

На правах рукописи

**Усанова Ксения Юрьевна**

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

Специальность: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: Барабанщиков Юрий Германович  
доктор технических наук, доцент, профессор высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты: Тюкалов Юрий Яковлевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и машин ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»  
Клюев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (ФГАОУ ВО КФУ)

Защита состоится «05» марта 2024 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета ПДС 2022.009 созданного на базе ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 368.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре (Научной библиотеке) РУДН по адресу: 117998, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Электронная версия диссертации, автореферат и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ (<http://vak.ed.gov.ru/>) и на сайте <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.009

кандидат технических наук, доцент

Маркович А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.

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

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

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 безцементного 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 диссертационного исследования.** Достоверность результатов исследования подтверждается применением методов испытаний, приведенных в действующих нормативных документах, 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 и 1 публикация в изданиях,

включенных в Перечень ВАК/РУДН. Разработанное в диссертационном исследовании вяжущее вещество имеет патент на изобретение № RU 2798801 С1 «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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

**В первой главе** представлены конструктивные решения бетонных и железобетонных стеновых панелей. Приведен обзор основных видов бетонов, используемых для производства бетонных и железобетонных наружных стеновых панелей, в том числе бетон с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия. Показаны преимущества бетонов с заполнителем из безобжигового зольного гравия перед традиционными видами бетонов. В частности, рассмотрены работы следующих авторов: Al-Rubaye S., Alam M., Anandan S., Antiohos S., Antoni A., Aslam F., Biçer A., Chaipanich A., Colangelo F.F., Farina I., Flansbjer M., Folliard K.J., Gesoğlu M., Gholampour A., Gomathi P., Güneyisi E., Hardjito D., Khankhaje E., Kinnane O., Kockal N.U., Kumar D., Li X., Maguire M., O'Hegarty R., Ozbakkaloglu T., Ozturan T., Portal N.W., Shams A., Sorensen T.J., Thomas J., Tsimas S., Xu G., Zhang N., Аксенов А.В., Барабанщиков Ю.Г., Ватин Н.И., Грановский А.В., Данель В.В., Ждановский Б.В., Калачев А.И., Капустин Ф.Л., Ключев С.В., Комиссаренко Б.С., Коренина И.Г., Матвеев А.В., Овчинников А.А., Уфимцев В.М., Федюк Р.С., Хунагов А.В., Юдина А.Ф.

Установлено, что уменьшить вес бетонной стеновой панели без ухудшения ее свойств возможно использованием вместо щебня или гравия безобжигового зольного гравия. Это обеспечивает возможность сокращения загрязнения природной среды и сохранения запасов месторождения истощаемых природных заполнителей для бетона.

Установлено отсутствие практики 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.

**Вторая глава** содержит результаты экспериментальных исследований высококальциевой золы уноса для использования в виде гравия при производстве бетонных наружных стеновых панелей.

В работе использована высококальциевая зола уноса Березовской ГРЭС – филиала ПАО «Юнипро», расположенного в Шарыповском районе Красноярского края. Зола уноса гидратационно активна – она реагирует с водой и отвердевает. Химический состав золошлаков углей Березовского разреза отличается большим содержанием оксида кальция в свободном состоянии  $\text{CaO}_{\text{free}}$  (10-30 %), благодаря чему процесс отвердевания золы сопровождается ее сильным расширением и растрескиванием. Усредненный состав золы представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Средний химический состав золы Берёзовской ГРЭС

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$
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 Березовской ГРЭС был опробован ряд добавок, используемых совместно с золой, представленных в таблице 2.

Таблица 2 - Виды использованных добавок в % от массы золы

№ состава	Вид добавки	Обозначение состава	Содерж. добавки, %	Водо-твердое отношение
1	Без добавки	N	-	0,43
2	Кислота кремниевая водная, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , 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 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ – реактив Ч	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	20,0	0,35
6	Гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , реактив Ч	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	17,4	0,33
7	$\text{Al}_2\text{O}_3$ – реактив ЧДА	$\text{Al}_2\text{O}_3$	40,0	0,48
8	Метакаолин $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	MK	42,9	0,5
9	Стекло натриево жидкое 60% р-р $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$	LSG	6,6	0,51
10	Трепел Фокинского месторождения	T	42,3	0,54

Испытание на расширение выполнялось с помощью колец Ле-Шателье. Влияние добавок на кинетику расширения зольного теста представлено на рисунке 1.

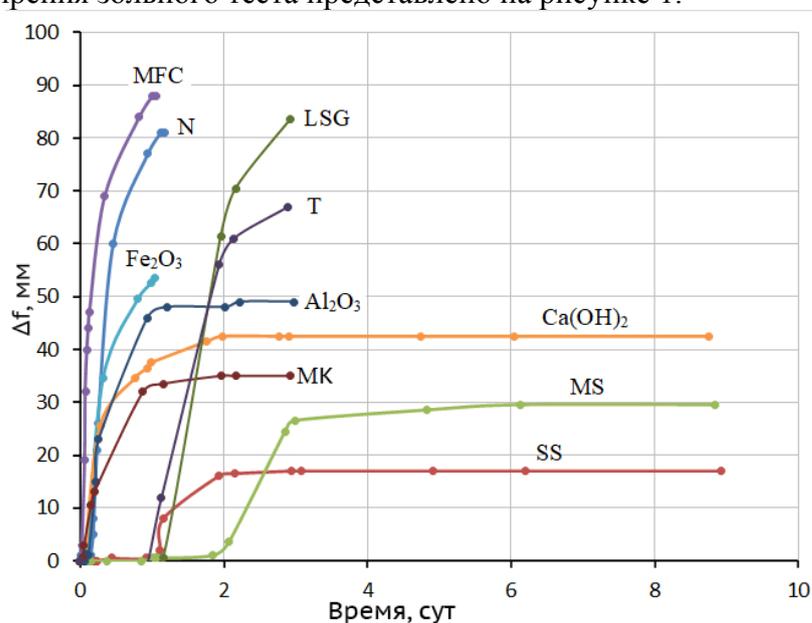


Рисунок 1 - Влияние добавок на кинетику расширения зольного теста

Видно (рисунок 1), что наибольший эффект в сдерживании расширения зольного теста проявляют добавки микрокремнезема (MS) и кремнекислоты (SS). При использовании этих добавок расширение начинается не сразу, а спустя 1-2 суток. В течение этого времени кремнезем связывает свободную известь в аморфный гидросиликат кальция и тормозит ее гидратацию. Когда весь кремнезем израсходован, начинается реакция извести с водой, сопровождающаяся расширением. Более продолжительный период задержки расширения теста с микрокремнеземом, чем с кремнекислотой, объясняется большим необходимым количеством микрокремнезема.

