

B
печать
26.06.2024

На правах рукописи

Петрик Ирина Юрьевна

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА
С ОБОГАЩЕННОЙ ЗОЛОЙ ТЭС**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2024

Работа выполнена на кафедре технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **ЗАЙЧЕНКО Николай Михайлович**, ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ректор, профессор кафедры «Технологии строительных конструкций, изделий и материалов»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **БАТЯНОВСКИЙ Эдуард Иванович**, Белорусский национальный технический университет, профессор кафедры «Строительные материалы и технология строительства»

кандидат технических наук, старший научный сотрудник **НАЗАРОВА Антонина Васильевна**, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Защита состоится «10» октября 2024 г. в 13:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.484.02 при ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний учёного совета. Тел.: +7-856-343-7033; e-mail: 24.2.484.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.484.02

Лахтарина Сергей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Канадским центром минеральных и энергетических технологий (CANMET) разработаны составы тяжелых цементных бетонов, содержащих более 50 % кремнеземистой золы (класс F) взамен портландцемента. Такие бетоны с высоким содержанием золы-уноса (High-Volume Fly Ash Concretes) за счет применения комплекса химических модификаторов (суперпластификатор, воздухововлекающая добавка) характеризуются высокой удобоукладываемостью бетонной смеси, пониженным тепловыделением в ранние сроки твердения, повышенной коррозионной стойкостью, а также достаточно высокой прочностью при сжатии в поздние сроки твердения.

В то же время, зола-уноса даже с одной тепловой электростанции может характеризоваться высокой степенью неоднородности как по гранулометрическому, так и по химико-минералогическому составу, что обусловлено целым рядом различных факторов. Так, количество несгоревшего углерода (потери при прокаливании ППП, %) в золе-уноса колеблется в широких пределах и зависит, прежде всего, от вида углей и условий их сжигания – от менее 1 до более 20 %. Углерод, содержащийся в золе, имеет высокую пористость и очень большую удельную поверхность, что обуславливает его способность поглощать значительное количество воды затворения, а также химических добавок, снижая их эффективность. Кроме того, вследствие адсорбции поверхностью углерода воздухововлекающей добавки требуется более высокая ее дозировка для обеспечения морозостойкости бетона, что приводит к снижению прочности бетона. Таким образом, для применения золы-уноса в бетоне содержание ППП в ее составе нормативными документами различных стран ограничивается в пределах 5-7 %. Следует также учитывать, что стремление на тепловых электростанциях выполнять требования по экологии в части снижения выбросов оксидов азота (NO_x), обычно сопровождается увеличением содержания несгоревшего углерода в золе-уносе, что может сделать ее непригодной для применения в бетоне.

Еще большей неоднородностью обладают золошлаковые смеси, образующиеся при совместном гидроудалении золы и шлака в золоотвал. Возможность применения в качестве минеральной добавки в виде сухой золы (восстановленная отвальная зола) с требуемой однородностью по гранулометрическому и химико-минералогическому составу обеспечивается в результате применяемой технологии переработки. Среди различных способов обогащения зол ТЭС наибольшей эффективностью обладает электростатическая сепарация. Обогащение золы гидроудаления в электростатическом сепараторе в сочетании с применением модификатора на основе углеродных нанострукту-

рированных материалов и воздухововлекающей добавки обеспечит возможность получения бетона с высоким содержанием золы взамен части портландцемента (до 50 %) с нормальными темпами набора прочности бетона как в раннем, так и позднем сроках твердения, а также нормируемыми строительно-техническими свойствами.

Степень разработанности темы. Проблемам разработки составов и исследования свойств тяжелых бетонов, содержащих золошлаковые отходы, в частности, золуноса ТЭС, посвящен огромный массив работ, выполненных отечественными и зарубежными учеными. На основе накопленного практического опыта различных научных коллективов: НИИЖБ Госстроя СССР, ВНИИЖелезобетон МПСМ СССР, Донецкого ПромстройНИИпроекта, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и других, разработаны «Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций». Согласно «Рекомендациям», содержание золы-уноса ТЭС, используемой в составе конструкционного бетона в качестве минеральной добавки, колеблется в пределах 15-25 %. В 1985 году ведущими учеными института CANMET – V. M. Malhotra, P. K. Mehta, предложены технологические принципы получения бетонов с высоким содержанием золы-уноса (до 50 % взамен цемента): High Volume Fly Ash Concretes. Наряду с тем, что разработанные бетоны отвечают требованиям устойчивого развития – сокращение выбросов CO₂, ресурсо- и энергосбережение, показатели их качества соответствуют также линейке высококачественных бетонов – High Performance Concretes. Ряд ученых доложили положительные результаты исследований бетонов с содержанием золы-уноса 65-80 %: Г. Д. Ляхевич, D. P. Bentz, R. Kumar, C. S. Poon, R. Siddique, M. Stechyshyn, W. Wongkeo и др. Для устранения негативного влияния повышенного содержания золы на твердение и свойства бетонов предложен ряд химических модификаторов, включающих эффективные суперпластификаторы, ускорители твердения, воздухововлекающие добавки. Объектом интенсивных исследований в последние годы являются фуллероидные углеродные наночастицы различных типов и топологий, которые вводятся в цементные системы для направленного управления их реологическими и физико-механическими характеристиками: Ю. В. Пухаренко, Э. И. Батяновский, С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Н. Н. Смирнягина, Л. А. Урханова.

С другой стороны, в литературе имеется значительное количество противоречивых данных о влиянии высокого содержания золы на свойства бетона. Кроме того, исследования, как правило, выполнены в отношении бетонов, содержащих золу-уноса сухого отбора, в том числе обогащенную различными технологическими способами. В то же время, практически отсутствуют данные о свойствах бетонов, содержащих большое количество низкокачественной золы, в частности, отвальной золы гидроудаления. Требуют дальнейшего изучения направления модифицирования бетонов химическими

добавками с целью устранения негативного влияния большого содержания золы на свойства бетона.

Целью исследования является разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение тяжелого бетона с повышенным содержанием отвалной золы ТЭС путем ее обогащения электростатической сепарацией совместно с комплексным модифицированием структуры бетона (суперпластификатор + модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов + воздухововлекающая добавка).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ существующих представлений о бетонах с высоким содержанием золы ТЭС в составе вяжущего;
- разработать конструкцию установки, обосновать параметры и режимы обогащения золы ТЭС в высоковольтном электростатическом сепараторе;
- определить свойства обогащенной золы ТЭС, исследовать влияние обогащенной золы ТЭС в сочетании с химическими модификаторами на твердение и свойства цементно-зольного вяжущего;
- оптимизировать состав комплексного органо-минерального модификатора, исследовать свойства бетонных смесей и бетонов;
- разработать рекомендации по ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС, осуществить опытно-промышленное внедрение результатов исследования и оценить их технико-экономическую эффективность.

Объект исследования – бетонные смеси и бетоны с обогащенной золой ТЭС и комплексным модификатором (суперпластификатор + модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов + воздухововлекающая добавка).

Предмет исследования – процессы твердения, свойства и технология тяжелого бетона с обогащенной золой ТЭС и комплексным модификатором (суперпластификатор + модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов + воздухововлекающая добавка).

