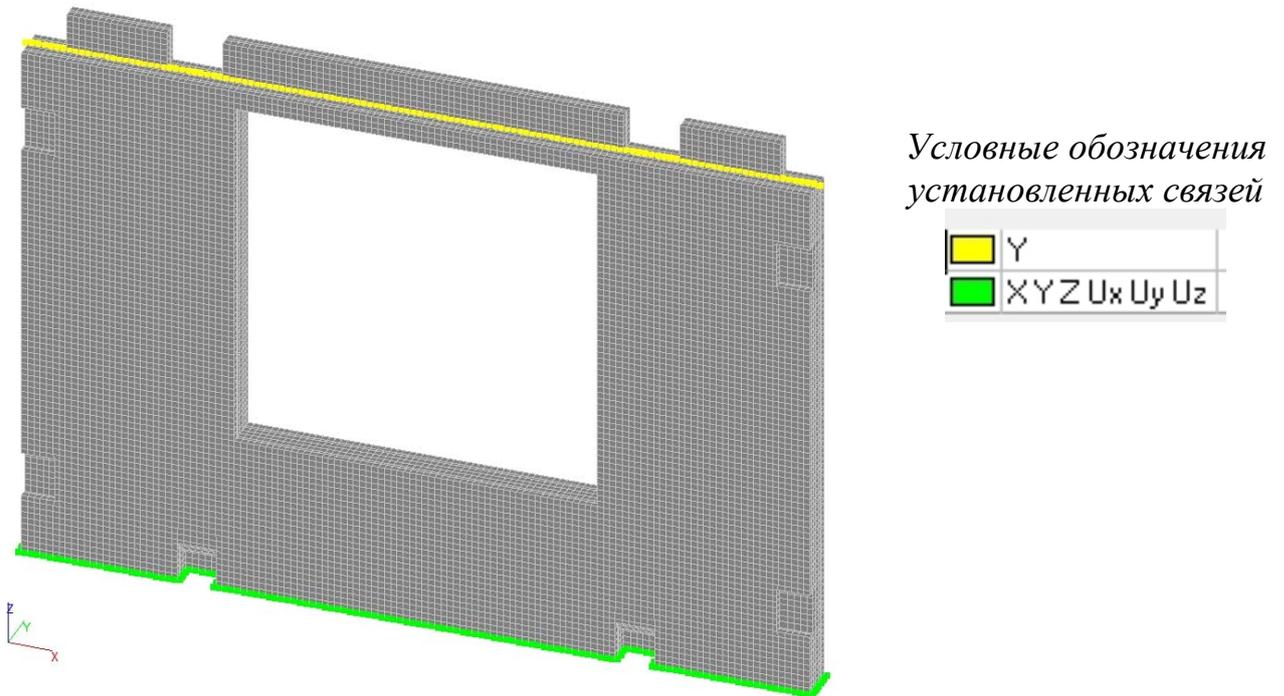


Рисунок 4.10 - Расчетная модель

Жесткостные характеристики объемных и стержневых элементов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Жесткостные характеристики объемных и стержневых элементов

Элемент	Назначение	Модуль упругости, кН/м <sup>2</sup>	Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	Диаметр, мм
Объемный	бетон	15799986	1,7	-
Стержневой	сетки армирования	206010000	7,85	5 (Bp-1)
Стержневой	отдельные арматурные стержни	206010000	7,85	14 (A500C)

Граничные условия - нижняя плоскость панели закреплена от смещения по направлению всех осей координат X, Y, Z, верхняя плоскость панели имеет свободный поворот из плоскости; горизонтальные перемещения из плоскости ограничены (см. рисунок 4.10).

Дополнительные условия - все перемещения узлов, принадлежащих каждой координате  $Y$  верхней плоскости панели, имеют одинаковые перемещения по  $Z$  (см. рисунок 4.11).

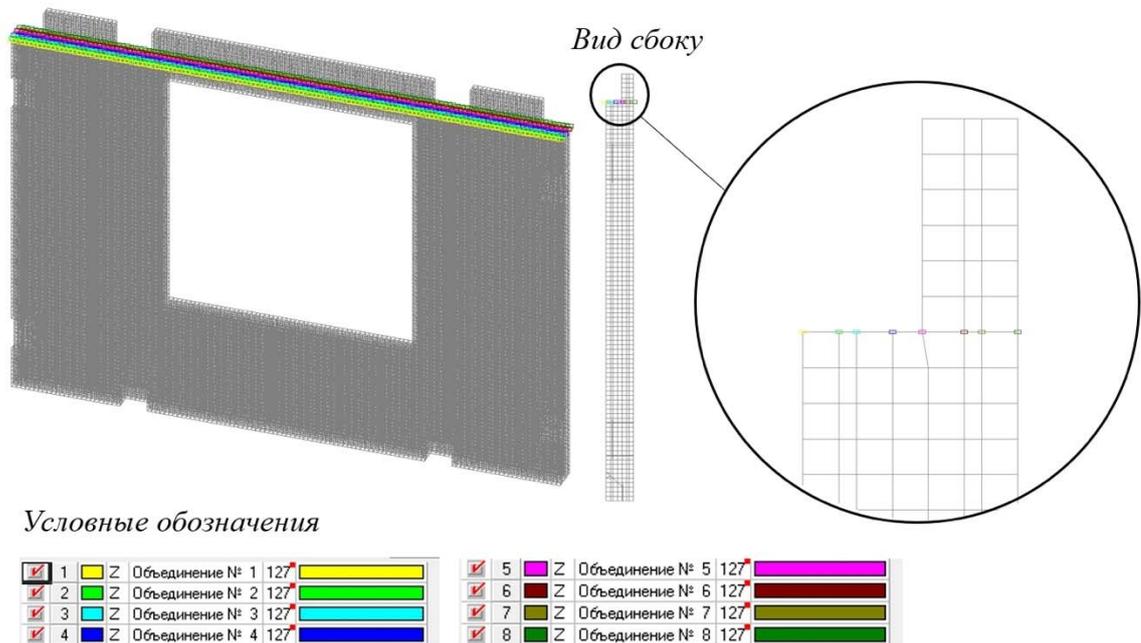


Рисунок 4.11 - Объединение перемещений

Нагрузка на панель задана тремя загрузками:

1. Линейно распределенная по верхней плоскости внутренней части панели нагрузка от плиты перекрытия, опирающейся непосредственно на панель ( $q_{0-max} = 26,46$  кН/м и  $q_{0-min} = 0$  кН/м);
2. Равномерно распределенная по поверхности «единичная» нагрузка от вышерасположенных панелей стен и перекрытий, кроме непосредственно опирающегося перекрытия указанного в п.1 ( $q_1 = 1$  кН/м);
3. Нагрузка от собственного веса стеновой панели ( $q_{с.в.} = 33,43$  кН)

Схемы приложения нагрузок при виде панели сбоку представлены на рисунке 4.12.

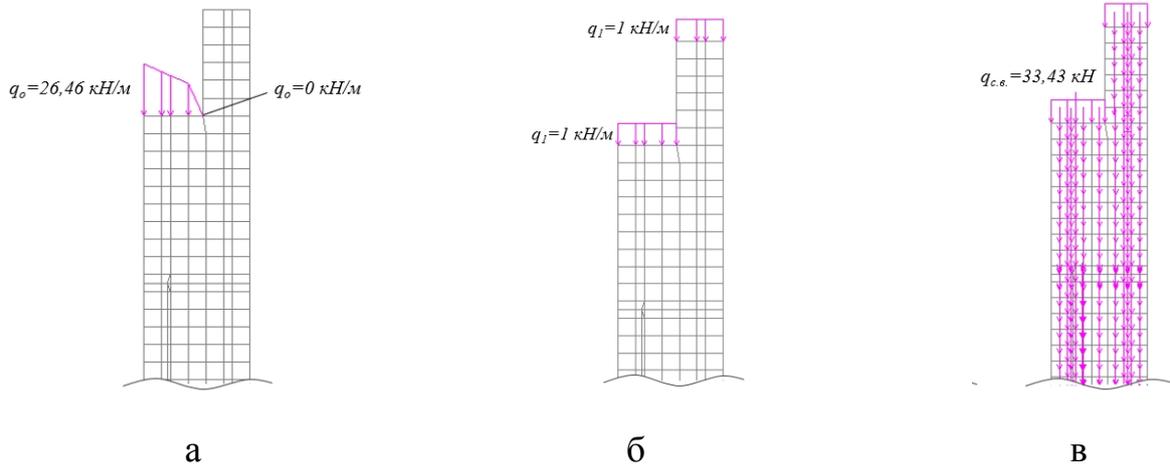


Рисунок 4.12 - Схема приложения нагрузок (а)  $q_0$ , (б)  $q_1$  и (в)  $q_{c.в}$ .

Расчет проводился на комбинацию из трех загрузений.

### Результаты численного расчета

Результаты численного расчета модели исследования с сеткой конечных элементов  $3 \times 3$  (см) и  $1,5 \times 3$  (см) показали, что при увеличении загрузки  $q_1$  в 970 раз в бетоне появляются опасные напряжения численно равные расчетному сопротивлению бетона В22,5 на сжатие (13 МПа). При этом максимальные сжимающие напряжения, направленные вдоль оси X, составили «минус» 3,53 МПа, вдоль оси Y - «минус» 1,22 МПа и вдоль оси Z - «минус» 12,69 МПа (см. рисунки 4.13-4.14).

$\sigma_x$		
МПа	МПа	
-3.53	-2.82	316
-2.82	-2.11	786
-2.11	-1.4	2062
-1.4	-0.69	7786
-0.69	0.02	43985
0.02	0.73	7470
0.73	1.44	4023
1.44	2.15	1662
2.15	2.86	642
2.86	3.57	322
3.57	4.28	176
4.28	4.99	44
4.99	5.7	28
5.7	6.41	28
6.41	7.12	12

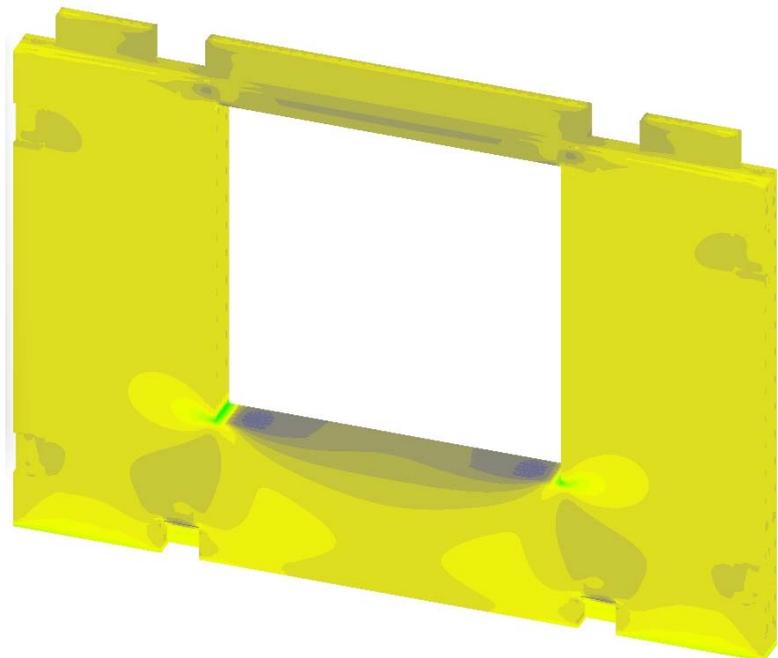


Рисунок 4.13 - Напряжения вдоль оси X

$\sigma_y$		
МПа	МПа	
-1,22	-0,82	1742
-0,82	-0,41	2787
-0,41	-0,01	13846
-0,01	0,39	52228
0,39	0,79	826
0,79	1,2	288
1,2	1,6	156
1,6	2	228
2	2,4	212
2,4	2,81	247
2,81	3,21	235
3,21	3,61	145
3,61	4,01	42
4,01	4,41	8
4,41	4,82	8