Отдельными испытаниями в кольцах Ле-Шателье золы уноса и микрокремнезема подобрано оптимальное количество добавки для сдерживания расширения зольного теста (рисунок 2).

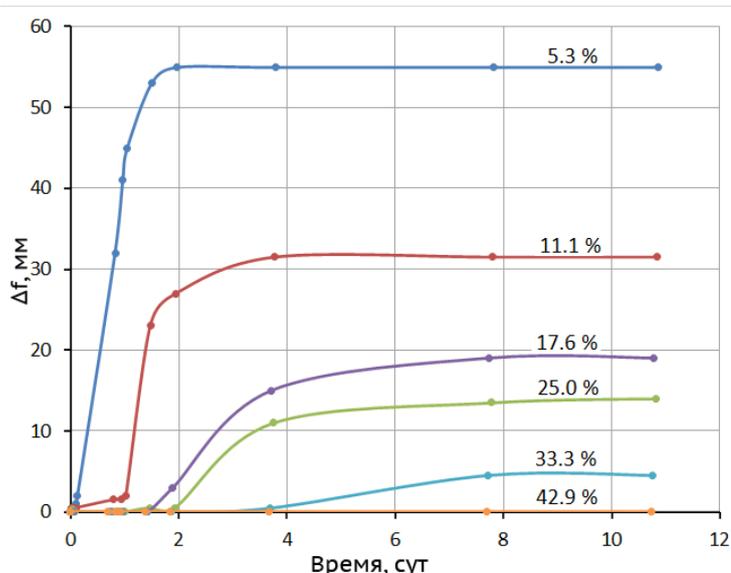


Рисунок 2 - Влияние микрокремнезема на деформацию расширения золы

Видно (рисунок 2), что расширение и растрескивание золы уноса Березовской ГРЭС можно полностью предотвратить добавкой микрокремнезема в количестве 42,9 % от массы золы уноса.

Проведен рентгено-фазовый анализ (РФА) пробы золы до гидратации (рисунок 3).

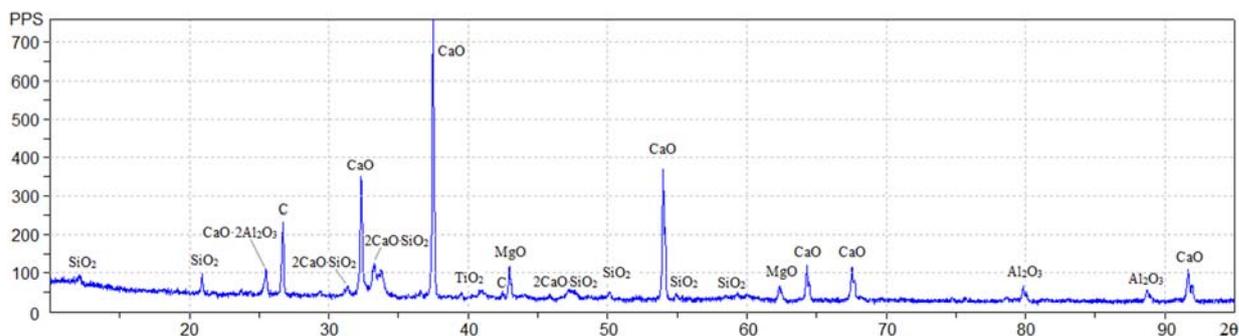


Рисунок 3 - Рентгенограмма золы уноса Березовской ГРЭС

В испытанной пробе золы уноса идентифицированы следующие фазы, представленные в таблице 3.

Таблица 3 - Фазовый состав золы уноса Березовской ГРЭС

Хим. состав соединений	Усл. содер. %	Химический состав соединений	Усл. содер. %
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

Проведен рентгено-фазовый анализ пробы золы после гидратации без добавок и с добавкой микрокремнезема от 11,1% до 42,8% от массы золы.

В пробе гидратированной золы без добавок из кристаллогидратов присутствует в основном  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  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 4.

Таблица 4 - 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 (таблица 4), 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 извести, так как вода в этом случае расходуется дополнительно на образование гидросиликатов кальция, количество которых растет с увеличением дозировки MS.

Результаты РФА подтверждены данными дифференциально-термического анализа, представленного в разделе 2.3.2 диссертационной работы.

Кинетику реакции между микрокремнеземом, свободной известью золы уноса и водой можно проследить по кривым тепловыделения смеси при гидратации. Удельное тепловыделение зольно-песчаного раствора в расчете на 1 кг золы при температуре 20 °C в зависимости от содержания микрокремнезема показано на рисунке 4.

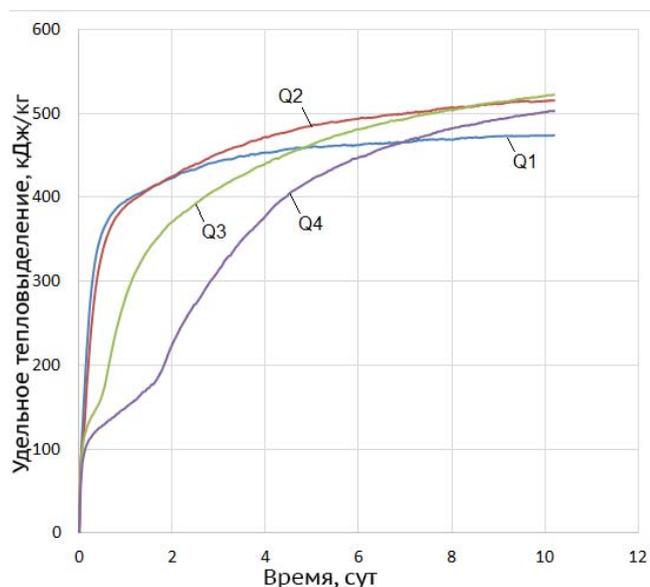


Рисунок 4 - Удельное тепловыделение зольно-песчаного раствора в зависимости от содержания микрокремнезема: Q1 – 0 %; Q2 – 11,1 %; Q3 – 25 %; Q4 – 42,9 %

Чистая зола уноса (Q1) реагирует с водой бурно благодаря гашению свободной извести. Примерно через 1 сутки после интенсивного тепловыделения процесс резко замедляется и к четвертым суткам приходит к 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 показывают результаты 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 и, тем выше в дальнейшие сроки.