Научная новизна полученных результатов:

- обосновано и экспериментально доказано технологическое решение получения комплексно модифицированного тяжелого бетона на основе цементно-зольного вяжущего с заменой портландцемента обогащенной электростатической сепарацией отвалной золой ТЭС в количестве до 45 %;
- по данным рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии установлено, что в результате электростатической сепарации золы обеспечивается улуч-

шение ее фазового состава: повышается содержание кварца и снижается содержание гематита, а также несгоревшего углерода. Цементный камень с обогащенной золой гидроудаления представлен плотной, достаточно однородной микроструктурой, с иммобилизованными в образовавшиеся фазы продуктов гидратации дисперсными частицами золы;

– по показателю «индекс пены» определено влияние золы ТЭС на эффективность воздухововлекающей добавки Sika® Aer Pro-100 – показано, что при применении в составе цементного теста золы с высоким содержанием несгоревшего углерода (ППП = 22 %) резко сокращается длительность устойчивого состояния пены на поверхности теста, а расход разбавленной воздухововлекающей добавки для получения стабильной пены повышается в 8,1 раза в сравнении с применяемой обогащенной золой (ППП = 2,2 %);

– по данным рентгенофазового анализа камня вяжущего в возрасте 28 суток твердения установлено активизирующее процессы гидратации цемента влияние комплексного органо-минерального модификатора (обогащенная зола, модификатор «АРТ-КОНКРИТ Р», добавка Sika® Aer Pro-100): снижение относительной интенсивности дифракционных отражений алита, β -кварца; более высокая интенсивность линий слабо-закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– получены новые данные, дополняющие теоретические представления о процессе структурообразования тяжелого бетона на основе портландцемента с добавкой золы ТЭС, содержащего комплексный модификатор: поликарбоксилатный суперпластификатор + модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов + воздухововлекающая добавка на основе композиции синтетических поверхностно-активных веществ. Получены бетоны с нормальными темпами набора прочности бетона как в раннем, так и позднем сроках твердения, а также нормируемыми строительными-техническими свойствами;

– установлена высокая эффективность способа трибоэлектростатической сепарации золы гидроудаления ТЭС для снижения содержания несгоревшего углерода и улучшения гранулометрического состава материала, используемого в качестве пуццолановой добавки для бетона: после электрической сепарации количество материала, отвечающего требованиям к пуццолановым добавкам бетона, составляет 82,7 %, среднее содержание ППП – не превышает 3 %, гранулометрический состав улучшен за счет повышения содержания дисперсных частиц размером менее 2 мкм;

– разработаны рекомендации по ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС, выполнена опытно-промышленная апробация результатов исследования (растворно-бетонный завод ООО «Донспецпром»);

– теоретические положения, результаты экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство», профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций», а также при подготовке магистров по направлению 08.04.01 «Строительство», программа «Перспективные строительные материалы, изделия, конструкции и технологии их производства».

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационной работы являются положения и закономерности материаловедения, физики, научные исследования в области трибоэлектростатической сепарации минерального сырья. Экспериментальные исследования свойств бетонных смесей и бетонов выполнены согласно стандартным и специальным методикам с использованием аттестованных средств измерительной техники и испытательного оборудования. Свойства золы, процессы твердения вяжущих веществ исследованы с использованием современных методов: лазерной гранулометрии, рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов. Оптимизация состава комплексного модификатора выполнена с использованием математических моделей. Для обработки и анализа результатов экспериментов применены методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование возможности получения тяжелого бетона с повышенным содержанием отвальной золы ТЭС за счет ее обогащения в электростатическом сепараторе, а также применения комплексного модификатора в составе: (поликарбоксилатный суперпластификатор + модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов + воздухоовлекающая добавка на основе композиции синтетических поверхностно-активных веществ);

– результаты исследования свойств отвальной золы ТЭС, обогащенной путем электростатической сепарации, и ее влияния на структурообразование цементно-зольного вяжущего;

– результаты исследования влияния обогащенной золы ТЭС и комплексного модификатора на свойства цементно-зольного теста, прочность камня вяжущего, состав продуктов гидратации;

– экспериментальные зависимости эксплуатационных свойств (морозостойкость и коррозионная стойкость) модифицированного бетона на основе обогащенной золы ТЭС от содержания комплексного модификатора.

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность результатов обеспечивается проведением экспериментов на современном исследовательском оборудовании с достаточной воспроизводимостью результатов; применением стандартных

методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов; статистической обработкой полученных данных с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний; сопоставлением результатов с аналогичными результатами, полученными другими авторами; положительными результатами опытного внедрения составов и ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались на: VII Международном молодежном форуме «Образование, наука, производство» (Белгород, 20-22 октября 2015 г.); Региональной конференции «Комплексное использование природных ресурсов» (Донецк, 10 декабря 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Строительство и архитектура-2015» (Ростов-на-Дону, 26-27 ноября 2015 г.); международных строительных форумах «Строительство и архитектура» и конференциях молодых ученых, аспирантов, студентов «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительно-архитектурной отрасли» (Макеевка, 2016-2023 гг.); Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2016-2018 гг.); IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение» (Якутск, 27-28 октября 2016 г.); Международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (Москва, 16-17 ноября 2016 г.); VI Международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона» (Саратов, 16-23 апреля 2018 г.); III Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию кафедры строительного материаловедения «Строительное материаловедение: настоящее и будущее» (Москва, 15-16 ноября 2023 г.).

Личный вклад соискателя состоит в выполнении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследований в производство. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований, а также внедрение результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 12 печатных работах: четыре – в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук; публикация в издании, индексируемом в базе данных “Web of Science”; семь – в изданиях по материалам научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 174 страницах машинописного текста, состоит из введения, основной части из четырех разделов, заключения, списка использованной литературы из 195 наименований и пяти приложений. Содержит 38 рисунков и 44 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, изложены научная новизна, теоретическое и практическое значение работы, приведена информация о структуре и объёму диссертации, публикациям и апробации работы.

В первом разделе проанализировано современное состояние вопроса по направлению темы диссертации, изложены теоретические предпосылки исследования, на основе которых сформулирована рабочая гипотеза диссертационного исследования.

Среди минеральных отходов различных отраслей народного хозяйства в качестве компонентов строительных материалов наибольшее применение находят шлаки металлургического производства и золошлаковые отходы (ЗШО) тепловых электростанций. Утилизация золы ТЭС при производстве бетонов взамен размещения в золоотвалах может быть обоснована как экономическими и экологическими аспектами при использовании в качестве частичной замены портландцемента с одной стороны, так и техническими, связанными с её положительным влиянием в качестве активной минеральной добавки (пуццоланы) и дисперсного наполнителя на свойства бетонных смесей и бетонов, – с другой.

Замена части портландцемента золой приводит к формированию более плотной структуры цементного камня с низкой общей и открытой пористостью вследствие снижения водовяжущего отношения и заполнения порового пространства тонкодисперсными активными минеральными наполнителями, связывающими портландит в менее растворимые низкоосновные гидросиликаты кальция. В то же время, гранулометрический, химико-минералогический состав, молекулярная структура применяемой золы, а также уровень замещения портландцемента могут оказывать несоизмеримое влияние на кинетику гидратации, прочность при сжатии и долговечность вяжущих систем на основе портландцемента с добавкой золы. Так, на современных ТЭС используются низкоэмиссионные методы производства электроэнергии и тепла, ориентированные на достижение минимального уровня выбросов вредных веществ в атмосферу (оксиды азота NO_x , оксид углерода CO и несгоревшие углеводороды C_xH_y). В результате образующаяся зола имеет более крупный гранулометрический состав и часто высокое остаточное содержание несгоревших угольных частиц (НУЧ), что ограничивает ее использование в бетонах в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Наличие НУЧ в золе-уноса вызывает повышение водопотребности бетонной смеси, снижение морозостойкости бетона и коррозионной стойкости стальной арматуры. Зола-уноса с высоким содержанием НУЧ может вовлекать большее количество воздуха, снижая среднюю плотность и прочность бетона, а также эффективность химических добавок, в частности, воздухововлекающих и пластифицирующих. Значительной неоднородностью как по гранулометрическому, так и фазово-минералогическому составу характеризуется зола гидроудаления, что указывает на то, что её извлечение из длительного хранения в золоотвалах для использования в составах бетона требует переработки – обогащения. Среди известных способов обогащения электростатическое сепарирование, основанное на различии в поверхностном заряде минералов золы и углерода, считается наиболее применимым и эффективным, практический интерес к которому постоянно растет (О. А. Сулейменов, L. Baker, F. Cangialosi, A. Gupta, J. K. Kim, Y. Soong, J. M. Stencel и др.). Электростатическое обогащение золы обеспечивает получение минеральной добавки для бетона, отвечающей техническим требованиям стандартов, в том числе по содержанию несгоревшего углерода.

