

В  
2.11.2021

*На правах рукописи*

Коваленко Денис Сергеевич



**ТЯЖЕЛЫЕ ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ  
С ПОНИЖЕННОЙ УСАДКОЙ ИЗ ПОДВИЖНЫХ СМЕСЕЙ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Макеевка – 2021

Работа выполнена на кафедре «Городское строительство и хозяйство» в институте строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Научный руководитель: кандидат технических наук  
**Сороканич Станислав Васильевич**,  
ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», заведующий кафедрой «Городское строительство и хозяйство».

Официальные оппоненты: **Сучков Владимир Павлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, г. Нижний Новгород.

**Халюшев Александр Каюмович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии, г. Ростов-на-Дону.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»**, г. Оренбург

Защита состоится «27» января 2022 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры" по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний учёного совета. Тел. факс: +38(062) 343-70-33, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

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

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 01.006.02



Лахтарина Сергей Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Бетонные смеси высокой подвижности имеют широкое применение в технологии монолитного и сборно-монолитного строительства, при бетонировании густоармированных конструкций, при наличии труднодоступных для уплотнения мест, конструкций со значительным модулем открытой поверхности и применении бетононасосов в процессе строительства как наиболее эффективного способа укладки. Для цементобетонных покрытий полов промышленных зданий, фундаментов под технологическое оборудование, покрытий автомобильных дорог, конструкций многоэтажных автостоянок, взлетно-посадочных полос аэропортов, мостовых сооружений из бетона класса по прочности не ниже В30, а значит с повышенным расходом цемента требуемая подвижность бетонных смесей должна достигаться без снижения показателей прочностных свойств и, особенно, без значительных усадочных деформаций получаемого бетона. Одним из современных способов регулирования деформационных свойств бетона является применение минеральных расширяющих добавок в составе комплексных модификаторов, которые способны влиять на микроструктуру бетона и его свойства. Однако, применение зарубежных фирменных расширяющих добавок приводит к повышению стоимости бетона. В связи с этим, исследования по разработке комплексных модификаторов на основе расширяющей добавки из отхода промышленности Донбасса, микрокремнезема и поликарбоксилатного суперпластификатора позволяют обеспечить получение бетонов с пониженными показателями усадочных деформаций из смесей с высокой подвижностью.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам регулирования и снижения собственных деформаций бетонов посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых: С.В. Александровского, И.Н. Ахвердова, Ю.М. Баженова, О.Я. Берга, П.П. Будникова, А.Е. Десова, А.И. Звездова, В.И. Калашникова, Т.В. Кузнецовой, Р. Лермита, Н.А. Мощанского, О.П. Мchedлов-Петросяна, Г.В. Несветаева, И.П. Павловой, М.Ю. Титова, З.Н. Цилосани, А.Е. Шейкина, М. Collepardi, A.B. Eberhardt, M. Wyrzykowski и других. Однако, стоит отметить, что фундаментальные исследования, связанные с усадкой бетона, были в большей мере связаны с классическими цементными бетонами, формируемыми в основном по заводским технологиям, что, в свою очередь, предполагало использование малоподвижных и жестких бетонных смесей. В современных условиях строительства, как правило, формируют монолитные бетонные, железобетонные изделия и конструкции из смесей с высокой подвижностью, а также сборные, но требующие минимизации вибрационных воздействий. Вопросы высокоподвижных смесей, содержащих различные комплексы минеральных добавок, которые, в свою очередь, вмещают расширяющие добавки, изучены недостаточно.

**Цель исследования** – теоретическое и экспериментальное обоснование получения тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из высокоподвижных смесей на основе установления закономерностей влияния состава комплексных модификаторов (два типа расширяющей добавки, активная

минеральная добавка, суперпластификатор и добавка, снижающая усадку) на структурообразование и свойства бетонной смеси и бетона.

**Задачи исследования:**

- выполнить анализ существующих представлений о составе, структуре и свойствах тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей и влиянии комплексных модификаторов на структурообразование бетонных смесей и бетонов;
- исследовать влияние комплексных модификаторов: два типа расширяющей добавки, суперпластификатор, микрокремнезем и добавка, снижающая усадку, на свойства цементного теста и бетонных смесей;
- изучить кинетику твердения бетона с комплексными модификаторами;
- установить закономерности влияния комплексных модификаторов на формирование состава продуктов гидратации цементного камня;
- выполнить оптимизацию состава комплексных модификаторов тяжелого цементного бетона с пониженной усадкой из подвижных смесей по критериям подвижности бетонной смеси и прочности бетона при сжатии;
- исследовать влияние комплексных модификаторов на усадку и эксплуатационные свойства бетона;
- оценить технико-экономические показатели разработанных составов модифицированного тяжелого бетона при осуществлении опытно-промышленного внедрения;
- разработать инструкцию по производству бетонных смесей в условиях модернизированного бетонно-растворного узла для тяжелых бетонов с пониженной усадкой, включающих комплексные модификаторы.

*Объект исследования* – тяжелые цементные бетоны с пониженной усадкой, включающие комплексные модификаторы.

*Предмет исследования* – процессы и явления, определяющие закономерности формирования структуры и свойств тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей, содержащих комплексные модификаторы.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

- осуществлено теоретическое и экспериментальное обоснование получения тяжелых бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей за счет использования комплексных модификаторов, содержащих расширяющие добавки, активную минеральную добавку (микрокремнезем), поликарбоксилатный суперпластификатор и добавку SRA, снижающую усадочные деформации;
- установлено, что введение расширяющей добавки сульфоалюминатного типа в бетонную смесь приводит к расширению твердеющего бетона в раннем возрасте, что подтверждается рентгенофазовым анализом, в частности, повышением интенсивности дифракционных отражений линий этtringита ( $d=0,388$ ;  $0,349$ ;  $0,220$  нм), а при введении расширяющей добавки оксидносульфоалюминатного типа помимо интенсивного роста этtringита дополнительное образование  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $d=0,263$ ;  $0,193$ ;  $0,179$  нм);
- установлено, что комплексные модификаторы с расширяющими добавками, как на основе шамотно-каолиновой пыли и гипса, так и с введением шамотно-

каолиновой пыли, гипса и извести, в составе тяжелых бетонов снижают усадочные деформации и повышают прочность, среднюю плотность, водонепроницаемость, морозостойкость;

- определены области оптимальных составов комплексных модификаторов бетонных смесей по содержанию расширяющих добавок и поликарбоксилатного суперпластификатора для получения бетонных смесей с показателем подвижности по осадке конуса в пределах 16-21 см, при достаточно высоком расходе цемента, обеспечивающих снижение усадки бетона.

#### **Практическое значение полученных результатов:**

- разработана инструкция по производству бетонных смесей в условиях модернизированного бетонно-растворного узла для тяжелых бетонов с пониженной усадкой, включающих комплексные модификаторы;

- определена технико-экономическая эффективность применения разработанных комплексных модификаторов в подвижных бетонных смесях для получения тяжелого бетона с пониженной усадкой;

- результаты исследований внедрены в учебный процесс Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля при подготовке студентов по направлению 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» в курсах дисциплин: «Строительные материалы», «Перспективы развития строительного материаловедения, ресурсо- и энергосбережение в городском строительстве».

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования выполнены согласно стандартным и специальным методам с использованием аттестованных средств измерительной техники и испытательного оборудования. Состав продуктов гидратации вяжущего установлен по данным рентгенофазового анализа, выполненного на установке "Дрон-4-07". Оптимизация состава бетонов выполнена с помощью математических моделей. Для обработки и анализа результатов экспериментов применены методы математической статистики.

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

- обоснование возможности получения тяжелых бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей с высоким расходом цемента на основе установления закономерностей влияния комплексных модификаторов, содержащих расширяющие добавки, на процессы формирования структуры и свойств бетона;

- результаты экспериментальных исследований влияния комплексных модификаторов с расширяющими добавками на свойства бетонных смесей и бетонов;

- результаты оптимизации составов комплексных модификаторов тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей.

**Степень достоверности результатов работы** обеспечивается выполнением экспериментальных исследований на современном и поверенном стандартном оборудовании; статистической обработкой полученных результатов с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний с

сопоставлением результатов с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

**Апробация диссертационной работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры строительных конструкций Луганского НАУ (2017-2019 гг.) и ежегодных научно-технических конференциях строительного факультета ЛНАУ (2017-2019 гг.). Материалы диссертации докладывались также на: XVI-XX международные конференции "Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий" (г. Макеевка, ГОУ ВПО «ДонНАСА», 2017-2021 гг.); II-V международные научно-практические конференции "Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации" (г. Луганск, ГОУ ВПО ЛНУ им. В.И. Даля, 2017-2020 гг.); научно-практической конференции с международным участием "Проблемы и перспективы современной науки" (межотраслевой) (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 11-15 декабря 2017 г.); I-II международные научно-технические конференции "Реконструкция и восстановление Донбасса. Строительные материалы, конструкции и изделия" (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 28 ноября 2018-2019 гг.); международной конференции "Научные чтения памяти доцента кафедры технологии строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько" (г. Макеевка, ГОУ ВПО «ДонНАСА», 27 декабря 2018 г.); научно-практической конференции "Интеграция науки и практики как условие продовольственной безопасности" (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 23 января 2019 г.); научно-практической конференции с международным участием «Электроповерхностные явления при формировании структуры строительных материалов на основе минеральных и органических вяжущих веществ (посвящена 65-летию кафедры ТСКИиМ и 70-летию д.т.н., проф. Матвиенко В.А.)» (г. Макеевка, ГОУ ВПО «ДонНАСА», 25 декабря 2020 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 15 научных статьях, в том числе шесть публикаций – в рецензируемых научных изданиях, пять публикаций – в материалах научных конференций, четыре публикации – в других изданиях.