Осуществлен поиск добавок (таблица 5) к зольно-кремнеземному вяжущему, повышающих прочность и водостойкость образцов.

Таблица 5 - 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> +MS	Ca(OH) <sub>2</sub> +MS	CaCl <sub>2</sub> +MS	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +MS	MgSO <sub>4</sub> +MS	K <sub>2</sub> O +MS	MgCl <sub>2</sub> +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

Для сравнительной оценки на рисунке 5 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<sub>2</sub>. С увеличением дозировки прочность образцов, содержащих MgSO<sub>4</sub> снижается, а образцов с MgCl<sub>2</sub> возрастает и достигает наибольших значений при дозировках 8.2 и 11.8 %. При этих дозировках относительно высокой прочностью характеризуется состав с добавкой Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, уступающий только образцам, содержащим MgCl<sub>2</sub>. Сочетание последних двух солей в соотношении 3,8 к 1 позволяет получить синергический эффект, что показывает последний столбик на гистограмме рисунка 5. Совместное применение этих добавок позволяет также снизить коррозионную активность хлорида в отношении стальной арматуры.

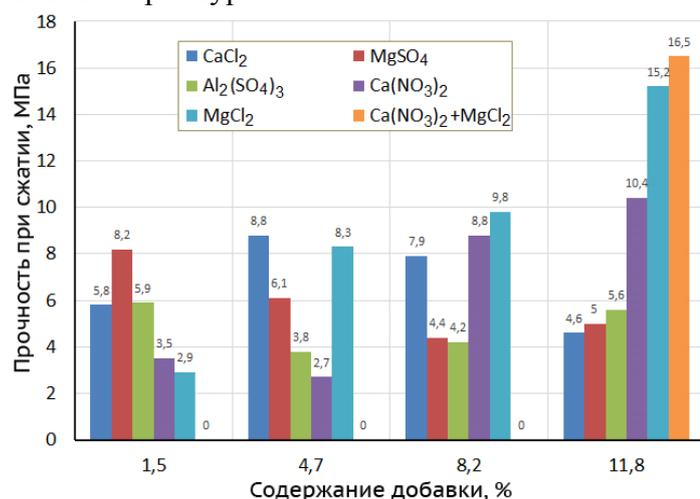


Рисунок 5 - Предел прочности при сжатии 7-дневных образцов воздушного твердения зольно-кремнеземного вяжущего с добавками минеральных солей

Наибольшую прочность обеспечило применение состава, содержащего золу уноса (64,6 %), микрокремнезем (27,8 %) и комплексную добавку MgCl<sub>2</sub> (1,6 %) + Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (6 %). Предел прочности при сжатии образцов такого состава в возрасте 28 суток составил 27,5 МПа.

**Третья глава** содержит разработку составов и экспериментальные исследования свойств бетона с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия для наружных стеновых панелей. Для подбора составов бетонов были проведены экспериментальные исследования традиционных компонентов бетонной смеси: песка, цемента и суперпластификаторов, исследования крупного заполнителя на основе низкокальциевой золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5, разработка и последующие исследования зольного гравия на основе высококальциевой золы Березовской ГРЭС.

*Безобжиговый зольный гравий на основе низкокальциевой золы уноса* Новосибирской ТЭЦ-5 испытан с целью определения его основных физико-механических характеристик для производства аналогичного гравия из высококальциевой золы уноса на основе разработанного вяжущего вещества, представленного в главе 2. Результаты испытаний безобжигового зольного гравия представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Физико-механические свойства безобжигового зольного гравия на основе низкокальциевой золы уноса

Наименование показателя		Ед. из.	Результаты испытаний
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
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

Испытанный безобжиговый зольный гравий на основе низкокальциевой золы уноса по физико-механическим свойствам сопоставим с другими видами легких пористых заполнителей (например, щебень из пористых горных пород, топливные и доменные шлаки, керамзит, перлит, шунгезит).

На основе описанного выше безобжигового зольного гравия подобрано два состава бетонов (таблица 7). В состав №1 добавляли сухой зольный гравий, в состав №2 - зольный гравий, предварительно насыщенный водой.

Таблица 7 - Состав бетонных смесей с безобжиговым зольным гравием на основе низкокальциевой золы уноса

Материалы	Расходы материалов (кг/м <sup>3</sup> )	
	Состав №1	Состав №2
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

Результаты испытаний на прочность не показали существенного различия между образцами, изготовленными с использованием водонасыщенных гранул, и изготовленными с использованием сухих гранул. Предел прочности при сжатии составил 30,3 МПа, 37,8 МПа и 42,6 МПа в возрасте 7, 28 и 65 суток, соответственно. 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.

Коэффициент температурного линейного расширения определялся на образцах-призмах размерами 70x70x280 мм и составил  $14,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Модуль упругости бетона составил 18 ГПа.

Результаты испытания на тепловыделение приведены на рисунке 6.

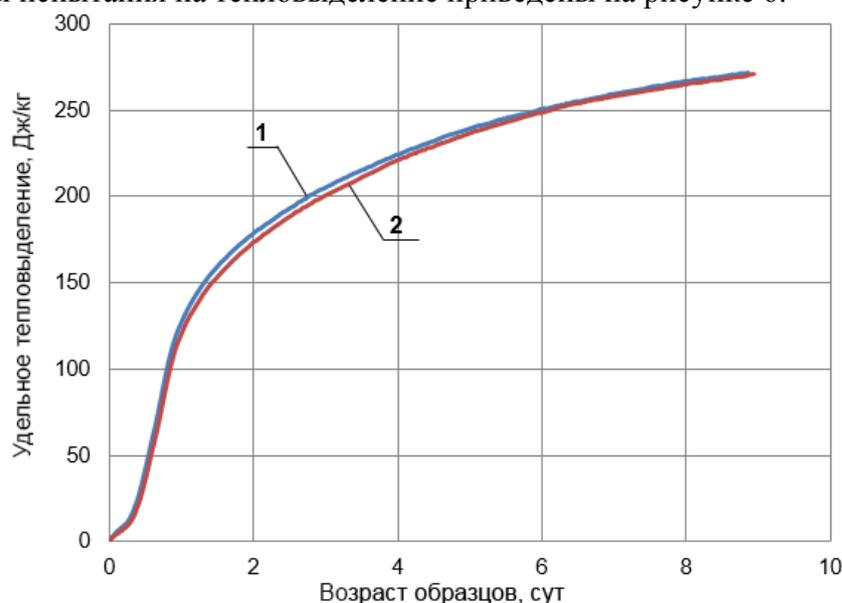


Рисунок 6 - Удельное тепловыделение цемента в бетоне: 1 – на сухих гранулах; 2 – на водонасыщенных гранулах

Как видно из рисунка 6 насыщение гранул водой не повлияло на кинетику тепловыделения и, следовательно, гидратацию цемента.