Обычно содержание золы-уноса ТЭС, используемой в составе конструкционного бетона в качестве минеральной добавки, в том числе частичной замены портландцемента, ограничивается в пределах 15-25 % от расхода цемента. При этом эффективность использования зол ТЭС в бетоне в количестве, большем, чем замещено цемента, снижается при повышенном содержании в их составе НУЧ. Конструкционные бетоны с большим объемом золы-уноса (50-60 %) были разработаны Канадским центром минеральных и энергетических технологий (CANMET) в 1985 году – High Volume Fly Ash Concretes (A. Bilodeau, G. Carette, V. M. Malhotra, P. K. Mehta).

Для устранения негативного влияния высокого содержания золы на процессы твердения (развитие прочности) и свойства бетонов применяется широкий спектр минеральных добавок (микро- и нанокремнезем, метакаолин, известняк и др.) и химических модификаторов (суперпластификаторы, воздухововлекающие добавки, ускорители твердения и др.). Объектом интенсивных исследований в последние годы являются фуллероидные углеродные наночастицы различных типов и топологий, которые вводятся в цементные системы для направленного управления их реологическими и физико-механическими характеристиками (Э. И. Батяновский, С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Ю. В. Пухаренко, Л. А. Урханова, Б. М. Хрусталеv и др.).

Анализируя большой массив выполненных работ по исследованию технологии и свойств бетонов с высоким содержанием золы-уноса ТЭС, следует отметить, что, несмотря на большие перспективы использования таких бетонов, имеется значительное количество противоречивых данных о влиянии высокого содержания золы на свойства

бетона. Многие аспекты применения таких бетонов должны быть дополнительно исследованы – выдвинута следующая **рабочая гипотеза** диссертационного исследования. Применение технологии обогащения золы ТЭС, в том числе золы гидроудаления, электростатической сепарацией (снижение содержания НУЧ, улучшение гранулометрического состава) в сочетании с комплексным модифицированием химическими добавками – поликарбоксилатным суперпластификатором с наноструктурированным углеродом и воздухововлекающей добавкой, позволит получить тяжелые цементные бетоны с частичной заменой портландцемента золой в количестве до 45 %, характеризующиеся нормальными темпами набора прочности и физико-механическими свойствами, сопоставимыми с составами бетонов без минеральной добавки.

Во **втором разделе** на основании поставленных в диссертации задач разработана структурно-логическая схема исследований, которая включает четыре последовательных блока: I – теоретические предпосылки получения тяжелых цементных бетонов с частичной заменой портландцемента обогащенной золой ТЭС в количестве до 45 %, характеризующихся нормальными темпами набора прочности и нормируемыми показателями физико-механических свойств; II – технология обогащения золы ТЭС, исследование ее влияния на свойства бетонной смеси и бетона; III – оптимизация состава комплексного модификатора, содержащего обогащенную золу ТЭС, поликарбоксилатный суперпластификатор с наноструктурированным углеродом и воздухововлекающую добавку; исследование физико-механических и эксплуатационных свойств бетона; IV – внедрение результатов исследования.

При проведении экспериментов в качестве исходных материалов были приняты: вяжущее вещество – портландцемент ЦЕМ-I 42,5 Н (ООО «ПИК-ЦЕМЕНТ», пгт. Новоамвросиевское, ДНР); минеральная добавка – зола гидроудаления, полученная переработкой золошлаковой смеси (Зуевская ТЭС, г. Зугрэс, ДНР); заполнители – щебень гранитный и песок кварцевый, соответственно Тельмановского и Ясиноватского месторождений. В качестве химических модификаторов использованы: суперпластификатор (СП) на поликарбоксилатной основе, содержащий модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов «АРТ-КОНКРИТ Р» (ТУ ВУ 691460594.002-2016, ООО «Передовые исследования и технологии», г. Минск); суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika Visco Crete 5-600 N PL (ТУ 2493-009-13613997-2011); воздухововлекающая добавка (ВД) на основе композиции синтетических поверхностно-активных веществ Sika®Aer Pro-100 (ТУ 20.59.59-036-13613997-2019).

Экспериментальные исследования свойств бетонных смесей и бетонов выполнены согласно стандартным и специальным методикам с использованием аттестованных средств измерительной техники и испытательного оборудования. Свойства золы,

процессы твердения вяжущих веществ исследованы с использованием современных методов: лазерной гранулометрии (лазерный анализатор размеров частиц Analyzette 22 compact), рентгенофазового (дифрактометры ARL X'tra, ДРОН 4-07), электронно-микроскопического (растровый электронный микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU с встроенным энергодисперсионным спектрометром) и химического (рентгенофлуоресцентный спектрометр ARLOptim'X) анализов. Оптимизация состава комплексного модификатора выполнена с использованием математических моделей. Для обработки и анализа результатов экспериментов применены методы математической статистики.

Электростатическая сепарация золы осуществлена с помощью камерного электростатического сепаратора свободного падения (рисунок 1). Частицы золы, контактируя с поверхностью медного питателя, приобретают поверхностный заряд, в частности, зерна углерода заряжаются положительно, золы – отрицательно.

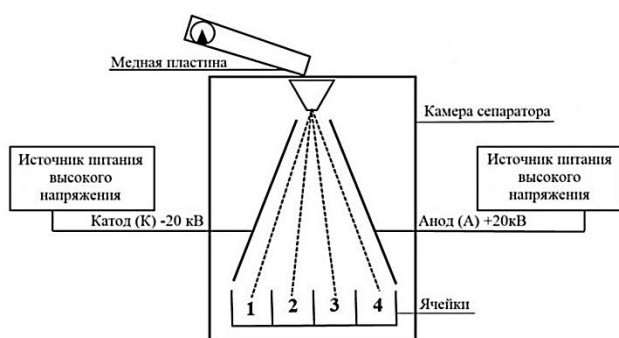


Рисунок 1 – Схема экспериментального электростатического камерного сепаратора

Заряженные частицы попадают в камеру сепаратора, оборудованную двумя пластинчатыми электродами из меди. Под действием постоянного электрического поля, создаваемого источником высокого напряжения, заряженные частицы отклоняются к электродам в соответствии с их полярностью и попадают в ячейки бункера сепаратора. Напряжённость электрического поля варьировалась в пределах от минус 2 кВ/см до плюс 2 кВ/см.

В **третьем разделе** представлены результаты исследования свойств обогащенной золы ТЭС, а также ее влияния в сочетании с химическими модификаторами на твердение и свойства цементно-зольного вяжущего.