Общий объем публикаций – 4,56 п.л., из которых – 2,96 п.л. принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников (147 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет 154 страницы, в том числе 112 страниц основного текста, 22 полных страниц с рисунками и таблицами, 15 страниц списка использованных источников, пять страниц приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы теоретические предпосылки и научная гипотеза, цель и задачи диссертационного исследования, указаны научная новизна и практическое значение работы, приведена информация о структуре и объеме диссертации, публикациях и апробации работы.

**В первом разделе** проанализировано современное состояние вопроса по проблеме усадочных деформаций в строительных изделиях и конструкциях с большим модулем открытой поверхности из цементного бетона, изложены теоретические предпосылки исследований, на основе которых сформулирована научная гипотеза диссертационного исследования.

Усадочные деформации бетона связаны с химическими и физическими процессами, происходящими при взаимодействии цемента с водой, изменением влажности цементного камня при его высыхании, а также при взаимодействии продуктов гидратации с проникающими из внешней среды компонентами.

Для получения бетонов с пониженной усадкой особое место занимают расширяющие добавки, при введении которых при твердении портландцемента происходит увеличение линейных размеров, что позволяет обеспечить высокую трещиностойкость и долговечность конструкций. Благодаря этому бетон с расширяющими добавками нивелирует значительные усадочные деформации.

Анализируя данные, представленные в отечественной и зарубежной литературе, расширяющие добавки можно разделить условно на четыре типа: сульфоалюминатная, оксидная, оксидносульфоалюминатная и сульфоферритная.

В качестве сульфоалюминатной расширяющей добавки обычно выступает смесь из высокоглиноземистого и сульфатного компонента. В этом типе добавки расширение осуществляется при взаимодействии алюминатных и сульфатсодержащих фаз с образованием игольчатых кристаллов этtringита. Сульфоалюминатная добавка является широко распространенной и достаточно изученной. И в большинстве зарубежных научных трудах и патентах описывается получение данной добавки путем высокотемпературного обжига специально подготовленных материалов либо смешиванием глиноземистого компонента с сульфатным, в частности, метакеолин с гипсом.

Расширение добавки оксидносульфоалюминатного типа происходит как за счет образования гидросульфоалюмината кальция, также называемого этtringитом, так и за счет гидрооксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (по аналогии с оксидной группой). Механизм расширения возможен при введении в состав бетона свободной извести и при применении глиноземосодержащей и сульфосодержащей добавок. Получение расширяющих добавок данной группы отражены во многих работах и патентах исследователей. В зарубежных исследованиях данную добавку готовят путем обжига смеси из глины, извести и боксита или сульфата кальция, извести и глины. В своей работе Титов М.Ю. испытал комплексную расширяющую добавку из циклонной пыли керамзитового производства в качестве глиноземистого компонента, гипсовый камень в качестве сульфатного и обожженный доломит, как оксидный компонент.

Для создания тяжелых бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей целесообразно разработать комплексные модификаторы на основе расширяющих добавок из местного сырья, как альтернативу дорогостоящим фирменным зарубежным добавкам. Возможно разработать два типа расширяющих добавок: сульфоалюминатную на основе шамотно-каолиновой пыли в качестве глиноземсодержащего компонента и гипса в роли сульфатного материала, и



оксидноалюминатную, где к двум вышеописанным компонентам добавляется оксидный – известь.

На основании анализа состояния вопроса и теоретических предпосылок исследования выдвинута следующая **научная гипотеза**. Введение в состав тяжелых бетонов из подвижных смесей комплексных модификаторов на основе расширяющих добавок, состоящих из шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести, способствует формированию повышенного количества гидросульфоалюмината кальция, а также дополнительному образованию гидроксида кальция, которые вызовут расширение системы в раннем возрасте, что позволит снизить усадочные деформации, а в последствии также повлияет на снижение влажностной усадки и повысит эксплуатационные свойства тяжелых бетонов.

**Во втором разделе** приведены свойства исходных материалов, изложены методы проведения исследований.

При выполнении экспериментальных исследований в качестве исходных материалов были использованы следующие материалы:

- портландцемент типа ЦЕМ I 42,5 Н производства ОАО "Новоросцемент" (г. Новороссийск, РФ), отвечающий требованиям ГОСТ 31108-2016 "Цементы общестроительные. Технические условия" ( $S_{уд.}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;  $НГ=26,2 \%$ ,  $R_{28}=52,7 \text{ МПа}$ );

- заполнители: щебень Торезского карьера Донецкой области, смесь фракций 5-20 мм, насыпная плотность  $1410 \text{ кг/м}^3$ , содержание зерен игольчатой формы  $12,5 \%$  (ГОСТ 8267-93 "Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия"); природный кварцевый песок Лутугинского песчаного карьера Луганской области с  $M_k=1,35$  (ГОСТ 8736-2014 "Песок для строительных работ. Технические условия");

- активная минеральная добавка – микрокремнезем Стахановского завода ферросплавов с насыпной плотностью  $620 \text{ кг/м}^3$ . Химический состав представлен оксидами:  $\text{SiO}_2 - 82,8\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,6\%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 3,0\%$ ;  $\text{CaO} - 1,1\%$ ;  $\text{MgO} - 0,2\%$ ;  $\text{K}_2\text{O} - 0,6\%$ ;  $\text{SO}_3 - 3,6\%$ ; ППП –  $7,1\%$ .

- два типа расширяющей добавки представлены порошкообразной смесью шамотно-каолиновой пыли и гипса (сульфоалюминатная – СА) или шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести (оксидосульфоалюминатная – ОСА). В качестве добавки, содержащей глинозем, принята шамотно-каолиновая пыль, которая образуется как побочный продукт при обжиге каолина Владимировского месторождения во вращающихся печах ЧАО "Великоанадольский огнеупорный комбинат" (пос. Владимировка, Донецкая область). Химический состав и свойства шамотно-каолиновой пыли представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав и свойства шамотно-каолиновой пыли

Содержание оксидов, %							ППП, %	Насыпная плотность, $\text{кг/м}^3$	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$			
51,0	37,3	1,05	0,31	0,16	0,15	0,05	2,5	450-700	400-500



- сульфатным компонентом расширяющей добавки является двуводный гипс по ГОСТ 4013-2019 "Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия". Оксидным компонентом принята известь, соответствующая ГОСТ 9179-2018 "Известь строительная. Технические условия";

- в качестве контрольной расширяющей добавки применяли фирменную порошкообразную добавку "Expancrete" (Exp) производства итальянской фирмы "Mapei";

- химические добавки: суперпластификатор "MasterGlenium 115" (BASF, Германия) на основе эфира поликарбоксилата, представляющий собой жидкость светло-желтого цвета плотностью 1,05...1,09 кг/л; добавка, снижающая усадку бетона "Marpesure SRA" (Mapei, Италия) на основе полипропиленгликолиевого полимера, в виде бесцветной жидкости плотностью 0,8...0,9 кг/л.

При выполнении экспериментальных исследований использовались стандартные методы. Структурообразование и состав продуктов гидратации модифицированных портландцементов исследованы с помощью рентгеновской дифрактометрии.

Состав продуктов гидратации модифицированного цементного камня оценивали с помощью рентгенофазового анализа, выполненного на установке "Дрон-4-07" при следующих условиях съемки дифрактограмм (одинаковые для всех образцов): медное излучение с длиной волны  $\lambda=0,154178$  нм при ускоряющем напряжении 27 кВ и токе 15 мА; щели для съемки  $0,5 \times 4 \times 0,25$  мм. Съемка дифрактограмм осуществлялась в пошаговом режиме ( $2\theta=10-80^\circ$  шагом  $0,1^\circ$  и временем экспозиции 5 с).

Оптимизацию составов бетона выполняли с применением метода математического планирования эксперимента (ПФЭ  $2^k$ ). Статистический анализ и обработку полученных результатов выполняли на основе статистических моделей. Графическую интерпретацию уравнений выполняли с использованием программного комплекса "MathCAD for Windows".