Деформация усадки бетона на воздушно-сухом заполнителе оказалась выше, чем на заполнителе, предварительно насыщенном водой (рисунок 7).

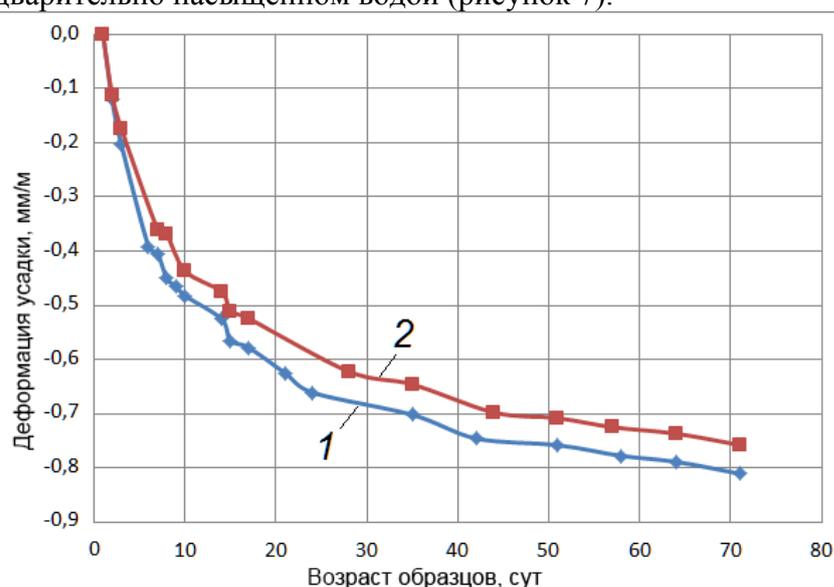


Рисунок 7 - Деформация воздушной усадки бетона: 1 – на сухих гранулах (состав №1); 2 – на водонасыщенных гранулах (состав №2)

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.

При испытании на усадку образцы периодически взвешивались, и вычислялась потеря массы в процентах от исходной массы образца. Зависимость усадки бетона от потери воды представлена в виде экспериментальных кривых на рисунке 8.



Рисунок 8 - Зависимость деформации усадки от потери воды на испарение: 1 – на сухих гранулах (состав №1); 2 – на водонасыщенных гранулах (состав №2)

При сравнении кривых 1 и 2 на рисунке 8 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 8 кривые хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, предложена удобная характеристика бетона в виде коэффициента воздушной усадки, равного производной от деформации усадки  $\epsilon$  по количеству потерянной воды  $c$  в виде:  $K=d\epsilon/dc$ .

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.

*Безобжиговый зольный гравий на основе высококальциевой золы уноса Березовской ГРЭС* был произведен из разработанного зольно-кремнеземного вяжущего.

Золу уноса и микрокремнезем отвешивали в определенном количестве и перемешивали вручную до получения однородной смеси. Добавки  $MgCl_2$  и  $Ca(NO_3)_2$  переводили в раствор. Смесь из золы уноса и микрокремнезема частично увлажняли раствором  $MgCl_2$  и раствором  $Ca(NO_3)_2$ , перемешивали в течение 2 минут и выгружали на тарель лабораторного гранулятора 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. 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.

Результаты испытаний безобжигового зольного гравия представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Физико-механические свойства безобжигового зольного гравия на основе высококальциевой золы уноса

Наименование показателя		Ед. из.	Результаты
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
Прочность при сдавливании в цилиндре		МПа	1,0
Истинная плотность		г/см <sup>3</sup>	2,65
Морозостойкость		-	не менее F25
Водопоглощение <b>по массе</b> за 1 час	смесь	%	23
	фракция 5-10		22
	фракция 10-20		24
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
Гигроскопичность при влажности воздуха 100%		%	35

Водопоглощение зольного гравия за час составляет 23 %, что существенно больше, чем у исследуемого зольного гравия на основе низкокальциевой золы уноса (15%). Дополнительно установлено, что для внутреннего ухода за бетоном оптимальным временем водонасыщения зольного гравия является 45 мин, т.к. после этого времени прирост массы гранул не происходит.

На основе безобжигового зольного гравия с высококальциевой золой уноса был разработан состав бетонной смеси (таблица 9) с водонасыщенными гранулами. В дополнение были выполнены исследования образцов бетона с зольным гравием, твердевшим в условиях тепловой обработки в течение 8 часов при температуре 80°C.

Таблица 9 - 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

Предел прочности при сжатии образцов с использованием зольного гравия после 7 суток воздушного хранения и последующей тепловой обработкой в течение 8 часов при температуре 80 °С составил 10,7 МПа, 17 МПа и 20,2 МПа в возрасте 7, 28 и 56 суток, соответственно.

Предел прочности при сжатии образцов, изготовленных с использованием зольного гравия, твердевшего в воздушных условиях, составил 23,3 МПа и 28,9 МПа в возрасте 7 и 28 суток, соответственно. 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.

Коэффициент температурного линейного расширения составил  $14,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

По результатам испытаний получено два значения модуля упругости: 16,1 ГПа и 9,3 ГПа. В первом случае в бетонную смесь 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.

Тепловая обработка зольного гравия не оказала влияния на ускорение в наборе прочности сырых гранул, 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.

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. Большее 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 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.

Результаты испытания на деформацию усадки приведены на рисунке 9.

