

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи

Фомина Ирина Викторовна

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕЗОБЖИГОВОГО
ЗОЛЬНОГО ГРАВИЯ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ**

2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение в строительстве» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Капустин Федор Леонидович

Официальные оппоненты: **Гаркави Михаил Саулович**, доктор технических наук, профессор, Закрытое акционерное общество «Урал-Омега», г. Магнитогорск, заместитель главного инженера по науке и инновациям;

Овчаренко Геннадий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, заведующий кафедрой «Строительные материалы и автомобильные дороги»;

Черных Тамара Николаевна,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия».

Защита состоится «23» декабря 2025 г. в 14-00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.02.07 по адресу: 620062, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого Совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=7829>

Автореферат разослан «___» ____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семенищев Владимир Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современном строительстве одним из самых востребованных строительных материалов является конструкционный цементный бетон. Важнейшим его компонентом, занимающим наибольший объем в составе и во многом определяющим строительно-технические свойства и назначение бетона, является крупный заполнитель. Производство заполнителей требуемых видов и качества основывается на технологиях переработки как природного, так и техногенного сырья. Многие регионы России не обеспечены природными каменными материалами в необходимом количестве, а в других их запасы исчерпаны. Доставка щебня и гравия до потребителей связана со значительными затратами.

Альтернативным предложением может быть применение искусственных заполнителей (керамзита, шлакового щебня, аглопоритового, безобжиговых шлакового или зольного гравия и др.), характеризующихся низкой плотностью и достаточно высокой прочностью и морозостойкостью. Техногенным сырьем для их производства могут быть золошлаковые отходы теплоэнергетики, например, зола-уноса Рефтинской ГРЭС, расположенной на территории Свердловской области и являющейся крупнейшей в России. На Рефтинской ГРЭС при сжигании каменного угля Экибастузского бассейна образуется до 5 млн т золошлаковых отходов, уровень утилизации которых не превышает 10 %. Отечественный многолетний опыт, как и зарубежный, показывает, что в производстве портландцемента можно применять до 35 % золы, керамического и силикатного кирпича – до 60 %, искусственных пористых заполнителей – до 90-100 % золошлаковых отходов.

Одним из наиболее перспективных способов повышения прочности безобжиговых пористых заполнителей, например, безобжигового зольного гравия, является модифицирование золоцементного камня химическими и минеральными добавками, ускоряющими гидратацию цемента и формирующими более плотную структуру заполнителя. В качестве минеральных добавок целесообразно использовать техногенные отходы, например, отсевы дробления плотных горных пород или металлургические шлаки. Однако процессы структурообразования и упрочнения золоцементного камня в присутствии данных добавок изучены недостаточно, а совместное применение золы-уноса и указанных выше отходов в производстве заполнителя для бетонов является актуальным. Максимальное вовлечение данных минеральных отходов в производство строительных материалов позволит также снизить экологическую нагрузку в регионе.

С учетом современных требований к энергоэффективности зданий и сооружений целесообразно использовать при их строительстве несущие конструкции из легких и облегченных бетонов с применением пористых заполнителей, обладающих высокой прочностью и долговечностью. В связи с этим актуальным является научно-техническое обоснование получения высокопрочного безобжигового зольного гравия на основе малоцементных зольных композиций, модифицированных химическими и минеральными добавками.

Степень разработанности темы

Изучению состава и свойств золошлаковых отходов теплоэнергетики, разработке технологий производства из них и применения безобжигового зольного гравия в составе легких строительных бетонов разного назначения посвящены исследования российских ученых Ю. М. Баженовой, А. В. Волженского, К. В. Гладких, И. Ю. Даниловича, С. В. Иванова, В. И. Мичкаревой, А. М. Юдиной, В. М. Уфимцева и др. Предлагаемые ими технологии получения безобжигового зольного гравия характеризуются многокомпонентным составом смеси и большим количеством технологических операций, а получаемый гравий имеет низкую прочность и морозостойкость, что ограничивает его применение в конструкционных бетонах. В то же время известные способы увеличения прочности безобжигового зольного гравия имеют ряд особенностей, например, тонкий помол повышает не только активность, но и водопотребность золы, а длительная сушка или пропаривание способствуют росту расхода электроэнергии и тепла на производство заполнителя. Разработанные ранее технологии производства безобжигового зольного гравия успешно апробированы на некоторых предприятиях, но не получили широкого применения и дальнейшего развития, в том числе по причине низкого его качества. В России отсутствуют предприятия по производству безобжигового зольного гравия из золошлаковых отходов тепловых электростанций.

Объект исследования – состав и технология получения высокопрочного безобжигового зольного гравия из золы-уноса, образующейся при сжигании каменного угля на Рефтинской ГРЭС.

Предмет исследования – физико-химические закономерности формирования структуры и свойств золоцементного камня модифицированием химическими и минеральными добавками, обеспечивающими получение на его основе высокопрочного безобжигового зольного гравия.

Цель работы – разработать состав и технологию производства высокопрочного безобжигового зольного гравия из золы-уноса Рефтинской ГРЭС, пригодного для использования в конструкционных бетонах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить состав и свойства золы-уноса Рефтинской ГРЭС;
- исследовать влияние химических и минеральных добавок на прочность золоцементного камня;
- разработать состав смеси для получения высокопрочного безобжигового зольного гравия, изучить его структуру и физико-механические свойства;
- подобрать составы и определить свойства конструкционных легких бетонов на основе высокопрочного безобжигового зольного гравия;
- разработать технологическую схему и опытно-промышленный технологический регламент его производства.

Методология и методы исследования

Для исследования свойств сырьевых материалов, цементного и золоцементного камня, безобжигового зольного гравия, бетонов применяли стандартные методы физико-механических испытаний на лабораторном оборудовании с

последующей математической обработкой результатов с заданной достоверностью. Минеральный состав материалов и продуктов твердения золоцементного камня определяли рентгенофазовым и дифференциально-термическим методами анализа, ИК-спектроскопией, структуру безобжигового зольного гравия исследовали технической петрографией, гранулометрический состав сырьевых материалов – на дифракционном лазерном анализаторе. Расчет оптимальной гранулометрии сырьевой смеси для получения высокопрочного безобжигового зольного гравия выполняли с помощью программы проектирования зерновых составов смесей строительных композитов *Granumetric v.5.0*.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

- закономерности формирования фазового состава и физико-механических свойств золоцементного камня, модифицированного химическими и минеральными добавками;
- результаты экспериментальных исследований влияния вида и дисперсности минеральной добавки на гранулометрический состав смеси и прочность золоцементного камня;
- состав, особенности структуры и свойства высокопрочного безобжигового зольного гравия из золы-уноса Рефтинской ГРЭС;
- разработанные рекомендации по совершенствованию технологии и опытно-промышленный технологический регламент его производства;
- составы и свойства цементных бетонов на высокопрочном безобжиговом зольном гравии.

Научная новизна

1. Предложен механизм повышения прочности золоцементного камня при введении шлака доменного гранулированного или отсева дробления горнбленданита, заключающийся в образовании дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, представленных кристаллогидратами тоберморита 14 Å и пломбьераита, в результате связывания портландита активными компонентами минеральных добавок. Активность отсева дробления горнбленданита обусловлена наличием в его составе минералов аортита и роговой обманки, которые в цементном растворе являются активными центрами (льюисовские кислотные центры), адсорбирующими на своей поверхности продукты гидратации цемента и ускоряющими их кристаллизацию, что способствует увеличению прочности золоцементного камня. Повышенное содержание низкоосновных гидросиликатов кальция и закристаллизованность способствуют увеличению прочности на сжатие золоцементного камня в 1,5-2 раза.

2. Показано, что применение минеральной добавки в составе золоцементного камня снижает общую пористость и улучшает структуру безобжигового зольного гравия, значительно уменьшая объем микропор за счет заполнения их продуктами гидратации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования и повышения прочности золоцементного камня, содержащего активную тонкодисперсную минеральную добавку и химическую добавку – сульфат натрия, что позволило обеспечить получение безобжигового зольного гравия с высокой

прочностью и морозостойкостью, пригодного для производства облегченного конструкционного бетона.

С использованием золы-уноса Рефтинской ГРЭС разработан состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий в качестве минеральной добавки шлак доменный гранулированный или отсевы дробления горнбледита, а также химическую добавку – сульфат натрия, ускоряющие твердение золоцементного камня. На состав сырьевой смеси для получения безобжигового зольного гравия получен патент РФ № 2482081 на изобретение.