Установлена достаточно высокая эффективность способа трибоэлектростатической сепарации золы гидроудаления ТЭС для снижения содержания несгоревшего углерода и улучшения гранулометрического состава материала, используемого в качестве пуццолановой добавки для бетона. Так, после электрической сепарации количество материала, отвечающего требованиям к пуццолановым добавкам бетона, составляет 82,7 %, среднее содержание ППП – не превышает 3 %, гранулометрический состав улучшен за счет повышения содержания дисперсных частиц размером менее 2 мкм.

Анализ структурных особенностей с применением растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией позволил оценить эффективность электростатического сепарирования золы в части выделения из пробы золы частиц несгоревшего углерода.

При проведении эксперимента использованы две пробы золы – исходная зола гидроудаления, выделенная из золошлаковой смеси после высушивания до постоянной массы, и обогащенная зола, полученная обработкой исходной золы в высоковольтном электросепараторе.

На микрофотографиях исходной (необработанной) золы гидроудаления четко фиксируются темные крупные частицы (агрегаты) углерода размером от 10 до 200 мкм (рисунок 2 а). В отличие от сферических, с гладким рельефом алюмосиликатных частиц, углеродные включения имеют пористую структуру и неправильную форму зерен. С другой стороны, проба золы гидроудаления, подвергнутая обогащению электростатической сепарацией (рисунок 2 б), показывает достаточно высокую однородность как в части распределения частиц по размеру, так и химическому составу – алюмосиликатные сфероиды размером преимущественно в диапазоне от 1 до 20 мкм с небольшим присутствием ферромагнитного вещества (оксиды железа), агломерированные кластеры не наблюдаются. Потери при прокаливании практически отсутствуют – 1,38 %. Кроме того, если для исходной золы сумма оксидов ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) составляет 76,06 %, то после обогащения их суммарное содержание увеличилось до 86,10 %, что должно положительно отразиться на повышении пуццоланической активности минеральной добавки.

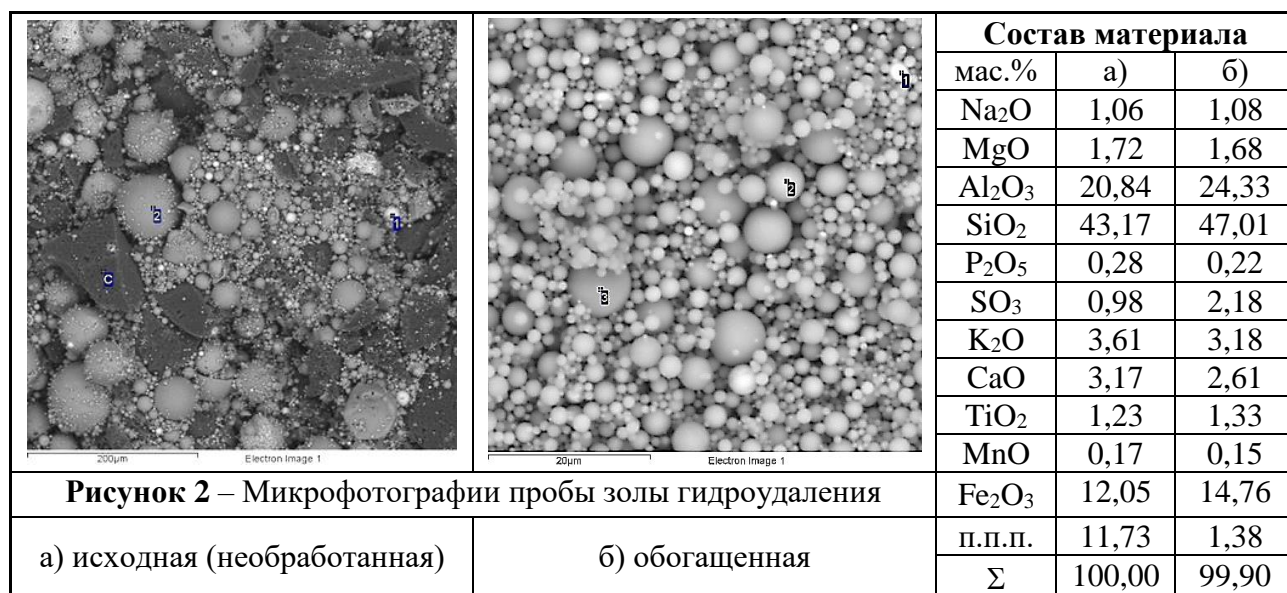


Рисунок 2 – Микрофотографии пробы золы гидроудаления

а) исходная (необработанная)

б) обогащенная

На СЭМ-изображениях во вторичных электронах (SE) цементный камень с добавкой обогащенной золы представлен плотной, достаточно однородной микроструктурой, состоящей из продуктов гидратации – гидросиликатов кальция, портландита и призматических игл этtringита, а также непрореагировавших частиц золы (рисунок 3 а). При этом частицы золы иммобилизованы в образовавшиеся фазы продуктов гидратации, что указывает на то, что произошло эффективное заполнение пустот. С другой

стороны, микроструктура цементного камня с добавкой необработанной золы менее плотная, включает более крупные непрореагировавшие зерна золы, которые имеют менее выраженный адгезионный контакт с цементной матрицей (рисунок 3 б).

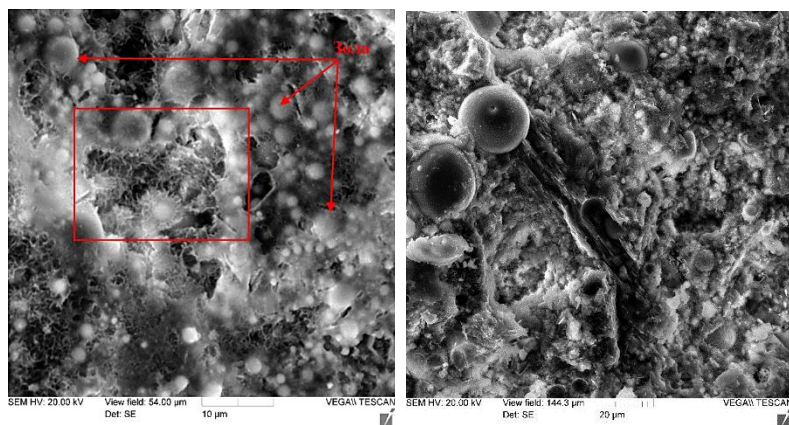


Рисунок 3 – Микрофотографии цементного камня с добавкой золы гидроудаления:

а) – обогащенная, б) – необработанная

Оценку влияния вяжущих материалов на воздухововлекающую способность добавки Sika® Aer Pro-100 производили по показателю «индекс пены» – минимальному количеству разбавленной ВВД, необходимого для получения устойчивой пены (пузырьки присутствуют по всей поверхности цементного теста) в течение 45 секунд (I. Kulaots, A. Hsu, R. H. Hurt, E. M. Suuberg).

Установлено, что не высокое содержание золы, а большое количество несгоревшего углерода (ППП) оказывает значительное влияние на требуемую дозировку воздухововлекающей добавки для получения устойчивой пены. Так, при применении в составе цементного теста золы с высоким показателем PPP = 22 % резко сокращается длительность устойчивого состояния пены на поверхности теста, а расход разбавленной воздухововлекающей добавки для получения стабильной пены повышается в 8,1 раза в сравнении с применяемой обогащенной золой (ППП = 2,2 %).