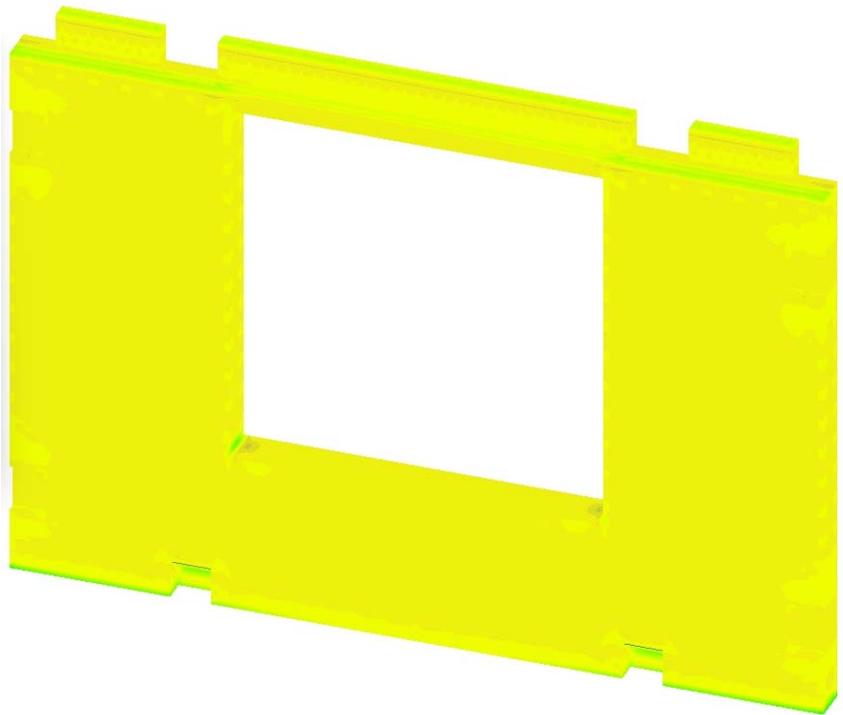


Рисунок 4.14 - Напряжения вдоль оси Y

$\sigma_z$		
МПа	МПа	
-12,69	-11,73	1102
-11,73	-10,77	2560
-10,77	-9,82	13332
-9,82	-8,86	28432
-8,86	-7,9	4684
-7,9	-6,95	2363
-6,95	-5,99	2540
-5,99	-5,03	3390
-5,03	-4,08	3201
-4,08	-3,12	2002
-3,12	-2,16	1896
-2,16	-1,21	2187
-1,21	-0,25	3973
-0,25	0,71	5926
0,71	1,66	108

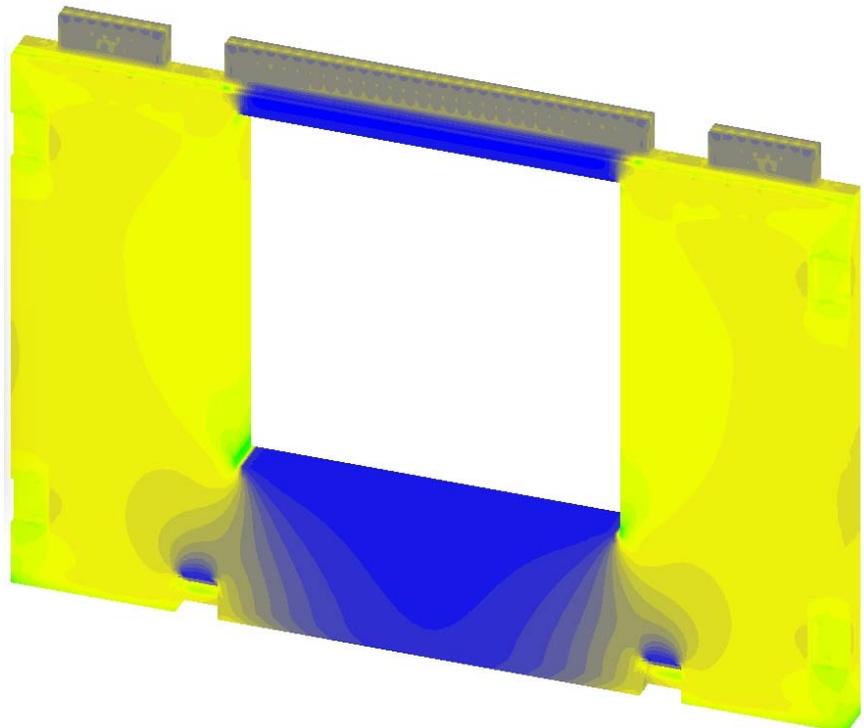


Рисунок 4.15 - Напряжения вдоль оси Z

При переходе к эквивалентным напряжениям согласно теории наибольших линейных деформаций значение максимального напряжения составило «минус» 12,99 МПа (см. рисунок 4.16).

$\sigma_{s1}$		
МПа	МПа	
-12,99	-11,8	1188
-11,8	-10,62	3400
-10,62	-9,43	25911
-9,43	-8,25	17539
-8,25	-7,06	2976
-7,06	-5,88	3178
-5,88	-4,69	3935
-4,69	-3,51	3127
-3,51	-2,32	2136
-2,32	-1,14	2855
-1,14	0,05	7597
0,05	1,23	786
1,23	2,42	236
2,42	3,6	270
3,6	4,78	22

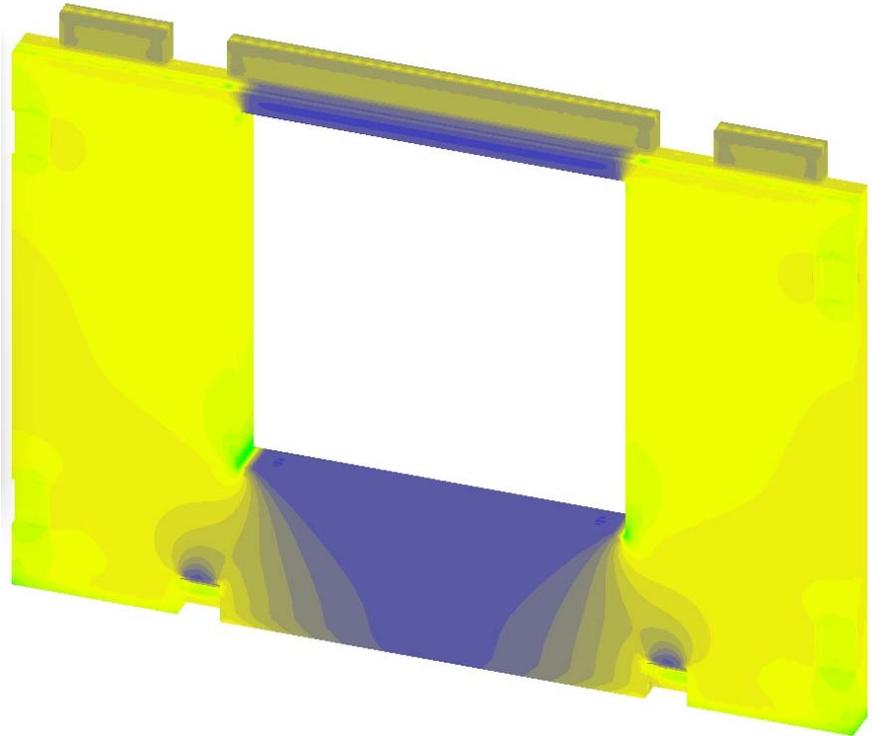


Рисунок 4.16 - Эквивалентные напряжения

Максимальные перемещения вдоль оси Z составляют -1,613 мм (см. рисунок 4.17).

Перемещения			
Z			
мм	мм	мм	
-1,613	-1,511	5810	
-1,511	-1,41	3155	
-1,41	-1,309	3116	
-1,309	-1,208	3162	
-1,208	-1,107	3096	
-1,107	-1,006	3100	
-1,006	-0,904	3126	
-0,904	-0,803	3156	
-0,803	-0,702	3168	
-0,702	-0,601	3182	
-0,601	-0,5	3204	
-0,5	-0,398	3248	
-0,398	-0,297	3352	
-0,297	-0,196	3814	
-0,196	-0,095	5112	
-0,095	0,006	12190	

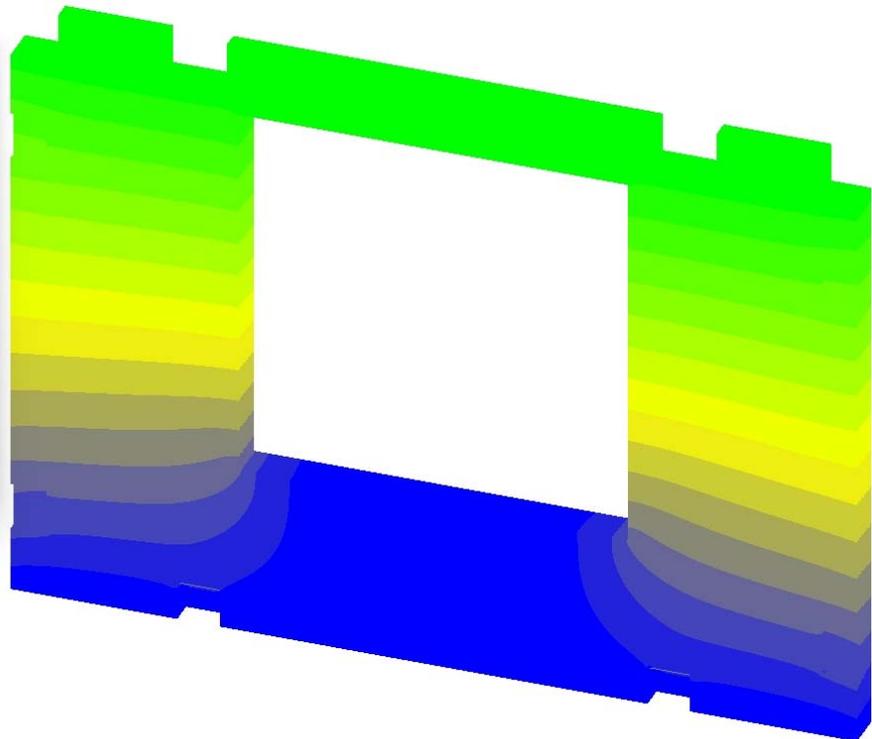


Рисунок 4.17 - Максимальные перемещения вдоль оси Z

Результаты численного расчета показали максимальные сжимающие ( $N_{sc}$ ) и растягивающие ( $N_s$ ) усилия в стержнях Ø14 (A500C) равные -23,88 кН и 5,18 кН, соответственно (см. рисунок 4.18).

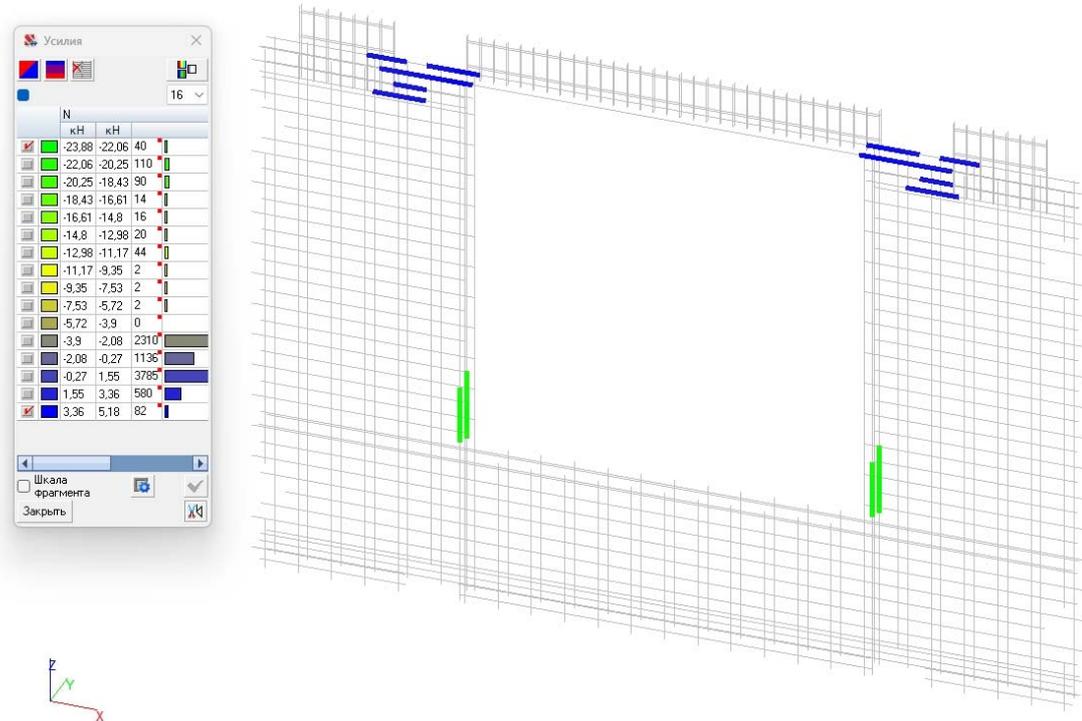


Рисунок 4.18 - Максимальные усилия в стержневых элементах

Сравним напряжения в арматуре с расчетными значениями сопротивлений растяжению и сжатию для предельных состояний первой группы согласно [163].

Расчетное сопротивление растяжению арматуры A500 ( $R_s$ ) - 435 МПа.