По результатам научных исследований сформулированы рекомендации, направленные на совершенствование технологии изготовления безобжигового зольного гравия с высокой прочностью и морозостойкостью, предложена аппаратурно-технологическая схема и разработан опытно-промышленный технологический регламент на его производство из золы Рефтинской ГРЭС.

Подобраны составы и определены физико-механические свойства цементных бетонов на основе высокопрочного безобжигового зольного гравия. Показано, что полученный по предложенной технологии заполнитель может быть использован в составе конструкционных облегченных и тяжелых бетонов классов прочности от В20 до В40.

Степень достоверности полученных результатов

Результаты диссертационной работы согласуются с теоретическими положениями, изложенными в научных изданиях, и экспериментальными результатами исследований, опубликованных в научно-технической литературе. Достоверность результатов обеспечена использованием современных средств исследования химического и минерального составов и физико-механических свойств сырьевых материалов, золоцементного камня и безобжигового зольного гравия.

Апробация результатов

Основные результаты работы представлены на Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2009, 2015, 2016, 2017); XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2009); Всероссийской научно-практической конференции «Строительное материаловедение сегодня: актуальные проблемы и перспективы развития» (Челябинск, 2010); Международном семинаре-конкурсе молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ бетонов и сухих смесей» (Москва, 2011, 2012); Международной научно-практической конференции «Инновационные материалы и технологии» (Белгород, 2011); Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» (Екатеринбург, 2011, 2012); Международном конгрессе «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов» (Екатеринбург, 2012); II Международной научно-практической конференции «Теория и практика внедрения новых технологий и материалов в производстве и строительстве» (Москва, 2013); VII заочной международной научно-практиче-

ской конференции «Система управления экологической безопасностью» (Екатеринбург, 2013, 2015); Международной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия» (Новосибирск, 2016); IV International Conference on Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures (Екатеринбург, 2018); Конгрессе с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург, 2019).

Внедрение результатов работы

Для внедрения результатов диссертационного исследования разработан опытно-промышленный технологический регламент производства высокопрочного безобжигового зольного гравия из золы-уноса Рефтинской ГРЭС.

Публикации

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 5 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 1 статья в журнале, индексируемом в международных базах цитирования Scopus и WoS; 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

Автором диссертационной работы самостоятельно выполнен анализ научно-технической и патентной литературы, по результатам которого сформулированы цель и задачи исследования. Постановка и проведение лабораторных экспериментов, изготовление и испытание образцов, обработка, анализ и интерпретация полученных результатов проводились автором лично, разработка технологических решений, подготовка материалов исследований к опубликованию – совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 157 наименований и приложений. Диссертация изложена на 174 страницах машинописного текста, включая 33 таблицы, 24 рисунка и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор научно-технической и патентной литературы по проблемам производства и применения искусственных безобжиговых заполнителей в бетонах. Показано, что большинство исследований были направлены на подбор состава, разработку технологий производства и применения безобжигового зольного гравия в качестве крупного заполнителя в составе строительных бетонов разного назначения. Однако, несмотря на преимущества безобжигового зольного гравия по сравнению с другими пористыми заполнителями (повышенная прочность, низкая энергоемкость, высокое

потребление золы, отсутствие сложного оборудования для изготовления и специальных условий хранения), разработанные технологии его производства не внедрены и не получили дальнейшего развития. Основной причиной тому являлось низкое качество получаемого заполнителя. В России отсутствуют промышленные предприятия по выпуску безобжигового зольного гравия.

Анализ российского и зарубежного опыта решения проблемы энерго- и ресурсосбережения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений показывает, что одним из наиболее рациональных и реальных направлений является комплексное использование легких и облегченных бетонов различного назначения в ограждающих и несущих конструкциях. Ранее искусственные пористые заполнители использовали главным образом для производства ограждающих бетонных конструкций. Но в последнее время с учетом современных требований к энергоэффективности зданий показана целесообразность их применения в составе конструкционных бетонов пониженной плотности. Для производства таких бетонов требуются пористые заполнители с высокой прочностью и долговечностью. С их использованием получены эффективные легкие бетоны для изготовления разнообразных строительных конструкций. Замена традиционных тяжелых заполнителей на пористые позволяет уменьшить плотность и улучшить теплотехнические характеристики бетона.

Во второй главе приведены характеристики сырьевых материалов и описаны методики экспериментальных исследований. Исследование минерального состава сырьевых материалов, цементного и золоцементного камня проводили на дифрактометре *XRD 7000 Maxima Shimadzu*, приборе синхронного термического анализа *STA 449F* фирмы *Netzsch GmbH*, спектрофотометре *Alpha* производства *Bruker*, структуры безобжигового зольного гравия – на цифровом микроскопе *Veho Discovery VMS-004 Deluxe*. Гранулометрический состав золы и цемента определяли на лазерном анализаторе частиц *SHIMADZU SALD-2201*.

Для разработки состава безобжигового зольного гравия использовали золу-уноса Рефтинской ГРЭС (Свердловская область, п. Рефтинский) от сжигания каменного угля Экибастузского бассейна (Казахстан) (ЗУ), портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108–2020 производства ООО «СЛК Цемент» (Свердловская область, г. Сухой Лог), а также минеральные и химические добавки. В качестве минеральных добавок в составе золоцементной смеси использовали шлак медеплавильный гранулированный ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» (Свердловская область, г. Ревда), шлак доменный гранулированный молотый ООО «Мечел-Материалы» (г. Челябинск) (ШДГ), отсевы дробления горнблендита ОАО «Первоуральское рудоуправление» (Свердловская область, г. Первоуральск), химические добавки – сульфат и хлорид натрия, *Ergomix 6000*, Лигнопан Б2. Химический состав ЗУ и минеральных добавок представлен в таблице 1.

Зола-уноса Рефтинской ГРЭС по химическому составу является кислой, практически не содержит топливных остатков, представлена стеклом, муллитом, кварцем и магнетитом, состоит в основном из сферических частиц (рисунок 1). Она имеет истинную плотность 2220 кг/м³, насыпную – 785 кг/м³, удельную поверхность 355 м²/кг, при увлажнении водой самостоятельно не твердеет, харак-

Таблица 1 – Химический состав ЗУ и минеральных добавок

Материалы	$\Delta m_{\text{прк}}$, мас.%	Содержание оксидов, мас.%								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Прочие
Зола-уноса	1,65	62,84	23,21	5,53	1,30	2,28	0,94	–	0,14	2,11
Шлак ме- деплавиль- ный	+1,13	35,80	7,78	45,77	0,97	1,09	1,65	0,26	2,50	4,18
Шлак доменный	0,34	37,75	12,85	0,46	35,24	9,10	0,88	0,56	0,80	2,02
Отсев горн- блендита	3,01	40,73	15,90	14,34	11,46	10,77	2,14	1,14	сл.	0,51

теризуется высоким значением t -критерия Стьюдента, равным 46,7, и проявляет пущоланические свойства по отношению к цементу и извести. По удельной эффективной активности естественных радионуклидов она относится к первому классу строительных материалов и может применяться без ограничений.

Минеральный состав отсева дробления горнблендита представлен в основном роговой обманкой, аортитом и шамозитом, шлака медеплавильного – стеклом, фаялитом и магнетитом, шлака доменного – стеклом, окерманитом, шпинелью. Выбор минеральных добавок обусловлен их потенциальной гидравлической активностью, повышенным плотностью и прочностью, распространенностью в Уральском регионе.

По возрастанию гидравлической активности техногенные отходы располагаются в ряду: шлак медеплавильный → отсев дробления горнблендита → ШДГ. Использование данных минеральных добавок в составе золоцементных композитов может не только изменить характер процессов структурообразования, но и улучшить их физико-механические свойства.

В третьей главе представлены результаты исследований основных закономерностей изменения физико-механических свойств при твердении цементного и золоцементного камня в присутствии химических и минеральных добавок. Установлено, что введение сульфата натрия в количестве 2 % или хлорида натрия (1,2 %), по сравнению с комплексными ускорителями твердения, а также бездобавочным составом, при твердении в воздушно-влажных условиях увеличивает прочность на сжатие золоцементного камня к 3 сут на 13,0-20,0, через 28 сут – на 33,3-54,8, после пропаривания – на 13,6-31,8 %. Наилучшие результаты по прочности при пропаривании золоцементного камня получены при использовании добавки сульфата натрия (5,4 МПа), который изменяет состав жидкой фазы цементного и золоцементного камня. За счет увеличения ионной силы раствора на ранних стадиях

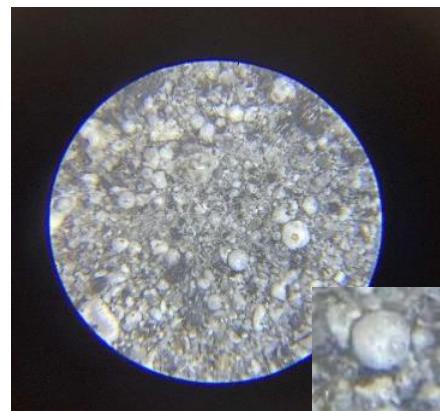


Рисунок 1 – Внешний вид частиц
ЗУ Рефтинской ГРЭС:
увеличение 100 крат

интенсифицируются процессы гидратации клинкерных минералов и взаимодействие гидратных образований со стеклофазой золы.

