

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

На правах рукописи

УДК 666.972:331.45

ДУДАРЕВ
Дмитрий Евгеньевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ
СМЕСЕЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

по специальности 1-59 81 01 – «Управление безопасностью
производственных процессов»

Научный руководитель
канд. техн. наук, доцент
Гребнев А.А.

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

Бетон является неотъемлемым компонентом при строительстве различных сооружений, дорог, мостов, трубопроводов, переправ, портов, прилегающих территорий и т.п. Одно из преимуществ бетона – долговечность, т.е. срок, в течение которого он соответствует своему назначению и может безопасно эксплуатироваться.

Долговечность элементов зданий и сооружений зависит во многом от степени агрессивности окружающей среды по отношению к материалам, из которых изготовлены конструкции, т.е. коррозионной стойкости этих материалов, проявляющейся в конкретных условиях эксплуатации. Развитие коррозии приводит к уменьшению размеров и площадей поперечных сечений элементов конструкций, к снижению их несущей способности и жесткости. Именно поэтому коррозия может являться причиной аварийного состояния железобетонных конструкций.

Структура цементного клинкера характеризуется наличием кристаллов основных минералов, имеющих определенные размеры и соединенных промежуточным стекловидным веществом сложного состава. Существенную роль играет величина удельной поверхности частиц мелкого заполнителя, которая зависит от степени их измельчения и химической природы. В реальной практике технологи, как правило, не обладают исчерпывающей информацией о химическом и фазовом составе цемента, его полном минералогическом составе, степени кристалличности минералов-компонентов и вкладе стекловидной фазы. Кроме детального знания минералогического состава цемента, ключом к разрешению многих проблем в области технологии цементобетона может быть информация, полученная при изучении влияния размеров частиц мелкого заполнителя, величины его удельной поверхности и химической активности при их участии в формировании цементобетонного конгломерата. Подобная информация может быть определяющей при подборе оптимального компонентного состава. Наиболее информативной для изучения процессов гидратации и твердения цементобетонных систем представляется новая, успешно развивающаяся электрохимическая методика – импедансная спектроскопия.

По своему строению цементный камень на основе магнезиального вяжущего является твердым раствором солей сложного состава. Уникальность магнезиального вяжущего заключается в сочетании его высоких вяжущих свойств с совместимостью практически с любыми видами заполнителей, в том числе органического, минерального и искусственного происхождения. На основе магнезиального вяжущего получают различные камнеподобные материалы с заранее заданными свойствами. Основным же преимуществом для строителей, отличающим магнезиальный бетон от классических портландцементных составов, является великолепная адгезия к различным типам основания и высокая скорость схватывания.

Сдерживающими факторами для распространения магнезиального

вяжущего, а, следовательно, и магнезиальных бетонов являются его невысокая водостойкость, непостоянство прочностных свойств во времени, а также невозможность применения металлической арматуры из-за использования в качестве затворителя водного раствора хлористого магния. Развитие строительных технологий на основе магнезиального вяжущего связано с исследованиями, направленными на улучшение его физико-механических характеристик, а также с решением выше названных проблем. Часть исследователей идут по пути автоклавной обработки изделий, что позволяет значительно повысить водостойкость и долговечность материалов. Однако такой способ производства несет много затрат и не позволяет полностью использовать уникальные свойства материала. Значительно выгоднее приготавливать и укладывать магнезиальные смеси непосредственно на объекте.

Поэтому наиболее эффективным решением является управление свойствами магнезиальных бетонов и растворов при помощи магнезиальных добавок, регулированием температурных режимов твердения (в зимних условиях работ), подбора составов и армирования.

Таким образом, к целям данной работы относится улучшение прочностных характеристик наиболее востребованных и перспективных видов бетона – цементобетона и магнезиального бетона – путем анализа данных, полученных при оценке свойств цементобетона методом электрохимической импедансной спектроскопии и путем подбора оптимального состава для магнезиального бетона с помощью введения добавок, соответственно. Однако главной целью данной работы является разработка рекомендаций по обеспечению безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Определение закономерностей влияния мелких наполнителей, вступающих во взаимодействие с водой и клинкерными минералами в процессе затвердевания, с использованием метода электрохимической импедансной спектроскопии может способствовать решению ряда технических задач, актуальных для области технологии цементобетона, в частности связанных с использованием гранитных отсеков в качестве мелкого наполнителя и подбором оптимального минералогического и гранулометрического состава цементобетонной смеси в целом, что позволит получать бетон с повышенной прочностью.