Установлено, что дзета-потенциал частиц золы отрицательный – в пределах от минус 13,12 до минус 22,29 мВ. Данный фактор может оказывать положительное влияние на реологические свойства цементно-зольного теста с высоким процентом замещения портландцемента золой, когда интегральный электрокинетический потенциал частиц в дисперсной системе будет отрицательный, и в системе, соответственно, будут преобладать кулоновские силы отталкивания, препятствующие образованию агрегатов из частиц (флоккул).

Для цементно-зольного теста, содержащего обогащенную золу, отмечается более выраженный пластифицирующий эффект при увеличении содержания минеральной добавки. При содержании золы в количестве 45 % эффект повышения подвижности в сравнении с контрольным составом (без химических добавок) составляет соответственно 54 % (добавка «АРТ-КОНКРИТ Р») и 74,2 % (Sika Visco Crete 5-600 N PL). Это связано как с улучшением гранулометрического состава обогащенной золы, так и снижением содержания высокопористых угловатых частиц несгоревшего углерода.

Данный пластифицирующий эффект оказывает положительное влияние на формирование структуры и прочность цементного камня. Исследования проведены для образцов цементно-золяного теста, содержащих в своем составе 15 и 45 % золы взамен части портландцемента: исходной – ЗН (необработанная), а также отобранной после процесса электросепарации с зоны электрода-анода (ЗА) и электрода-катода (ЗК). Показатели прочности соотносили к прочности цементного теста контрольного состава (К) – без золы. Расход воды (водовязущее отношение) подбирался из условия получения теста вязущего нормальной густоты – НГ = 25 % (таблица 1). Установлено, что цементный камень, содержащий 15 % обогащённой золы взамен портландцемента, в возрасте 28 суток твердения имеет показатель прочности при сжатии на 6,7 % выше в сравнении с контрольным образцом (рисунок 4). Когда уровень замещения составляет 45 %, прочность при сжатии также достаточно высока – 85,2 %. Это, прежде всего, связано с тем, что цементно-золяное тесто, содержащее обогащенную золу в количестве 45 %, имеет нормальную густоту В/В = 0,20, в то время как при таком же содержании исходной (необработанной) золы показатель нормальной густоты выше в 1,6 раза (В/В = 0,32).

Таблица 1 – Прочность при сжатии камня вязущего

Обозначение состава	В/В	З, %	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут.		
			3	7	28
1 К	0,25	0	26,6	51,9	66,7
2 ЗА-15	0,24	15	23,3	53,9	71,2
3 ЗА-45	0,20	45	17,7	35,8	56,8
4 ЗК-15	0,26	15	19,2	41,6	52,1
5 ЗК-45	0,28	45	15,5	31,3	41,9
6 ЗН-15	0,29	15	17,2	34,4	44,8
7 ЗН-45	0,32	45	12,2	26,7	39,7

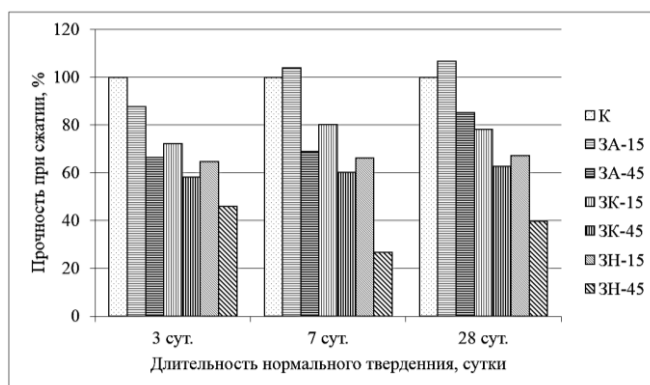


Рисунок 4 – Относительное изменение прочности при сжатии камня вязущего в зависимости от длительности твердения, количества и качества золы в составе вязущего

Рентгенофазовый анализ образцов камня вязущего выполнен для образцов составов, приведенных в таблице 1, твердевших 28 суток в нормальных условиях. Установлено (рисунок 5), что зола оказывает влияние на гидратацию трёхкальциевого силиката (алит) и состав формирующихся продуктов гидратации. Так, относительная интенсивность линий алита (в сравнении с контрольным образцом) цементного камня с 15 %-ной заменой золой: 2-ЗА-15 (обогащенная, с анода), 4-ЗК-15 (обогащенная, с катода) и 6-ЗН-15 (необработанная) составляет соответственно: $d = 0,278$ нм ($2\theta = 32,17^\circ$) – 85,6; 93,4 и 87,9 %; $d = 0,177$ нм ($2\theta = 51,59^\circ$) – 84,4; 94,3 и 88,1 %; $d = 0,164$ нм ($2\theta = 56,00^\circ$) – 91,3; 102,2 и 113,9 %.

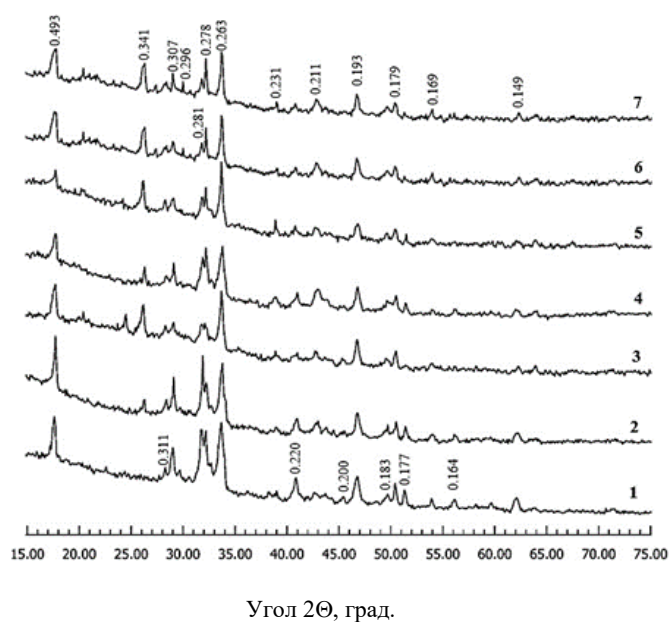


Рисунок 5 – Рентгенограммы образцов камня вяжущего с добавкой золы (составы 1-7)

а также слабозакристаллизованной фазы гидросиликатов кальция (CSH(B) и C_2SH_2): $d = 0,307$ нм ($2\theta = 29,06^\circ$); $d = 0,281$ нм ($2\theta = 31,82^\circ$); $d = 0,183$ нм ($2\theta = 49,79^\circ$); $d = 0,220$ нм ($2\theta = 40,99^\circ$); $d = 0,211$ нм ($2\theta = 42,90^\circ$); $d = 0,200$ нм ($2\theta = 45,31^\circ$).

Результаты показывают, что обогащенная зола, отобранная с зоны анодной пластины сепаратора (ЗА), является более реакционноспособной в сравнении с образцами обогащенной золы, отобранной с зоны катодной пластины, а также необработанной золой. Эти данные согласуются с результатами определения прочности камня вяжущего в возрасте 28 суток твердения (таблица 1).