Исследовано влияние вида и количества тонкодисперсной минеральной добавки на физико-механические свойства и состав продуктов гидратации золоцементного камня, содержащего 20 % цемента и 2 % сульфата натрия от его массы, который вводили с водой затворения. Компонентный состав и физико-механические свойства золоцементного камня после пропаривания представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние вида и количества минеральной добавки на плотность и прочность золоцементного камня

Номер состава	Вид добавки	Расход, мас. %		В/Т*	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа
		Добавка	ЗУ			
1	Без добавки	–	80	0,46	1 522	4,4
2	Отсев дробления горнблендида	5	75	0,43	1 630	6,0
3		10	70	0,42	1 652	7,5
4		20	60	0,40	1 687	9,0
5	Шлак доменный	5	75	0,41	1 656	6,6
6		10	70	0,40	1 723	8,1
7		20	60	0,38	1 843	11,9
8	Шлак медеплавильный	5	75	0,42	1 625	4,5
9		10	70	0,40	1 647	5,5
10		20	60	0,38	1 682	6,5

* - водотвердое отношение

Установлено, что с увеличением количества введенной минеральной добавки снижается водопотребность смеси, повышается плотность и прочность на сжатие золоцементного камня. При введении до 20 % ШДГ плотность золоцементного камня возрастает на 21 %, отсева дробления горнблендида и медеплавильного шлака – на 11 %, по сравнению с бездобавочным составом. Показано, что прочность золоцементного камня повышается с увеличением значения коэффициента качества минеральной добавки, определенного по ГОСТ 3476-2019. Так, добавка 20 % ШДГ, имеющего $K = 1,49$, увеличивает его прочность в 2,7 раза, отсева дробления горнблендида с $K = 0,94$ – в 2,1 раза, медеплавильного шлака с $K = 0,27$ – на 48 %. Таким образом, установлено, что наибольшую прочность на сжатие имеет золоцементный камень, содержащий в качестве минеральной добавки ШДГ или отсев дробления горнблендида.

Цементный камень, содержащий добавку ШДГ и 2 % сульфата натрия, после тепловлажностной обработки представлен следующими продуктами гидратации: высокосульфатной формой этtringита, портландитом, высокоосновными гидросиликатами кальция C_2S α -гидрат и C_2S γ -гидрат, а также гидрогранатами и, возможно, в незначительном количестве – низкоосновными гидросиликатами кальция (тоберморитовым гелем, тоберморитом). При введении отсева дробления горнблендида или шлака медеплавильного в цементном камне отсутствуют высокоосновные

гидросиликаты кальция, а количество этtringита увеличивается в присутствии медеплавильного шлака.

В золоцементном камне, не содержащем минеральную добавку, продукты гидратации представлены в основном низкосульфатной формой этtringита, тоберморитовым гелем, портландитом, а также низкоосновными гидросиликатами кальция тоберморитовой группы, которые образуются на поверхности зольных частиц в результате взаимодействия алюмосиликатного стекла и кварца ЗУ с портландитом (рисунок 2, *a*).

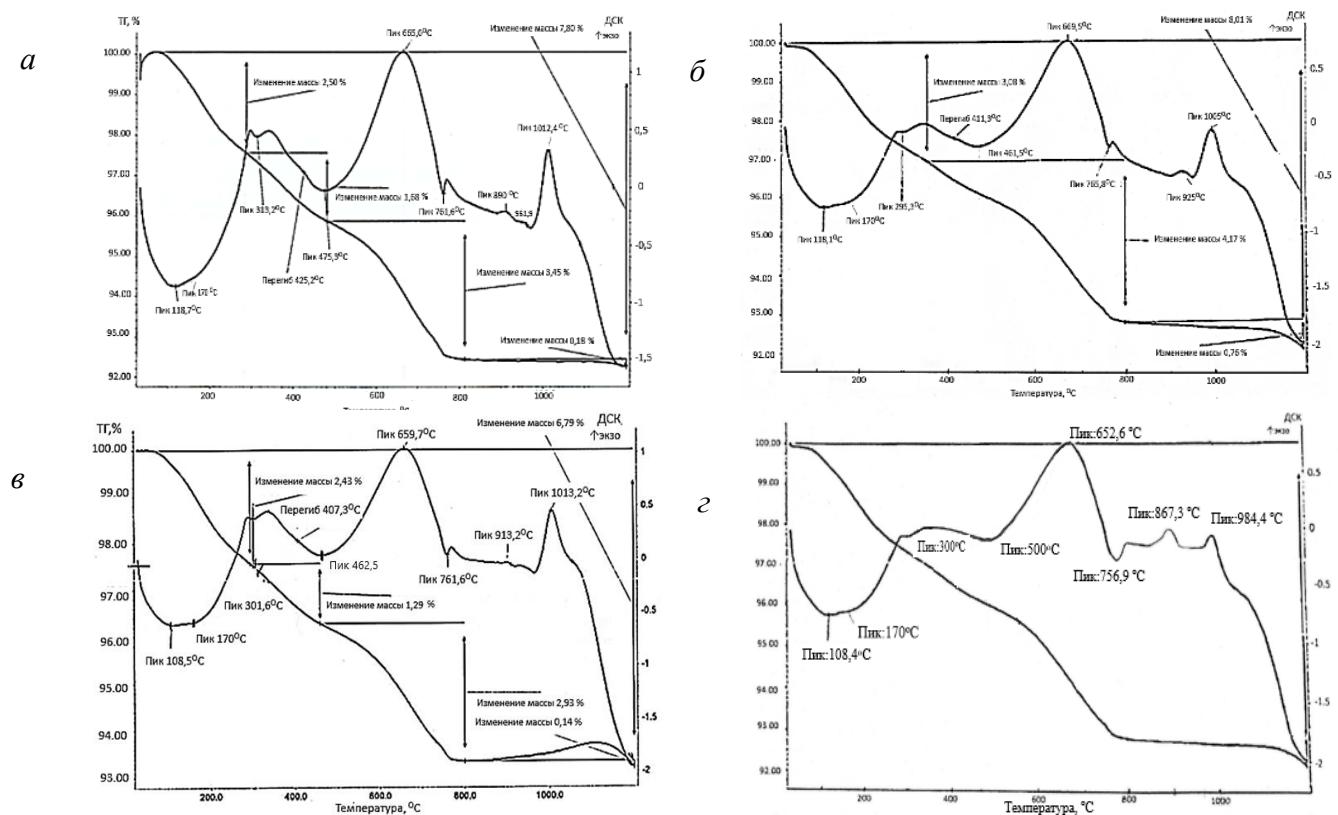
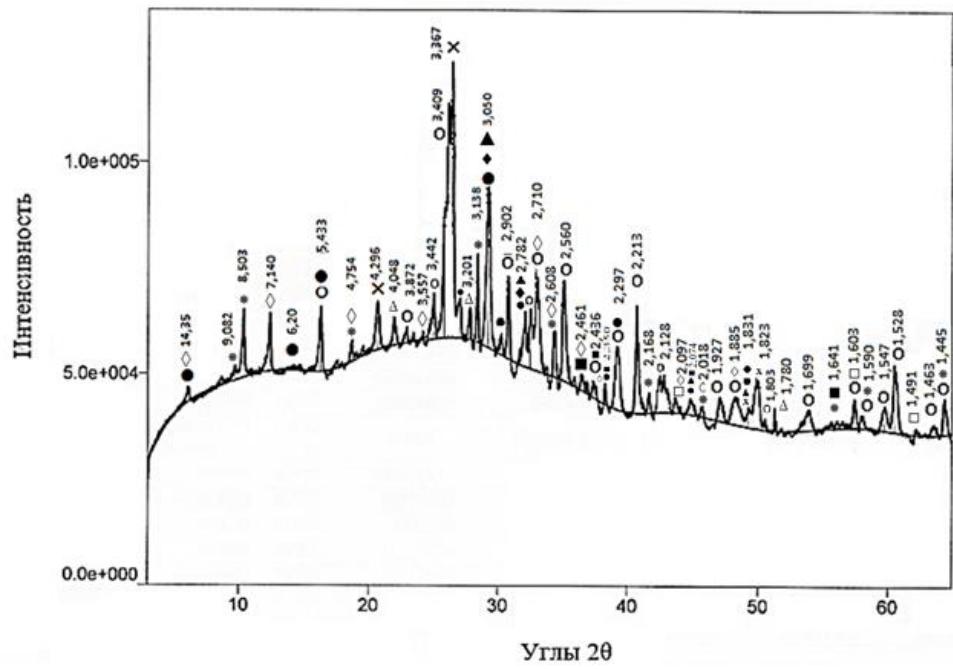


