

На правах рукописи



**Ибе Екатерина Евгеньевна**

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ  
ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ С МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ,  
СОДЕРЖАЩИМИ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ШЛАКИ**

**05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук**

**Томск 2016**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

**Научный руководитель:** **Козлова Валентина Кузьминична,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Чулкова Ирина Львовна,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СИБАДИ)», заведующая кафедрой «Строительные материалы и специальные технологии»

**Булгаков Борис Игоревич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», доцент кафедры «Технология вяжущих веществ и бетонов»

**Ведущая организация:** **ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)**

Защита состоится 20 мая 2016 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 при ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 2, ауд. 303.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2 и на сайте <http://www.tsuab.ru/ru/nauka/sovety/info-diss/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Н.О. Копаница

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Строительство гидротехнических сооружений всегда является востребованной задачей, так как при этом обеспечивается безопасность населения (дамбы, водозаборы) или осуществляется производство экологически чистой энергии (гидроэлектростанции).

Одной из причин повреждения гидротехнических сооружений является низкая коррозионная стойкость бетона. В настоящее время при наличии значительного количества работ в области гидротехнического бетона решение вопросов повышения коррозионной стойкости и снижения тепловыделения остается актуальным.

Одним из способов решения данной проблемы является разработка составов и технологий изготовления композиционного портландцемента для гидротехнического строительства, обладающего повышенной коррозионной стойкостью и умеренным тепловыделением, отсутствующего на российском рынке.

В настоящее время в целях повышения коррозионной стойкости гидротехнических бетонов рекомендуется применять сульфатостойкие портландцементы, содержащие пониженное количество трехкальциевого алюмината и трехкальциевого силиката. Однако наиболее целесообразным и менее дорогостоящим является способ повышения коррозионной стойкости бетонов, получаемых с использованием портландцементов, изготовленных на основе рядовых клинкеров с применением комплекса активных минеральных добавок, в том числе представленных отходами или побочными продуктами промышленности, что может способствовать улучшению экологической обстановки в регионах.

Для решения данного вопроса предполагается в качестве одного из компонентов комплексной активной минеральной добавки в производстве композиционных портландцементов использовать высокоглиноземистые шлаки (побочный продукт алюмотермического производства хрома), запасы которых составляют около 3 млн. тонн. Химический состав шлака представлен на 68–75 % оксидом алюминия, что позволяет предположить его эффективное применение в качестве активной минеральной добавки к портландцементу, способной повышать коррозионную стойкость бетона. Возможность применения высокоглиноземистого шлака в качестве компонента комплексной минеральной добавки при изготовлении портландцементов на данный момент изучена недостаточно. В этой связи, исследование, посвященное разработке составов гидротехнического бетона, характеризующегося повышенной коррозионной стойкостью, получаемого с использованием композиционного портландцемента, содержащего высокоглиноземистый шлак в составе комплексной минеральной добавки, является актуальной.

**Степень разработанности темы диссертационного исследования.**

Вопросы разработки составов портландцементов с повышенной коррозионной стойкостью и оценки влияния коррозии на долговечность цементного камня в бетоне нашли отражение в работах В. М. Москвина, С. Н. Алексеева, В. И. Бабушкина, В. Г. Барташевича, В. Г. Батракова, Ф. М. Иванова, В. В. Кинда, А. И. Минаса, Н. А. Мошанского, А. Ф. Полака, В. Б. Ратинова, Т. В. Рубецкой, Н.К. Розенталя, Т.В. Кузнецовой, Г.С. Кардумяна, И.В. Кравченко, И. Штарка, С.В. Федосова, Ш.М. Рахимбаева, В.К. Козловой, А.И. Кудякова, Н.М. Тольпиной и других ученых.

На современном этапе в исследованиях, ориентированных на повышение коррозионной стойкости бетона, основное внимание уделяется вопросам структурообразования цементного камня путем регулирования химико-минералогического состава применяемого портландцемента (снижения  $C_3A$ ) или применения добавок, способствующих снижению проницаемости цементного камня и бетона для компонентов агрессивной среды. Актуальным остается вопрос разработки гидротехнических бетонов повышенной коррозионной стойкости на основе портландцементов с комплексными активными минеральными добавками.

**Целью диссертационного исследования является** разработка научно обоснованных составов и технологических приемов изготовления гидротехнических бетонов, обладающих повышенной коррозионной стойкостью, на основе композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки.

**Задачи исследования:**

- обосновать выбор минеральных добавок, содержащих высокоглиноземистые шлаки, для производства композиционного портландцемента для гидротехнических бетонов и исследовать их влияние на свойства композиционных портландцементов;
- разработать составы композиционных портландцементов для гидротехнических бетонов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки и исследовать особенности структурообразования цементного камня;
- разработать составы гидротехнических бетонов и исследовать влияние композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, на свойства таких бетонов;
- разработать технологический регламент на изготовление бетонной смеси для гидротехнического бетона;
- апробировать в производственных условиях составы и технологию изготовления бетонных смесей на предлагаемых композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, и оценить экономическую эффективность их использования.

**Объект исследования:** гидротехнический бетон, изготовленный на основе композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки.

**Предмет исследования:** процессы структурообразования, свойства композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, технологические свойства гидротехнического бетона на основе указанного портландцемента.