По результатам факторного эксперимента (ПФЭ 2^k) установлено влияние компонентов органо-минерального модификатора на гидратацию и развитие прочности камня вяжущего (Y_1 – прочность камня вяжущего в раннем возрасте твердения R_3 , МПа; Y_2 – то же, в проектном возрасте твердения R_{28} , МПа). Установлено, что при увеличении содержания обогащенной золы ТЭС (фактор X_1) прочность камня вяжущего как в раннем, так и проектном возрасте имеет тенденцию к снижению. Напротив, при увеличении содержания добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» (фактор X_2), прочность камня вяжущего повышается – с одной стороны, суперпластификатор оказывает водоредуцирующий эффект, с другой, присутствие в составе модификатора углеродного наноматериала, выполняющего функцию центров кристаллизации новообразований вяжущего, способствует формированию упрочнённой армированной микроструктуры цементного камня. Положительное влияние на прочность камня вяжущего воздухововлекающей

Аналогичная тенденция сохраняется для цементного камня, содержащего 45 % золы: 3-ЗА-45; 5-ЗК-45 и 7-ЗН-45, соответственно: $d = 0,278$ нм ($2\theta = 32,17^\circ$) – 81,8; 90,7 и 93,1 %; $d = 0,177$ нм ($2\theta = 51,59^\circ$) – 96,3; 106,7 и 96,2 %; $d = 0,164$ нм ($2\theta = 56,00^\circ$) – 107,3; 113,8 и 120,4 %.

Можно также наблюдать изменение относительной интенсивности дифракционных пиков продуктов гидратации вяжущего: портландита (СН): $d = 0,493$ нм ($2\theta = 17,98^\circ$); $d = 0,311$ нм ($2\theta = 28,66^\circ$); $d = 0,263$ нм ($2\theta = 34,05^\circ$),

добавки Sika®Aer Pro-100 (фактор X_3), в исследуемом интервале варьирования, вероятно, связано с проявлением синергетического взаимодействия с пластификатором в части усиления водоредуцирующего эффекта.

$$Y_1 = 27,68 - 1,43x_1 + 7,15x_2 + 1,78x_3 + 0,6x_1x_2 - 0,2x_2x_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 49,95 - 3x_1 + 8x_2 + 2,15x_3 - 3,55x_1x_2 - 0,25x_2x_3 - 0,6x_1x_2x_3 \quad (2)$$

По изменению относительной величины дифракционных отражений минерала алита образцов камня вяжущего, содержащего комплексную органо-минеральную добавку, относительно контрольного состава (100 % портландцемент) отмечается активизация процессов гидратации, что объясняет прирост прочности составов с оптимальным содержанием модификатора.

В четвёртом разделе выполнена оптимизация состава комплексного органо-минерального модификатора, исследованы свойства модифицированных бетонных смесей и бетонов; разработаны рекомендации по ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС, выполнена оценка технико-экономической эффективности результатов исследования.

Оптимизация состава комплексного органо-минерального модификатора выполнена с использованием полного трехфакторного эксперимента с уровнями варьирования -1, 0, +1. Прочность бетонной смеси в проектном возрасте (ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности») по показателю прочности бетона на сжатие R_{28} , МПа (не менее 40), и удобоукладываемость бетонной смеси по расплыву конуса (ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия») на встряхивающем столе $d_{расп.}$, мм (не менее 35 и не более 41), – служили параметрами оптимизации.

Анализ уравнений регрессии (3, 4) показывает, что увеличение содержания в бетонной смеси золы (фактор X_1) ведет к повышению ее удобоукладываемости. Это связано с уменьшением внутреннего трения зерен в бетонной смеси при добавлении обогащенной золы, состоящей преимущественно из сферических частиц с гладкой остеклованной фактурой поверхности и сниженным содержанием шероховатых и пористых несгоревших угольных частиц. Кроме того, при введении золы взамен части портландцемента объем теста вяжущего в бетонной смеси увеличивается, что при прочих равных условиях, приводит к повышению удобоукладываемости бетонной смеси.

$$Y_1 = 33,3 + 2,63 \cdot X_1 + 1,88 \cdot X_2 + 1,38 \cdot X_3 \quad (3)$$

$$Y_2 = 45,75 - 2,08 \cdot X_1 - 3,20 \cdot X_3 + 3,34 \cdot X_1 \cdot X_2 - 4,59 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4)$$

Поликарбоксилатный суперпластификатор в составе модификатора «АРТ-КОНКРИТ Р» (фактор X_2) также оказывает положительное влияние на повышение удобоукладываемости бетонной смеси, в то время как воздухововлекающая добавка Sika®

Aer Pro-100 (фактор X_3) оказывает незначительное пластифицирующее действие. Совместное влияние факторов (X_1 , X_2 , X_3) на удобоукладываемость бетонной смеси не существенно – коэффициенты являются не значимыми.

С другой стороны, на показатель прочности бетона факторы X_1 и X_3 оказывают отрицательное влияние. Можно предполагать, что эффект связан с тем, что темпы роста прочности в ранние сроки твердения снижаются с увеличением процента замещения портландцемента золой. В то же время известно, что в более поздние периоды твердения (90-360 сут.) бетон с умеренным количеством золы может достичь той же или даже более высокой прочности, чем бетон без золы.

Отрицательное влияние фактора X_3 связано, с тем, что с увеличением расхода воздухововлекающей добавки повышается пористость бетона, что может привести к снижению его прочности. Компенсировать некоторое снижение прочности бетона возможно за счет слабого водоредуцирующего эффекта воздухововлекающей добавки. Положительное взаимодействие факторов X_1 и X_2 можно объяснить совместным пластифицирующим эффектом на бетонную смесь, что ограничивает расход воды затворения, с одной стороны, а также влиянием углеродных наночастиц на процесс гидратации цемента – с другой. Отрицательное взаимодействие факторов X_2 и X_3 , вероятно, связано с повышением воздухововлечения в бетонную смесь при увеличении содержания химических добавок.

Области оптимальных составов комплексного модификатора (обогащенная зола ТЭС, модификатор «АРТ-КОНКРИТ Р» и воздухововлекающая добавка Sika®Aer Pro-100), обеспечивающего получение бетонных смесей с показателем удобоукладываемости по расплыву конуса на встряхивающем столе не менее 35 и не более 41 см (марка по расплыву конуса Р2 согласно ГОСТ 7473-2010) и бетона с пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа, приведены на рисунке 6.

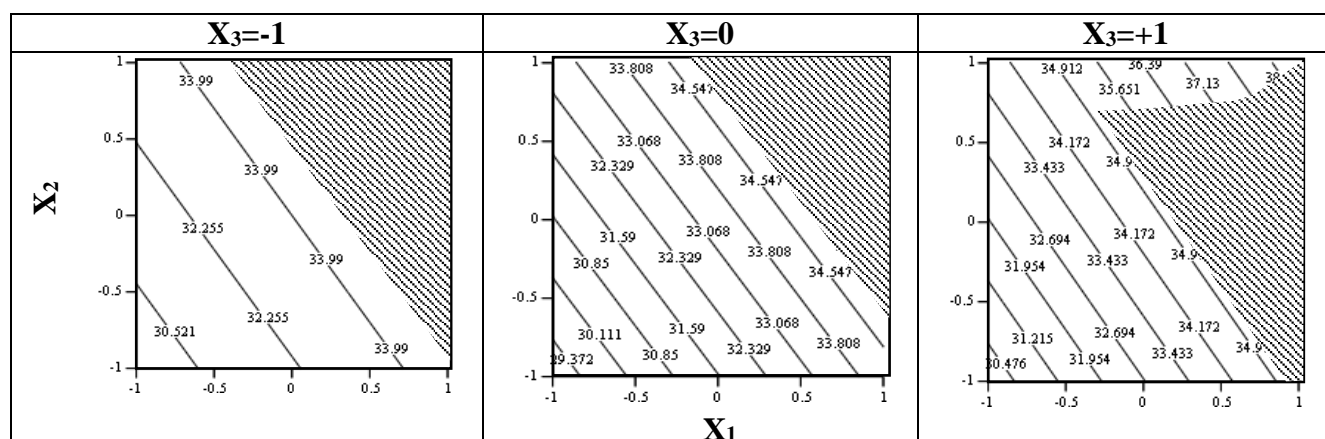


Рисунок 6 – Области оптимальных составов комплексного модификатора

Объем вовлеченного воздуха уплотненных бетонных смесей определен с помощью поромера КП-133 с объемом чаши для смеси 4000 см³ по ГОСТ 10181-2014. Установлено (рисунок 7), что с ростом процента замещения портландцемента исходной золой гидроудаления (необработанной), содержащей несгоревший углерод в количестве ППП = 7 %, снижается содержание вовлеченного воздуха в бетонную смесь, кроме того, наблюдается ухудшение ее удобоукладываемости. С другой стороны, зола, обогащенная в электростатическом сепараторе, с показателем ППП = 2,4 % обеспечивает повышение воздухововлечения в бетонную смесь с увеличением процента замещения портландцемента до 45 %.