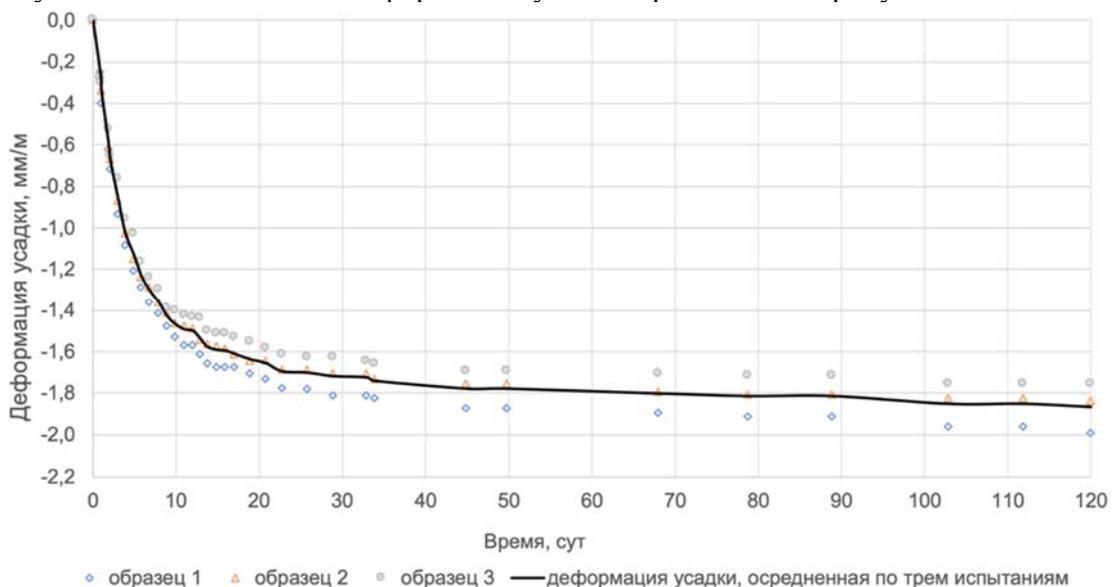


Рисунок 9 - Деформация воздушной усадки бетона

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 ГОСТ 31310-2015 «Панели стеновые трехслойные железобетонные с эффективным утеплителем. Общие технические условия».

Зависимость усадки бетона от потери воды представлена в виде экспериментальных кривых на рисунке 10.

Из рисунка 10 видно, что значение коэффициента воздушной усадки ( $K=d\varepsilon/dc$ ), предложенного ранее, составляет 0,28. 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.

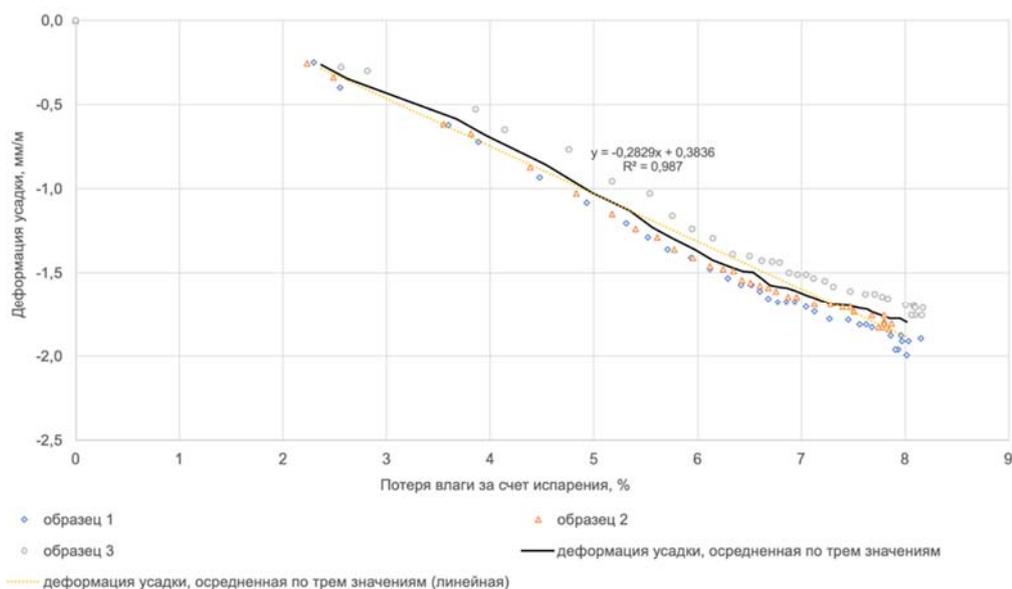


Рисунок 10 - Зависимость деформации усадки от потери воды на испарение

**Четвертая глава** содержит конструктивные решения наружных стеновых панелей из бетона с искусственным заполнителем на основе высококальциевой золы. В главе подробно описаны технические решения наружной стеновой панели, предназначенной для строительства бескаркасных многоэтажных жилых зданий (до 16 этажей) с поперечно-стеновой конструктивной схемой.

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 11.

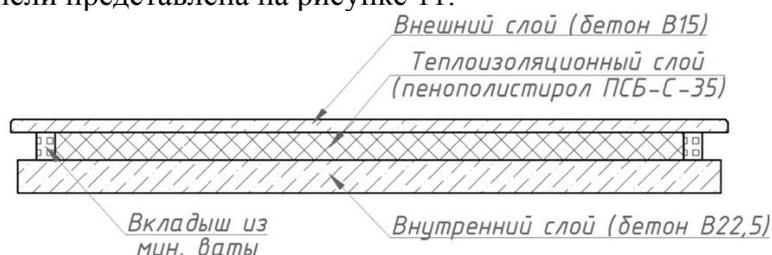


Рисунок 11 - Конструкция трехслойной железобетонной панели (вид сверху)

Внешний слой толщиной 70 мм выполнен из тяжелого бетона с плотностью  $2100 \text{ кг/м}^3$ , классом по прочности В15, маркой по водонепроницаемости W4, маркой по морозостойкости F1000, армированного в один ряд сетками и отдельными стержнями. Внутренний слой толщиной 180 мм выполнен из бетона с крупным заполнителем из безобжигового зольного гравия, разработанного состава с плотностью бетона в сухом состоянии –  $1700 \text{ кг/м}^3$ , 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.

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.