#### **Научная новизна.**

– Установлены закономерности структурообразования и формирования заданных свойств цементного камня из композиционного портландцемента, полученного совместным помолом портландцементного клинкера с добавками высокоглиноземистого и доменного гранулированного шлаков при их соотношении 1:1, а также гидротехнических бетонов на их основе.

– Высокоглиноземистый шлак, фазовый состав которого представлен алюминатами кальция  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ , при гидратации портландцемента взаимодействует с портландитом с образованием продуктов гидратации, содержащих повышенное количество кристаллизационной воды, что приводит к повышению плотности цементного камня, снижению в нем содержания свободного гидроксида кальция и, соответственно, к существенному увеличению коррозионной стойкости гидротехнического бетона.

– Установлено, что бетонная смесь на разработанном композиционном портландцементе с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, обладает пониженным водоотделением (0,5 %) и раствороотделением (2 %), а гидротехнический бетон – повышенной прочностью при сжатии (класс В30 на 180 сутки твердения), высокой водопроницаемостью (W12) и пониженной истираемостью (0,17-1,18 г/см<sup>2</sup>).

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

– раскрыт механизм взаимодействия алюминатов кальция  $\text{CA}_2$  и  $\text{CA}_6$  с продуктами гидратации портландцементного клинкера, исследовано влияние образующихся продуктов гидратации на свойства цементного камня и бетона;

– разработан состав композиционного портландцемента класса ЦЕМ II/A-K 32,5 Н гидротехнического назначения, отличающийся тем, что содержит 20% активной минеральной добавки, состоящей из доменного гранулированного шлака и высокоглиноземистого шлака алюмотермического производства хрома, характеризующийся повышенной коррозионной стойкостью и умеренным тепловыделением;

– разработан состав бетонной смеси для производства бетонов гидротехнического назначения и получены бетоны класса В30 на 180 сутки твердения и В35 на 360 сутки, с содержанием композиционного портландцемента в количестве 440 кг/м<sup>3</sup>, отвечающие требованиям национальных стандартов к бетонам гидротехнического назначения, характеризующиеся пони-

женным водопоглощением (1,6–1,7%), высокой стойкостью против истирания (0,18 г/см<sup>2</sup>), высокой водонепроницаемостью (W 10-12);

- разработан технологический регламент на изготовление бетонной смеси для гидротехнического бетона;

- осуществлена производственная апробация предложенных составов бетонных смесей на объекте предприятия ООО ДПМК «Ачинская». Изготовлены конструкции порталных оголовков, лотков, водопропускных труб на водотоках периодического действия, контактирующие в процессе службы с агрессивными средами (грунтовыми водами и водами сезонных подтоплений), при капитальном ремонте участка автомобильной дороги М-53 (на участке 955-967 км);

- результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Хакасского технического института – филиала Сибирского федерального университета при проведении занятий по курсу «Строительные материалы», «Современные материалы, конструкции и технологии с элементами НИРС».

**Методологической основой диссертационного исследования** являются современные положения теории строительного материаловедения в области структурообразования бетонов и цементов с минеральными добавками, методики определения коррозионной стойкости против трех основных видов коррозионного воздействия на гидротехнические сооружения (коррозия выщелачивания, сульфатная и углекислотная коррозия), современные методики исследования химического, рентгенофазового, дифференциально-термического и других видов анализов.

**Достоверность результатов** и выводов по работе обеспечена методически обоснованным комплексом исследований с использованием стандартных методов испытаний, применением поверенного и аттестованного испытательного лабораторного оборудования и измерительных инструментов, обработкой результатов экспериментов статистическими методами, достаточным количеством проведенных опытов, обеспечивающих адекватность результатов.

**Личное участие автора** заключается в анализе литературных данных, в постановке цели, выборе теоретических и экспериментальных методов решения поставленных задач, в проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, участии в подготовке к публикации докладов и статей.

**На защиту выносятся:**

- разработанные составы композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, и результаты определения основных строительно-технических свойств композиционных портландцементов, в том числе коррозионной стойкости цементного камня;

- результаты исследований составов продуктов гидратации композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки;
- разработанные составы бетона на основе предлагаемого композиционного портландцемента;
- результаты оценки зависимости строительно-технических свойств бетонной смеси и бетона от вида композиционного портландцемента;
- разработанная технология изготовления гидротехнического бетона на основе предлагаемого портландцемента, включающая технологические операции по производству композиционных портландцементов с комплексной минеральной добавкой, содержащей высокоглиноземистые шлаки.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы строительства» (НГАСУ, г. Новосибирск, 2013г.);
- международной научно-практической конференции «Молодежь и наука» (СФУ, г. Красноярск, 2013г.);
- всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективные строительные материалы» (ТГАСУ, г. Томск, 2013г.);
- международной научно-практической конференции молодых ученых «Перспективные материалы в строительстве и технике» (ТГАСУ, г. Томск, 2014г.);
- всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы строительства» (НГАСУ, г. Новосибирск, 2015г.);
- внутривузовских конференциях, проводимых на базе ХТИ – филиала СФУ (г. Абакан, 2012 – 2015гг.);
- I Межрегиональной научно-практической конференции-выставке «Пути решения проблем тепло- и ресурсосбережения в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве» (ХТИ – филиал СФУ, г. Абакан, 2015).