Расчетное сопротивление сжатию арматуры A500 ( $R_{sc}$ ) - 435 МПа.

Площадь поперечного сечения арматуры Ø14 ( $A_s$  и  $A'_s$ ) - 1,54 см<sup>2</sup>.

Определим максимальные растягивающие напряжения в арматуре ( $\sigma_s$ ):

$$\sigma_s = \frac{N_s}{A_s} = \frac{23880}{1,54 \cdot 10^{-4}} = 155,1 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 155,1 \text{ МПа}$$

Таким образом, действующее растягивающее напряжение в арматуре 155,1 МПа  $\leq$  435 МПа.

Определим максимальные сжимающие напряжения в арматуре ( $\sigma_{sc}$ ):

$$\sigma_{sc} = \frac{N_{sc}}{A'_s} = \frac{5180}{1,54 \cdot 10^{-4}} = 33,6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 33,6 \text{ МПа}$$

Таким образом, действующее сжимающее напряжение в арматуре 33,6 МПа  $\leq$  435 МПа.

При длине панели 3,8 м несущая способность панели составит 3716 кН (978 кН/м×3,8 м).

Результаты численного расчета с различными размерами сеток конечных элементов представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Результаты численного расчета

Размер сетки	3x3 (см) и 1,5x3 (см)	1,5x1,5 (см)	1x1 (см) и 1,5x1 (см)
Коэффициент $K$ , кН/м	970	976	978
Максимальные перемещения по $z$ , мм	-1,613	-1,625	-1,630
Несущая способность, кН	3686	3709	3716

Выявлена сходимость модели исследования с различными размерами сетки конечных элементов как по перемещениям, так и по напряжениям.

По результатам численного расчета несущая способность наружной стеновой панели составляет не менее 3716 кН.

#### **4.4. Пример использования разработанной наружной стеновой панели в конструкции жилого многоэтажного здания**

##### **4.4.1. Описание конструктивного решения здания**

Использование разработанных наружных стеновых панелей рассматривается на примере сборного крупнопанельного односекционного 16-этажного жилого здания. Конструктивная система здания – поперечно-стеновая.

В проекте приняты следующие основные архитектурно-конструктивные параметры, правила расположения модульных осей, высот этажей и привязки к ним конструктивных элементов:

- шаг поперечных несущих стен от 2,1 до 3,9 м.
- высота тех. подполья 2,81 м;
- высота этажа: 2,8 м;
- высота технического этажа 2,16 м;

План типового этажа представлен в Приложении 2, продольный разрез здания — в Приложении 3.

Жесткость, устойчивость и геометрическая неизменяемость здания обеспечивается совместной работой продольных и поперечных несущих стен.

Жесткость и геометрическая неизменяемость диска перекрытия (покрытия) обеспечивается связями между плитами перекрытий (покрытий), имеющими сварные соединения между собой при помощи металлических соединительных элементов и образующих геометрически неизменяемый контур горизонтального диска перекрытия (покрытия).

*Фундамент здания* – свайный с ленточными ростверками.

*Внутренние стеновые панели* - несущие бетонные, 1-го, типового и технического этажа толщиной 180 мм, цокольного этажа толщиной 200 мм. Длинной до 7200 мм из тяжелого бетона класса по прочности В15-В25, армированные сетками, плоскими каркасами и отдельными стержнями из ненапрягаемой арматуры классов А240, А500С, Вр-I.

Высота панелей типового этажа - 2600 мм, чердака - 2060 мм.

*Плиты перекрытия* - плоские, сплошные толщиной 160 мм, длиной до 6930 мм, шириной до 4080 мм из тяжелого бетона класса по прочности не ниже В25 класса по морозостойкости F50 с ненапрягаемой арматурой классов А240, А500С, Вр-I. Часть плит имеет подрезки и отверстия для пропуска инженерных коммуникаций. Между собой плиты свариваются посредством металлических соединительных элементов к закладным и монтажным петлям, тем самым образуется единый диск перекрытия. *Плиты покрытия* - за исключением покрытия ЛЛУ - многопустотные плиты безопалубочного формования с канатным армированием.

*Наружные стеновые панели* - трехслойные железобетонные с жесткими дискретными связями однорядной (поэтажной) разрезки.

Ненесущие наружные панели имеют толщину 350 мм и состоят из трех слоев: наружного слоя (70 мм) из тяжелого бетона класса по прочности В15-В25, армированного в один ряд сетками и отдельными стержнями, теплоизоляционного

слоя (150 мм) из пенополистирола ПСБ-С-35 (ГОСТ 15588-86) с защитой по торцам и в проемах вкладышами из минеральной ваты группы горючести «НГ» (ГОСТ 30244-94) в полиэтиленовой пленке и внутреннего слоя (80 мм) из тяжелого бетона класса по прочности В25, армированного ненапряженной арматурой - в один ряд сетками с шагом 200х200мм и отдельными стержнями.

Несущие стеновые панели описаны в п.4.1.

Жесткие дискретные связи из бетона В15 W4 F100 армированы сварным каркасом из арматуры Ø10 А240/Ø6 Вр-I.

Схема расположения наружных стеновых панелей представлена в Приложении 4, несущие наружные стеновые панели — в Приложении 5.

#### **4.4.2. Сбор нагрузок и анализ несущей способности наружной стены**

Сравним несущую способность с действующими нагрузками. Для этого рассмотрим область применения панелей для строительства жилых зданий высотой до 16 этажей с поперечно-стеновой конструктивной схемой с пролетами 2,1 - 3,9 м и монолитной плитой перекрытия толщиной 160 мм. Сбор нагрузок осуществлен для здания максимальной этажности - 16 этажей и пролета - 3,6 м (см. п. 4.4.1).

1. Вес панелей - 642 кН (17 шт по 3433 кг/шт с учетом коэффициента надежности 1,1);
2. Вес перекрытий - 525,1 кН (17 шт по 400 кг/м<sup>2</sup> с учетом коэффициента надежности 1,1 и опирания перекрытия по двум сторонам);
3. Вес пола - 112,3 кН (16 шт по 100 кг/м<sup>2</sup> с учетом опирания перекрытия по двум сторонам);
4. Вес плоской кровли - 17,6 кН (250 кг/м<sup>2</sup> с учетом опирания плиты покрытия по двум сторонам);
5. Снеговая нагрузка - 14,7 кН (III снеговой район, с учетом коэффициента надежности 1,4 и опирания плиты покрытия по двум сторонам);
6. Полезная нагрузка - 120,5 кН (16 шт по 150 кг/м<sup>2</sup> с учетом коэффициента надежности 1,3, коэффициента понижения нормативных значений

нагрузки 0,55, определяемого по формуле 6.8 [170] и опирания перекрытия по двум сторонам).

Таким образом, действующие нагрузки на панель составят  $642+525,1+112,3+17,6+14,7+120,5=1432,2$  кН = 143,2 т, а действующая нагрузка на один простенок панели составит  $1432,2/2=716,1$  кН=71,6 т. Действующая нагрузка на панель 143,2 т  $\leq$  371,6 т, что удовлетворяет условиям прочности, следовательно, разработанная наружная стеновая панель применима для жилых многоэтажных зданий (до 16 этажей).

#### **4.5. Техничко-экономические показатели разработанной наружной стеновой панели и сравнение с существующими аналогами**

Техничко-экономические показатели разработанной наружной стеновой панели сравниваются с ближайшим аналогом - трехслойной железобетонной панелью. Производство сравниваемых панелей одинаковое - в заводских условиях, различие между панелями заключается в используемом материале внутреннего слоя и толщине теплоизоляционного слоя. По этой причине экономическое сравнение выполнено путем сравнения стоимости материалов (без учета транспортных расходов) для производства одной панели с размерами, указанными на рисунке 4.8.

Промежуточный слой сравниваемых панелей выполнен из плит экструдированного пенополистирола. В случае с трехслойной железобетонной панелью толщиной 160 мм (см. п. 4.2.3), в случае с разработанной панелью - 150 мм (см. п. 4.2.2). Схема раскладки плит утеплителя осуществляется в два слоя (рисунок 4.19).

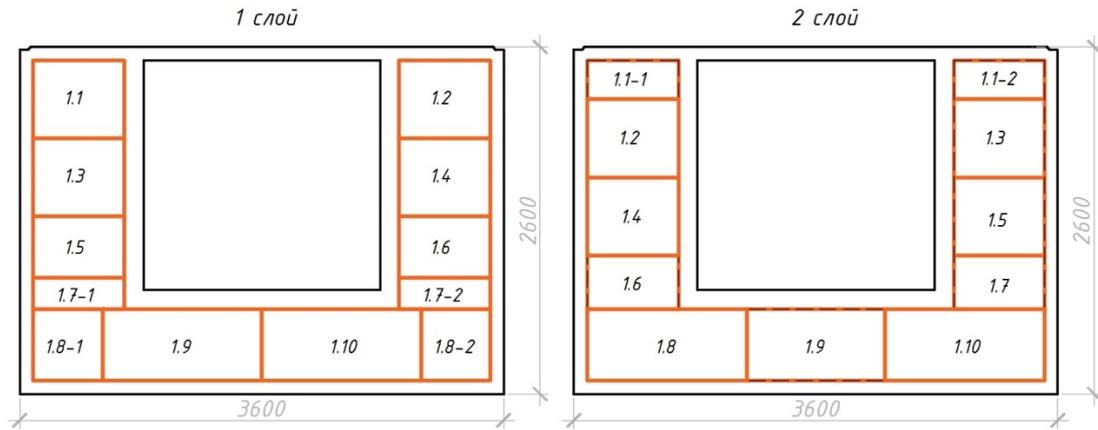


Рисунок 4.19 - Схема раскладки плит утеплителя

Определение стоимости используемых видов бетона для двух сравниваемых панелей представлено в таблице 4.6, стоимости утепления - в таблице 4.7. Стоимость материалов взята в мае 2022 г.

Таблица 4.6 - Стоимость используемых видов бетонов для производства панелей

Вид бетона и вид наружной панели	Компоненты	Стоимость 1кг, руб	Расход в кг на 1 м <sup>3</sup>	Стоимость материала на 1 м <sup>3</sup> , руб
1	2	3	4	5
Бетон с зольным гравием (В22,5) для разработанной панели	Песок карьерный	0,1 (1м <sup>3</sup> -180руб)	650	65
	Цемент. М500	5,39 руб (1т-5390руб)	360	1940,4
	Зольный гравий	0,19	710	134,9
	Суперпластификатор МС-PowerFlow 2695	128	6	768
	Вода	-	144	-
Итого:				<b>2908,3</b>

1	2	3	4	5
Тяжелый бетон (В20) для двух видов панелей	Песок карьерный	0,1 (1м <sup>3</sup> -180руб)	710	71
	Цемент. М400	5,09 руб (1т-5090руб)	320	1628,8
	Щебень гранитный 5- 10мм. М1000	0,82 (1м <sup>3</sup> -1150руб)	1040	852,8
	Вода	-	165	-
	Пластификатор С-3	89	6	534
Итого:				<b>3086,6</b>
Железобетон (В22,5) для трехслойной типовой панели	Песок карьерный	0,1 (1м <sup>3</sup> -180руб)	648	64,8
	Цемент. М500	5,39 руб (1т-5390руб)	380	2048,2
	Щебень гранитный 5- 20 мм. М1000	0,75 (1м <sup>3</sup> -1050руб)	1260	945
	Суперпластификатор МС-PowerFlow 2695	128	3	384
	Вода	-	155	-
Итого:				<b>3442</b>

Таблица 4.7 - Стоимость утепления для производства панелей

Толщина листа ЭППС (35кг/м <sup>3</sup> )	Кол-во листов	Стоимость упак. и кол-во листов в упак.	Стоимость 1 листа, руб	Стоимость на панель, руб
1	2	3	4	5
<i>Теплоизоляция для разработанной панели</i>				
100 мм	10	1872 руб/4 штуки	468	4680
50 мм	10	1776 руб/8 штук	222	2220
Итого:				<b>6900</b>

1	2	3	4	5
<i>Теплоизоляция для трехслойной железобетонной панели</i>				
100 мм	10	1872 руб/4 штуки	468	4680
60 мм	10	1900 руб/штук	380	3800
Итого:				<b>8480</b>

Экономическое сравнение двух видов панелей одинаковых размеров (см. рисунок 4.8) представлено в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Экономическое сравнение двух видов панелей

Вид панели	Материал и толщина слоя, мм	Объем, м <sup>3</sup>	Стоимость 1 м <sup>3</sup> , руб	Стоимость материала на панель, руб
Наружная панель из бетона с зольным гравием	Бетон с зольным гравием, 180	1,26	2908,3	3664,5
	ЭППС, 100	-	-	4680
	ЭППС, 50	-	-	2220
	Тяжелый бетон, 70	0,53	3086,6	1635,9
Итого:				<b>12200,4</b>
Наружная трехслойная типовая панель	Железобетон, 180	1,26	3442	4336,9
	ЭППС, 100	-	-	4680
	ЭППС, 60	-	-	3800
	Тяжелый бетон, 70	0,53	3086,6	1635,9
Итого:				<b>14452,8</b>

Из таблицы 4.8 видно, что стоимость материалов для производства разработанной наружной панели - 12200,4 рублей, стоимость материалов для трехслойной железобетонной панели - 14452,8 рублей. Стоимость материалов для разработанной панели на 15,6% меньше, чем для трехслойной железобетонной панели. Технология строительства с использованием в качестве наружных стен

панели из бетона с зольным гравием экономически выгоднее, чем строительство зданий с наружными стенами из трехслойных железобетонных панелей.