Прочность на сжатие цементного камня определена на образцах размером  $0,03 \times 0,03 \times 0,03$  м, бетона - на образцах размером  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Деформации усадки измеряли на призматических образцах  $0,1 \times 0,1 \times 0,4$  м в соответствии с ГОСТ 24544-81 "Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести". Морозостойкость бетонных образцов определяли в проектном возрасте в соответствии с ГОСТ 10060-2012 "Бетоны. Методы определения морозостойкости" вторым ускоренным методом. Показатели водонепроницаемости определяли согласно ГОСТ 12730.5-84 "Бетоны. Методы определения водонепроницаемости" на образцах-цилиндрах диаметром 0,15 м, высотой 0,10 м.

**В третьем разделе** приведены результаты исследований влияния комплексных модификаторов на основе расширяющих добавок сульфоалюминатного или оксидосульфоалюминатного типов, микрокремнезема, поликарбоксилатного суперпластификатора и добавки SRA на технологические и

физико-механические свойства цементного теста и камня, бетона и на состав продуктов гидратации цемента.

Для определения реологических свойств модифицированного цементного теста использовали вискозиметр Суттарда, с помощью которого оценивали изменение текучести смеси и ее изменение во времени по величине расплыва цементного теста.

Для экспериментальных исследований цементного теста были приняты четыре варианта составов (с введением добавки, снижающей усадку SRA, и без неё):

- 1) (ПЦ+МК+Exp)+(В+СП);
- 2) (ПЦ+МК+ CA)+(В+СП);
- 3) (ПЦ+МК+ Exp)+(В+СП+SRA);
- 4) (ПЦ+МК+ CA)+(В+СП+SRA).

Кроме того, в указанных составах сульфоалюминатная расширяющая добавка – СА вводится в количестве 5, 10, 15% от массы цемента. Дозировка фирменной добавки "Expaccrete" принята в соответствии с рекомендациями производителей. Водотвердое отношение принято с учетом равнозначности расплыва теста контрольных составов №1 и 2 с составами, содержащими расширяющие добавки. Составы представлены в таблице 2.

Таблица 2

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста						В/Т
	ПЦ, г	МК, %	Exp, %	СА, %	СП, %	SRA, %	
1	600	10	-	-	1,3	-	0,27
2	600	10	-	-	1,3	1,5	0,27
3	600	10	7	-	1,3	-	0,28
4	600	10	7	-	1,3	1,5	0,28
5	600	10	-	5	1,3	-	0,28
6	600	10	-	5	1,3	1,5	0,28
7	600	10	-	10	1,3	-	0,3
8	600	10	-	10	1,3	1,5	0,3
9	600	10	-	15	1,3	-	0,32
10	600	10	-	15	1,3	1,5	0,32

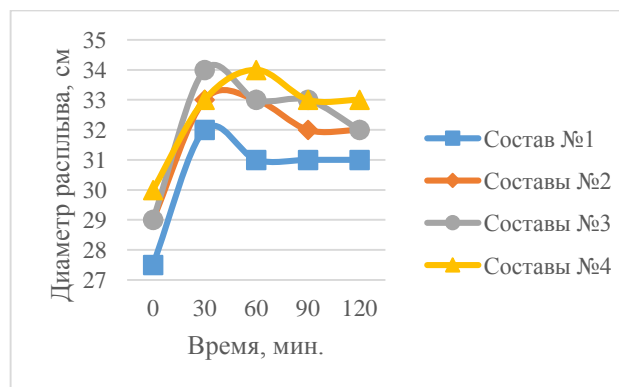


Рис. 1. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1-4)

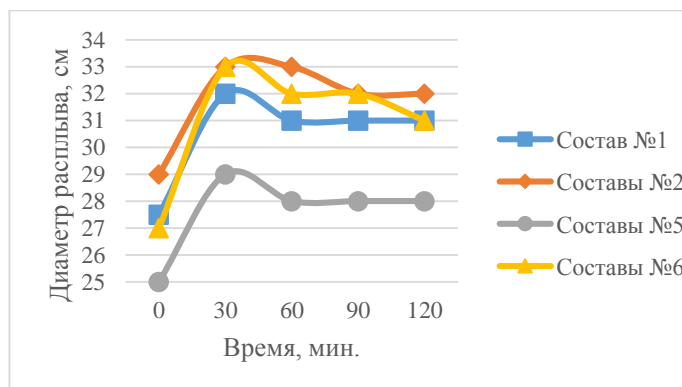


Рис. 2. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 5, 6)

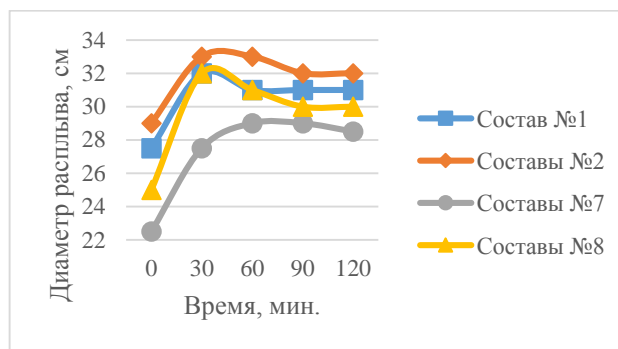


Рис. 3. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 7, 8)

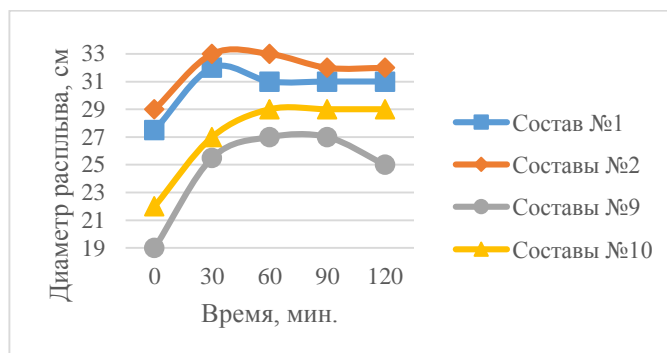


Рис. 4. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 9, 10)

Из данных, приведенных на рисунках 1-4, установлено, что начальный расплыв теста контрольного состава №1 составляет 27,5 см, через 30 минут выдерживания увеличивается до 32 см и в течение последующих 90 минут снижается до 31 см. Повышение диаметра расплыва в течение первого получаса и сохранение её до 120 минуты, вероятно, связано с поздней стабилизацией стерического эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора "MasterGlenium 115". Введение жидкой химической добавки, снижающей усадку SRA (состав №2), повышает начальный расплыв теста на 5,45% ( $D=29$  см). При дальнейшем выдерживании прослеживается та же тенденция увеличения диаметра расплыва в течение часа и его сохранения до 120 минут, что и в составе №1, при этом в двухчасовой срок диаметр расплыва выше на 6,45% ( $D=33$  см).

Выявлено, что при введении в цементное тесто расширяющей добавки "Expancrete" (состав №3) начальный диаметр расплыва также повышается на 5,45% ( $D=29$  см), и в течение 120 минутной выдержки смеси её расплыв выше контрольного состава на 1-2 см.

Установлено, что применение расширяющей добавки СА в цементном тесте (составы №5-10) в большей степени влияет на его расплыв по сравнению с контрольным составом №1 (рисунок 2-4). При этом, величина снижения расплыва зависит от количества вводимой добавки: при содержании СА в количестве 5% от массы цемента (состав №5) первоначальный диаметр расплыва снижается на 9,1% ( $D=25$  см), при 10% (состав №7) – на 18,2% ( $D=22,5$  см), а при 15% (состав №9) до 30,9% ( $D=19$  см). Данное явление, вероятно, связано с применением в качестве глиноземсодержащего компонента расширяющей добавки шамотно-каолиновой пыли, имеющую высокую водопотребность.

Для определения влияния расширяющей добавки СА на прочностные характеристики цементного камня выполнены экспериментальные исследования на образцах, составы которых и результаты приведены в таблице 3.

Выявлено, что введение расширяющей добавки СА в состав цементного теста снижает прочность при сжатии в возрасте 3 суток на 5,27-18,9% (составы №№2-10) по сравнению с контрольным составом №1. Это может быть обусловлено влиянием расширяющего компонента при совместном действии с суперпластификатором на раннее твердение.