**Публикации.** Результаты исследований изложены в 11 научных публикациях, в том числе в четырех статьях в центральных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 161 страницу машинописного текста, 31 таблицу, 40 рисунков, список литературы из 166 источников и 5 приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность работы и дается её общая характеристика, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** приведен анализ литературы, посвященной вопросу особенностей службы гидротехнических сооружений и требованиям, предъявляемым к бетонным конструкциям таких сооружений. Даны понятия о портландцементе, применяемых при строительстве гидросооружений, а также рассмотрены вопросы коррозии цементного камня и бетона, работающего в воде или в условиях переменного уровня воды.

В настоящее время основной целью современных исследований при разработке портландцементов повышенной коррозионной стойкости является регулирование их химико-минералогических составов. Однако для повышения коррозионной стойкости необходимо в первую очередь создавать цементный камень, обладающий низкой проницаемостью по отношению к компонентам агрессивной среды.

Исходя из анализа литературных данных, можно отметить, что вопрос повышения коррозионной стойкости гидротехнического бетона путем применения композиционных портландцементов с комплексными минеральными добавками, обеспечивающими получение цементного камня с пониженной пористостью, является недостаточно изученным.

**Во второй главе** приводится описание методик, применявшихся в исследованиях, а также характеристики использованных материалов.

При определении свойств исходных материалов (портландцементного клинкера, высокоглиноземистого шлака, доменного гранулированного шлака, доломита, песка, щебня, а также композиционного портландцемента с минеральными добавками, цементного теста, цементного камня, бетонной смеси и образцов бетона) применялись как стандартные методы испытаний, соответствующие ГОСТам и другим нормативным документам, так и не являющиеся стандартными методики определения содержания  $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ , стойкости цементного камня против коррозии выщелачивания, углекислотной и сульфатной коррозии, тепловыделения цементного теста и бетонной смеси.

При исследовании фазового состава были использованы: дифференциально-термический анализ (DTA), совместно с методом дифференциальной термогравиметрии (DTA-DTG), рентгенофазовый анализ (РФА), химический анализ.

Для изготовления композиционных портландцементов и гидротехнических бетонов на их основе в работе применялись следующие сырьевые материалы:

- портландцементный клинкер ОАО «Искитимцемент»;
- камень гипсовый по ГОСТ 4013–82;
- шлак доменный гранулированный;
- шлак высокоглиноземистый Ключевской обогатительной фабрики, г. Дзуреченск Свердловской области;
- доломит Таензинского месторождения;

- песок полифракционный по ГОСТ 6139–2003, изготовитель ООО «Цемсэнд», г. Подольск;
- песок речной с поймы р. Оби;
- щебень мраморный;
- суперпластификатор С-3;
- замедлитель схватывания натрий виннокислый.

Минералогический состав портландцементного клинкера ОАО «Искитимцемент» следующий:  $C_2S$  – 18,0%,  $C_3S$  – 57,0%,  $C_3A$  – 7,0%,  $C_4AF$  – 13,0%.

Шлак высокоглиноземистый по ТУ 14-00186482-048-03 является побочным продуктом алюмотермического производства хрома, осуществляемого на Ключевском заводе ферросплавов. Минералогический состав высокоглиноземистых шлаков представлен в основном однокальциевым двуалюминатом  $CA_2$  (58,7%) и однокальциевым шестиалюминатом  $CA_6$  (36,0%). Использовались высокоглиноземистые шлаки марки КВЦ 70-А, КВЦ 70-Б, КВЦ 75-А и КВЦ 75-Б.

Портландцемент ЦЕМ II / А-К 32,5Н изготавливался путем совместного помола портландцементного клинкера и минеральных добавок в заданных пропорциях в шаровой мельнице с добавкой гипса 5% до остатка на сите №008 6–8% и удельной поверхности  $S=300–320$  м<sup>2</sup>/кг.

В качестве контрольного состава использовался портландцемент ЦЕМ II/А-Ш 35,5Н. Для определения прочностных характеристик композиционного портландцемента из теста нормальной густоты изготавливались образцы кубы с ребром 2 см, а также образцы-балочки 4х4х16 см из растворной смеси с полифракционным песком по ГОСТ 30744–2001.

Образцы бетона изготавливались из бетонной смеси, состав которой рассчитан согласно ГОСТ 27006–86.

**В третьей главе** приводятся результаты определения физико-механических свойств композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки.

В качестве комплексных минеральных добавок для производства композиционного портландцемента в работе рассматриваются два варианта: первый – высокоглиноземистые шлаки с доменным гранулированным шлаком, второй – высокоглиноземистые шлаки с доломитом. Показано, что применение высокоглиноземистых шлаков в качестве компонента минеральной добавки приводит к изменению основных свойств цементного теста и цементного камня, таких как водоотделение, пористость, прочность при сжатии, коррозионная стойкость.

Портландцементы с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, отличаются пониженным водоотделением. Для портландцемента контрольного состава водоотделение составляет 20%, для состава

вов, содержащих комплексную минеральную добавку – 7,2–7,8%, а для составов, содержащих добавку 20% высокоглиноземистого шлака – 1,3–1,5%.