Другим преимуществом разработанных панелей перед трехслойными железобетонными панелями является меньшая масса одного изделия. В таблице 4.9 представлены массы двух сравниваемых панелей (см. рисунок 4.8).

Таблица 4.9 - Сравнение массы двух видов панелей

Материал и толщина слоя, мм	Объем, м <sup>3</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Масса, кг
Наружная панель из бетона с зольным гравием			
Бетон с зольным гравием, 180	1,26	1700	2142
Арматура - по данным численного расчета (SCAD)			90
ЭППС, 100	0,63	35	22,1
ЭППС, 50	0,31	35	10,9
Тяжелый бетон, 70	0,53	2100	1113
Итого:			<b>3378</b>
Наружная трехслойная типовая панель			
Тяжелый бетон, 180	1,26	2300	2898
Арматура - по данным численного расчета (SCAD)			90
ЭППС, 100	0,63	35	22,1
ЭППС, 60	0,38	35	13,3
Тяжелый бетон, 70	0,53	2100	1113
Итого:			<b>4136,4</b>

Из таблицы 4.9 видно, что масса разработанной наружной панели - 3378 кг, масса аналогичной трехслойной железобетонной панели - 4136,4 кг. Разработанная наружная панель легче аналога на 18,3 %, что уменьшает нагрузку на фундамент.

#### 4.6 Выводы по главе 4

1. По теплотехническим характеристикам разработанная наружная стеновая панель не уступает известной трехслойной железобетонной стеновой панели. При одинаковых теплотехнических характеристиках разработанной

наружной стеновой панели требуется теплоизоляционный слой из экструдированного пенополистирола меньшей толщины - 150 мм вместо 160 мм для трехслойной железобетонной панели.

2. Разработанная наружная стеновая панель удовлетворяет условиям прочности и, следовательно, применима для многоэтажных жилых зданий (до 16 этажей). Коэффициент использования несущей способности стеновой панели для 16-этажного здания составляет 39 %.

3. Стоимость материалов для разработанной панели на 15,6% меньше, чем для трехслойной железобетонной панели. Технология строительства с использованием в качестве наружных стен панелей из бетона с зольным гравием экономически выгоднее, чем строительство зданий с наружными стенами из трехслойных железобетонных панелей.

4. Масса разработанной наружной панели - 3378 кг, масса аналогичной трехслойной железобетонной панели - 4136,4 кг. Разработанная наружная панель легче аналога на 18,3 %, что уменьшает нагрузку на фундамент.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведен обзор научно-технической литературы в области конструктивных решений бетонных и железобетонных наружных стеновых панелей, и подходов по использованию зол уноса в различных видах бетонов. Особо следует подчеркнуть следующее. Уменьшить вес бетонной стеновой панели без ухудшения ее свойств возможно использованием вместо щебня или гравия безобжигового зольного гравия. При этом сокращается загрязнение природной среды и сохраняются месторождения истощаемых природных заполнителей для бетона.

2. Приведен обзор физико-механических свойств бетонов с заполнителем из безобжигового зольного гравия, показана возможность использования таких бетонов в наружных стеновых панелях. Показаны преимущества бетонов с заполнителем из безобжигового зольного гравия перед традиционными видами бетонов.

3. Экспериментально исследована высококальциевая зола уноса для использования в бетонных слоях наружных стеновых панелей:

- осуществлен поиск добавок к золе, которые могли бы предотвратить расширение. Испытаны кремниевая кислота  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , микрокремнезем МКУ-85,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – реактив, гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – реактив, метакаолин  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , трепел Фокинского месторождения (Брянская обл.), жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ , микрофибриллированная целлюлоза. Наибольший эффект получен от кремниевой кислоты и микрокремнезема, а наименьший от жидкого стекла, трепела и микроцеллюлозы;

- установлено, что расширение и растрескивание золы Березовской ГРЭС можно полностью предотвратить добавкой микрокремнезема в количестве около 40 % от массы золы. При меньших значениях наблюдается расширение и, тем большее, чем меньше содержание микрокремнезема. Установлено, что микрокремнезем, позволяя золе нормально твердеть и набирать прочность в воздушных условиях, не обеспечивает отвержденным составам достаточной водостойкости;

- осуществлен поиск добавок к зольно-кремнеземному вяжущему для повышения прочности и водостойкости образцов. На расширение испытаны  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2$ . Наименьшее расширение показали хлориды и сульфаты. На прочность были испытаны добавки-электролиты, такие как  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{MgSO}_4$ ;  $\text{CaCl}_2$ ;  $\text{MgCl}_2$ ;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Наиболее высокую прочность обеспечили добавки  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , особенно их совместное применение в соотношении  $\text{MgCl}_2 : \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  равном 1 : 3,8. Прочность при сжатии в последнем случае составила за 28 суток 27,5 МПа.

4. Экспериментально исследованы искусственные заполнители для бетона на основе зол уноса:

- определены физико-механические характеристики искусственного заполнителя на основе низкокальциевой золы уноса: истинная плотность – 2,50 г/см<sup>3</sup>, средняя плотность – 1,53 г/см<sup>3</sup>, морозостойкость - не менее F25, водопоглощение по массе - 15 %, пористость - 38,8%, в т.ч. открытая – 23 %;

- определены физико-механические характеристики искусственного заполнителя на основе высококальциевой золы уноса: истинная плотность – 2,65 г/см<sup>3</sup>, средняя плотность – 1,42 г/см<sup>3</sup>, морозостойкость - не менее F25, водопоглощение по массе - 23 %, пористость - 46 %, в т.ч. открытая – 33 % .

5. Экспериментально исследованы бетоны с безобжиговым зольным гравием для наружных стеновых панелей:

- определены физико-механические характеристики бетонов с безобжиговым зольным гравием: прочность при сжатии – 37,8 МПа и 28,92 МПа, прочность при изгибе – 4,9 МПа и 4 МПа, коэффициент температурного линейного расширения –  $14,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $14,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , модуль упругости – 18 ГПа и 16 ГПа для бетона с зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса и бетона с зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса, соответственно;

- установлено, что предварительное насыщение гранул водой не повлияло на кинетику тепловыделения и, следовательно, гидратацию цемента. Усадка бетона на сухом заполнителе выше, чем у бетона на водонасыщенном заполнителе; при этом потери воды на испарение меньше у бетона на сухих

гранулах. При одинаковой потере влаги усадка бетона на водонасыщенном зольном гравии значительно меньше, чем на сухом заполнителе;

- предложена характеристика бетона в виде коэффициента воздушной усадки, равного производной от деформации усадки  $\varepsilon$  по количеству потерянной воды  $c$  в виде:  $K=d\varepsilon/dc$ . Коэффициент воздушной усадки составил 0,28 и 0,34 для бетона на водонасыщенном заполнителе и сухом заполнителе, соответственно;

- подтверждена целесообразность в производственных условиях, в качестве «внутреннего ухода», предварительно насыщать водой гранулы безобжигового зольного гравия для снижения вероятности образования усадочных трещин при высыхании.

6. На основании экспериментальных результатов усовершенствовано конструктивное решение наружной трехслойной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы. Проведена оценка теплотехнических характеристик, несущей способности, определены технико-экономические показатели конструкции.

- По теплотехническим характеристикам разработанная наружная стеновая панель не уступает известной трехслойной железобетонной стеновой панели. При одинаковых теплотехнических характеристиках разработанной наружной стеновой панели требуется теплоизоляционный слой из экструдированного пенополистирола меньшей толщины - 150 мм вместо 160 мм для трехслойной железобетонной панели.

- Разработанная наружная стеновая панель удовлетворяет условиям прочности и, следовательно, применима для многоэтажных жилых зданий (до 16 этажей). Коэффициент использования несущей способности стеновой панели для 16-этажного здания составляет 39 %.

- Стоимость материалов для разработанной панели на 15,6% меньше, чем для трехслойной железобетонной панели. Технология строительства с использованием в качестве наружных стен панелей из бетона с зольным гравием экономически выгоднее, чем строительство зданий с наружными стенами из трехслойных железобетонных панелей.

- Масса разработанной наружной панели - 3378 кг, масса аналогичной трехслойной железобетонной панели - 4136,4 кг. Разработанная наружная панель легче аналога на 18,3 %, что уменьшает нагрузку на фундамент.

### ***Рекомендации для будущих исследований***

#### ***Рекомендуется:***

Провести исследования модифицированных-смесей различного состава бетона с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы уноса для определения состава, который обеспечит максимальную прочность при минимальной плотности бетона.

Оценить затраты на материалы и производство наружных стеновых панелей из модифицированных бетонов с безобжиговым зольным гравием на основе высококальциевой золы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Wang J., Li B. Cyclic testing of square CFST frames with ALC panel or block walls // *J Constr Steel Res. Elsevier Ltd*, 2017. Vol. 130. P. 264–279.
2. Баженов А.А, Рукавишников А.М. Современные технологии сборного железобетона // *Вестник строительства и архитектуры. Сборник научных трудов. Общество с ограниченной ответственностью полиграфическая фирма «Картуш»*. Орел. 2017. P. 66–70.
3. Блажко Д.Н., Гусева А.Л. Трудности и возможности современного панельного домостроения // *Alfabuild*. 2017. Vol. 1, № 1. P. 111–120.
4. Yudina A.F., Belozero P.G. Types of joint connections in modern panel construction, the advantages and disadvantages // *Вестник гражданских инженеров. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE)*, 2021. Vol. 18, № 1. P. 97–102.
5. ГОСТ 11024-2012 Панели стеновые наружные бетонные и железобетонные для жилых и общественных зданий. Общие технические условия. М., 2014. 20 с.
6. Жадановский Б.В., Синенко С.А., Кужин М.Ф. Механическая обработка наружных стеновых панелей из легких бетонов // *Системные технологии*. 2018. Vol. 1(26). P. 53–57.
7. Гарипов В.С., Лосицкая В.О. Сравнительный анализ однослойных и трёхслойных стеновых панелей // *Science and world*. 2018. №. Vol. 12, № 64. P. 47–48.
8. Bozsaky D. Laboratory Tests with Liquid Nano-ceramic Thermal Insulation Coating // *Procedia Engineering*, 2015. Vol. 123. P. 68–75.
9. Жуков А.Н. Определение сопротивления теплопередаче однослойной керамзитобетонной стеновой панели с покрытием жидкой керамической теплоизоляцией // *Международная научная конференция “Качество внутреннего воздуха и окружающей среды”* / ed. ВолгГАСУ(Волгоград). 2012. P. 323–327.

10. Kumar D. et al. Comparative analysis of form-stable phase change material integrated concrete panels for building envelopes // *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01737.
11. Лихотько В.И. Керамзитопенобетон - эффективный материал для наружных ограждающих конструкций // *Техника и технологии строительства*. 2018. Vol. 2(14). P. 16–22.
12. Куликова Е.С., Кривун Е.А. Бетоны на вспученных перлитах // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. 2017. Vol. 1. P. 291–293.
13. Комиссаренко, Б.С. Керамзитобетон для эффективных ограждающих конструкций: дис. ... д-ра. тех. наук: 05.23.05. — Самара, 2000. — 317 с.
14. Ветрова Г. Панельные дома могут быть энергоэффективными // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2014. Vol. 4. P. 12–13.
15. Sekki P., Karvinen T., Vinha J. Moisture behavior of external insulated precast concrete wall panels // *J Build Phys*. SAGE Publications Ltd, 2021. Vol. 44, № 5. P. 409–434.
16. Vytchikov Y.S., Belyakov I.G., Saparev M.Y. The Analysis of Heat-and-moisture Conditions of Using Double-Layer Wall Panels // *Procedia Eng.*, 2015. Vol. 111. P. 853–857.
17. Афанасьев А.А., Жунин А.А. Индустриальная технология возведения энергоэффективных ограждающих конструкций // *Технология и организация строительного производства*. 2014. Vol. 2(7). P. 28–30.
18. Хунагов Р.А., Маилян Д.Р., Блягоз А.М. Двухслойные железобетонные панели с неравномерно обжатými сечениями // *Вестник Майкопского государственного технологического университета*. 2011. Vol. 4. P. 37–41.
19. Шогенов С.Х., Балов А.А., Афашагов Б.З. Новые конструкции универсальных панелей зданий // *Инженерный вестник Дона. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»*, 2016. Vol. 41, № 2 (41).