Развитие строительного комплекса неразрывно связано с внедрением новых технологий, позволяющих повысить качество и безопасность возводимых объектов, ускорить темпы строительства и снизить затраты

материально-технических ресурсов.

При все возрастающем дефиците цемента и непредсказуемости его цены в разгар строительного сезона, представляется актуальным искать пути разумного замещения цементосодержащих конструктивных элементов.

Решением вопроса является применение новых материалов, обладающих повышенными по сравнению с традиционными физико-механическими и технологическими характеристиками. К таким материалам можно уверенно отнести магнезиальное вяжущее.

Необходимость обеспечения безопасной работы работников при производстве бетонных смесей и различных изделий из них делает представленную тему диссертации актуальной.

Степень разработанности проблемы

Исследование влияния на свойства магнезиального бетона вводимых добавок, заполнителей, жидкости затворения осуществлялось на основе построения теоретических моделей, получаемых с помощью уравнений регрессии. Для получения зависимостей свойств вяжущих и материалов от изменения факторов, определяющих эти свойства, а также для получения математических моделей, статистического анализа полученных моделей применяли математическое планирование эксперимента, которое включает выбор плана эксперимента, проведение опытов в соответствии с выбранным планом, последующую математическую обработку результатов и получение регрессионных зависимостей, а также анализ полученных зависимостей. Эти модели представлены в работах Т. Н. Черных, С. В. Нуждина, Л. Я. Крамар, Б. Я. Трофимова, А. А. Орлова и других авторов.

Изучение процессов, протекающих в цементной пасте, с помощью метода электрохимической импедансной спектроскопии проводили Б. Кристенсен, Т. Мейсон, С. Форд, Р. Ковердейл и др.

Авторами белорусских работ, посвященных изучению процессов гидратации в цементном растворе и коррозии металлических конструктивных элементов с использованием метода электрохимической импедансной спектроскопии для железобетона являются С. Н. Бондаренко, Г. А. Рагойша. Авторами российских и зарубежных работ, изучающими вопросы, связанные с магнезиальными вяжущими и материалами на их основе, являются А. А. Байков, В. В. Шелягин, П. П. Будников, А. П. Ваганов, С. И. Килессо, Т. В. Кузнецова, В. И. Верещагин, Л. Я. Крамар и др.

Одним из недостатков в изученной литературе является искажение результатов измерений полученных спектров импеданса при исследовании цементобетона методом импедансной спектроскопии, которое проявляется в связи с наличием поверхностных эффектов, возникающих на границе раздела фаз стальной электрод-бетон. Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе улучшения существующей методики измерения спектров импеданса стандартных образцов цементобетона.

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является разработка рекомендаций по обеспечению безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи**:

- разработать метод, позволяющий повысить прочностные характеристики бетонов путем анализа их структуры и влияния компонентов бетонной системы на ее характеристики;

- подобрать оптимальное соотношение компонентов закладочного состава с помощью математического планирования эксперимента, что позволит улучшить характеристики бетонов и сделать их более применимыми на практике;

- разработать рекомендации по обеспечению безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

Объектом исследования являются ЦБ блоки с наполнителем из песка и гранитного отсева; магнезиальные бетоны на основе каустического магнезита, модифицированного добавкой-пластификатором.

Предметом работы является физикохимия процессов, протекающих в цементобетоне в ходе его твердения во влажной атмосфере и последующей сушке; прочностные характеристики закладочных составов; обеспечение безопасной работы при производстве бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-59 81 01 – «Управление безопасностью производственных процессов».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты известных исследований белорусских, российских и зарубежных ученых в области изучения влияния коррозии на железобетон, определения импеданса цементобетонного конгломерата в ходе его твердения, а также изучения влияния различных добавок на прочностные характеристики магнезиальных бетонов и оптимизации их состава.

Для получения теоретических результатов исследования применялись модели эквивалентных электрических схем, характеризующие процессы, протекающие в армированном бетоне; была проведена проверка соответствия моделей эквивалентных схем экспериментальным данным, полученным в настоящей работе. Были использованы компоненты и методы исследования для определения влияния содержания и вида пластификаторов, а также способа их введения в

гипсомагнезиальные закладочные смеси на изменение их реологических, электрокинетических и технологических свойств. Была изучена электрофоретическая подвижность распределенных в них твердых частиц: оксида магния, гипса, галита и продуктов твердения методом микроэлектрофореза в сильно разбавленных бидистиллированной водой магнезиальных суспензиях. Также был проведен регрессионный анализ методом дробного факторного эксперимента при изучении прочностных характеристик магнезиальных бетонов, позволяющий при снижении числа опытов получать достоверные результаты.