Изучение характера тепловыделений показало, что особенностью композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, является ускоренный процесс повышения температуры цементного теста по сравнению с портландцементом, не содержащим такой добавки. По рассчитанному показателю тепловыделения (в кДж) композиционные портландцементы с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, можно отнести к умеренотермичным.

При гидратации композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, образуется цементный камень, характеризующийся пониженной пористостью, большей плотностью. Установлено, что пористость цементного камня, полученного при твердении такого цемента, составляет 17,2–18,7 %, что значительно меньше, чем пористость цементного камня, полученного при твердении портландцемента контрольного состава (24,3 %).

Результаты определения предела прочности при сжатии приведены на рис. 1.

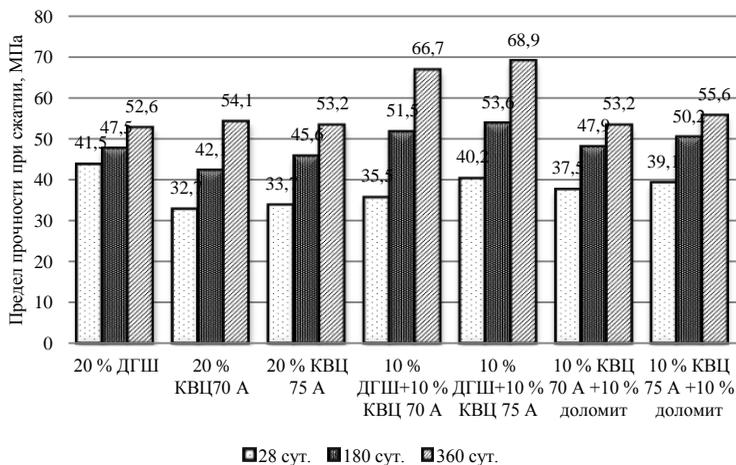


Рисунок 1 – Предел прочности при сжатии образцов-балочек с полифракционным песком в возрасте 28, 180, 360 суток (в зависимости от вида добавки к портландцементу), МПа

Установлено, что портландцементы с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, характеризуются меньшим значением предела прочности при сжатии на 28 суток твердения, чем контрольный состав. Однако в возрасте 180 и 360 суток предел прочности при сжатии

портландцементов с комплексными минеральными добавками превышает предел прочности при сжатии портландцемента контрольного состава.

Определение коррозионной стойкости цементного камня по отношению к коррозии выщелачивания, углекислотной и сульфатной коррозии показало, что портландцементы с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, характеризуются более высокой коррозионной стойкостью. Результаты определения стойкости против коррозии выщелачивания приведены на рис. 2.

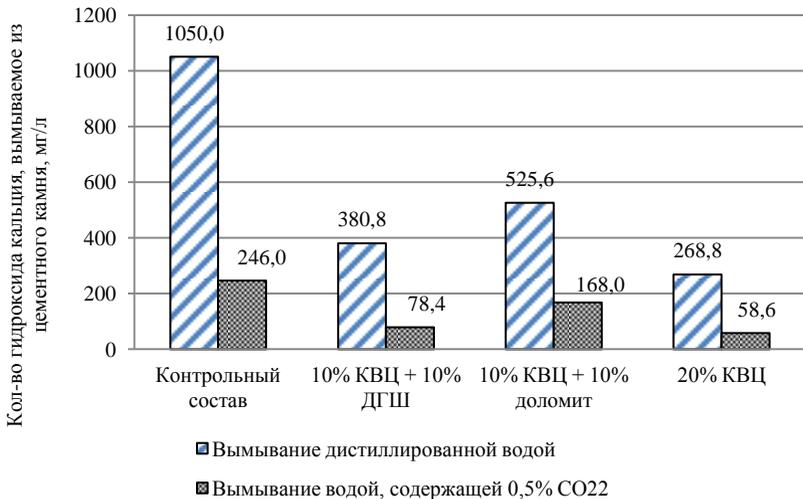


Рисунок 2 – Количество гидроксида кальция (в пересчете на  $CaO$ ), вымываемое водой из цементного камня, полученного при твердении портландцемента с комплексными минеральными добавками (в зависимости от вида добавки к портландцементу)

Использование высокоглиноземистого шлака в качестве компонента минеральной добавки приводит к значительному снижению количества гидроксида кальция, вымываемого из продуктов гидратации цементного камня, полученного при твердении композиционного портландцемента. Установлено, что вымывание дистиллированной водой происходит более интенсивно и с большим растворением продуктов гидратации, чем вымывание водой, содержащей растворенную углекислоту.

С целью определения стойкости цементного камня против углекислотной коррозии осуществлялась принудительная карбонизация цементного камня. Определялось количество углекислого газа, поглощенного продуктами гидратации в течение 144 часов. Наибольшее количество углекислого газа поглощает цементный камень контрольного состава (с добавкой 20% домен-

ного гранулированного шлака) – 275 миллиграмм  $\text{CO}_2$  на 1 грамм клинкера, наименьшее количество – цементный камень, полученный из портландцемента с добавкой 20% высокоглиноземистого шлака КВЦ 75-А – 130 миллиграмм  $\text{CO}_2$  на 1 грамм клинкера. Цементный камень из композиционного портландцемента, содержащего комплексную добавку, в результате карбонизации поглощает 150–200 миллиграмм  $\text{CO}_2$  на 1 грамм клинкера.