Таблица 3

## Составы цементного теста и прочностные показатели цементного камня

№ состава	Компоненты цементного теста				В/Т	Прочность при сжатии МПа, сут			
	ПЦ, г	МК, %	СА, %	СП, %		3	7	14	28
			ШКП:Г						
1	600	10	-	1,3	0,27	55	63,3	72,8	75
2	600	10	5	1,3	0,28	47,6	58,3	68,2	74,8
			50:50						
3	600	10	5	1,3	0,28	49,0	60,2	69,4	77,2
			60:40						
4	600	10	5	1,3	0,28	52,1	63,0	73,5	79,5
			70:30						
5	600	10	10	1,3	0,3	49,5	59,9	67,4	73,3
			50:50						
6	600	10	10	1,3	0,3	50,3	65,2	71,3	78,1
			60:40						
7	600	10	10	1,3	0,3	48,4	64,6	79,3	90,5
			70:30						
8	600	10	15	1,3	0,32	47,2	55,3	62,1	72,9
			50:50						
9	600	10	15	1,3	0,32	46,9	57,6	69,3	78,2
			60:40						
10	600	10	15	1,3	0,32	44,6	56,2	74,8	80,1
			70:30						

Установлено, что в проектном возрасте твердения наибольший прирост прочности по сравнению с контрольным составом №1 наблюдается у составов с соотношением шамотно-каолиновой пыли к гипсу 70:30, а именно: у состава с 5% (состав №4) расширяющей добавки СА на 2,9%, с 10% добавки (состав №7) на 20,6% и с 15% (состав №10) – 6,8%. Результаты экспериментальных исследований дали основание считать оптимальным содержанием расширяющей добавки СА в цементном тесте 10% от массы цемента при количественном соотношении шамотно-каолиновой пыли и гипса 70:30.

Для определения влияния расширяющей добавки ОСА на свойства цементного теста экспериментальные исследования выполнены на образцах, составы которых представлены в таблице 4.

Таблица 4 Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста					В/Т
	ПЦ, г	МК, %	ОСА, %	СП, %	SRA, %	
1	600	10	-	1,3	-	0,27
2	600	10	-	1,3	1,5	0,27
3	600	10	5	1,3	-	0,28
4	600	10	5	1,3	1,5	0,28
5	600	10	10	1,3	-	0,3
6	600	10	10	1,3	1,5	0,3
7	600	10	15	1,3	-	0,32
8	600	10	15	1,3	1,5	0,32

Установлено, что применение расширяющей добавки ОСА в цементном тесте (составы №3, 5, 7) несколько снижает его начальный диаметр расплыва по сравнению с контрольным составом №1 (рисунок 5, 6, 7).

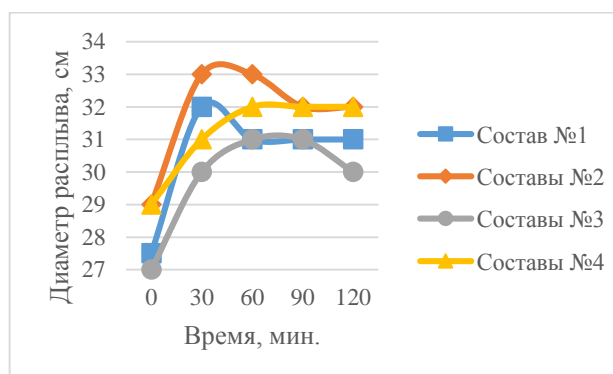


Рис. 5. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1-4)

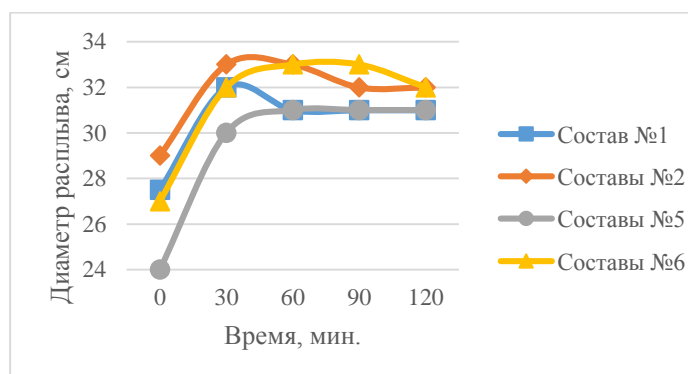


Рис. 6. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 5, 6)

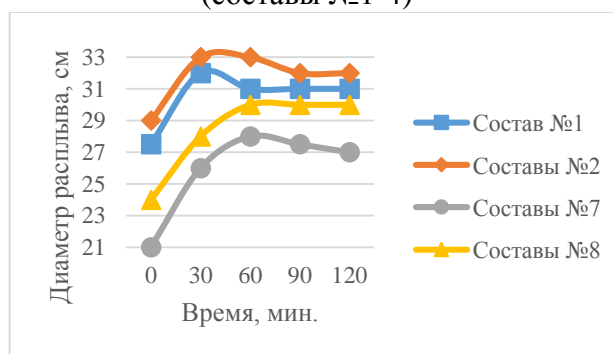


Рис. 7. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 7, 8)

Выявлена та же тенденция, что и при введении расширяющего компонента СА, а именно, зависимость расплыва теста от количества вводимой добавки: при содержании ОСА в количестве 5% от массы цемента (состав №3) первоначальный диаметр расплыва снижается на 1,82% ( $D=27$  см), при 10% (состав №5) – на 12,73% ( $D=24$  см), а при 15% (состав №7) до 23,64% ( $D=19$  см). При этом, как в контрольном составе №1, в составах, модифицированных расширяющими добавками наблюдается

повышение диаметра расплыва цементного теста при выдерживании его в первые 60 минут и последующая стабилизация до 120 минуты. У состава №3 повышение диаметра расплыва теста в течение 60 минут по сравнению с первоначальном расплывом составляет 14,8% ( $D=31$  см), у состава №5 на 29,2% ( $D=31$  см) и состава №7 – 33,3% ( $D=28$  см). Динамика изменения диаметра расплыва цементного теста у составов №3 и №5 с 60 по 120 минуты аналогичны величинам расплыва теста контрольного состава №1. Введение химической добавки SRA в составы с расширяющей добавкой ОСА (составы №4, 6, 8) повышает расплыв теста по сравнению с составами аналогами без этой добавки (составы №3, 5, 7). Повышение диаметра расплыва у состава №4 на всем протяжении выдержки цементного теста составляет от 3,22 до 7,4%, состава №6 – от 3,22 до 12,5% и у состава №8 – 7,14-14,3%.

Для определения влияния расширяющей добавки ОСА на прочностные характеристики цементного камня выполнены экспериментальные исследования на образцах, составы которых и результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5

## Составы цементного теста и прочностные показатели цементного камня

№ состава	Компоненты цементного теста				В/Т	Прочность при сжатии МПа, сут			
	ПЦ, г	МК, %	ОСА, %	СП, %		3	7	14	28
			ШКП:Г:И						
1	600	10	-	1,3	0,27	55	63,3	72,8	75
2	600	10	5	1,3	0,28	49,3	61,7	69,9	74,4
			45:50:5						
3	600	10	5	1,3	0,28	56,1	63,4	72,1	76,7
			55:40:5						
4	600	10	5	1,3	0,28	54,3	65,8	70,3	78,1
			65:30:5						
5	600	10	10	1,3	0,3	43,9	60,2	71,8	76,2
			45:50:5						
6	600	10	10	1,3	0,3	53,4	62,7	73,1	79,6
			55:40:5						
7	600	10	10	1,3	0,3	52,5	64,8	75,9	85,2
			65:30:5						
8	600	10	15	1,3	0,32	44,3	59,6	66,5	71,9
			45:50:5						
9	600	10	15	1,3	0,32	49,5	56,3	68,4	75,8
			55:40:5						
10	600	10	15	1,3	0,32	46,5	57,7	72,9	79,7
			65:30:5						

Как следует из таблицы 5, прочность при сжатии цементного камня в возрасте трех суток при введении расширяющей добавки ОСА снижается на 1,27-20,2% (составы №№2, 4-10) по сравнению с контрольным составом №1, что также, как и при введении расширяющей добавки СА, объясняется негативным влиянием периода развития процесса расширения. Установлено, что использование расширяющей добавки ОСА в количестве 10% от массы цемента (составы №5-7) при любой вариации компонентов внутри неё повышает прочность в возрасте 28 суток цементного камня на 1,6...13,6% по сравнению с контрольным составом №1. Введение добавки ОСА в количестве 15% способствует незначительному увеличению прочности при сжатии цементного камня до 6,3% при соотношении компонентов расширяющей добавки 55:40:5 и 65:30:5. Следует отметить, что, как и при использовании расширяющей добавки СА, так и при введении добавки ОСА, уменьшение количества шамотно-каолиновой пыли и увеличение количества гипса в составе добавок приводит к снижению прочности цементного камня.

По результатам экспериментальных исследований принято оптимальное содержание расширяющей добавки ОСА в цементном тесте 10% от массы цемента при количественном соотношении шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести 65:30:5.

Для исследования процессов гидратации были приняты: контрольный состав №1, состав с расширяющим фирменным компонентом "Expancrete" и модифицированные составы с максимальными показателями прочности.

Составы растворов для изготовления образцов цементного камня для рентгенофазового анализа приведены в таблице 6. Рентгенограммы образцов цементного камня представлены на рисунке 8.