Для теплотехнического расчета наружной стеновой панели экспериментальным путем был определен коэффициент внутренней теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием, который составил  $0,648 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Сравнивая это значение с другим бетоном с безобжиговым зольным гравием из низкокальциевой золы уноса видно, что коэффициент теплопроводности предлагаемого бетона меньше на 27,5%.

В результате теплотехнического расчета согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» определена толщина утеплителя из экструдированного пенополистирола для наружной стеновой панели из бетона с искусственным наполнителем на основе высококальциевой золы. Толщина утеплителя составила 150 мм. Общая толщина стены в данном случае будет равна 400 мм.

Сравнение теплотехнических характеристик предлагаемой наружной стеновой панели с типовой трехслойной железобетонной панелью при одинаковой толщине внутреннего и внешнего слоев показало, что типовой наружной стеновой панели требуется толщина утеплителя из экструдированного пенополистирола 160 мм. Общая толщина стены в данном случае будет равна 410 мм.

Для определения несущей способности рассматривается трехслойная железобетонная панель, представленная на рисунке 12.

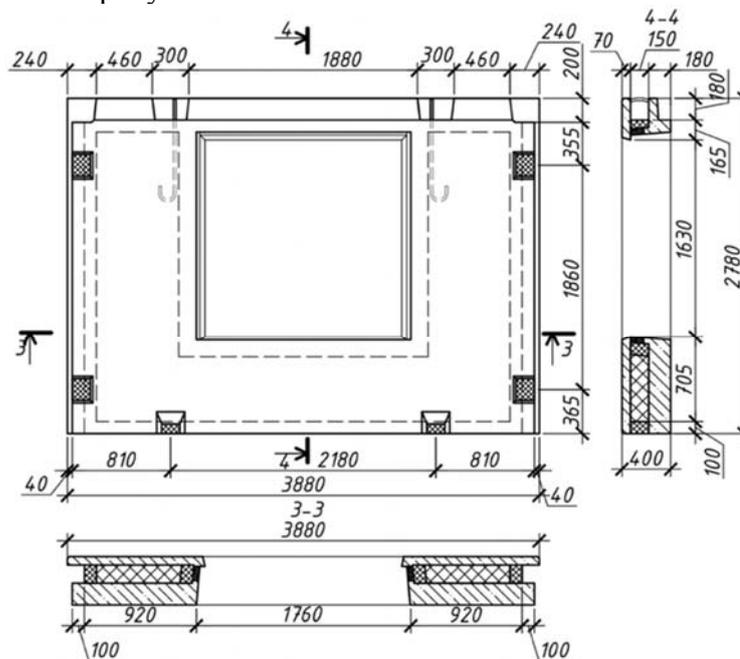


Рисунок 12 - Наружная стеновая панель

Несущий слой панели выполнен из бетона с искусственным наполнителем на основе высококальциевой золы уноса. Модуль упругости бетона и прочность при сжатии, полученные экспериментально, 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 согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

В качестве расчетного сечения примем сечение простенка несущего слоя панели с размерами 180 мм x 1020 мм (рисунок 13).

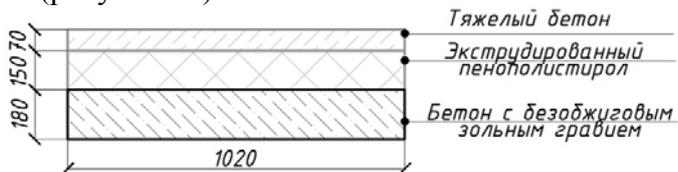


Рисунок 13 - Схема расчетного сечения

Анализ несущей способности стеновой панели произведен согласно СП 63.13330.2018. Несущая способность стеновой панели определена по формуле 1.

$$N \leq 2 \cdot R_b \cdot A_b, \quad (1)$$

где  $N$  – несущая способность стеновой панели;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона класса В22,5 по прочности на сжатие согласно СП 63.13330.2018 и равное 13,0 МПа;  $A_b$  – площадь сжатой зоны бетона, определяемая для элементов прямоугольного сечения по формуле (2); 2 – коэффициент, учитывающий количество простенков в панели (см. рисунок 12).

Несущая способность стеновой панели, определенная по формуле 1 составила 4001 кН.

Целью численного расчета являлось 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, и стержней, моделирующих рабочую арматуру. 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 14.

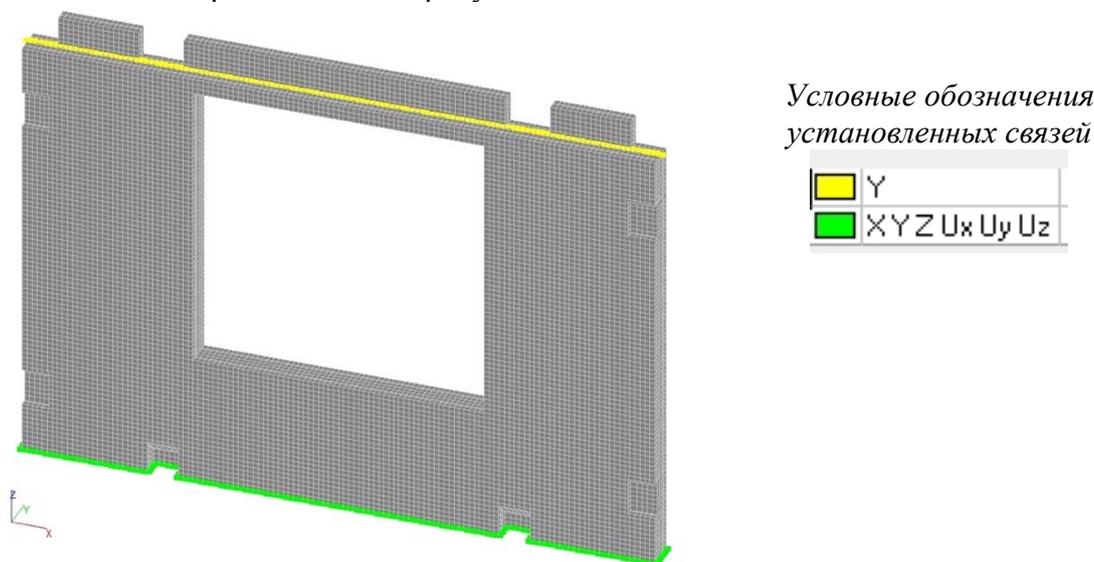


Рисунок 14 - Расчетная модель

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 14).