Рисунок 2 – Результаты дифференциального-термического анализа золоцементного камня, содержащего 2 % сульфата натрия и минеральную добавку, после пропаривания: *а* – без минеральной добавки; *б* – отсев дробления горнблендита; *в* – шлак медеплавильный; *г* – шлак доменный гранулированный

С целью установления причин, вызывающих повышение прочности золоцементного камня при введении минеральной добавки, дифференциальным термическим анализом определен состав его гидратных новообразований. При введении минеральных добавок состав продуктов гидратации золоцементного камня в основном не меняется, но отличается пониженной их основностью и увеличением количества низкоосновных гидросиликатов кальция. Так, на дериватограмме золоцементного камня с отсевом дробления горнблендита в интервале температур от 100 до 760 °C присутствуют тепловые эффекты, близкие к бездобавочному золоцементному камню, но отличными при более высокой температуре (рисунок 2, *б*). В температурной области 800–1000 °C на дифференциальной кривой присутствует экзотермический эффект с максимумом при температуре 925 °C, под-

тврждающий кристаллизацию волластонита – продукта обезвоживания гидросиликата кальция, тогда как на дериватограмме бездобавочного золоцементного камня наблюдаются два экзоэффекта при 890,0 и 961,9 °С. При введении отсева дробления горнблендита исчезновение в золоцементном камне экзоэффекта с максимумом при 890 °С, связанного с разложением высокососновного гидросиликата кальция, и смещение температуры кристаллизации волластонита в область более низких температур может быть обусловлено уменьшением основности низкоосновного гидросиликата кальция тоберморитовой группы.

Для определения состава низкоосновных гидросиликатов кальция, образующихся в пропаренном золоцементном камне, содержащем отсев дробления горнблендита, был выполнен рентгенофазовый анализ (рисунок 3). Установлено, что в нем содержатся минералы ЗУ муллит, кварц и магнетит, а также роговая обманка, шамозит и аортит, входящие в горнблендит. Из закристаллизованных продуктов гидратации обнаружены этtringит состава $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и низкоосновные гидросиликаты кальция: тоберморит 14 Å $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{CSH}(\text{I})$ и пломбьерит $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, входящие в тоберморитовую группу с разной степенью кристаллизации и отношением CaO/SiO_2 до 1,0.



- – тоберморит 14 Å; ◆ – $\text{CSH}(\text{I})$; ■ – этtringит; ▲ – пломбьерит; ◇ – шамозит;
- – магнетит; △ – аортит; * – роговая обманка; x – кварц; ○ – муллит

Рисунок 3 – Дифрактограмма золоцементного камня, содержащего отсев дробления горнблендита

При введении медеплавильного шлака характер дериватограммы золоцементного камня в области температуры от 100 до 760 °С существенно не отличается от кривых нагревания искусственного камня без и с добавкой отсева дробления горнблендита, они имеют близкие тепловые эффекты (рисунок 2, в). Однако на кривых золоцементного камня в температурной области 800–1000 °С они

различаются величиной экзотермических эффектов. На дериватограмме золоцементного камня с добавкой медеплавильного шлака присутствует экзоэффект с максимумом при температуре 913 °C, связанный с кристаллизацией волластонита, образующегося при обезвоживании тоберморита. Таким образом, показано, что добавка медеплавильного шлака не способствует образованию в золоцементном камне дополнительного количества новых гидратных фаз, так как содержащиеся в нем неактивные фазы не гидратируют и не вступают в реакцию с продуктами гидратации портландцемента и стеклофазой ЗУ. Поэтому повышение его прочности может быть обусловлено в основном уплотнением структуры золоцементного камня при введении данной добавки.

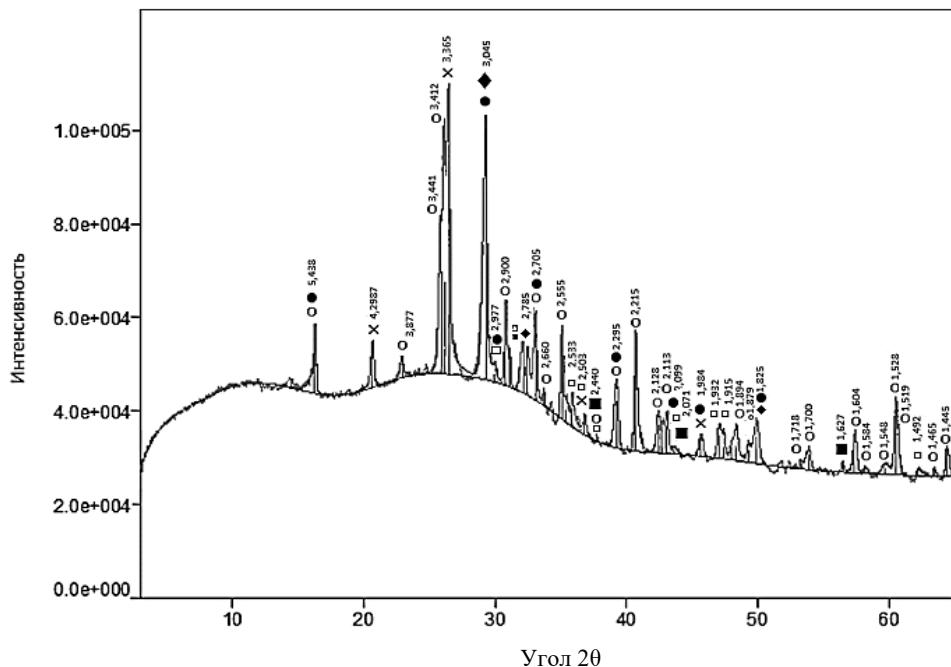
Особенностью твердения золоцементного камня с добавкой ШДГ, по сравнению с бездобавочным камнем, является то, что, наряду с гидратацией клинкерных минералов цемента, происходит также их взаимодействие с продуктами гидратации стеклофазы и минералов шлака. На дериватограмме золоцементного камня с ШДГ эндотермический эффект с максимумом при температуре 108,5 °C обусловлен удалением гидратной воды из гидросульфоалюмината кальция, а эндоэффект при 170 °C связан с частичным обезвоживанием тоберморитового геля и дегидратацией низкоосновных гидросиликатов кальция (рисунок 2, 2). При дальнейшем нагревании в области температуры 400–500 °C наблюдается снижение интенсивности эндоэффекта, характеризующего дегидратацию портландита, по сравнению с золоцементным камнем, содержащим отсев дробления горнблендита и медеплавильный шлак, что является подтверждением взаимодействия химически активной шлаковой составляющей с $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

При твердении в нормальных условиях доменные шлаки не взаимодействуют с водой, но в присутствии портландита, выделяющегося при гидролизе альта цемента, и особенно с увеличением температуры твердения гидравлическая активность их значительно повышается, и образуются гидросиликаты кальция состава CSH(I) и CSH(II) . На кривой дифференциального-термического анализа золоцементного камня с добавкой ШДГ в области высоких температур 800–1000 °C имеются два экзоэффекта: первый – при температуре 867,3 °C связан с образованием волластонита в результате полного обезвоживания гидросиликатов кальция тоберморитовой группы, второй экзоэффект при 984,4 °C – с кристаллизацией шлакового стекла мелилитового состава. При введении ШДГ основность образующихся гидросиликатов кальция в золоцементном камне понижается, что подтверждается снижением температурных максимумов их экзоэффектов. На дериватограмме золоцементного камня с доменным шлаком, по сравнению с бездобавочным камнем, экзоэффект, характерный для гидросиликатов кальция тоберморитовой группы, смещается от 890 до 867,3 °C.