Таблица 6

Составы цементного камня для рентгенофазового анализа

Наименование компонента	Ед. изм.	Составы, №			
		1	2	3	4
Портландцемент	г	600	600	600	600
Микрокремнезем	%	10	10	10	10
Суперпластификатор	%	1,3	1,3	1,3	1,3
"Expancrete"	%	-	7	-	-
Добавка СА	%	-	-	10	-
Добавка ОСА	%	-	-	-	10
В/Т	-	0,27	0,28	0,3	0,3

Для образцов цементного камня №2-4 дифракционные отражения основных линий гидросиликатов кальция ( $d=0,501$ ;  $0,307$ ;  $0,247$ ;  $0,210$ ;  $0,199$ ;  $0,183$ ;  $0,140$  нм) характеризуются как ростом, так и снижением их интенсивностей по сравнению с контрольным составом №1. Прирост прочности составов с расширяющими добавками объясняется ростом линий гидроалюмината кальция типа  $C_3AH_6$  ( $d=0,281$ ;  $0,230$ ;  $0,204$  нм). Отмечается уменьшение количества линий гидросульфоалюмината кальция ( $d=0,388$ ;  $0,349$ ;  $0,261$ ;  $0,220$  нм) во всех составах, при этом относительная интенсивность выше в модифицированных образцах, особенно у составов с добавками СА и ОСА (№3, 4). Эти данные подтверждают положительное влияние мелкодисперсных расширяющих добавок на гидратацию и твердение цементного камня, так как кристаллы этtringита образуют большое число активных центров кристаллизации, способствующих увеличению количества гидратных новообразований в единице объема и формированию более плотного и прочного цементного камня.

Позитивное действие расширяющих добавок на структурообразование цементного камня обусловлено образованием повышенного количества стабильных гидроалюминатов кальция типа  $C_3AH_6$  и гидросульфоалюмината кальция. Также результаты рентгенофазовых исследований составов с комплексными модификаторами на основе сульфоалюминатной и оксидосульфоалюминатной расширяющих добавок свидетельствуют о том, что основой расширения цементного камня в раннем возрасте будет являться образование гидросульфоалюмината кальция, при этом отсутствие несвязанного гипса в возрасте 28 суток может свидетельствовать о том, что дополнительное образование этtringита при эксплуатации сооружений из бетона, включающих в состав данные добавки, невозможно.



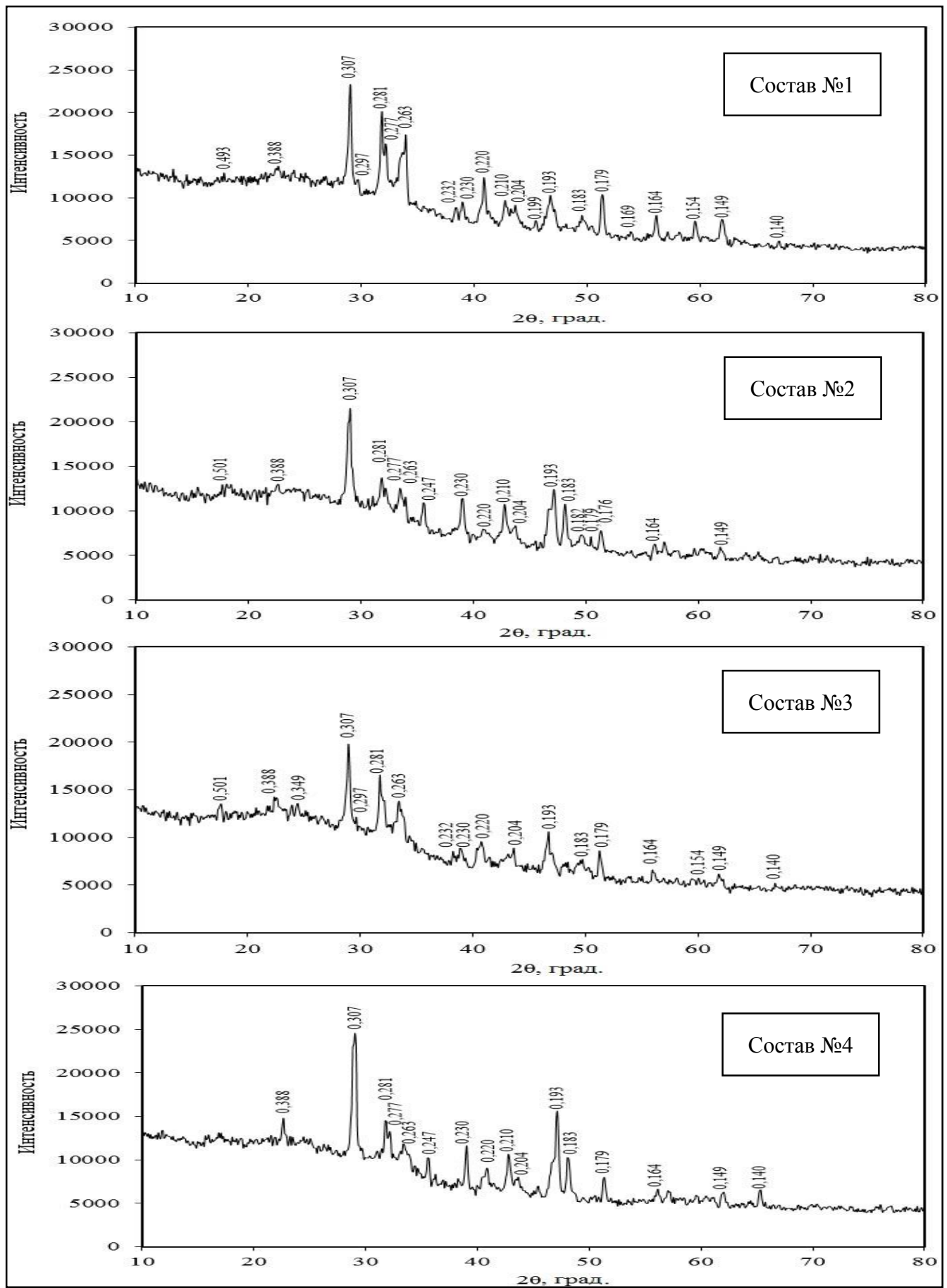


Рис. 8. Рентгенограммы образцов цементного камня в возрасте 28 суток твердения

Для исследования влияния разработанных комплексных модификаторов на кинетику твердения в бетонах запроектировано восемь составов, отличающихся наличием расширяющих добавок вариантных типов и содержанием химических добавок СП и SRA (таблица 7). Результаты экспериментов приведены на рисунках 9-11.

Таблица 7

Состав бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг(л)/м <sup>3</sup>									В/Ц	ОК, см	$\rho_{\text{факт}}$ , кг/м <sup>3</sup>
	ПЦ	П	Щ	МК	Exp	СА	ОСА	СП	SRA			
1	400	545	1175	38				5,2		0,44	17	2339
2	400	545	1175	38				5,2	6	0,44	21	2345
3	400	545	1175	38	28			5,2		0,44	16	2380
4	400	545	1175	38	28			5,2	6	0,44	20	2382
5	400	545	1175	38		40		5,2		0,44	16	2379
6	400	545	1175	38		40		5,2	6	0,44	21	2385
7	400	545	1175	38			40	5,2		0,44	16	2383
8	400	545	1175	38			40	5,2	6	0,44	21	2378

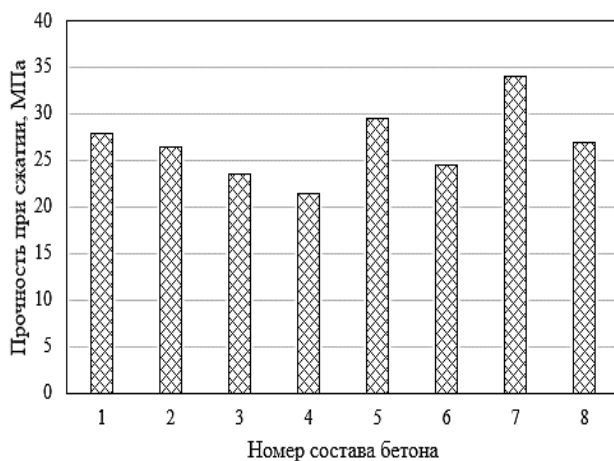


Рис. 9. Предел прочности бетона при сжатии в возрасте 7 суток нормального твердения

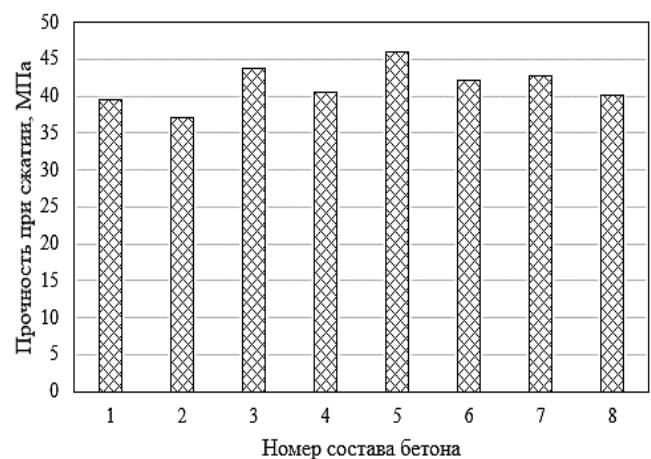


Рис. 10. Предел прочности бетона при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения

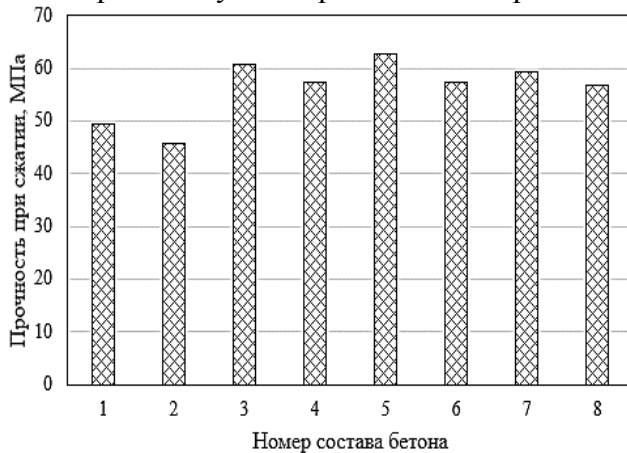


Рис. 11. Предел прочности бетона при сжатии в возрасте 90 суток нормального твердения

Выявлено, что при использовании расширяющей добавки СА (состав №5) или ОСА (состав №7) прочность бетона в раннем возрасте повышается на 5,7% и 22,2% соответственно по сравнению с составом №1, что обусловлено наличием в составе расширяющей добавки алюмосиликатного компонента, который положительно влияет на более интенсивное образование не только этtringита, но и гидросиликатов кальция, совместно обеспечивающих прочность бетона в

ранние сроки. В проектном возрасте все составы бетонов, модифицированные расширяющими добавками (составы №3-8), превышают прочность при сжатии контрольного состава №1 на 6,58...16,2%, что является следствием повышения степени гидратации цемента, формирования более плотной и прочной структуры цементного камня. В возрасте 90 суток показатели пределов прочности составов №3-8 также выше контрольного уже на 24,8...37,8%.

**В четвёртом разделе** приведены результаты оптимизации составов модифицированного цементного бетона с расширяющими добавками СА и ОСА по расходу расширяющих добавок и суперпластификатора.

В качестве параметров оптимизации приняты предел прочности бетона при сжатии в проектном возрасте и подвижность бетонной смеси. Значения факторов варьирования приведены в таблице 8.

Таблица 8

Значение факторов варьирования

Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
				-1	0	+1
X <sub>1</sub>	Содержание добавки СП	%*	0,2	1,1	1,3	1,5
X <sub>2</sub>	Содержание добавки СА	%	2	8	10	12

\* Примечание: расход добавок в % от массы цемента

На основании результатов эксперимента, получены следующие уравнения регрессии: (1) - осадка конуса; (2) - прочность бетона при сжатии.

$$\hat{y}_1 = 14 + 3,75X_1 - 2X_2 \quad (1)$$

$$\hat{y}_2 = 46,5 + 2,78X_1 - 3,3 X_1X_2 \quad (2)$$

Установлено, что на величину удобоукладываемости бетонной смеси в большей мере оказывает влияние фактор (X<sub>1</sub>) – содержание добавки СП, чем фактор (X<sub>2</sub>) – количество расширяющей добавки СА. Повышение содержания СП приводит к повышению подвижности бетонной смеси, напротив повышенное содержание добавки СА снижает подвижность, что является следствием её высокой водопотребности. Показано, что прочность бетона повышается как при увеличении дозировки СП (фактор X<sub>1</sub>), так и расширяющей добавки СА (фактор X<sub>2</sub>). При этом, максимальные значения прочности при сжатии достигаются при минимальном содержании СА и максимальной концентрации добавки СП.

При оптимизации состава бетона с добавкой ОСА в качестве параметров оптимизации приняты также предел прочности бетона при сжатии в проектном возрасте и подвижность бетонной смеси, значения факторов варьирования аналогичны значениям, приведенным в таблице 8, но с заменой добавки СА на ОСА.

На основании результатов эксперимента, получены следующие уравнения регрессии: (3) - осадка конуса; (4) - прочность бетона при сжатии.

$$\hat{y}_1 = 14,87 + 3,4X_1 - 1,4X_2 \quad (3)$$

$$\hat{y}_2 = 40,7 - 2,4X_1 - 1,8 X_1X_2 \quad (4)$$

Анализ уравнений регрессии (3 и 4) показывает, что прочность бетона повышается при увеличении дозировки СП (фактор  $X_1$ ) и снижении количества вводимой расширяющей добавки ОСА (фактор  $X_2$ ). Также присутствует вторая зависимость повышения прочности: при повышении содержания расширяющей добавки ОСА необходимая прочность (40 МПа) достигается при снижении количества СП.

Для экспериментальных исследований влияния полученных модификаторов на деформационные свойства бетона разработаны составы согласно таблицы 7, а для составов №5-8 были внесены изменения, учитывая полученные результаты оптимизации расхода расширяющей добавки и суперпластификатора. Количество расширяющих добавок принято 8% от массы цемента (таблица 9).

Таблица 9

№	Расход компонентов, кг(л)/м <sup>3</sup>									В/Ц
	ПЩ	П	Щ	МК	Exp	СА	ОСА	СП	SRA	
1	400	545	1175	38	-	-	-	5,2	-	0,44
2	400	545	1175	38	-	-	-	5,2	6	0,44
3	400	545	1175	38	28	-	-	5,2	-	0,44
4	400	545	1175	38	28	-	-	5,2	6	0,44
5	400	545	1175	38	-	32	-	5,2	-	0,44
6	400	545	1175	38	-	32	-	5,2	6	0,44
7	400	545	1175	38	-	-	32	5,2	-	0,44
8	400	545	1175	38	-	-	32	5,2	6	0,44

Анализируя данные исследований деформации усадки, приведенных на рисунках 12-14, следует отметить, что усадка наиболее характерно проявляется в бетоне контрольного состава № 1, достигая в возрасте 28 суток величины -0,62 мм/м, и, стабилизируясь после 70 суток, достигает -0,70 мм/м к 120 суткам. Введение в состав №1 добавки SRA снижает усадку в раннем возрасте до 20% и до 11% в возрасте 120 суток (-0,62 мм/м).

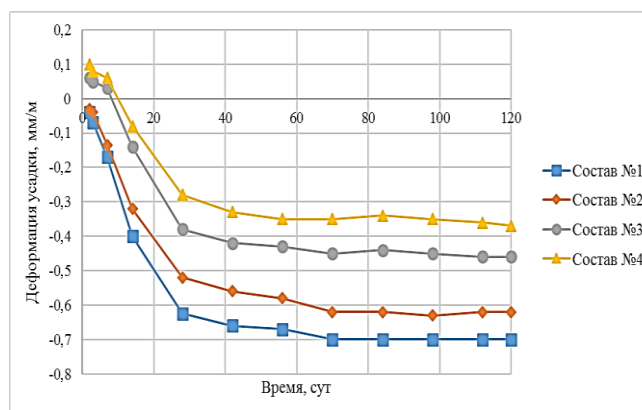


Рис. 12. Относительные деформации усадки образцов контрольных составов №1-2 и модифицированных составов №3-4

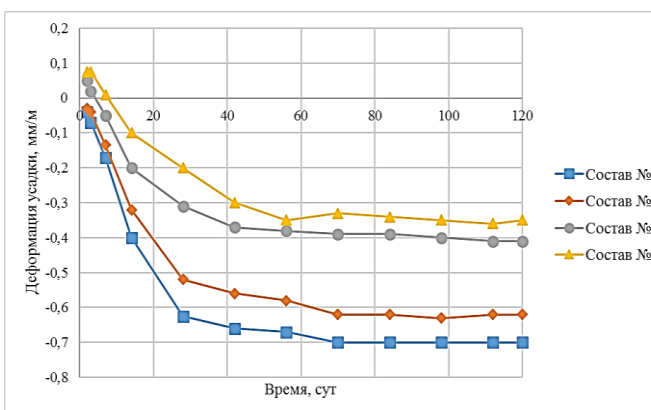


Рис. 13. Относительные деформации усадки образцов контрольных составов №1-2 и модифицированных составов №5-6

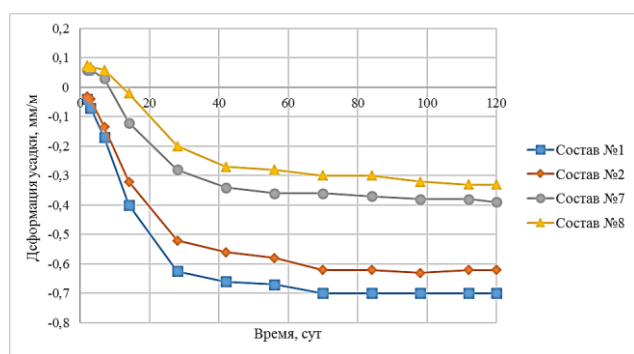


Рис. 14. Относительные деформации усадки образцов контрольных составов №1-2 и модифицированных составов №7-8

Установлено, что при твердении образцы-призмы бетона с расширяющими добавками (составы №3-8) в течение трех суток показывают расширение, при этом наибольшее абсолютное значение зафиксировано для бетона, содержащего комплекс добавок "Expancrete + SRA" (№4) – +0,1 мм/м, что на 25% выше, чем у составов №6 и 8 (+0,075 мм/м).