Дополнительные условия - все перемещения узлов, принадлежащих каждой координате Y верхней плоскости панели, имеют одинаковые перемещения по Z (см. рисунок 15).

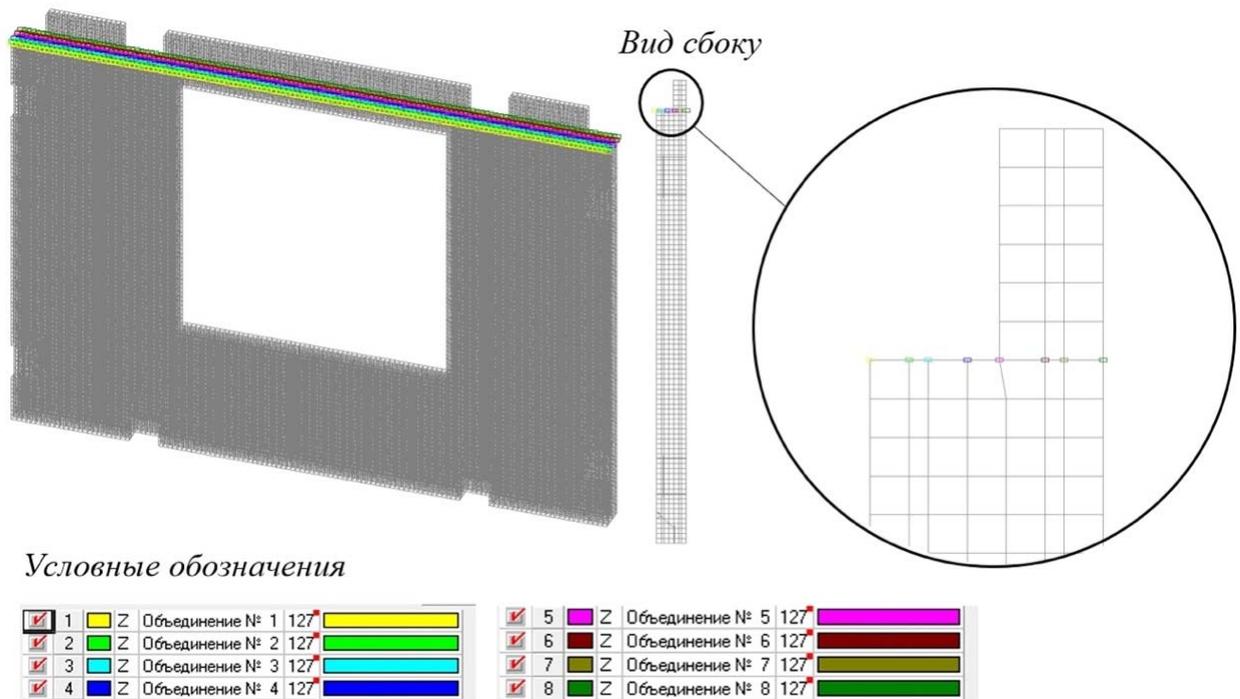


Рисунок 15 - Объединение перемещений

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 ( $q_{c.в.} = 33,43$  кН)

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.

При переходе к эквивалентным напряжениям согласно теории наибольших линейных деформаций значение максимального напряжения составило «минус» 12,99 МПа (см. рисунок 16).

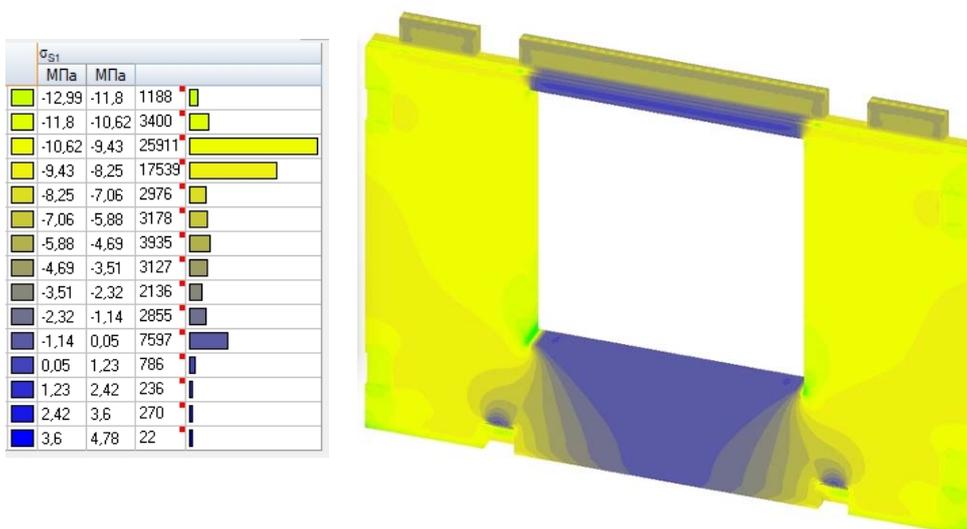


Рисунок 16 - Эквивалентные напряжения

Максимальные перемещения вдоль оси Z составляют «минус» 1,613 мм.

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. Сравнение напряжения в арматуре с расчетными значениями сопротивлений растяжению и сжатию для предельных состояний первой группы согласно СП 63.13330.2018 показало, что действующее растягивающее напряжение в арматуре 155,1 МПа меньше расчетного значения сопротивления растяжению 435 МПа, а действующее сжимающее напряжение в арматуре 33,6 МПа меньше расчетного значения сопротивления сжатию 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 10.

Таблица 10 - 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.

Пример использования разработанной наружной стеновой панели рассматривается на примере сборного крупнопанельного односекционного 16-этажного жилого здания. Конструктивная система здания – поперечно-стеновая. План типового этажа представлен в Приложении 2, продольный разрез здания — в Приложении 3, схема расположения наружных стеновых панелей — в Приложении 4, несущие наружные стеновые панели — в Приложении 5 диссертационной работы.

Сбор нагрузок осуществлен для здания максимальной этажности - 16 этажей и пролета - 3,6 м. Действующие нагрузки на панель составили 143,2 т, а действующая нагрузка на один простенок панели — 71,6 т. Действующая нагрузка на панель  $143,2 \text{ т} \leq 371,6 \text{ т}$ , что удовлетворяет условиям прочности, следовательно, разработанная наружная стеновая панель применима для жилых многоэтажных зданий (до 16 этажей).