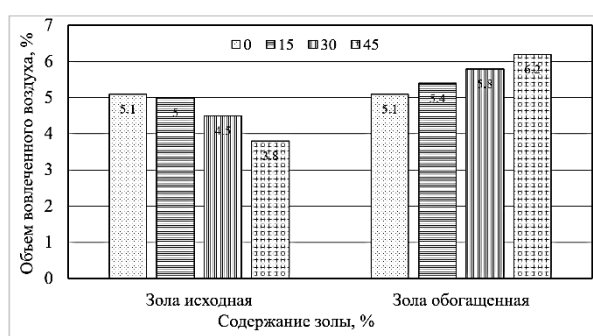


Рисунок 7 – Зависимость объема вовлечённого воздуха от процента замещения портландцемента золой ТЭС

Положительное влияние содержания обогащенной золы ТЭС взамен части портландцемента в составе бетона на получение требуемого объема вовлеченного воздуха дает предпосылки для обеспечения его высокой морозостойкости. Исследованы два состава бетона: контрольный – с высоким содержанием портландцемента и достаточно низким водоцементным отношением, и модифицированный – с обогащенной золой в количестве 50 % взамен портландцемента и воздухововлекающей добавкой (таблица 2).

в количестве 50 % взамен портландцемента и воздухововлекающей добавкой (таблица 2).

Таблица 2 – Состав бетонных смесей для определения морозостойкости

№	Расход компонентов, кг/м ³						В/Ц (В/В)
	цемент	зола	песок	щебень (фр.5-10 мм)	СП (л)	ВВД (л)	
1	600	0	648	1000	6,0	0	0,32(0,32)
2	300	300	512	945	5,1	3,0	0,64(0,32)

Результаты исследований показывают, что морозостойкость модифицированного бетона (обогащенная зола в количестве 50 % взамен портландцемента; модификатор «АРТ-КОНКРИТ Р»; воздухововлекающая добавка Sika®Aer Pro-100) выше, чем у бетона контрольного состава: образцы модифицированного бетона выдержали 100 циклов испытаний по второму базовому методу, что соответствует марке бетона по морозостойкости F₂100. Для образцов бетона контрольного состава данное соотношение не выполняется.

Установлено, что коэффициент коррозионной стойкости образцов модифицированного бетона после выдерживания в течение 126 суток в 0,1 н растворе HCl и 5 %-

ном растворе NaCl равен, соответственно $K_c^{\text{HCl}} = 0,90$ и $K_c^{\text{NaCl}} = 0,95$ (условие $K_c \geq 0,8$ – выполняется), в то время как для образцов бетона контрольного состава – $K_c^{\text{HCl}} = 0,74$ и $K_c^{\text{NaCl}} = 0,87$.

Бетоны с высоким содержанием золы имеют большие перспективы использования, что обусловлено, в первую очередь, доступностью сырьевой базы, которая имеется во многих регионах России. Так, в настоящее время на территории Донецкой Народной Республики расположены четыре тепловые электростанции: Зуевская, Старобешевская, Углегорская и Мироновская.

По результатам исследования разработаны «Рекомендации по ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС», в которых приведены требования к золе, исходным компонентам тяжелого цементного бетона; даны ссылки на ГОСТы на бетонные смеси и бетон, а также все составляющие бетон материалы; приведены рекомендации по хранению и транспортированию золошлаковых отходов на заводы-потребители; описана функциональная технологическая схема производства бетонной смеси с обогащенной золой ТЭС. Выполнена опытно-производственная апробация предлагаемой технологии: раствором-бетонным заводом ООО «Донспецпром» изготовлена опытная партия товарной бетонной смеси, отвечающая требованиям нормативной документации. Для оценки технико-экономической эффективности производства товарного бетона с обогащенной золой ТЭС произведен расчет себестоимости готовой продукции (бетонная смесь) и выполнен сравнительный анализ затрат на производство. Показано, что себестоимость производства 1 м^3 товарного бетона, в котором в составе вяжущего вещества часть портландцемента заменяется обогащенной золой ТЭС, на 1277 руб. дешевле, чем аналогичный состав бетона без применения обогащенной золы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность получения тяжелых цементных бетонов с повышенным содержанием до 45 % отвалной золы ТЭС взамен части портландцемента, характеризующихся нормальными темпами набора прочности и физико-механическими свойствами, сопоставимыми с составами бетонов без минеральной добавки, за счет применения технологии обогащения золы электростатической сепарацией в сочетании с комплексным модифицированием химическими добавками – поликарбоксилатным суперпластификатором с наноструктурированным углеродом и воздухововлекающей добавкой.

2. Установлена высокая эффективность способа трибоэлектростатической сепарации отвалной золы ТЭС для снижения содержания несгоревшего углерода и улуч-

шения гранулометрического состава материала, используемого в качестве пуццолановой добавки для бетона. После электросепарации количество материала, отвечающего требованиям к пуццолановым добавкам бетона, составляет 82,7 %, среднее содержание ППП – не превышает 3 %, гранулометрический состав улучшен за счет повышения содержания дисперсных частиц размером менее 2 мкм.

3. Определено влияние золы ТЭС на эффективность воздухововлекающей добавки Sika® Aer Pro-100. Показано, что при применении в составе цементного теста золы с высоким содержанием несгоревшего углерода (ППП = 22 %) резко сокращается длительность устойчивого состояния пены на поверхности теста, а расход разбавленной воздухововлекающей добавки для получения стабильной пены повышается в 8,1 раза в сравнении с применяемой обогащенной золой (ППП = 2,2 %).

4. Установлено, что для цементно-золяного теста, содержащего обогащенную золу, отмечается более выраженный пластифицирующий эффект суперпластификаторов при увеличении содержания минеральной добавки. При содержании золы в количестве 45 % эффект повышения подвижности в сравнении с контрольным составом (без химических добавок) составляет соответственно 54 % (добавка «АРТ-КОНКРИТ Р») и 74,2 % (Sika Visco Crete 5-600 N PL). Это связано как с улучшением гранулометрического состава обогащенной золы, так и снижением содержания высокопористых угловатых частиц несгоревшего углерода.

5. Установлено, что цементный камень, содержащий 15 % обогащённой золы взамен портландцемента, в возрасте 28 суток твердения имеет показатель прочности при сжатии на 6,7 % выше в сравнении с контрольным образцом. Когда уровень замещения составляет 45 %, прочность при сжатии также достаточно высока – 85,2 %. Это связано с тем, что цементно-золяное тесто, содержащее обогащенную золу в количестве 45 %, имеет нормальную плотность В/В = 0,20, в то время как при таком же содержании исходной (необработанной) золы показатель нормальной плотности выше в 1,6 раза (В/В = 0,32).