Позже происходили усадочные деформации, стабилизировавшиеся также как в контрольных составах №1 и 2 после 70 суток твердения. Усадка образцов бетона с добавкой "Expancrete" (№3) в возрасте 120 суток составляет -0,46 мм/м, что ниже чем у контрольного состава №1 на 34,3%, но выше чем у состава №4 на 19,5% (- 0,37 мм/м). Наличие в бетоне расширяющей добавки СА (состав № 5) также значительно снижает величину усадки бетона в возрасте 120 суток (-0,41 мм/м), что на 41,4% ниже, чем у контрольного состава №1 (-0,70 мм/м) и на 8,7%, чем у состава №3 с фирменной добавкой "Expancrete" (-0,37 мм/м). Деформации усадки образцов бетона, содержащих расширяющую добавку ОСА (№7), в возрасте 120 суток твердения составляют -0,39 мм/м, что на 44,3% меньше, чем показатели усадки контрольного состава №1, на 15,2% уменьшают показатели усадки в сравнении с образцами с расширяющей добавкой "Expancrete". В сравнении с усадочными явлениями состава с добавкой СА (№5) введение добавки ОА снижает их на 7,1%, что очевидно связано с дополнительным оксидным компонентом в расширяющей добавке ОСА, благодаря которому начальное расширение происходит не только при образовании этtringита, но и за счет гидратации извести. Введение добавки SRA к расширяющей добавке ОСА (№8) приводит к снижению усадки на 15,4% (- 0,33 мм/м) по сравнению с составом №7 без неё. Также, отмечено, что усадка состава с комплексом "ОСА + SRA" ниже на 46,7% и 10,8%, в сравнении с составами №2 и 4, соответственно.

Комбинированное применение расширяющих компонентов на основе сульфоалюминатной или оксидноалюминатной добавок, а также добавки SRA положительно влияет на снижение величины влажностной усадки. Расширяющие добавки интенсифицируют процесс образования этtringита в ранние сроки твердения, вызывая при этом деформации расширения, в то время как добавка SRA, снижая поверхностное натяжение поровой жидкости, уменьшает испарение влаги из бетона, при этом понижает величину влажностной усадки, и дополнительно способствует обеспечиванию влагой реакции гидратации расширяющегося компонента.

Полученные результаты по водонепроницаемости и морозостойкости (таблица 10) показывают положительную тенденцию этих показателей при модификации бетонов расширяющими добавками.

Таблица 10

## Показатели эксплуатационных характеристик бетонов

№ состава	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости	Водопоглощение Wm, %
1	W2	F150	4,2
2	W2	F150	4,0
3	W4	F200	3,7
4	W4	F200	3,5
5	W6	F300	3,4
6	W6	F300	3,1
7	W6	F300	3,4
8	W6	F300	3,0

Эти данные можно объяснить тем, что в составах бетонов с расширяющим компонентом образующийся гидросульфат алюмината кальция способствует заполнению и уплотнению микропор, а, следовательно, бетоны имеют мелкопористую структуру с небольшим объемом капиллярных пор, тем самым обеспечивая непроницаемость структуры и способствуя повышению морозостойкости и водонепроницаемости.

**В пятом разделе** разработана инструкция по производству бетонных смесей в условиях модернизированного бетонно-растворного узла для тяжелых бетонов с пониженной усадкой, включающих комплексные модификаторы. Выполнен расчет экономической эффективности при реконструкции части цементобетонного покрытия (объемом 560 м<sup>3</sup>) взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и перрона Луганского аэропорта при использовании разработанного модификатора.

Общий экономический эффект при замене фирменного расширяющего компонента «Expancrete» на расширяющую добавку СА из местного сырья при производстве бетонной смеси объемом 560 м<sup>3</sup> составит 1358336 руб., а при замене на добавку ОСА – 1365504 руб.

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально обосновано получение составов тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой на основе установления закономерностей влияния состава комплексных модификаторов (два типа расширяющей добавки, активная минеральная добавка, суперпластификатор и добавка, снижающая усадку) на структурообразование и свойства бетонной смеси и бетона.

2. Установлено, что расширяющая добавка СА в количестве 5...15% от массы цемента снижает начальный диаметр расплыва цементного теста на 9,1...30,9%, а добавка ОСА – на 1,82...23,64% по сравнению с контрольным составом, что связано с высокой водопотребностью компонентов добавок. Однако, по мере нарастания стерического эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора происходит увеличение показателей подвижности теста образцов всех составов и потери подвижности в образцах с расширяющими добавками в конечном периоде ниже по отношению к контрольному составу.

3. Установлено, что введение расширяющей добавки СА или ОСА повышает проектную прочность бетона при сжатии на 3,3...16,2% и в возрасте 90 суток на 24,8...37,8% в сравнении с контрольным составом. При этом, отмечается негативное влияние добавки SRA на прочность всех составов, понижая её на 5...31% в раннем возрасте и на 5,5-9% в проектном возрасте твердения.

4. По данным рентгенофазового анализа, отмечается повышение дифракционных отражений гидроалюминатов кальция  $C_3AH_6$  и портландита  $Ca(OH)_2$  в модифицированных составах по сравнению с контрольным, что подтверждает положительное влияние мелкодисперсных расширяющих добавок на гидратацию и твердение цементного камня, так как кристаллы этtringита образуют большое число активных центров кристаллизации, способствующих увеличению количества гидратных новообразований в единице объема и формированию более плотного и прочного цементного камня.

5. Определены области оптимальных составов бетонных смесей по содержанию расширяющих добавок СА или ОСА по критериям подвижности бетонной смеси и прочности бетона при сжатии, обеспечивающие получение бетонных смесей марки по подвижности П4 и пределом прочности цементного бетона при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа.

6. Показано, что введение расширяющих добавок снижает величину деформации усадки за счёт проявляющегося процесса расширения, вызванного повышенным образованием этtringита в раннем возрасте твердения. По сравнению с контрольным составом (-0,70 мм/м) применение расширяющей добавки "Expancrete" снижает усадку в возрасте 120 суток на 34,3% (-0,46 мм/м), добавки СА – на 41,4% (-0,41 мм/м), а введение добавки ОСА – на 44,3% (-0,39 мм/м). Выявлено, что наименьшее значение усадки в возрасте 120 суток нормального твердения показывает состав с комплексом добавок "ОСА + SRA" (- 0,33 мм/м), что на 15,4% ниже по сравнению с аналогичным составом без добавки SRA (-0,39 мм/м), а также на 52,8% и на 46,7% ниже чем у контрольных составов без SRA (-0,70 мм/м) и с SRA (-0,62 мм/м) соответственно, т.е. комбинированное применение расширяющих компонентов с добавкой, снижающую усадку – SRA, приводит к синергетическому эффекту снижения величины деформаций усадки.

7. Установлено, что применение расширяющих добавок СА или ОСА положительно влияет на эксплуатационные свойства модифицированных бетонов: повышает марку бетона по морозостойкости с F150 до F300, а по водонепроницаемости с W2 до W6.

8. Предполагаемый расчетный экономический эффект при частичной реконструкции цементобетонного покрытия (объемом 560 м<sup>3</sup>) взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и перрона Луганского аэропорта при замене фирменного расширяющего компонента «Expancrete» на расширяющую добавку ОСА составит 1365504 руб.