20. Алдияров Ж.А. et al. Исследование работы отдельных слоев трехслойных железобетонных конструкций // Научные труды ЮКГУ ИМ. М. Ауэзова. 2018. Vol. 2, № 46. P. 3–6.
21. O’Hegarty R., Kinnane O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2020. Vol. 233. P. 117145.
22. Mugahed Amran Y.H. et al. Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review // *Structures.* Elsevier, 2020. Vol. 27. P. 1358–1379.
23. Al-Rubaye S., Sorensen T., Maguire M. Investigating Composite Action at Ultimate for Commercial Sandwich Panel Composite Connectors // *Proceedings of the PCI Convention and National Bridge Conference.* 2017. № 5523.
24. Flansbjerg M. et al. Composite Behaviour of Textile Reinforced Reactive Powder Concrete Sandwich Façade Elements // *Int J Concr Struct Mater.* Korea Concrete Institute, 2018. Vol. 12, № 1. P. 1–17.
25. Williams Portal N. et al. Bending behaviour of novel Textile Reinforced Concrete-foamed concrete (TRC-FC) sandwich elements // *Compos Struct.* Elsevier, 2017. Vol. 177. P. 104–118.
26. Shams A. et al. Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane // *Compos Struct.* Elsevier, 2015. Vol. 121. P. 271–279.
27. Hopkins P.M., Norris T., Chen A. Creep behavior of insulated concrete sandwich panels with fiber-reinforced polymer shear connectors // *Compos Struct.* Elsevier, 2017. Vol. 172. P. 137–146.
28. O’Hegarty R. et al. Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels // *Journal of Building Engineering.* Elsevier, 2020. Vol. 27. P. 100937.
29. O’Hegarty R. et al. Development of thin precast concrete sandwich panels: Challenges and outcomes // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2021. Vol. 267. P. 120981.
30. Корниенко С.В. Температурный режим трехслойной стеновой панели // *Жилищное строительство.* 2001. Vol. 9. P. 20–21.

31. Касторных Л.И., Черепанов В.Д. Варианты армирования трехслойных стеновых панелей композитной арматурой // Молодой исследователь Дона. 2020. Vol. 3(24). P. 33–41.
32. Николаев В.Н., Степанова В.Ф. Новый уровень панельного домостроения: композитные диагональные гибкие связи и петли монтажные для трехслойных бетонных панелей // Жилищное строительство, 2019. № 10. P. 14–20.
33. Грановский А.В. et al. Сейсмостойкость трехслойных стеновых панелей на гибких стеклопластиковых связях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. Vol. 3. P. 36–40.
34. Tomlinson D., Fam A. Flexural behavior of precast concrete sandwich wall panels with basalt FRP and steel reinforcement // PCI Journal. Precast/Prestressed Concrete Institute, 2015. Vol. 60, № 6. P. 51–71.
35. Матвеев А.В., Овчинников А.А. Разработка энергоэффективных крупнопанельных ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2014. Vol. 10. P. 19–23.
36. Zhou A., Wong K.W., Lau D. Thermal insulating concrete wall panel design for sustainable built environment // Scientific World Journal. Hindawi Publishing Corporation, 2014. Vol. 2014, № 279592. P. 1–12.
37. Faria Oliveira T. et al. Precast concrete sandwich panels (PCSP): An analytical review and evaluation of CO<sub>2</sub> equivalent // Constr Build Mater. Elsevier, 2022. Vol. 358. P. 129424.
38. Colombo I.G., Colombo M., di Prisco M. Bending behaviour of Textile Reinforced Concrete sandwich beams // Constr Build Mater. Elsevier, 2015. Vol. 95. P. 675–685.
39. Данель В.В. Трехслойные наружные стеновые панели с повышенной несущей способностью // Жилищное строительство. 2014. Vol. 7. P. 48–52.
40. Шалыгина, Е.Ю. Поэтажно-несущие панели наружных стен зданий: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. — М., 1998. — 209 с.

41. Куликов И.М. Совершенствование несущей стеновой системы многоэтажных крупнопанельных зданий: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. — Пенза, 2002. — 245 с.
42. Чепурненко А.С. Расчет полимерных пластин и оболочек на силовые и температурные воздействия с учетом нелинейной ползучести: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.17. — Махачкала, 2015. — 126 с.
43. Шкутов А.С. Прочность стеновых панелей с технологическими отверстиями при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. — Пенза, 2008. — 229 с.
44. Хунагов Р.А. Двухслойные железобетонные панели с комбинированным преднапряжением арматуры: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. — Ростов-на-Дону, 2012. — 185 с.
45. Овсянников С.Н., Максимов В.Б. Энергоэффективные наружные стеновые панели каркасно-панельных зданий // Вестник ТГАСУ Т.20. 2018. Vol. 6. P. 107–114.
46. Koňáková D. et al. Lime-based plasters with combined expanded clay-silica aggregate: Microstructure, texture and engineering properties // Cem Concr Compos. Elsevier, 2017. Vol. 83. P. 374–383.
47. Shafigh P. et al. A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes // Mater Des. Elsevier, 2014. Vol. 60. P. 320–327.
48. Nepomuceno M.C.S., Pereira-de-Oliveira L.A., Pereira S.F. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates // Constr Build Mater. Elsevier, 2018. Vol. 166. P. 373–385.
49. Bastos A.M., Sousa H., Melo A.F. Methodology for the design of lightweight concrete with expanded clay aggregates // TMS J. 205AD. P. 73–84.
50. Vijayalakshmi R., Ramanagopal S. Structural Concrete using Expanded Clay Aggregate: A Review // Indian J Sci Technol. 2018. Vol. 11, № 16.

51. Jozwiak-Niedzwiedzka D. Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate // *Cem Concr Compos.* Elsevier, 2005. Vol. 27, № 6. P. 709–715.
52. Bogas J.A., Nogueira R. Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions // *KSCE Journal of Civil Engineering.* Springer Verlag, 2014. Vol. 18, № 6. P. 1780–1791.
53. Bogas J.A., Gomes A. Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction // *Mater Des.* Elsevier, 2013. Vol. 46. P. 832–841.
54. Murugan K., Palaniappan M., Kalappan K.K. Experimental studies on light weight concrete using LECA material // *Mater Today Proc.* Elsevier, 2023. Vol. 74. P. 1035–1041.
55. Compaoré A. et al. Preparation and characterization of foamed concrete using a foaming agent and local mineral resources from Burkina Faso // *Results in Materials.* Elsevier, 2023. Vol. 17. P. 100365.
56. Gailitis R. et al. Comparison of the long-term properties of foamed concrete and geopolymer concrete in compression // *AIP Conf Proc.* American Institute of Physics Inc., 2020. Vol. 2239. P. 20003.
57. Kuzielová E., Pach L., Palou M. Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties // *Constr Build Mater.* Elsevier Ltd, 2016. Vol. 125. P. 998–1004.
58. Montayev S.A. et al. Collagen agent technology for foam concrete production. 2017. Vol. 12, № 5.
59. Kadela M., Kukielka A., Małek M. Characteristics of lightweight concrete based on a synthetic polymer foaming agent // *Materials.* MDPI AG, 2020. Vol. 13, № 21. P. 1–15.
60. Falliano D., Restuccia L., Gugliandolo E. A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete // *Constr Build Mater.* 2021. Vol. 268. P. 121101.

61. Falliano D. et al. Key factors affecting the compressive strength of foamed concrete // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 431, № 6. P. 062009.
62. Rybakov V.A. et al. Heat protective properties of enclosure structure from thin-wall profiles with foamed concrete // Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University, 2020. Vol. 94, № 2. P. 11–20.
63. Bartenjeva E. The effect of mineral additives on foam concrete porosity // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 962, № 2. P. 022023.
64. Bartenjeva E. The increase of heat-insulating properties of foam concrete by introducing mineral additives // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 456, № 1. P. 012036.
65. Mashkin N., Bartenjeva E. Research of structuring processes of non-autoclave foam concrete with introduction of mineral additives // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 451, № 1. P. 012018.
66. Rybakov V. et al. Strength characteristics of foam concrete samples with various additives // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. Vol. 245. P. 03015.
67. Johnpaul V. et al. High Strength Lightweight Foam Concrete // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 1006, № 1. P. 012013.
68. Steshenko A.B., Kudyakov A.I., Ryabtseva N.E. Cement based foam concrete with hardening accelerators // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 911, № 1. P. 012003.
69. Веревкин О.А. Наполненные пенобетоны и ограждающие конструкции с их применением: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05. — Самара, 2000. — 171 с.
70. Tran N.P. et al. Strategic progress in foam stabilisation towards high-performance foam concrete for building sustainability: A state-of-the-art review // J Clean Prod. Elsevier, 2022. Vol. 375. P. 133939.
71. Mugahed Amran Y.H. et al. Influence of slenderness ratio on the structural performance of lightweight foam concrete composite panel // Case Studies in Construction Materials. Elsevier, 2019. Vol. 10. P. e00226.

72. Flansbjer M. et al. Composite Behaviour of Textile Reinforced Reactive Powder Concrete Sandwich Façade Elements // *Int J Concr Struct Mater.* Korea Concrete Institute, 2018. Vol. 12, № 1. P. 1–17.
73. Kearsley E.P., Wainwright P.J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete // *Cem Concr Res.* Pergamon, 2001. Vol. 31, № 1. P. 105–112.
74. Kearsley E.P., Wainwright P.J. Porosity and permeability of foamed concrete // *Cem Concr Res.* Pergamon, 2001. Vol. 31, № 5. P. 805–812.
75. Jones M.R., McCarthy A. Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete // *Fuel.* Elsevier, 2005. Vol. 84, № 11. P. 1398–1409.
76. Itkin Y. V, Shpirt M.Y., Grekhov I.T. Change in the bulk density of the products of the thermal treatment of carbonaceous rocks on heating // *Solid Fuel Chemistry.* 1976. Vol. 10, № 2. P. 65–69.
77. Абрамов А.К., Ефимов В.И., Никулин И.Б. Аглопорит, полученный из отходов углеобогащения, как заполнитель для легких бетонов // *Горные науки и технологии.* 2013. P. 3–11.
78. Donat F. et al. Thermal properties of a porous filler based on powdered ekibastuz coal rock // *Solid Fuel Chemistry.* 1978. Vol. 12, № 6. P. 99–101.
79. Маршинская О.А., Макаева А.А. Особенность применения пористых заполнителей в составе легких крупнопористых бетонов // *Современная наука: новые подходы и актуальные исследования: материалы междунар. науч.-практ. конф., Прага, 18 апр. 2022 г. / под общ. ред. А. И. Вострецова - Нефтекамск: Мир науки, 2022. P. 33–37.*
80. Al-Tarbi S.M. et al. Development of energy-efficient hollow concrete blocks using perlite, vermiculite, volcanic scoria, and expanded polystyrene // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2023. Vol. 371. P. 130723.
81. Sengul O. et al. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete // *Energy Build.* Elsevier, 2011. Vol. 43, № 2–3. P. 671–676.

82. Kolak M.N., Oltulu M. Investigation of mechanical and thermal properties of new type bio-composites containing camelina // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2023. Vol. 362. P. 129779.
83. Khalaf M.A., Ban C.C., Ramli M. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2019. Vol. 215. P. 73–89.
84. Chan S.Y.N., Peng G.F., Chan J.K.W. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature // *Materials and Structures* 1996 29:10. Springer, 1996. Vol. 29, № 10. P. 616–619.
85. Rakhimov Sh.T., Normurodov A., Nomozov I. Development of compositions of fine-grained concrete based on industry waste // *Oriental Journal of Technology and Engineering.* The USA Journals, 2021. Vol. 1, № 01. P. 10–14.
86. Jia M., Yu K., Qian K. Measurement and visualization of crack patterns in basalt fabric reinforced fine-grained concrete with different textile structures using high-speed photography and a cohesive finite element model // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2022. Vol. 349. P. 128785.
87. Einea A. et al. State-of-the-art of Precast Concrete Sandwich Panels // *PCI Journal.* 1991. Vol. 36, № 6. P. 78–92.
88. Ferraro A. et al. Production and characterization of lightweight aggregates from municipal solid waste incineration fly-ash through single- and double-step pelletization process // *J Clean Prod.* Elsevier, 2023. Vol. 383. P. 135275.
89. Terzić A. et al. Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances // *Ceram Int.* Elsevier, 2015. Vol. 41, № 2. P. 2714–2726.
90. Gopi R., Revathi V., Kanagaraj D. Light expanded clay aggregate and fly ash aggregate as self curing agents in self compacting concrete // *Asian Journal of Civil Engineering.* 2015. Vol. 16, № 7. P. 1025–1035.
91. Kockal N.U., Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes // *Mater Des.* 2011. Vol. 32, № 4. P. 2396–2403.