Рентгенофазовым анализом золоцементного камня с добавкой ШДГ уточнен состав низкоосновных гидросиликатов кальция (рисунок 4). Кроме муллита, кварца, магнетита и окерманита, в нем обнаружены закристаллизованные продукты гидратации: этtringит, тоберморит 14 Å, CSH(I) и пломбьерит. На дифрактограмме золоцементного камня с добавкой ШДГ интенсивность рефлексов, характерных для тоберморита 14 Å, высокая, что свидетельствует о более

полной их закристаллизованности, по сравнению с камнем, содержащим отсев дробления горнблендита.

В золоцементном камне с ШДГ, по сравнению с другими минеральными добавками, содержится меньше портландита, что подтверждает более активное



- – тоберморит 14 Å; ■ – этtringит; ♦ – CSH(I); ▲ – пломбьерит; x – кварц;
- – муллит; □ – магнетит; ▨ – окерманит

Рисунок 4 – Дифрактограмма золоцементного камня, содержащего шлак доменный

связывание его компонентами шлака, а также алюмосиликатным стеклом ЗУ, с образованием большего количества низкоосновных гидросиликатов кальция, способствующих увеличению его прочности. Повышенное содержание портландита в золоцементном камне с добавкой медеплавильного шлака, имеющего пониженную прочность, свидетельствует о том, что шлак не реагирует с гидроксидом кальция и не участвует в формировании низкоосновных гидросиликатов кальция. Отсутствие гидравлической активности данного шлака обусловлено низким содержанием в нем оксидов кальция и алюминия, присутствием в значительном количестве химически инертного фаялита.

С целью изучения особенностей структуры кристаллогидратов золоцементного камня, содержащих минеральную добавку, были проведены дополнительные исследования методом ИК-спектроскопии. Установлено, что ИК-спектры золоцементного камня с добавкой ШДГ отличаются от спектров камня с отсевом дробления горнблендита. Так, на ИК-спектрах золоцементного камня с доменным шлаком в интервале волновых чисел 770,62–1100,00 cm^{-1} присутствует больше полос поглощения, обусловленных колебаниями группировок мостиковых связей Si–O–Si и тетраэдров Si–O кремнекислородного каркаса в гидросиликатах кальция (рисунок 5, а). Однако их интенсивность, по сравнению с золоцементным камнем, содержащим отсев дробления горнблендита, несколько меньше, что связано с понижением основности и образованием дополнительного

количества гидросиликатов кальция. Волновые числа в области 1416,62–1483,02 см^{-1} соответствуют колебаниям свободных гидроксильных групп –ОН в вершинах кремнекислородных тетраэдров, что свидетельствует о более полной гидратации минералов портландцемента в золоцементном камне, содержащем добавку доменного шлака.

На ИК-спектрах золоцементного камня с отсевом дробления горнблендита в интервале 858,55–1027,81 см^{-1} наблюдается меньше полос поглощения, обусловленных колебаниями кристаллических гидросиликатов кальция – тоберморита 14 Å, но с большей интенсивностью (рисунок 5, б). Присутствие закристаллизованных гидросиликатов кальция также подтверждается наличием волнового числа 637,09 см^{-1} . Усиление интенсивности валентных колебаний Si–O в данном интервале полос поглощения с максимумом при 967,11 см^{-1} свидетельствует об увеличении содержания низкоосновных гидросиликатов кальция, возрастании прочной ковалентной связи Si–O и снижении слабой ионной связи Ca–O, способствующих упрочнению твердеющей системы и увеличению их закристаллизованности.

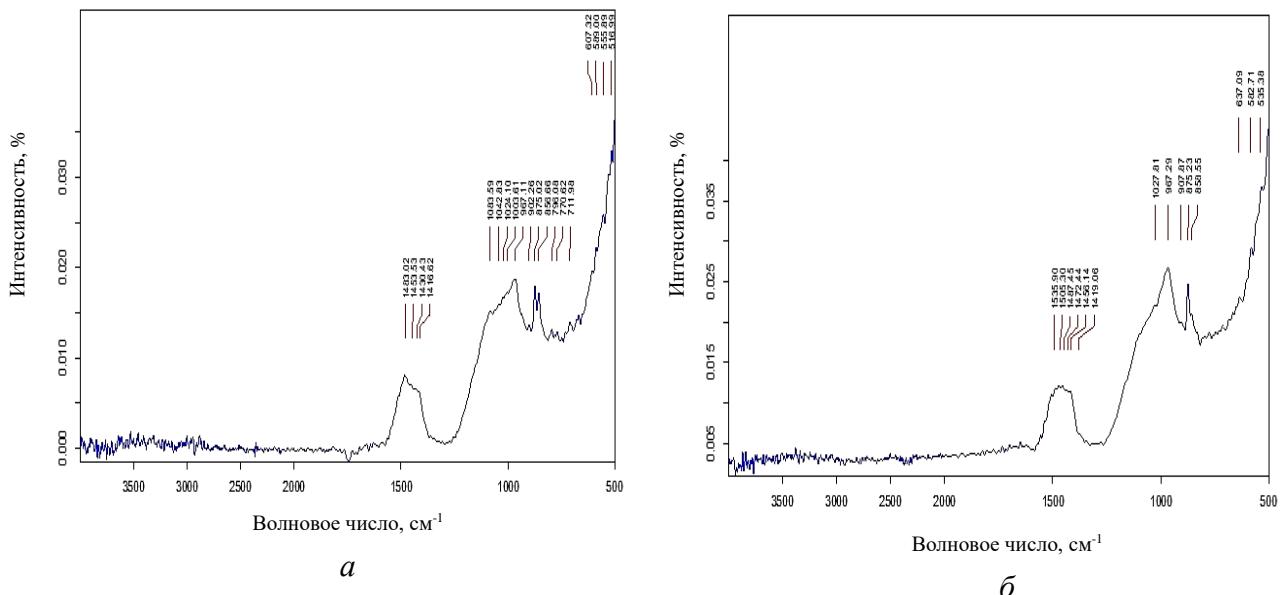


Рисунок 5 – ИК-спектры золоцементного камня с добавкой:
а – шлака доменного; б – отсева дробления горнблендита

С учетом изложенного можно предположить, что поверхность частиц горнблендита не является полностью инертной по отношению к продуктам гидратации цемента. На их поверхности могут присутствовать активные адсорбционные центры, в качестве которых выступают минералы анортит и роговая обманка, содержащиеся в горнблендите. Анортит представляет собой алюмосиликат с каркасной структурой, состоящий из тетраэдров SiO_4 , в которых Si^{4+} частично изоморфно замещен на Al^{3+} , являющийся источником электроноакцепторных льюисовских кислотных центров $\text{O}-\text{Al}-\text{O}$. Кристаллы гидросиликатов кальция в водной среде имеют отрицательный заряд, связанный с диссоциацией OH-групп, а частицы алюмосиликатов кальция (анортита) – положительный, обусловленный наличием активных льюисовских кислотных центров. Чем

больше валентность иона, тем сильнее он притягивается противоположно заряженной поверхностью. Катионы различной валентности по их возрастающей адсорбционной способности располагаются в ряд $K^+ \rightarrow Ca^{2+} \rightarrow Al^{3+}$.

Роговая обманка, содержащаяся в горнблендите, является ленточным силикатом, содержащим радикал $[Si_4O_{11}]^{6-}$. Внерешеточные катионы Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , присутствующие в ее структуре, являются также источниками льюисовских кислотных центров, способствующих адсорбции продуктов гидратации цемента.

Таким образом, пущоланическая активность отсева дробления горнблендита обусловлена наличием в его составе минералов аортита и роговой обманки, частицы которых в цементном растворе являются активными центрами (льюисовские кислотные центры), адсорбирующими на своей поверхности продукты гидратации цемента и ускоряющими их кристаллизацию, что способствует увеличению прочности золоцементного камня.

Четвертая глава посвящена разработке технологии производства высокопрочного безобжигового зольного гравия с использованием ЗУ Рефтинской ГРЭС. Изменяя технологические параметры получения, можно в широком диапазоне регулировать физико-механические свойства безобжигового зольного гравия. Так, на процесс грануляции и получение безобжигового зольного гравия определенного гранулометрического состава влияет состав, водопотребность и дисперсность сырьевой смеси. Повышению прочности гравия способствует оптимизация технологических параметров его получения, условия твердения с учетом свойств исходных материалов, дополнительное измельчение, введение химических и минеральных добавок. Основными показателями качества безобжигового зольного гравия являются количество гранул кондиционной фракции, насыпная плотность, прочность на сжатие в цилиндре и морозостойкость.