6. Определены области оптимальных составов комплексного модификатора (обогащенная зола ТЭС, модификатор «АРТ-КОНКРИТ Р» и воздухововлекающая добавка Sika® Aer Pro-100), обеспечивающего получение бетонных смесей с показателем удобоукладываемости по расплыву конуса на встряхивающем столе не менее 35 и не более 41 см (марка по расплыву конуса Р2 согласно ГОСТ 7473-2010) и бетона с пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа.

7. Установлено, что морозостойкость модифицированного бетона (обогащенная зола в количестве 50 % взамен портландцемента; модификатор «АРТ-КОНКРИТ Р»;

воздухововлекающая добавка Sika® Aer Pro-100) выше, чем у бетона контрольного состава: образцы модифицированного бетона выдержали 100 циклов испытаний по второму базовому методу, что соответствует марке бетона по морозостойкости F₂100. Для образцов бетона контрольного состава данное соотношение не выполняется. Коэффициент коррозионной стойкости образцов модифицированного бетона после выдерживания в течение 126 суток в 0,1 н растворе HCl и 5 %-ном растворе NaCl равен, соответственно $K_c^{HCl} = 0,90$ и $K_c^{NaCl} = 0,95$ (условие $K_c \geq 0,8$ – выполняется), в то время как для образцов бетона контрольного состава – $K_c^{HCl} = 0,74$ и $K_c^{NaCl} = 0,87$.

8. Разработаны «Рекомендации по ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС», выполнена опытно-производственная апробация предлагаемой технологии: растворно-бетонным заводом ООО «Донспецпром» изготовлена опытная партия товарной бетонной смеси, отвечающая требованиям нормативной документации. Для оценки технико-экономической эффективности произведен расчет себестоимости готовой продукции и выполнен сравнительный анализ затрат на производство: себестоимость производства 1 м³ товарного бетона, в котором в составе вяжущего вещества часть портландцемента заменяется обогащенной золой ТЭС, на 1277 руб. дешевле, чем аналогичный состав бетона без применения обогащенной золы.

Перспективы и рекомендации дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в совершенствовании технологических режимов и параметров электростатической сепарации с целью повышения эффективности обогащения отвальной золы; исследовании влияния новых видов химических модификаторов на твердение и свойства бетона; исследовании режимов гидротермальной обработки свежееотформованных изделий для возможности применения ресурсосберегающей технологии бетона с обогащенной золой ТЭС при производстве сборных железобетонных изделий и конструкций.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

– публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Петрик, И. Ю. Высокофункциональные бетоны с обогащенной электрической сепарацией золой-уносом ТЭС / И. Ю. Петрик, Н. М. Зайченко, А. И. Сердюк // Вестник ДОННАСА : сб. науч. тр. – Макеевка : ДОННАСА, 2016. – Вып. 2016-1 (117). – С. 32-39. – Режим доступа : [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2016/vestnik_2016_1\(117\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2016/vestnik_2016_1(117).pdf)

2. Губарь, В. Н. Способы повышения качества золы-унос ТЭС, применяемой в высококачественных бетонах / В. Н. Губарь, **И. Ю. Петрик**, А. В. Жибоедов // Вестник ДОННАСА : сб. науч. тр. – Макеевка : ДОННАСА, 2016. – Вып. 2016-3 (119). – С. 63-70. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2016/vestnik_2016_3\(119\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2016/vestnik_2016_3(119).pdf)

3. Петрик, И. Ю. Влияние электростатической сепарации на дисперсность золы-уноса ТЭС / **И. Ю. Петрик**, Е. С. Христинич, В. Н. Губарь, С. В. Корниенко // Вестник ДОННАСА : сб. науч. тр. – Макеевка : ДОННАСА, 2018. – Вып. 2018-4 (132). – Т 2. – С. 203-208. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-4\(132\)_tom_2.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-4(132)_tom_2.pdf)

4. Зайченко, Н. М. Модифицирование электроповерхностных свойств дисперсных компонентов в технологии композиционных строительных материалов / Н. М. Зайченко, А. К. Халюшев, В. В. Нефедов, **И. Ю. Петрик** // Строитель Донбасса : научно-практический журнал. – Макеевка. – 2022. – № 3(20). – С. 37-43. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/sd/2022/sd_2022-3\(20\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/sd/2022/sd_2022-3(20).pdf)

Публикации в зарубежных журналах, индексируемых международной базой цитирования Web of Science:

1. Zaichenko N. Beneficiated ponded fly ash for concretes with high volume mineral additions / N. Zaichenko, **I. Petrik**, L. Zaichenko // MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 315. – 10 p. – DOI: 10.1051 / mateconf / 202031507006.

Публикации по материалам конференций:

1. **Петрик, И. Ю.** Влияние дисперсности золы-унос ТЭС на пуццолановую активность / И. Ю. Петрик // Образование, наука, производство (Белгород, 20-22 октября 2015 г.). – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2015. – С. 754-758. – Режим доступа : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25571528_21197488.pdf

2. Петрик, И. Ю. Высококачественные бетоны, отвечающие принципам устойчивого развития в области строительства / **И. Ю. Петрик**, С. В. Лахтарина, Н. М. Зайченко // Комплексное использование природных ресурсов : сб. науч. тр. региональной конф. (Донецк, 10 декабря 2015 г.). – Донецк : ДонНТУ, 2015. – С. 104-106. – Режим доступа: http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/32580/1/Сборник_7%20региональная%20конференция.pdf

3. Зайченко, Н. М. Высококачественные бетоны для устойчивого развития с повышенным содержанием золы-унос ТЭС / Н. М. Зайченко, **И. Ю. Петрик** // Строительство и архитектура – 2015 : мат-лы межд. научно-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 26-27 ноября 2015 г.). – Т. 2. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2015. – С. 469-471. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24875642_55783822.pdf

4. Зайченко, Н. М. Влияние содержания золы-уноса ТЭС на прочность цементного камня / Н. М. Зайченко, **И. Ю. Петрик** // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат-ов межд. научной конф. (Москва, 16-17 ноября 2016 г.). – М. : Изд-во МГСУ, 2017. – С. 609-614. – Режим доступа: https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2017/integr_pt2.pdf

5. **Петрик, И. Ю.** Влияние качества золы-уноса ТЭС на ее воздухововлекающую способность / И. Ю. Петрик // Научно-технические достижения студентов строительной архитектурной отрасли : сб. тезисов докл. по мат-лам конф. (Макеевка, 17 апреля 2020 г.) – Макеевка : ДОННАСА, 2020. – С. 131-132. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/studconf/2020/stud_konf_tezis_2020.pdf

6. **Петрик, И. Ю.** Морозостойкость бетона с высоким содержанием золы-уноса ТЭС / И. Ю. Петрик // Научно-технические достижения студентов строительной архитектурной отрасли : сб. тезисов докл. по мат-лам конф. (Макеевка, 22-24 апреля 2021 г.) – Макеевка : ДОННАСА, 2021. – С. 93 – Режим доступа : http://donnasa.ru/publish_house/journals/studconf/2021/stud_konf_tezis_2021.pdf

7. Петрик, И. Ю. Ресурсосберегающая технология бетона с обогащенной золой ТЭС / **И. Ю. Петрик**, Н. М. Зайченко, В. Н. Губарь // Строительное материаловедение: настоящее и будущее : сб. мат-лов III Всероссийской научной конф., посвящённой девяностолетию кафедры строительного материаловедения (Москва, 15-16 ноября 2023 г.). – М. : Изд-во МИСИ-МГСУ, 2023. – С. 226-230. – Режим доступа : https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2023/Sbornik_Stroy-material__2023.pdf