92. Kockal N.U., Ozturan T. Properties of lightweight concretes made from lightweight fly ash aggregates // Excellence in Concrete Construction through Innovation - Proceedings of the International Conference on Concrete Construction. 2009. P. 251–261.
93. Gesoğlu M. et al. Strength and transport properties of steam cured and water cured lightweight aggregate concretes // Constr Build Mater. 2013. Vol. 49. P. 417–424.
94. Their J.M., Özakça M. Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber // Constr Build Mater. 2018. Vol. 180. P. 12–22.
95. Güneyisi E. et al. Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber // Constr Build Mater. 2015. Vol. 84. P. 156–168.
96. Güneyisi E., Gesoğlu M., Ipek S. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes // Constr Build Mater. 2013. Vol. 47. P. 358–365.
97. Gesoğlu M., Özturan T., Güneyisi E. Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes // Cem Concr Compos. 2006. Vol. 28, № 7. P. 598–605.
98. Priyadarshini P., Mohan Ganesh G., Santhi A.S. Effect of cold bonded fly ash aggregates on strength & restrained shrinkage properties of concrete // IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012. 2012. P. 160–164.
99. Gesoglu M., Özturan T., Güneyisi E. Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates // Cem Concr Res. 2004. Vol. 34, № 7. P. 1121–1130.
100. Коренева И.Г. Конструкционные свойства бетона на безобжиговом зольном гравии при простом и сложном напряженном состоянии: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. — М., 1984. — 173 с.

101. Gesoglu M. et al. Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates // *Constr Build Mater.* 2015. Vol. 79. P. 40–47.
102. Joseph G., Ramamurthy K. Workability and strength behaviour of concrete with cold-bonded fly ash aggregate // *Materials and Structures/Materiaux et Constructions.* 2009. Vol. 42, № 2. P. 151–160.
103. Gesoğlu M., Özturan T., Güneyisi E. Effect of coarse aggregate properties on the ductility of lightweight concretes // *Role of Cement Science in Sustainable Development - Proceedings of the International Symposium - Celebrating Concrete: People and Practice.* 2003. P. 537–546.
104. Gomathi P., Sivakumar A. Synthesis of geopolymer based class-F fly ash aggregates and its composite properties in Concrete // *Archives of Civil Engineering.* 2014. Vol. 60, № 1. P. 55–75.
105. Thomas J., Harilal B. Mechanical properties of cold bonded quarry dust aggregate concrete subjected to elevated temperature // *Constr Build Mater.* 2016. Vol. 125. P. 724–730.
106. Shobeiri V. et al. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction // *Case Studies in Construction Materials.* Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01832.
107. Nayak D.K. et al. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies // *Cleaner Materials.* Elsevier, 2022. Vol. 6. P. 100143.
108. Faisal Noaman M. et al. Effect of fly ash on the shear strength of clay soil // *Mater Today Proc.* Elsevier, 2023. Vol. 6(2022). P. 100151.
109. Mohamed A.A.M.S. et al. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement // *Case Studies in Construction Materials.* Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01894.
110. Amin M.N. et al. Multigene expression programming based forecasting the hardened properties of sustainable bagasse ash concrete // *Materials.* MDPI, 2021. Vol. 14, № 19. P. 5659.

111. Yang S. et al. Mechanical and fracture properties of fly ash-based geopolymer concrete with different fibers // *Journal of Building Engineering*. Elsevier, 2023. Vol. 63. P. 105281.
112. Jiao Z. et al. Chloride resistance of class C/class F fly ash-based geopolymer mortars with different strength grades // *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01811.
113. Vatin N. et al. Cement-based materials with oil shale fly ash additives // *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 578, № 1. P. 012043.
114. Barabanshchikov Y., Usanova K. Influence of High-Calcium Oil Shale Ash Additive on Concrete Properties // *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Vol. 150 LNCE. P. 23–34.
115. Teixeira E.R. et al. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material // *J Clean Prod*. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 112. P. 2221–2230.
116. Khankhaje E. et al. Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: A review // *Developments in the Built Environment*. Elsevier, 2023. Vol. 14. P. 100130.
117. Kim K.W. et al. Effect of pretreated biomass fly ash on the mechanical properties and durability of cement mortar // *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01754.
118. Usanova K. Properties of Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes // *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, 2020. Vol. 70. P. 507–516.
119. Narattha C., Chaipanich A. Effect of curing time on the hydration and material properties of cold-bonded high-calcium fly ash–Portland cement lightweight aggregate // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2020 145:5. Springer, 2020. Vol. 145, № 5. P. 2277–2286.
120. Ma J. et al. Influence of Particle Morphology of Ground Fly Ash on the Fluidity and Strength of Cement Paste // *Materials (Basel)*. Materials (Basel), 2021. Vol. 14, № 2. P. 1–18.

121. Bicer A. Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites // *Thermal Science and Engineering Progress*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 8. P. 78–82.
122. ГОСТ 25818-2017 Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. М., 2017. 20 с.
123. ASTM C 618-Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete // ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 2019.
124. Amran M. et al. Fly ash-based eco-efficient concretes: A comprehensive review of the short-term properties // *Materials*. MDPI AG, 2021. Vol. 14, № 15. P. 4264.
125. Tepsri P., Chumphu A., Yoriya S. High-calcium fly ash recovery from wet-stored condition and its properties // *Mater Res Express*. Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 5, № 11. P. 115506.
126. Xu G., Shi X. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review // *Resour Conserv Recycl*. Elsevier, 2018. Vol. 136. P. 95–109.
127. Zhang N. et al. Effects of low- and high-calcium fly ash on the water resistance of magnesium oxysulfate cement // *Constr Build Mater*. Elsevier, 2020. Vol. 230. P. 116951.
128. Fan W.J., Wang X.Y., Park K.B. Evaluation of the Chemical and Mechanical Properties of Hardening High-Calcium Fly Ash Blended Concrete // *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2015. Vol. 8, № 9. P. 5933–5952.
129. Капустин, Ф.Л. Структура и фазообразование в гранулированных высококальциевых золах ТЭС и получение вяжущих на их основе: дис. ... д-ра. тех. наук: 05.17.11. — Екатеринбург, 2003. — 333 с.
130. Аксенов А.В. Композиционное бесцементное вяжущее из механохимически активированных промышленных отходов и мелкозернистый бетон на его основе: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05. — Новосибирск, 2005. — 120 с.

131. Goenawan V., Antoni, Hardjito D. A Preliminary Study on Cracking Tendency of Cement Paste Incorporating High Calcium Fly Ash // *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, Ltd., 2015. Vol. 815. P. 158–163.
132. Shehata M.H., Thomas M.D.A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali–silica reaction // *Cem Concr Res*. Pergamon, 2000. Vol. 30, № 7. P. 1063–1072.
133. Dhole R. et al. Sulfate resistance of mortar mixtures of high-calcium fly ashes and other pozzolans // *ACI Mater J*. 2011. Vol. 108, № 6. P. 645–654.
134. Antiohos S., Tsimas S. Investigating the role of reactive silica in the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems // *Cem Concr Compos*. 2005. Vol. 2, № 27. P. 171–181.
135. Korpa A. et al. Processing of high sulphate and free lime calcareous coal fly ash for producing high volume blended cements and complying grade products employed in civil engineering // *Zastita materijala*. Centre for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES), 2014. Vol. 55, № 3. P. 251–258.
136. Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives // *Cem Concr Compos*. Elsevier, 2005. Vol. 27, № 2. P. 231–237.
137. Klyuev S. V. et al. Strengthening of concrete structures with composite based on carbon fiber // *J Comput Theor Nanosci*. American Scientific Publishers, 2019. Vol. 16, № 7. P. 2810–2814.
138. Chen B., Liu J. Effect of fibers on expansion of concrete with a large amount of high f-CaO fly ash // *Cem Concr Res*. 2003. Vol. 33, № 10. P. 1549–1552.
139. Klyuev S. V. et al. *Fibers and their Properties for Concrete Reinforcement* // *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. Vol. 945. P. 125–130.
140. Anthony E.J. et al. The long term behaviour of CFBC ash–water systems // *Waste Management*. Pergamon, 2002. Vol. 22, № 1. P. 99–111.
141. Iribarne J. et al. Hydration of combustion ashes — a chemical and physical study // *Fuel*. Elsevier, 2001. Vol. 80, № 6. P. 773–784.

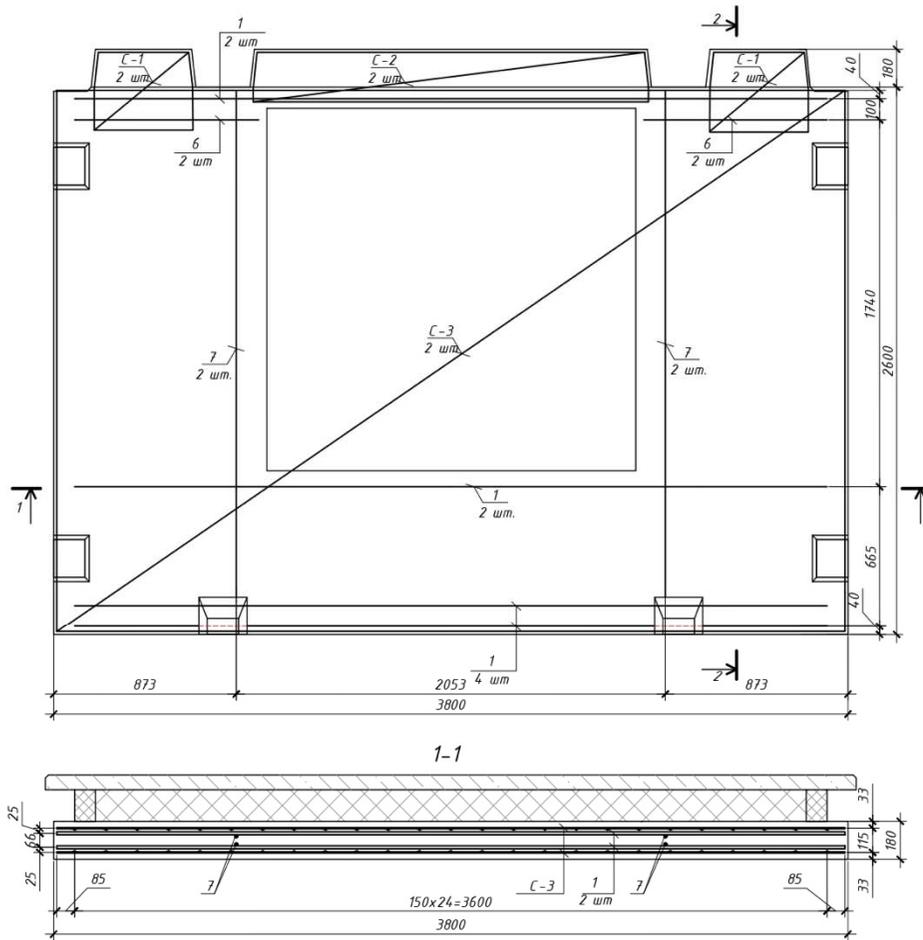
142. Domanskaya I., Oleynik V., Minyazev D. ICSC Problems and Perspectives of high-calcium fly ash from heat power plants in the composition of “green” building materials // E3S Web of Conferences. 2016. Vol. 6. P. 01014.
143. Sheng G. et al. Self-cementitious properties of fly ashes from CFBC boilers co-firing coal and high-sulphur petroleum coke // Cem Concr Res. Pergamon, 2007. Vol. 37, № 6. P. 871–876.
144. Юнипро. Общая информация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://unipro.energy/about/structure/affiliate/berezovskaya/details/> (дата обращения 08.03.2023).
145. Качаев, Г.В. Восстановление степных экосистем в зоне добычи бурого угля (на основе золошлаковых отходов ОАО “Березовская ГРЭС-1”): дис. ... канд. тех. наук: 03.02.08. — Красноярск, 2014. — 141 с.
146. EN 196-9:2010 Methods of testing cement - Part 9: Heat of hydration - Semi-adiabatic method. 2010.
147. Запорожец И.Д., Окорочков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. Ленинград–Москва: Стройиздат; 1966. 313 с.
148. Yıldırım H., Özturan T. Mechanical properties of lightweight concrete made with cold bonded fly ash pellets // 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 23-25 May 2013, Epoka University, Tirana, Albania. P. 612–619.
149. Lo T.Y. et al. Manufacturing of sintered lightweight aggregate using high-carbon fly ash and its effect on the mechanical properties and microstructure of concrete // J Clean Prod. Elsevier, 2016. Vol. 112. P. 753–762.
150. Aungatichart O., Nawaukkaratharnant N., Wasanapiarnpong T. The potential use of cold-bonded lightweight aggregate derived from various types of biomass fly ash for preparation of lightweight concrete // Mater Lett. North-Holland, 2022. Vol. 327. P. 133019.
151. Majhi R.K., Padhy A., Nayak A.N. Performance of structural lightweight concrete produced by utilizing high volume of fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate with silica fume // Clean Eng Technol. Elsevier, 2021. Vol. 3. P. 100121.