Для получения безобжигового зольного гравия использовали ЗУ, портландцемент и отсев дробления горнблендита или ШДГ, измельченные в лабораторной барабанной мельнице. Необходимость в дополнительном измельчении обусловлена тем, что в исходном состоянии они являются полидисперсными продуктами, содержащими в основном зерна размером более 0,16 мм (более 75 %). Установлено, что с увеличением удельной поверхности отсева дробления горнблендита от 100 до 400 m^2/kg уменьшается средний размер от 11,8 до 5,30 мкм соответственно. Измельченный отсев дробления горнблендита смешивали с ЗУ и цементом, полученную смесь увлажняли 2 % раствором сульфата натрия, формовали образцы, которые подвергали пропариванию и далее испытанию на прочность. В эксперименте использовали золоцементную смесь, содержащую 60 % ЗУ Рефтинской ГРЭС, 20 % портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и 20 % отсева горнблендита с разной удельной поверхностью. Для расчета плотнейшей упаковки данной системы с непрерывным зерновым составом применяли уравнение Функа – Дингера, описывающее оптимальные гранулометрические кривые:

$$A'_j = 100 \cdot \left(\alpha + (1 - \alpha) \cdot \frac{d_j^n - d_{\min}^n}{d_{\max}^n - d_{\min}^n} \right),$$

где A'_j – полный проход частиц через сито с размером ячейки d_j , %; d_{\max} и d_{\min} –

наибольший и наименьший размеры зерна, мкм; n – коэффициент распределения, равный 0,5 (по Фуллеру); α – коэффициент формы частиц, равный 0,08.

С помощью уравнения Функа – Дингера были выполнены расчеты и построена «идеальная» кривая распределения частиц, а также определена величина отклонения от нее гранулометрического состава золоцементной смеси без и с минеральной добавкой (рисунок 6). Установлено, что, в зависимости от степени измельчения отсева горнблендита, золоцементная смесь характеризуется гранулометрическим составом, в котором с увеличением удельной поверхности от 100 до 400 м²/кг количество крупных частиц размером более 400 мкм снижается от 2,0 до 1,3 %, размером 10–200 мкм – от 78,0 до 71,4 %, а содержание зерен размером менее 5 мкм увеличивается до 27,3 %. При этом отклонение гранулометрического состава смеси от «идеальной» кривой распределения частиц увеличивается до 44,5 %.

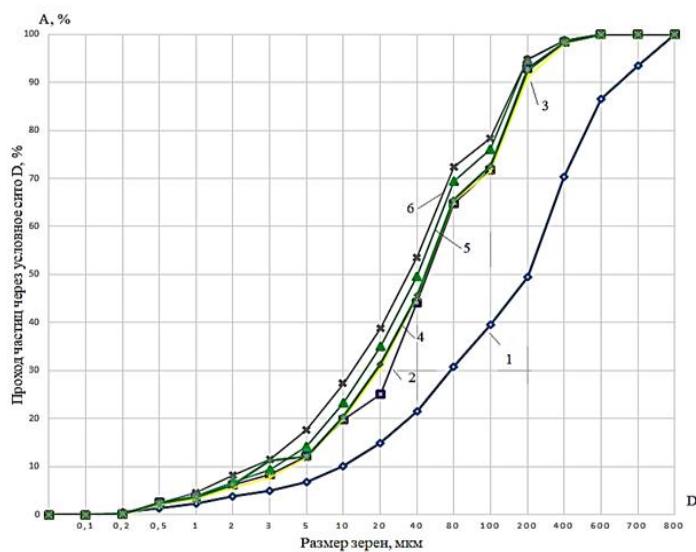


Рисунок 6 – Влияние удельной поверхности отсева дробления горнблендита на гранулометрический состав золоцементной смеси:
1 – кривая Функа – Дингера; 2 – без добавки; 3, 4, 5 и 6 – с добавкой, имеющей удельную поверхность, равную 100, 200, 300 и 400 м²/кг

Наименьшее отклонение от «идеальной» кривой распределения частиц имеет золоцементная смесь, содержащая отсев дробления горнблендита с удельной поверхностью, равной 100 м²/кг. Более тонкий его помол до удельной поверхности 400 м²/кг не повышает плотность и незначительно увеличивает прочность на сжатие золоцементного камня от 9,1 до 9,9 МПа. Таким образом, установлено, что увеличение прочности золоцементного камня при введении измельченной минеральной добавки обусловлено не оптимальным гранулометрическим составом смеси, обеспечивающим максимальную плотность упаковки ее зерен, а особенностями процессов гидратации, заключающимися в образовании дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция в золоцементном камне.

На выход кондиционной фракции 5–20 мм при окомковании и свойства безобжигового зольного гравия влияет расход воды на увлажнение золоцементной смеси. Установлено, что при гранулировании смеси с водопотребностью до 24 % образуются в основном не прочные гранулы размером менее 5 мм. Наибольший

выход прочных зольных гранул сферической формы и кондиционной фракции 5–20 мм с плотной структурой получен при водопотребности, равной 25–26 %. Дальнейшее повышение расхода воды увеличивает количество гранул размером более 40 мм.

Определенное влияние на прочность золоцементного камня оказывают условия его твердения. Твердение сырцовых гранул безобжигового зольного гравия в естественных условиях (относительная влажность окружающей среды 60–80 %, температура 22 ± 2 °C) нами не рассматривалось, так как оно занимает достаточно длительное время для получения прочного искусственного заполнителя. Поэтому было исследовано влияние разных режимов пропаривания на физико-механические свойства безобжигового зольного гравия. Показано, что для ускорения его твердения сырцовые гранулы необходимо пропаривать по режиму: 3 ч – подъем температуры, 6 ч – изотермическая выдержка при температуре 85 ± 5 °C и 3 ч – охаждение. Физико-механические свойства пропаренного безобжигового зольного гравия приведены в таблице 3. По плотности, прочности, морозостойкости, силикатному распаду и водопоглощению он удовлетворяет требованиям к заполнителям для легких бетонов по ГОСТ 25820-2021.

Подбор составов конструкционных бетонов проводили на двух пробах безобжигового зольного гравия, полученного из ЗУ Рефтинской ГРЭС: первая – гравий, содержащий добавку отсева дробления горнблендита и имеющий марки по насыпной плотности М1000 и прочности П300; вторая – гравий, изготовленный с добавкой ШДГ, марки по плотности М1100, прочности П350. Компонентный состав и свойства бетонной смеси и бетона классов прочности от В20 до В40 представлены в таблице 4.

Установлено, что высокопрочный безобжиговый зольный гравий (рисунок 7) может быть использован для получения бетонов класса прочности до В40 пониженной плотности. По сравнению с гранитным щебнем, плотность бетона, содержащего в качестве крупного заполнителя безобжиговый зольный гравий с отсевом горнблендита и ШДГ, при равном классе прочности на 24 и 19 % меньше соответственно. Показано, что применение безобжигового зольного гравия с ШДГ, по сравнению с гравием, содержащим отсев горнблендита, при одинаковом расходе цемента повышает плотность бетона на 3,4 %, увеличивает его прочность на сжатие на 14 % после пропаривания и через 28 сут. нормального твердения.



По результатам лабораторных исследований и испытаний с учетом рекомендаций по оптимизации технологических параметров предложены технологическая и аппаратурная схемы изготовления высокопрочного безобжигового зольного гравия (рисунки 8, 9) и разработан опытно-промышленный технологический регламент на его производство из ЗУ Рефтинской ГРЭС.