Технико-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 12.

Стоимость материалов для производства разработанной наружной панели составила 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. 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

В рамках проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Разработано безцементное вяжущее на основе высококальциевой золы Березовской ГРЭС с исключением ее расширения и повышением прочности с помощью микрокремнезема и комплексной добавки  $MgCl_2 + Ca(NO_3)_2$  в соотношении равном 1 : 3,8.

2. Экспериментально исследованы состав и свойства зольно-кремнеземистого вяжущего вещества с добавками  $Ca(NO_3)_2$  и  $MgCl_2$  (испытания на расширение в кольцах Ле Шателье, рентгенофазовый анализ, дифференциальный термический анализ, тепловыделение, прочность и усадка).

3. Разработана технология безобжигового зольного гравия на основе разработанного вяжущего вещества и определены физико-механические характеристики искусственного заполнителя на основе высококальциевой золы уноса: истинная плотность –  $2,65 \text{ г/см}^3$ , средняя плотность –  $1,42 \text{ г/см}^3$ , морозостойкость - не менее F25, водопоглощение по массе - 23 %, пористость - 46 %, в т.ч. открытая – 33 % и др.

4. Разработаны и экспериментально исследованы составы бетонов на основе безобжигового зольного гравия:

- 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 –  $14,4 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  и  $14,5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ , 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  $\epsilon$  по количеству потерянной воды  $c$  в виде:  $K=d\epsilon/dc$ . 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.

5. На основании экспериментальных результатов усовершенствовано конструктивное решение наружной трехслойной стеновой панели из бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы.

- 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.

- 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.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Публикации в изданиях, включенных в Перечень РУДН/ВАК**

1. Усанова К.Ю., Барабанщиков Ю.Г., Калачев А.И., Уханов А.В. Neutralization of high-calcium fly ash expansion // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2022. № 5(103). С. 31-45. DOI:10.4123/CUBS.103.2

**Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы Scopus, Web of Science**

1. Usanova, K., Barabanshchikov, Yu.G. Cold-bonded fly ash aggregate concrete. Magazine of Civil Engineering, 95 (3), pp. 104-118. DOI: 10.18720/MCE.95.10
2. Barabanshchikov, Y., Fedorenko, I., Kostyrya, S., Usanova, K. Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes with Low Thermal Transmittance: Review. Advances in Intelligent Systems and Computing, 983, pp. 858-866. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_84
3. Usanova, K. Properties of Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes. Lecture Notes in Civil Engineering, 70, pp. 507-516. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3\_44
4. Barabanshchikov, Y., Usanova, K., Akimov, S., Uhanov, A., Kalachev, A. Influence of electrostatic precipitator ash “zolest-bet” and silica fume on sulfate resistance of Portland cement. Materials 2020, 13 (21), статья № 4917, pp. 1-13. DOI: 10.3390/ma13214917
5. Barabanshchikov, Y., Usanova, K. Influence of High-Calcium Oil Shale Ash Additive on Concrete Properties. Lecture Notes in Civil Engineering, 150 LNCE, pp. 23-34. DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7\_3
6. Barabanshchikov, Y.; Usanova, K. Influence of Silica Fume on High-Calcium Fly Ash Expansion during Hydration. Materials 2022, 15(10), статья № 3544, pp. 1-19. DOI: 10.3390/ma15103544
7. Vatin N., Barabanshchikov Y., Usanova, K., Akimov S., Kalachev A., Uhanov A. Cement-based materials with oil shale fly ash additives. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 578, 2020. DOI:10.1088/1755-1315/578/1/012043

**Авторские свидетельства и патенты**

1. Патент на изобретение № RU 2798801 C1. Вяжущее вещество на основе высококальциевой золы-уноса. Авторы: Барабанщиков Ю.Г., Усанова К.Ю., Ватин Н.И. // Бюл. изобр.— 2023.— №18.

**АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ****Усанова Ксения Юрьевна****«Наружные стеновые панели из бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы»**

В диссертации представлено и обосновано усовершенствованное конструктивное решение наружной стеновой панели с учетом физико-механических свойств бетона с искусственным заполнителем на основе вяжущего вещества из высококальциевой золы уноса.

Исследование содержит анализ существующих конструктивных решений бетонных и железобетонных наружных стеновых панелей и подходы по использованию техногенных отходов в бетонных конструкциях, экспериментальные исследования свойств высококальциевой золы и разработка состава вяжущего вещества на ее основе, экспериментальные исследования физико-механических свойств бетонов с искусственными заполнителями в виде безобжигового зольного гравия, в т.ч. заполнителя на основе вяжущего из высококальциевой золы, подбор оптимального состава бетона для использования в наружных стеновых панелях, совершенствование ограждающей конструкции с наружными стеновыми панелями. Представлены теплотехнические свойства наружной стеновой панели, определена ее несущая способность и технико-экономические показатели. Использование разработанной наружной стеновой панели рассматривается на примере сборного крупнопанельного односекционного 16-этажного жилого здания с поперечно-стеновой конструктивной системой здания.

При выполнении работы применялись экспериментальные и расчетные методы исследования.

**ABSTRACT OF DISSERTATION****Usanova Kseniia Iurevna****« Exterior wall panels made of concrete with artificial aggregate based on high-calcium fly ash binder»**

The dissertation presents and substantiates an improved design solution for the exterior wall panel, considering the physical and mechanical properties of concrete with artificial aggregate based on high-calcium fly ash binder.

The study contains an analysis of existing design solutions for concrete and reinforced concrete exterior wall panels and approaches to the use of man-made waste in concrete structures, experimental studies of the properties of high-calcium fly ash and the development of a binder composition based on it, experimental studies of the physical and mechanical properties of concretes with artificial aggregates in the form of cold-bonded fly ash gravel, incl. coarse aggregate based on high-calcium fly ash binder, selection of the optimal composition of concrete for use in external wall panels, improvement of the enclosing structure with external wall panels. The thermotechnical properties of the exterior wall panel are presented, its bearing capacity and technical and economic indicators are determined. The use of the developed exterior wall panel is considered on the example of a prefabricated large-panel single-section 16-storey residential building with a cross-wall structural system of the building.

When performing the work, experimental and computational research methods were used. The field of application is construction.