По результатам испытаний на сульфатостойкость (табл. 1) определено, что частичная или полная замена доменного гранулированного шлака в составе минеральной добавки к портландцементу на высокоглиноземистый шлак КВЦ, приводят к повышению сульфатостойкости образцов.

Таблица 1– Влияние состава портландцемента на сульфатостойкость цементного камня

Составы портландцементов	Количество циклов испытания до разрушения	Линейные деформации (удлинение), %
80% клинкер + 5% гипс + 20% ДГШ	17	0,10
80% клинкер + 5% гипс + 20% КВЦ 70-А	27	0,02
80% клинкер + 5% гипс + 20% КВЦ 75-А	26	0,03
80% клинкер + 5% гипс + 10% ДГШ + 10% КВЦ 70-А	35	0,03
80% клинкер + 5% гипс + 10% ДГШ + 10% КВЦ 75-А	30	0,04
80% клинкер + 5% гипс + 10% КВЦ 70-А + 10% доломит	30	0,06
80% клинкер + 5% гипс + 10% КВЦ 75-А + 10% доломит	28	0,06

По результатам комплекса испытаний установлено, что предлагаемые композиционные портландцементы с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, характеризуются улучшенными показателями основных свойств.

Установлено, что в цементном камне, полученном при твердении композиционных портландцементов с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, на 28 сутки твердения содержится меньшее количество свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (3,01–3,36%), чем в цементном камне контрольного состава (5,04%).

При гидратации композиционных портландцементов образуются гидратные фазы, содержащие большее количество химически связанной воды.

Добавленные в состав портландцемента шлаком КВЦ диортоалюминат кальция  $\text{CA}_2$  и гексаалюминат кальция  $\text{CA}_6$  приводят к изменению состава

ва продуктов гидратации в сторону образования большего количества алюминатных фаз. Дериватограммы гидратированного портландцемента контрольного состава и композиционного портландцемента приведены на рис. 3, 4.

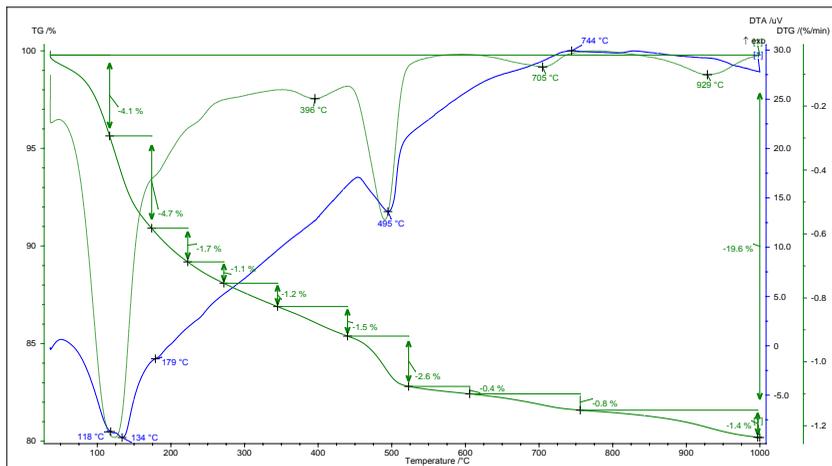


Рисунок 3 – Дериватограмма цементного камня, полученного при гидратации портландцемента контрольного состава (с добавкой 20 % доменного гранулированного шлака)

На кривой ДТА цементного камня контрольного состава (рис. 3) имеются эндотермические эффекты частичной дегидратации гидросиликатов кальция (118 °С), этtringита (134°С), разложение гидроксида кальция (495 °С, потеря массы 2,6 %).

Использование комплексной минеральной добавки, состоящей из высокоглиноземистого шлака КВЦ 70-Б и доменного гранулированного шлака в соотношении 1:1, приводит к изменению фазового состава продуктов гидратации композиционного портландцемента (рис. 4).

На дериватограмме цементного камня из композиционного портландцемента (рис. 4) имеется глубокий эндотермический эффект при температуре 120 °С с потерей массы 8,3 %, который может быть отнесен к совместным продуктам гидратации высокоглиноземистого шлака и силикатной фазы портландцемента и представляет собой алюминийзамещенные гидросиликаты кальция типа С-S-A-H. Эндотермический эффект при температуре 186 °С свидетельствует об образовании гидрокарбоалюмината кальция.