152. Balapour M. et al. Off-spec fly ash-based lightweight aggregate properties and their influence on the fresh, mechanical, and hydration properties of lightweight concrete: A comparative study // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2022. Vol. 342. P. 128013.
153. Risdanareni P. et al. The effect of NaOH concentration on the mechanical and physical properties of alkali activated fly ash-based artificial lightweight aggregate // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2020. Vol. 259. P. 119832.
154. Narattha C., Chaipanich A. Phase characterizations, physical properties and strength of environment-friendly cold-bonded fly ash lightweight aggregates // *J Clean Prod.* Elsevier, 2018. Vol. 171. P. 1094–1100.
155. Li X. et al. Mechanical properties of sintered ceramsite from iron ore tailings affected by two-region structure // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2020. Vol. 240. P. 117919.
156. Wang S. et al. The toxic leaching behavior of MSWI fly ash made green and non-sintered lightweight aggregates // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2023. Vol. 373. P. 130809.
157. Liu M. et al. Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment // *J Alloys Compd.* Elsevier, 2018. Vol. 748. P. 522–527.
158. Gesoğlu M., Özturan T., Güneyisi E. Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2007. Vol. 21, № 9. P. 1869–1878.
159. Balapour M. et al. Engineering properties and pore structure of lightweight aggregates produced from off-spec fly ash // *Constr Build Mater.* Elsevier, 2022. Vol. 348. P. 128645.
160. Sahoo S., Selvaraju A.K., Suriya Prakash S. Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres // *Cem Concr Compos.* Elsevier, 2020. Vol. 113. P. 103712.
161. ГОСТ Р 58942 - 2020. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски. М., 2020. 16 с.

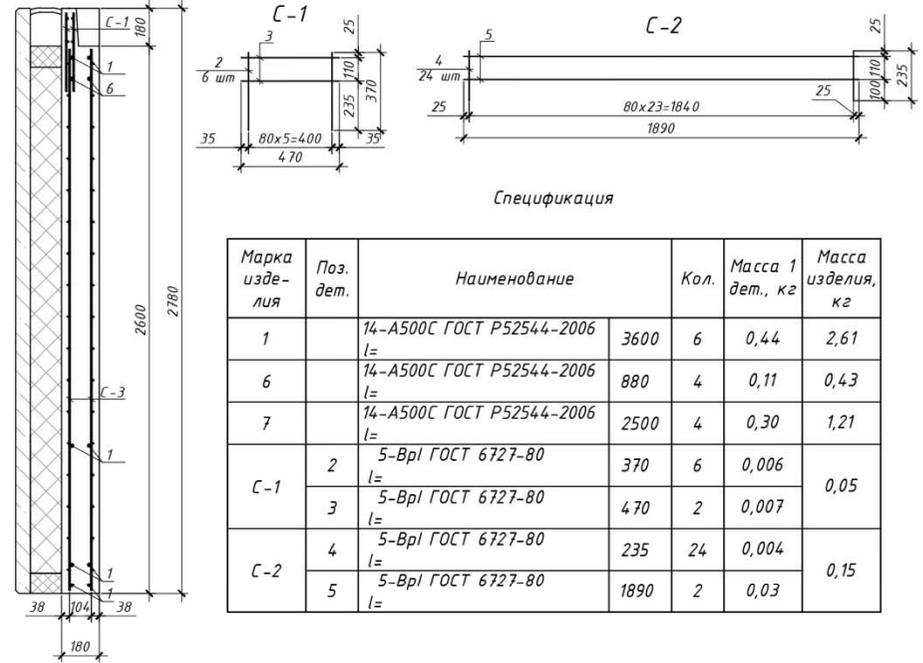
162. ГОСТ 31310-2015. Панели стеновые трехслойные железобетонные с эффективным утеплителем. Общие технические условия. М., 2016. 24 с.
163. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., 2019. 119 с.
164. ГОСТ 13015-2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения. М., 2018. 24 с.
165. Методические рекомендации по определению теплотехнической эффективности каменных кладок и стеновых материалов и изделий: метод. пособие / сост.: Минстрой России; ФАУ «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве»; М., 2017. – 84 с.
166. СП 131.13330.2020. Свод правил. Строительная климатология. М., 2021. 114 с.
167. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М., 2013. 12 с.
168. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М., 2012. 96 с.
169. ГОСТ Р 54851-2011. Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче. М., 2012. 23 с.
170. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. М., 2018. 95 с.

## Приложение 1. Схема арматуры, участвующей в расчетной схеме

Схема армирования внутреннего слоя



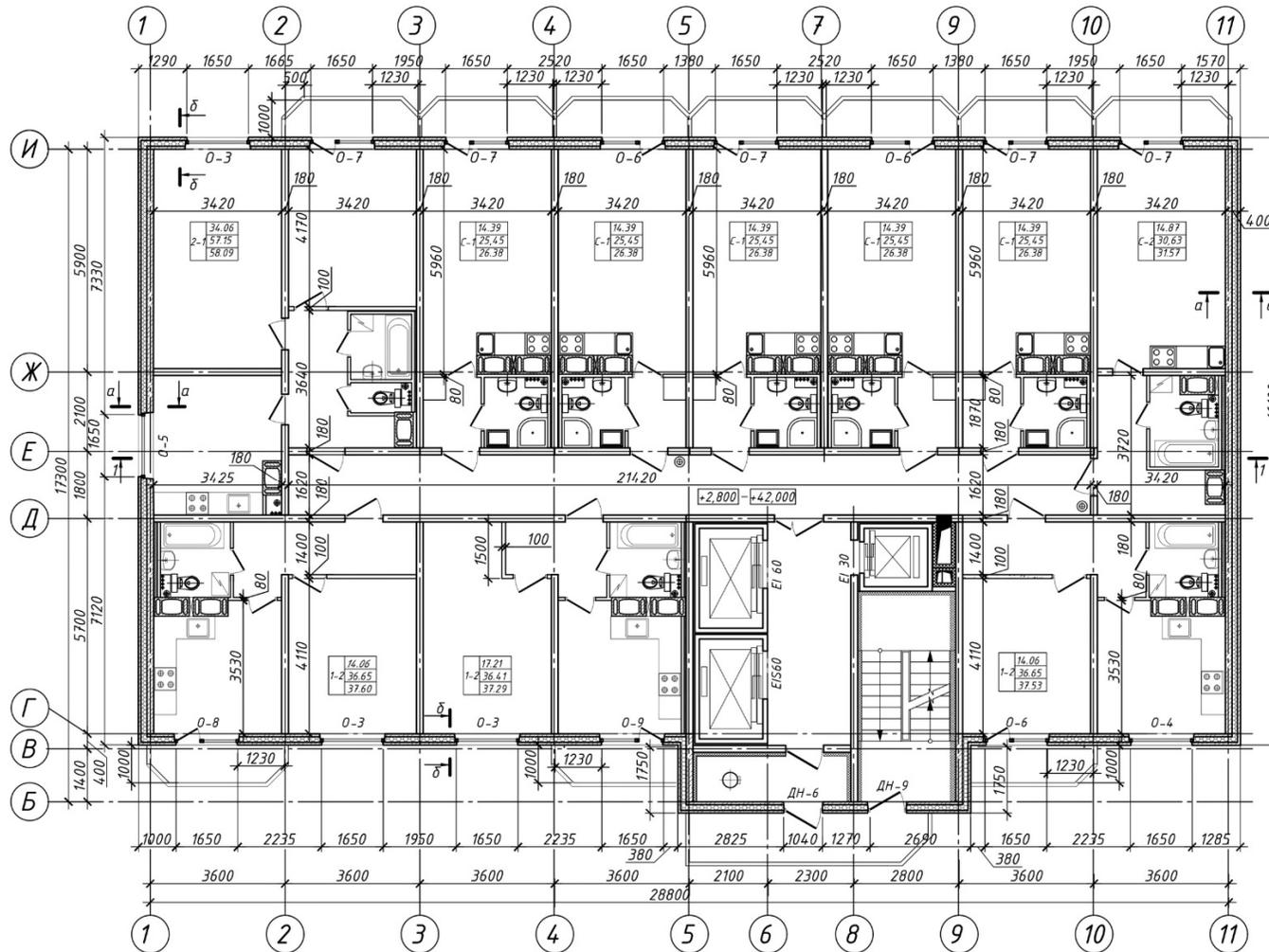
2-2



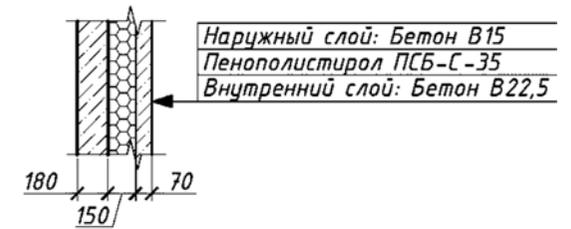
Спецификация

Марка изделия	Поз. дет.	Наименование	Кол.	Масса 1 дет., кг	Масса изделия, кг	
	1	14-A500С ГОСТ P52544-2006 l=	3600	6	0,44	2,61
	6	14-A500С ГОСТ P52544-2006 l=	880	4	0,11	0,43
	7	14-A500С ГОСТ P52544-2006 l=	2500	4	0,30	1,21
C-1	2	5-BpI ГОСТ 6727-80 l=	370	6	0,006	0,05
	3	5-BpI ГОСТ 6727-80 l=	470	2	0,007	
C-2	4	5-BpI ГОСТ 6727-80 l=	235	24	0,004	0,15
	5	5-BpI ГОСТ 6727-80 l=	1890	2	0,03	