Рисунок 7 – Внешний вид безобжигового зольного гравия

Таблица 3 – Физико-механические свойства безобжигового гравия фракции 10–20 мм

№	Вид добавки	Плотность, кг/м ³		Марка по насыпной плотности	Прочность на сжатие в цилиндре, МПа	Марка по прочности	Силикатный распад, мас. %	Водопоглощение, мас. %	Морозостойкость	
		Средняя	Насыпная						Потери массы, %	Марка
1	Без добавки	1 280	900	M900	5,5	П200	4,0	12,1	7,2	F50
2	Отсев дробления горноблендита	1 595	987	M1000	7,5	П300	0,8	10,2	5,7	
3	Шлак доменный	1 633	1017	M1100	10,3	П350	2,6	8,3	4,6	
Требования ГОСТ 33928–2016 для зольного гравия		–	–	M450-М900	1,0-7,5	П50-П250	Не более 5	Не более 20 для марок М700-М900	Не более 8	Не менее F15

Таблица 4 – Состав и свойства конструкционных бетонов

Номер состава	Расход материалов, кг/м ³						Марка по подвижности бетонной смеси по ГОСТ 7473-2010	Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа		Класс прочности по ГОСТ 18105-2018			
	Цемент	Песок	Безобжиговый зольный гравий		Щебень	Добавка Полипласт СП-1			TBO	28 сут.				
			отсев горноблендита	шлак доменный										
1	280	803	723	–	–	1,7	200	П2	2 008	1 934	20,5	25,3	B20	
2	280	800	–	733	–	1,7	196		2 011	1 940	21,7	26,7	B20	
3	280	817	–	–	1107	1,7	204		2 408	2 307	17,5	24,4	B20	
4	310	865	776	–	–	1,8	191	П2	2 142	2 064	26,2	37,2	B27,5	
5	316	878	–	794	–	1,9	190		2 176	2 092	27,8	39,5	B27,5	
6	313	830	–	–	1155	1,9	184		2 484	2 384	27,9	40,2	B27,5	
7	510	550	819	–	–	3,1	171	П2	2 053	1 990	32,8	47,2	B35	
8	510	560	–	840	–	3,1	180		2 130	2 058	37,4	53,9	B40	
9	510	542	–	–	1294	3,1	170		2 516	2 450	38,5	55,4	B40	

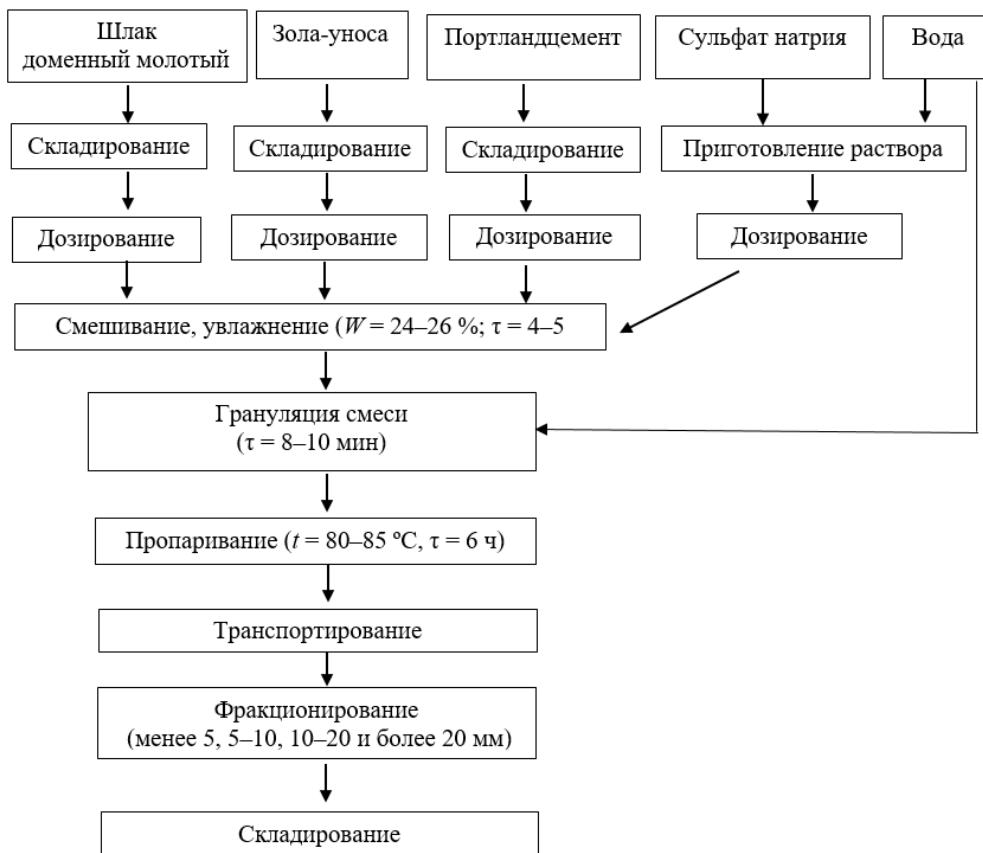


Рисунок 8 – Технологическая схема производства безобжигового зольного гравия из ЗУ Рефтинской ГРЭС

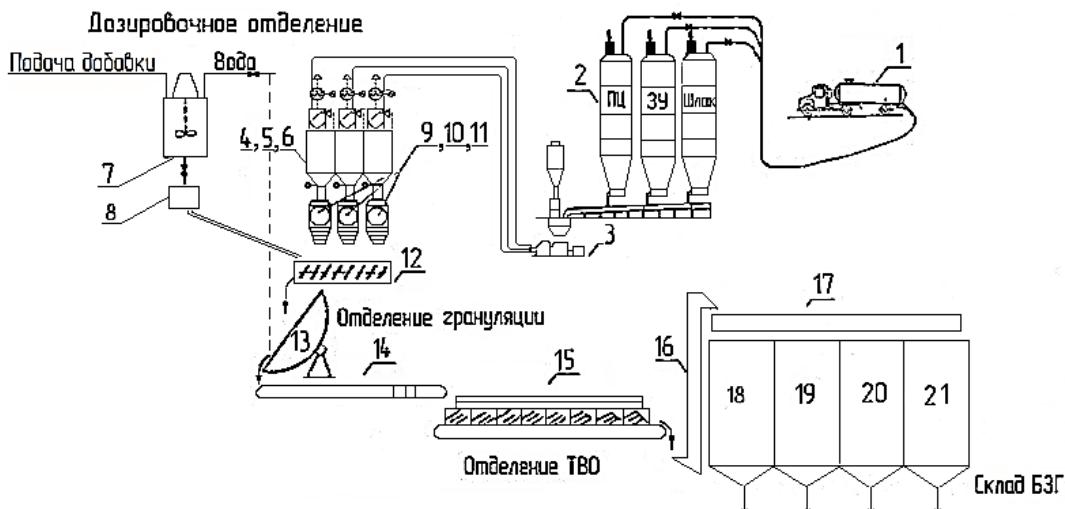


Рисунок 9 – Аппаратурная схема производства безобжигового зольного гравия из ЗУ Рефтинской ГРЭС:

1 – автоцементовоз; 2 – силоса цемента, золы-уноса, молотого доменного шлака; 3 – пневмовинтовые насосы; 4, 5, 6 – расходные бункера цемента, золы, шлака; 7 – мешалка; 8 – расходной бак с дозатором; 9, 10, 11 – дозаторы весовые; 12 – смеситель лопастной; 13 – гранулятор тарельчатый; 14 – транспортер ленточный; 15 – камера пропарочная туннельная; 16 – ковшовый элеватор; 17 – барабанная гравиесортировка; 18, 19, 20, 21 – силоса для гравия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Определены состав и свойства ЗУ, образующейся при сжигании каменного угля Экибастузского бассейна на Рефтинской ГРЭС, и других техногенных продуктов, рекомендованных в качестве минеральной добавки для получения высокопрочного золоцементного камня. По химическому составу зола является кислой, практически не содержит коксовых остатков, ее минеральный состав представлен в основном стеклофазой, муллитом, кварцем, по гранулометрическому составу – среднедисперсная, обладает пущолановой активностью, удельной эффективной активности естественных радионуклидов относится к 1-му классу строительных материалов, удовлетворяет требованиям ГОСТ 25818-2018 и может применяться в строительстве без ограничений.

Установлено, что с увеличением коэффициента качества, характеризующего активность минеральной добавки, исследованные техногенные продукты располагаются в ряду: шлак медеплавильный → отсев дробления горнблендита → шлак доменный гранулированный.

2. Добавка сульфата или хлорида натрия увеличивает прочность на сжатие золоцементного камня после пропаривания и хранения в воздушно-влажных условиях по сравнению с комплексными поликарбоксилат- и лигносульфонатсодержащими суперпластификаторами с эффектом ускорения твердения. Наиболее эффективной добавкой является сульфат натрия, повышающий прочность золоцементного камня, снижающий продолжительность пропаривания.

3. Установлены закономерности изменения физико-механических свойств золоцементного камня после пропаривания в зависимости от вида и количества введенной минеральной добавки. Добавка ШДГ в количестве до 20 % вместо ЗУ Рефтинской ГРЭС увеличивает плотность золоцементного камня на 21 %, отсева дробления ГБ и медеплавильного шлака – на 11 % по сравнению с бездобавочным составом. При этом его прочность на сжатие значительно повышается с увеличением значения коэффициента качества минеральной добавки: при введении доменного шлака в 2,7 раза (до 11,9 МПа), отсев дробления горнблендита – в 2,1 раза (до 9,0 МПа), медеплавильного шлака – на 48 % (до 6,5 МПа).