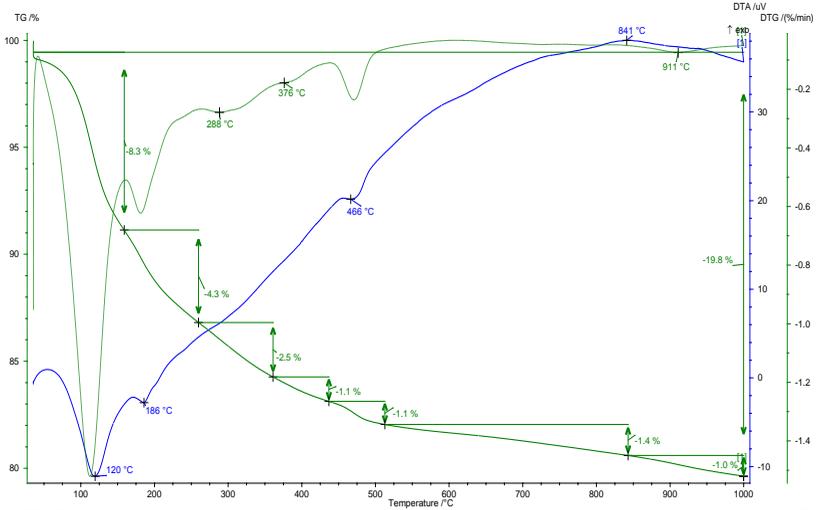


Рисунок 4 – Дериватограмма цементного камня, полученного при гидратации композиционного портландцемента с 20 % комплексной минеральной добавкой, состоящей из доменного гранулированного шлака и шлака КВЦ 70-Б в соотношении 1:1

За счет процесса гидратации двуалюмината кальция  $CA_2$  и шестиалюмината кальция  $CA_6$  с образованием гидроалюминатов различного состава снижается концентрация  $Ca(OH)_2$  в цементном тесте. Потеря массы в эндотермическом эффекте разложения гидроксида кальция (при температуре  $466^\circ C$ ) значительно уменьшилась по сравнению с контрольным составом, и составила 1,1%. При уменьшении количества гидроксида кальция снижается показателя pH среды, в результате чего отсутствуют условия для образования и роста этtringитовой фазы. Следует отметить, что на дериватограмме отсутствует температурный максимум при  $134^\circ C$ , что позволяет предположить отсутствие этtringита в составе продуктов гидратации.

Слабо выраженный эндотермический эффект при температуре  $288^\circ C$  с потерей массы 2,5 % возможно относится к частичной дегидратации гидроксида алюминия, который образуется в результате гидратации двуалюмината кальция  $CA_2$  и шестиалюмината кальция  $CA_6$ .

На рентгенограмме продуктов гидратации данного композиционного портландцемента основные дифракционные максимумы, как и для контрольного состава, характеризуют наличие свободного гидроксида кальция ( $d = (4,89; 2,64; 1,92) \cdot 10^{-10}$  м). В значительной степени остаются негидратированными клинкерные минералы  $C_3S$ , характеризующиеся дифракционными максимумами при  $d = (2,85; 2,77; 2,62) \cdot 10^{-10}$  м. Имеются дифракционные максимумы

мы при  $d = (7,27; 3,56; 2,60) \cdot 10^{-10}$  м, характерные для гидрокарбоалюмината кальция.

В продуктах гидратации всех композиционных портландцементов, содержащих добавку высокоглиноземистых отсутствуют дифракционные максимумы этtringита.

При увеличении содержания высокоглиноземистого шлака в составе портландцемента до 20 %, количество алюминатных фаз возрастает, о чем свидетельствуют более выраженные экзотермические эффекты на дериватограммах, а также дополнительные дифракционные максимумы на рентгенограммах.

**В четвертой главе** приведены результаты определения свойств бетона, изготовленного на основе композиционных портландцементов с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки. Составы бетона приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Составы гидротехнических бетонов

Условное обозначение состава бетона	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг.				
	Портланд-цемент	Песок	Щебень	Вода	С-3
КС	440	710	1100	215	0,13
№1	440	710	1100	210	0,13
№2	440	710	1100	210	0,13

Для контрольного состава бетона (КС) применялся портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5 Н. Для составов №1 и №2 применялись разработанные композиционные портландцементы ЦЕМ II/A-К 32,5 Н с комплексными минеральными добавками. Состав №1 изготавливался на основе композиционного портландцемента, содержащего 20 % комплексной минеральной добавки, состоящей из доменного гранулированного шлака и высокоглиноземистого шлака в соотношении 1:1, состав №2 – из композиционного портландцемента, содержащего 20 % комплексной минеральной добавки, состоящей из доломита и высокоглиноземистого шлака в соотношении 1:1.

У бетонных смесей, изготовленных на основе композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, значительно уменьшается водоотделение, до 0,5–0,6 % и расствороотделение - до 1,8–1,9 %. Показатели, характеризующие тепловыделение бетонных смесей контрольного и экспериментального составов, имеют близкие значения.

На рис. 5 приведены показатели прочности бетонов в различные сроки твердения. В возрасте 28 суток контрольный состав бетона при твердении в нормальных условиях обеспечивает набор прочности, соответствующий

классу В22,5. Бетоны, изготовленные на основе композиционных портландцементов, характеризуются классом В20.

В поздние сроки твердения характер набора прочности заметно изменяется. Составы бетона, приготовленные на основе композиционных портландцементов, обеспечивают более высокие показатели прочности. В возрасте 180 суток составы №1 и №2 соответствуют классу В30, в возрасте 360 суток - классу В35.