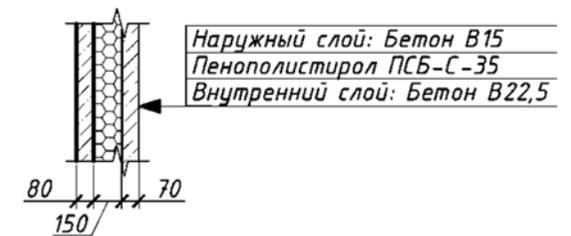
## Приложение 2. План типового этажа



Сечение а-а



Сечение б-б

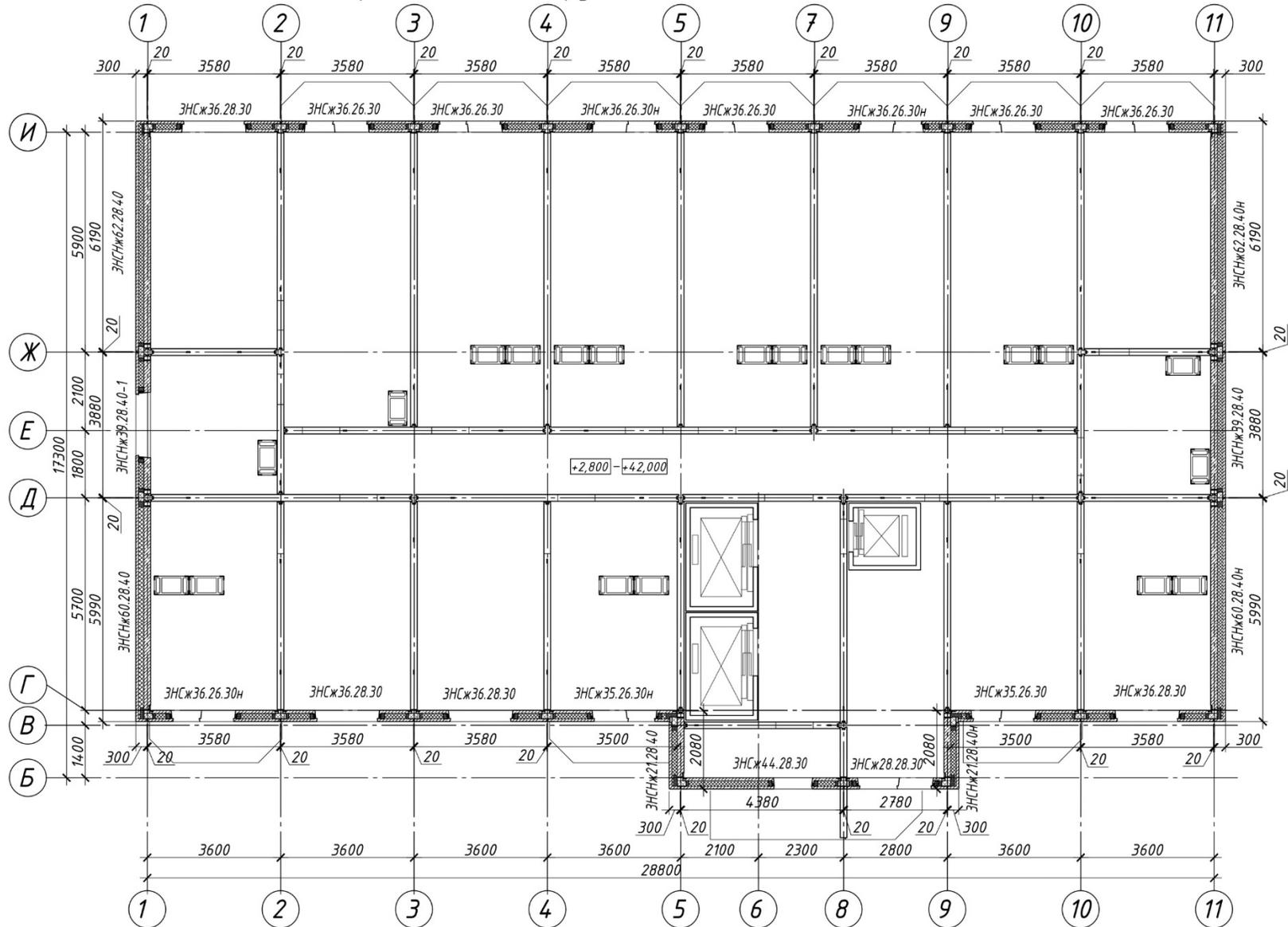


Условные обозначения

-  - наружные сборные несущие ж/б панели (см. сечение а-а)
-  - наружные сборные ненесущие ж/б панели (см. сечение б-б)
-  - внутренние сборные ж/б панели толщ. 180 мм
-  - газобетонные перегородки толщ. 100 мм
-  - пазогреб. плиты толщ. 80 мм
-  - минераловатная плита

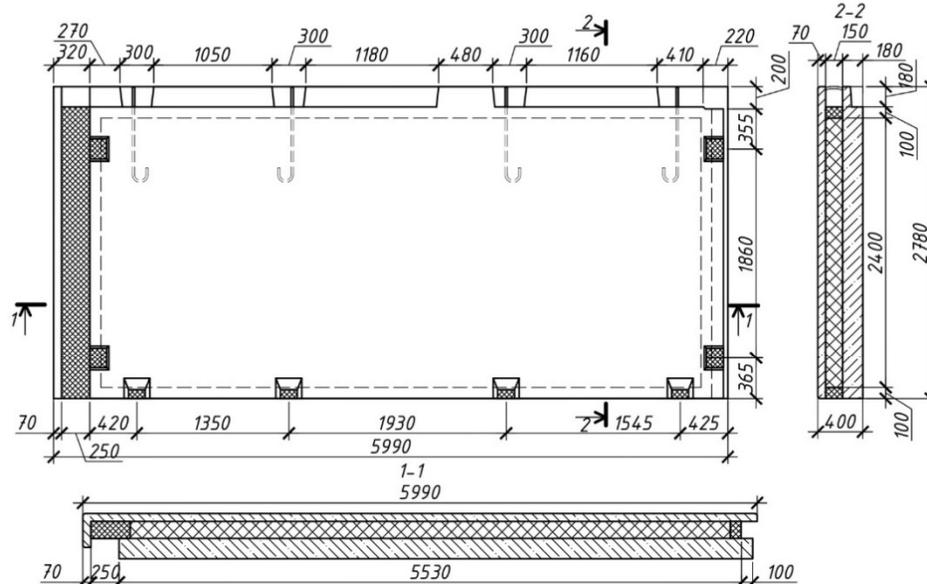


### Приложение 4. Схема расположения наружных стеновых панелей

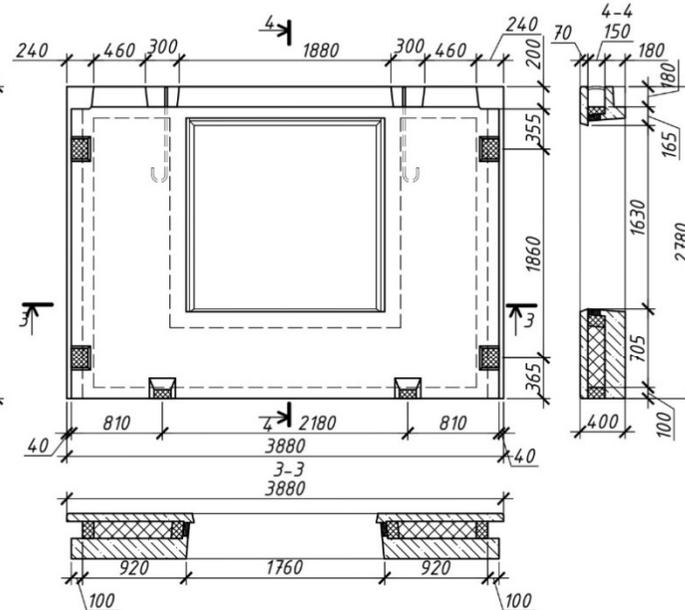


## Приложение 5. Наружные панели типового этажа

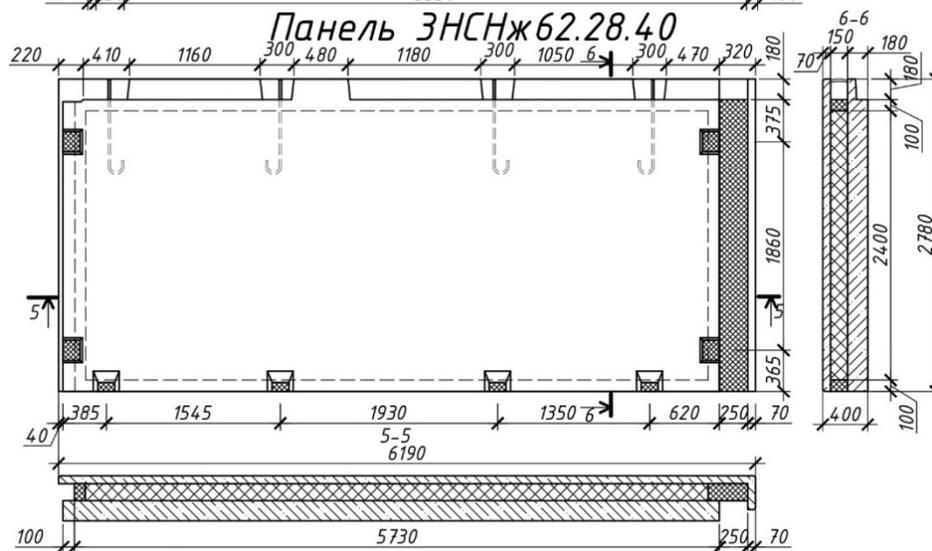
Панель ЗНСж60.28.40



Панель ЗНСж39.28.40-1



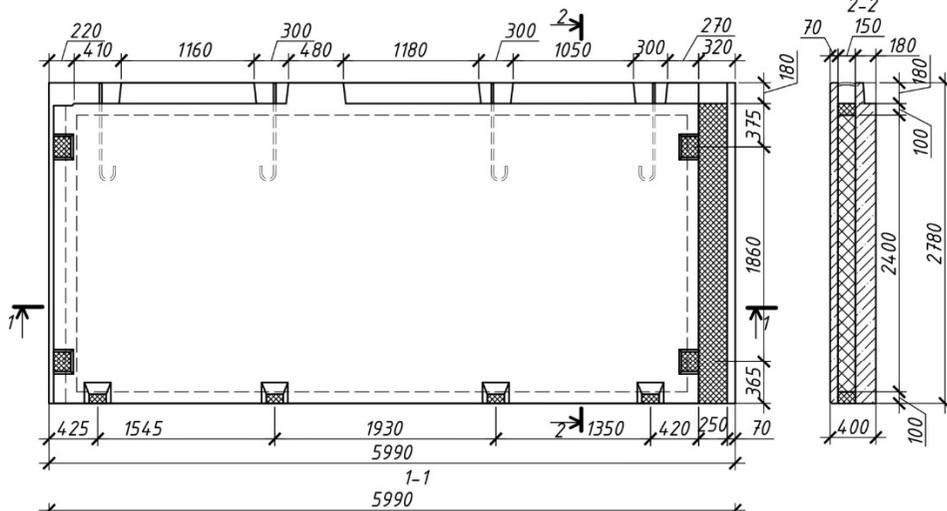
Панель ЗНСж62.28.40



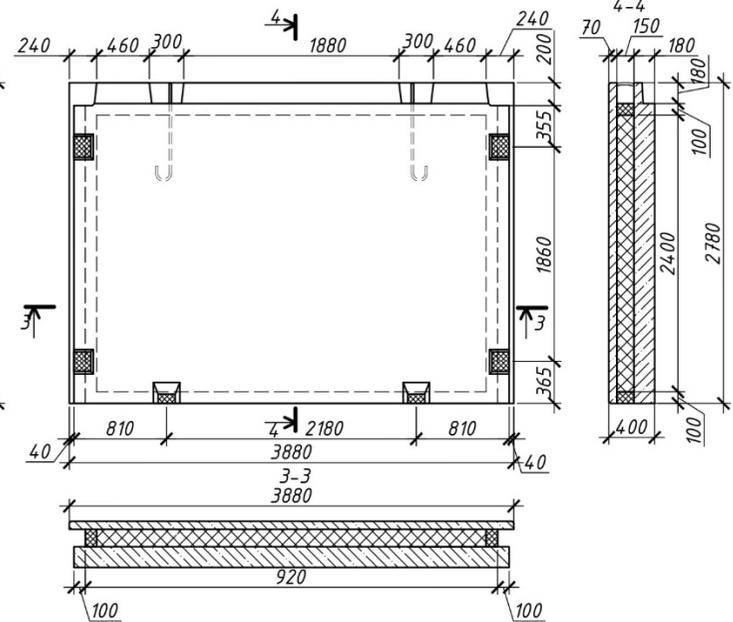
Условные обозначения:

-  - пенополистирол ПСБ-С-25
-  - минеральная вата группы горючести "НГ"

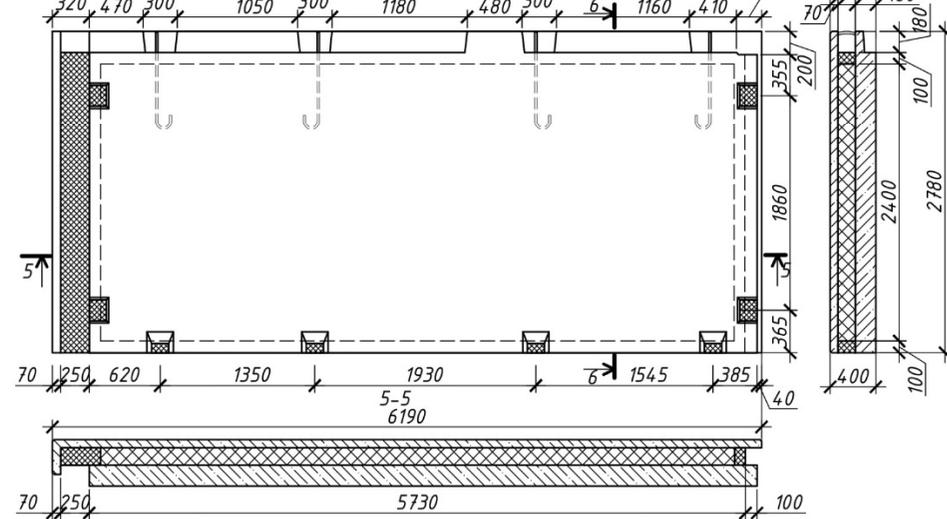
Панель ЗНСЖ60.28.40н



Панель ЗНСЖ39.28.40



Панель ЗНСЖ62.28.40н



Условные обозначения:

-  - пенополистирол ПСБ-С-25
-  - минеральная вата группы горючести "НГ"