4. Физико-химическими исследованиями определен состав продуктов твердения золоцементного камня при пропаривании, который представлен этрингитом, портландитом, а также низкоосновными гидросиликатами кальция тоберморитовой группы (тоберморитовым гелем, тоберморитом), образующимися при взаимодействии алюмосиликатного стекла золы с гидроксидом кальция. Показано, что добавка доменного гранулированного шлака или отсева дробления горнблендита в количестве 10-20 % увеличивает в нем количество тоберморитового геля и низкоосновных гидросиликатов кальция, представленных кристаллогидратами тоберморита 14 Å и пломбьерита. Их повышенное содержание и высокая закристаллизованность способствуют увеличению прочности на сжатие камня, особенно при введении доменного шлака.

5. Разработан компонентный состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий ЗУ Рефтинской ГРЭС, портландцемент, минеральную

добавку и сульфат натрия, определены физико-механические свойства заполнителя. Введение минеральной добавки снижает общую пористость и значительно увеличивает в ней долю закрытых микропор. Добавка 20 % ШДГ повышает прочность гравия до 10,3 МПа, отсева дробления горнблендита – до 7,5 МПа. Безобжиговый зольный гравий с добавкой доменного шлака имеет марку по насыпной плотности М1100, прочности – П350, морозостойкость F50; отсева дробления горнблендита – марки М1000, П300 и F50 соответственно.

6. Предложены составы конструкционных бетонов класса прочности от В20 до В40 с использованием в качестве крупного заполнителя высокопрочного безобжигового зольного гравия на основе ЗУ Рефтинской ГРЭС. Установлено, что применение гравия с ШДГ повышает плотность бетона при одинаковом расходе цемента на 3,4 %, увеличивает прочность на сжатие после пропаривания и через 28 сут нормального твердения на 14 % по сравнению с заполнителем, содержащим отсев горнблендита.

7. Для промышленного внедрения разработаны рекомендации по совершенствованию технологии, технологическая и аппаратурная схемы, опытно-промышленный технологический регламент на производство безобжигового зольного гравия из ЗУ Рефтинской ГРЭС. Предложенная технология производства высокопрочного искусственного заполнителя не содержит сушку, дополнительное измельчение сырьевых материалов и обжиг, что обеспечивает ей высокую энергоэффективность.

Рекомендации по внедрению

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены на предприятиях по производству строительных материалов с использованием золошлаковых отходов ТЭС, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований связаны с совершенствованием разработанной технологии производства высокопрочного безобжигового зольного гравия с использованием золошлаковых отходов теплоэнергетики, образующихся в других регионах России, модифицированных местными техногенными отходами и полифункциональными добавками, а также бетонов и строительных изделий на основе данного искусственного заполнителя.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ
и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Капустин, Ф. Л. Безобжиговый зольный гравий – эффективный заполнитель для конструкционных бетонов / Ф. Л. Капустин, **И. В. Рыжкова (И. В. Фомина)** // Строительные материалы. – 2012. – № 8. – С. 57–59. (0,55 п. л. / 0,28 п. л.).

2. Капустин, Ф. Л. Получение и применение безобжигового зольного гравия в конструкционных бетонах / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Перспективные материалы. – 2013. – № 10. – С. 76–80. (0,32 п. л. / 0,16 п. л.).

3. Капустин, Ф. Л. Получение легкого заполнителя на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС для конструкционных бетонов / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Экология и промышленность России. – 2014. – № 8. – С. 2–4. (0,40 п. л. / 0,20 п. л.).

4. Kapustin, F. L. Composition and Properties of Non-Fired Fly Ash Gravel and Concrete on its Basis / F. L. Kapustin, D. V. Kokorina, **I. V. Fomina** // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. – Р. 1–5. (Scopus, WoS). (0,31 п. л. / 0,11 п. л.).

5. Капустин, Ф. Л. Влияние минеральной добавки на гидратацию и твердение золоцементного камня в условиях тепловлажностной обработки / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2024. – Т. 9, № 7. – С. 88–97. (1,16 п. л. / 0,58 п. л.). К 1.

Объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент № 2482081 Российской Федерации, МПК C04B 18/10. Состав для получения безобжигового зольного гравия : № 2011138610/03 : заявл. 20.09.2011 : опубл. 20.05.2013 / Капустин Ф. Л., **Рыжкова И. В. (Фомина И. В.)**, Тарабухина О. Г., Уфимцев В. М.

Другие публикации:

7. Капустин, Ф. Л. Влияние химических добавок на прочность безобжигового зольного гравия для бетонов / Ф. Л. Капустин, **И. В. Рыжкова (И. В. Фомина)** // Научные труды XVI Уральской Международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – Ч. 4. – С. 210–211. (0,12 п. л. / 0,06 п. л.).

8. Капустин, Ф. Л. Свойства безобжигового зольного гравия для конструкционных бетонов / Ф. Л. Капустин, **И. В. Рыжкова (И. В. Фомина)** // Проблемы инновационного биосферно совместимого социально экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы Всероссийской конференции. – Брянск : БГИТА, 2010. – С. 146–148. (0,12 п. л. / 0,06 п. л.).

9. Капустин, Ф. Л. Безобжиговый зольный гравий для конструкционных бетонов / Ф. Л. Капустин, **И. В. Рыжкова (И. В. Фомина)** // Строительное материаловедение сегодня: актуальные проблемы и перспективы развития : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Челябинск : ГОУ ВПО ЮрГУ, 2010. – С. 98–101. (0,33 п. л. / 0,16 п. л.).

10. Капустин Ф. Л. Влияние способа получения смешанного вяжущего на свойства безобжигового зольного гравия / Ф. Л. Капустин, **И. В. Рыжкова (И. В. Фомина)** // Инновационные материалы и технологии : сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Белгород : БГТУ имени В. Г. Шухова, 2011. – С. 259–263. (0,31 п. л. / 0,16 п. л.).

11. Капустин, Ф. Л. Влияние состава смешанного вяжущего на свойства безобжигового зольного гравия / Ф. Л. Капустин, **И. В. Рыжкова (И. В. Фомина)** // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы I Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 186–190. (0,31 п. л. / 0,16 п. л.).

12. Капустин, Ф. Л. Малоцементные композиции с использованием техногенных продуктов для получения безобжигового зольного гравия / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы II Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 44–48. (0,31 п. л. / 0,16 п. л.).

13. Капустин, Ф. Л. Использование золы-уноса Рефтинской ГРЭС в производстве безобжигового зольного гравия / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов : труды Международного конгресса. – Екатеринбург : УрО РАН, 2012. – С. 341–343. (0,33 п. л. / 0,16 п. л.).

14. Капустин, Ф. Л. Использование отходов теплоэнергетики для получения заполнителя для конструкционных бетонов / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Система управления экологической безопасностью : сборник материалов VII заочной Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 233–240. (0,44 п. л. / 0,22 п. л.).

15. Капустин, Ф. Л. Эффективный заполнитель для конструкционных бетонов на основе золы-уноса / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Теория и практика внедрения новых тех-

нологий и материалов в производстве и строительстве : сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Москва : НИЦ «АПРОБАЦИЯ», 2013. – С. 55–60. (0,31 п. л. / 0,16 п. л.).

16. **Фомина, И. В.** Ресурсо- и энергосбережение в производстве заполнителей для конструкционных бетонов / **И. В. Фомина**, Л. С. Сумарокова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 336–339. (0,25 п. л. / 0,13 п. л.).

17. Капустин, Ф. Л. Малоцементные композиции на основе золы-уноса ТЭС / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина** // Система управления экологической безопасностью : сборник материалов IX заочной Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 112–116. (0,25 п. л. / 0,13 п. л.).

18. Капустин, Ф. Л. Влияние дополнительного измельчения золы-уноса на гранулируемость и свойства безобжигового зольного гравия / Ф. Л. Капустин, **И. В. Фомина**, Л. С. Сумарокова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 612–615. (0,19 п. л. / 0,06 п. л.).

19. Kapustin, F. L. Manufacture of concretes based on unburnt ash gravel / F. L. Kapustin, **I. V. Fomina**, V. N. Oleinik // Progress in Materials Science. – 2018. – P. 117–122. (0,31 п. л. / 0,11 п. л.).

20. Капустин, Ф. Л. Использование золы уноса Рефтинской ГРЭС в производстве строительных материалов и изделий / Ф. Л. Капустин, В. М. Уфимцев, А. А. Вишневский, **И. В. Фомина**, А. Ф. Капустин, К. Г. Земляной // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований : труды Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых. – Екатеринбург : УрО РАН, 2019. – С. 50–55. (0,65 п. л. / 0,05 п. л.).