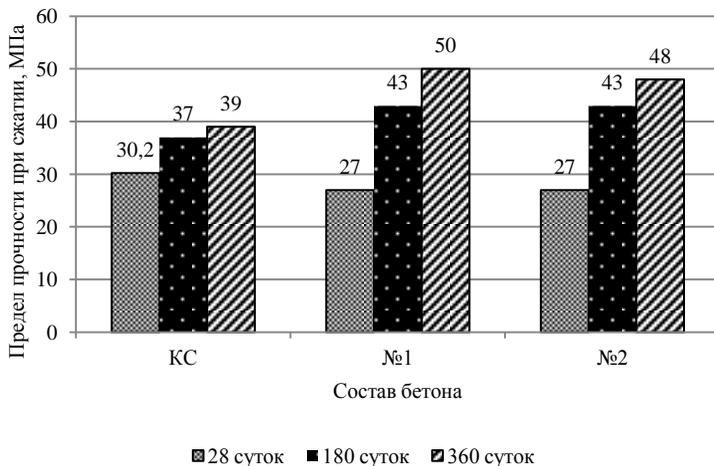


Рисунок 5 – Предел прочности при сжатии бетонов в возрасте 28, 180, 360 суток, МПа

Для всех составов бетонов были проверены строительно-технические свойства, обеспечивающие надежную работу в конструкциях.

Водонепроницаемость бетона на основе предлагаемых композиционных портландцементов, содержащих добавку высокоглиноземистых шлаков, соответствует маркам W 11–W 12, и морозостойкость соответствует марке F300, это значительно выше, чем для бетона контрольного состава. Это является одной из предпосылок длительной и надежной работы бетона в конструкции.

Истираемость бетонных образцов, изготовленных из экспериментальных составов бетонных смесей, практически в 2 раза ниже, чем истираемость бетона контрольного состава, и характеризуется значением  $0,18 \text{ г/см}^2$ .

Полученные бетоны состава №1 и №2 могут быть использованы в надводной зоне конструкции, подводной зоне, зоне переменного уровня воды (при числе циклов замораживания и оттаивания в год от 50 до 75), поскольку обладают малым водопоглощением, высокой морозостойкостью, высокой водонепроницаемостью и повышенной прочностью.

Определение коэффициентов сульфатостойкости бетонов (рис. 6) показало, что бетоны, изготовленные на композиционных портландцементе с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, отличаются повышенной стойкостью против сульфатной коррозии.

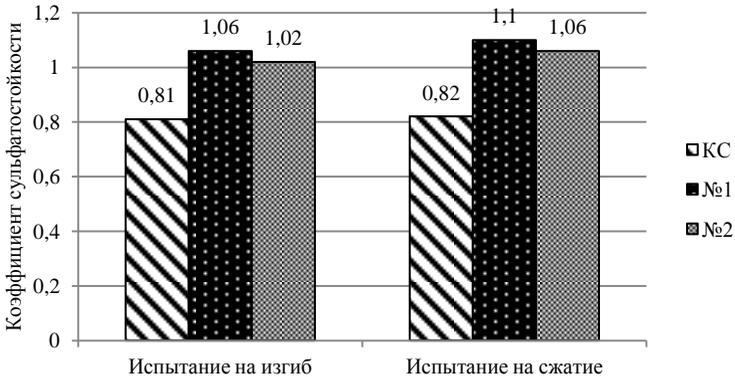


Рисунок 6 – Коэффициенты сульфатостойкости бетонов (испытание образцов на изгиб и сжатие)

**В пятой главе** представлены результаты исследований по технологии изготовления гидротехнического бетона, даны рекомендации по обеспечению условий его твердения.

Бетонные смеси гидротехнического назначения, изготовленные на композиционных портландцементе с комплексными минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, использовались для капитального ремонта участка автомобильной дороги М-53 на 955- 967 км Федеральной автомобильной дороги ООО ДПМК «Ачинская». В процессе работы осуществлялось омоноличивание водопропускных лотков, водопропускных труб, водотоков периодического действия.

Разработан технологический регламент на изготовление бетонной смеси для гидротехнического бетона, определена экономическая эффективность применения данного гидротехнического бетона.

Себестоимость производства композиционного портландцемента ЦЕМ II / А-К (Ш-ВГШ) 32,5Н составляет 2882,36 руб./тонна, для контрольного состава ЦЕМ II / А-Ш 32,5Н - 2400,08 руб./тонна. Себестоимость материалов для изготовления бетонной смеси на основе портландцемента ЦЕМ II / А-Ш 32,5Н составляет 1706,74 руб./м<sup>3</sup> смеси, композиционного портландцемента с комплексными минеральными добавками ЦЕМ II / А-К (Ш-ВГШ) 32,5Н – 1900,94 руб./м<sup>3</sup> смеси.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для получения гидротехнических бетонов повышенной коррозионной стойкости и замены сульфатостойкого портландцемента при их изготовлении предложены составы композиционных портландцементов с минеральными добавками, содержащими доменный гранулированный шлак и высокоглиноземистый шлак алюмотермического производства хрома.

Показана возможность производства гидротехнического бетона, обладающего улучшенными строительно-техническими свойствами при использовании композиционных портландцементов с использованием комплексных минеральных добавок, изготовленных на основе портландцементных клинкеров рядового минералогического состава.

2. Разработан рациональный состав минеральных добавок для производства композиционных портландцементов и изучено их влияние на свойства цементного теста и цементного камня. Показано, что водоотделение цементного теста снижается в 3-4 раза, значительно повышается плотность цементного камня и снижается в нем содержание свободного гидроксида кальция. Кроме того, полученный цементный камень обладает повышенной коррозионной стойкостью против основных видов коррозионного воздействия на гидротехнический бетон – коррозии выщелачивая, углекислотной коррозии, сульфатной коррозии.