9. Разработана инструкция по приготовлению бетонных смесей для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексного модификатора. Выполнено опытно-промышленное внедрение результатов диссертационной работы на ООО «Торговая компания «СБМ» (ЛНР, г. Луганск), а также внедрение в учебный



процесс ИСА и ЖКХ ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### – публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Назарова, А.В. Эффективные способы минимизации усадочного трещинообразования в цементобетоне [Текст] / А.В. Назарова, Ал-Маршди Косай Сахиб Ради, **Д.С. Коваленко** // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2017. – Вып. – 2(124). – С. 65–70 (*Приведен анализ современных исследований по снижению усадочных деформаций в бетоне*);

2. **Коваленко, Д.С.** Перспективы использования техногенного сырья Луганского региона в строительной индустрии [Текст] / Д.С. Коваленко // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2017. – Вып. – 2(124). – С. 71–75 (*Представлен обзор промышленных отходов производственных баз Луганского региона*);

3. **Коваленко, Д.С.** Расширяющая добавка сульфоалюминатного типа на основе отходов промышленности для бетонов [Текст] / Д.С. Коваленко // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2018. – Вып. – 4(132). – С. 139–144 (*Приведен обзор и установление наиболее подходящего техногенного сырья для оптимального варианта расширяющей добавки в региональных условиях Донбасса*);

4. Назарова, А.В. Эксплуатационные свойства тяжелого бетона с расширяющим компонентом на основе отхода промышленности [Текст] / А.В. Назарова, В.А. Бугаев, **Д.С. Коваленко** // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2020. – Вып. – 1(141). – С. 26–33 (*Приведены результаты исследований эксплуатационных свойств модифицированных цементных бетонов*);

5. **Коваленко, Д.С.** Цементные композиты, модифицированные расширяющими добавками [Текст] / Д.С. Коваленко // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2020. – Вып. – 1(141). – С. 162–169 (*Представлены результаты экспериментальных исследований процессов гидратации модифицированных цементных композитов и их свойств*);

6. Назарова, А.В. Оптимизация состава тяжелого цементного бетона с расширяющей сульфоалюминатной добавкой промышленности [Текст] / А.В. Назарова, С.В. Сороканич, **Д.С. Коваленко** // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. Сборник научных трудов – Луганск: 2020. – Вып. – 4(33). – С. 75–84 (*Определено оптимальное количество сульфоалюминатной расширяющей добавки и суперпластификатора в составе бетона*).

### – публикации по материалам конференций:

7. **Коваленко, Д.С.** Эффективность применения химических добавок, снижающих усадку бетона [Текст] / Д.С. Коваленко // Сборник тезисов докладов по материалам конференции «Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли» 21 апреля 2017 года: тезисы доклада, г. Макеевка: - 2017. – С. 181;

8. Назарова, А.В. Перспективы создания экономичных бетонов с пониженной усадкой на основе отходов промышленности [Текст] / А.В. Назарова, А.А. Мирошникова, **Д.С. Коваленко** // Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы современной науки» (межотраслевая): тезисы доклада, г. Луганск: - 2017. – С. 594-597;

9. Назарова, А.В. Технологические и прочностные свойства цементных композитов, модифицированных расширяющими добавками на основе отходов промышленности [Текст] / А.В. Назарова, **Д.С. Коваленко** // Научные чтения памяти доцента кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько: Сборник тезисов докладов международной конференции, 27 декабря 2018 г.: тезисы доклада, г. Макеевка: - 2018. – С. 9;

10. **Коваленко Д.С.** Прочностные свойства тяжелых цементных бетонов, модифицированных добавками, компенсирующими усадку [Текст] / Д.С. Коваленко // Сборник тезисов докладов по материалам конференции «Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли» 19 апреля 2019 года: тезисы доклада, г. Макеевка: - 2019. – С. 86.

11. **Коваленко, Д.С.** Эксплуатационные свойства тяжелого бетона с расширяющей добавкой на основе отхода промышленности [Текст] / Д.С. Коваленко, С.В. Сороканич // Электроповерхностные явления при формировании структуры строительных материалов на основе минеральных и органических вяжущих веществ (посвящена 65-летию кафедры ТСКИиМ и 70-летию д.т.н., проф. Матвиенко В.А.): Сборник тезисов докладов научно-практической конференции с международным участием, 25 декабря 2020 г.: тезисы доклада, г. Макеевка: - 2021. – С. 12;

**– публикации в других изданиях:**

12. **Коваленко Д.С.** Перспективы создания экономичных бетонов с пониженной усадкой на основе отходов промышленности [Текст] / Д.С. Коваленко // Международный научно-практический журнал Интеграция наук. – Москва: 2017. - №3(7). – С. 65-70 (*Представлен обзор современного состояния вопроса снижения усадки цементного бетона с помощью минеральных добавок*);

13. **Коваленко, Д.С.** Эффективность бетонов на основе химической добавки SRA [Текст] / Д. С. Коваленко // Вестник ЛНУ имени Владимира Даля. – Луганск: 2017. – №3 (5) Ч.2. – С.143-146;

14. Бугаев, В.А. Свойства цементных композитов, модифицированных расширяющими добавками на основе промышленных отходов [Текст] / В.А. Бугаев, **Д.С. Коваленко** // Научный вестник ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет». – Луганск: 2019. – № 6 (1). – С. 319-327 (*Представлены результаты исследований свойств модифицированных цементных композитов*);

15. Назарова, А.В. Оптимизация состава тяжелого бетона, модифицированного расширяющей оксидноалюминатной добавкой [Текст] / А.В. Назарова, С.В. Сороканич, **Д.С. Коваленко** // Вестник ЛГУ имени Владимира Даля. – Луганск: 2020. – №12 (42) – С. 78-81 (*Определено оптимальное количество*

*оксидноалюминатной расширяющей добавки и суперпластификатора в составе бетона).*

## **АННОТАЦИЯ**

**Коваленко Денис Сергеевич. Тяжелые цементные бетоны с пониженной усадкой из подвижных смесей. – Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2021 г.

В диссертационной работе показано, что применение бетонов с пониженной усадкой является наиболее эффективным способом предотвращения или минимизации трещинообразования в цементобетонных конструкциях вследствие усадки. Это достигается путем использования разнообразных материалов, таких как добавки, снижающие усадку, расширяющие добавки.

Диссертация посвящена решению научно-технической прикладной задачи получения модифицированных бетонов с пониженной усадкой и повышенными эксплуатационными свойствами (водонепроницаемость, морозостойкость) на рядовых цементах, применяя в составе бетона комплексные модификаторы, основой которых являются расширяющие добавки из отхода промышленности.

Исследованы закономерности влияния расширяющих добавок в составах комплексных модификаторов на процессы формирования продуктов гидратации цементного камня, а также на кинетику твердения модифицированных бетонов.

Определены области оптимальных составов бетонных смесей по содержанию расширяющих добавок СА или ОСА по критериям подвижности бетонной смеси и предела прочности бетона при сжатии, обеспечивающие получение бетонных смесей марки по подвижности П4 и пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа.

Разработана инструкция по производству бетонных смесей в условиях модернизированного бетонно-растворного узла для тяжелых бетонов с пониженной усадкой, включающих комплексные модификаторы.

Выполнен расчет экономической эффективности при возможной реконструкции цементобетонного покрытия (объемом 560 м<sup>3</sup>) взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и перрона Луганского аэропорта при использовании разработанных комплексных модификаторов. Общий экономический эффект при замене фирменного расширяющего компонента «Expancrete» на расширяющую добавку СА из местного сырья при производстве бетонной смеси объемом 560 м<sup>3</sup> составит 1358336 руб., а при замене на расширяющую добавку ОСА – 1365504 руб.

**Ключевые слова:** усадка, тяжелый бетон, модификатор, шамотно-каолиновая пыль, подвижность, прочность.

## ABSTRACT

**Kovalenko Denis Sergeevich. Heavy cement concrete with reduced shrinkage from mobile mixes. – Manuscript.**

The thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.05 - building materials and products. - Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2021.

It is shown in the thesis that the use of concrete with reduced shrinkage is the most effective way to prevent or minimize cracking in the cement-concrete structures due to shrinkage. This is achieved through the use of a variety of materials such as shrinkage reducing additives, expanding additives.

The thesis is devoted to solving the scientific and technical applied problem of obtaining modified concrete with reduced shrinkage and increased operational properties (water resistance, frost resistance) on ordinary cements, using complex modifiers in the composition of concrete, the basis of which are expanding additives from industrial waste.

The regularities of the influence of expanding additives in the compositions of complex modifiers on the processes of formation of hydration products of cement stone, as well as on the kinetics of hardening of modified concretes have been investigated.

The areas of optimal compositions of concrete mixtures have been determined by the content of expanding additives SA or OSA according to the criteria of concrete mix mobility and concrete compressive strength, which ensure the production of concrete mixes of grade P4 in terms of mobility and ultimate compressive strength at the design age of at least 40 MPa.

The instruction for the production of concrete mixtures under the conditions of a modernized concrete-mortar unit for heavy concrete with reduced shrinkage, including complex modifiers has been developed.

The calculation of the economic efficiency for the possible reconstruction of the cement concrete pavement (volume 560 m<sup>3</sup>) of the runway, taxiways and apron of the Luhansk airport using the developed complex modifiers has been performed. The total economic effect of replacing the branded expanding component “Expancrete” with an expanding additive SA from local raw materials in the production of a concrete mix with a volume of 560 m<sup>3</sup> will amount to 1,358,336 rubles, and replacing with an expanding additive OSA - 1,365,504 rubles.

**Keywords:** shrinkage, heavy concrete, modifier, chamotte-kaolin dust, mobility, strength.