3. Обоснован состав гидротехнического бетона, изготовленного на композиционных портландцементов. Установлено влияние рецептурно-технологических факторов на свойства бетонной смеси и бетона.

Определены основные свойства гидротехнического бетона. Показано, что они отвечают требованиям стандартов для бетонов гидротехнического назначения. Получен бетон класса В30 с морозостойкостью F300, водонепроницаемостью W10–12, истираемостью 0,18 г/см<sup>2</sup>, водопоглощением 1,6–1,7% по объёму.

4. Разработана технология изготовления гидротехнического бетона на основе композиционного портландцемента с минеральными добавками, состоящими из доменного гранулированного шлака и высокоглиноземистых шлаков.

5. Осуществлена производственная апробация предложенных составов бетонных смесей на объекте предприятия ООО ДПМК «Ачинская». Изготовлены конструкции порталных оголовков, лотков, водопропускных труб на водотоках периодического действия, контактирующие в процессе службы с агрессивными средами (грунтовыми водами и водами сезонных подтоплений), при капитальном ремонте участка автомобильной дороги М-53 (на участке 955-967 км);

Данные испытания подтвердили эффективность использования предлагаемых бетонов при устройстве конструкций, работающих в воде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к применению в практическом производстве бетонов гидротехнического назначения.

Разработанные составы и технология изготовления гидротехнического бетона рекомендуется применять при возведении гидротехнических сооружений, работающих в воде, к которым предъявляются требования по водонепроницаемости и коррозионной стойкости.

Среди перспективных направлений дальнейшей разработки темы можно отметить целесообразность развития технологии производства бетонных работ с использованием гидротехнического бетона на основе композиционного портландцемента с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки, для обеспечения возможности возведения конструкций с развитой поверхностью, подверженных воздействию агрессивной среды, в том числе в транспортном строительстве.

Для разработки составов новых типов коррозионностойких бетонов должны быть использованы результаты исследований, приведенных в данной работе.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Григорьев В.Г., Козлова В.К., **Андрюшина Е.Е.**, Шкробко Е.В., Лихошерстов А.А. Композиционные портландцементы для гидротехнического строительства // Ползуновский вестник.–2012.– №1.–С. 62–64.

2. Козлова В.К., Лихошерстов А.А., Вольф А.В., **Андрюшина Е.Е.**, Шкробко Е.В. Состав продуктов гидратации портландцемента с добавкой зол бурых углей Канско-Ачинского бассейна // Ползуновский вестник.–2011.– №1.–С. 75–78.

3. Козлова В.К., **Ибе Е.Е.** Улучшение свойств композиционного цементного камня повышенной коррозионной стойкости // В мире научных открытий / Научно-инновационный центр, Красноярск – 2013. – №7 (43). – С. 321-331

4. Себелев И.М., Соколов А.М., Маноха А.М., Божок Е.В., **Ибе Е.Е.** Композиционные портландцементы для зимнего бетонирования // Ползуновский вестник.–2014.– №1.– С. 172-176.

## Публикации в других изданиях

5. **Андрюшина Е.Е.**, Шibaева Г.Н. Композиционные вяжущие для гидротехнических бетонов // Вестник ХТИ. – 2011. – №32. –С. 135–139.
6. **Ибе Е.Е.**, Шibaева Г.Н., Панишева Ю., Федотова О. О повышении стойкости гидротехнического бетона к различным типам коррозии // Сборник докладов и тезисов докладов молодых ученых ХТИ – филиала ФГАОУ ВПО СФУ. –2012. –№12.–С. 110-112
7. Козлова В.К., **Ибе Е.Е.** К вопросу об актуализации требований, предъявляемых к цементам для гидротехнических сооружений // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: научное издание / М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва, МГСУ. – 2012.–С. 395-400.
8. Козлова В.К., **Ибе Е.Е.**, Григорьев В.Г. Композиционные цементы повышенной коррозионной стойкости // Актуальные вопросы строительства : VI Всероссийская конференция [Электронный ресурс]. – Новосибирск. – 2013. – С. 112-118
9. **Ибе Е.Е.** Композиционные цементы для гидротехнического строительства // Молодежь и наука : сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов. Аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск [Электронный ресурс]. – Красноярск. – 2013. – режим доступа <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013>.
10. **Ибе Е.Е.**, Веремейчик А.С., Шугурова А.В. Исследование добавок к цементам для гидротехнических сооружений // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 сентября 2013г. в 34 частях. Часть17 : М-во обр. и науки РФ, Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество». – 2013. – С. 47-48.
11. **Ибе Е.Е.**, Веремейчик А.С., Шугурова А.В. Влияние добавок высокоглиноземистых шлаков на свойства цементов и бетонов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции, №4, часть 3, 2014г. Изд-во ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – С. 132-135.

Подписано в печать 22.03.2016. Формат 60x84.  
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.-изд. л. 1,15.  
Тираж 120 экз. Заказ №...

Изд-во ФГБОУ ВО «ТГАСУ», 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.  
Отпечатано с оригинал макета автора в ООП ФГБОУ ВО «ТГАСУ».  
634003, г. Томск, ул. Партизанская 15.