Имитационные расчеты по теоретической модели эквивалентной схемы для цементобетонных образцов осуществлены в пакете EIS Spectrum Analyser. Обработка статистических данных проводилась с использованием программы Origin. Расчеты теоретических показателей магнезиальных бетонов были проведены с помощью программы Statistica.

Информационная база исследования для анализа спектров импеданса цементобетона и для изучения прочностных характеристик магнезиальных бетонов сформирована на основе экспериментальных данных и теоретических, полученных с помощью моделей эквивалентных электрических схем, и регрессионных моделей, соответственно.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке способа определения импеданса цементобетона с целью дальнейшего мониторинга бетонной конструкции и подбора оптимального состава магнезиального бетона с улучшенными прочностными характеристиками; а также в обеспечении безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика измерения спектров импеданса цементобетонного конгломерата, позволяющая исключить влияние потенциала разомкнутой цепи на общий импеданс цементобетона; исключить влияние поверхностных эффектов, зависящих от состава цементобетона; повысить точность измерения за счет усреднения импеданса между двумя парами электродов, устанавливаемых в цементобетон на стадии его изготовления.

2. Методика подбора оптимального соотношения компонентов закладочного состава с помощью математического планирования эксперимента, что позволит улучшить характеристики бетонов и сделать их более применимыми на практике.

3. Рекомендации по обеспечению безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к анализу состояния цементобетона методом импедансной спектроскопии. Также предложены составы для производства

магнезиальных бетонов с улучшенными прочностными характеристиками.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что имеется возможность проводить мониторинг состояния цементобетонной конструкции как на стадии ее изготовления, так и в ходе ее эксплуатации; а также выявлять некачественные цементобетонные блоки и производить их отбраковку в ходе предварительного измерения спектров импеданса бетона. Оптимальное соотношение компонентов закладочного состава можно определить с помощью математического планирования эксперимента, что позволит улучшить характеристики бетонов и сделать их более применимыми на практике. Разработанные рекомендации по обеспечению безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками позволят уменьшить число несчастных случаев, возникающих при производстве бетонных смесей.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследования представлены на 54-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», а также на Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме.

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в двух опубликованных работах общим объемом 7 страниц.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 82 страницы. Работа содержит 7 таблиц, 32 рисунка. Библиографический список включает 47 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также структура и объем диссертации.

В первой главе рассматриваются свойства наиболее востребованных бетонов, таких как цементобетон и магнезиальный бетон. Также рассматриваются достоинства этих бетонов и их недостатки.

Во второй главе рассматривается методика измерения спектров импеданса стандартных образцов цементобетона и предложена усовершенствованная методика. Также рассматриваются вопросы оптимизации состава магнезиальных бетонов.

В третьей главе представлены результаты изменения импеданса цементобетона при воздействии на него влаги в ходе твердения и последующей сушке. Проведено сравнение спектров импеданса, полученных экспериментально, с теоретическими, полученными с помощью моделей эквивалентных схем. Составлены рекомендации по обеспечению безопасности производства бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ литературных источников по производству бетонных смесей и работы с ними предусматривает многие аспекты деятельности, включая: опалубочные и арматурные работы, процесс укладки бетона, уплотнение бетонной смеси, подогрев пара в бункере, электрообогрев бетонных и железобетонных конструкций и др.; позволяет сделать следующие выводы:

Производство бетона должно осуществляться в соответствии с рядом требований, включая требования к компонентному составу смеси (в том числе нормирование марки по морозостойкости), к водоцементному соотношению и составу заполнителей, а также к условиям приготовления, хранения и транспортировки раствора. Для получения плотной, наиболее стойкой и экономичной структуры бетона используют смеси заполнителей с минимальным объемом пустот и применяют различные технологические приемы укладки бетона.

Предложенная в данной работе методика измерения сопротивления бетона с помощью метода электрохимической импедансной спектроскопии может быть реализована на практике путем внедрения в бетон стальных электродов, на которые предварительно нанесен адгезивный слой стандартного цементобетона. Таким образом, можно будет в любой момент времени проводить мониторинг состояния бетонной конструкции путем измерения полного сопротивления бетона, что позволит понять, является ли

пригодной для эксплуатации данная бетонная конструкция или ее необходимо заменить.

На основе анализа полученных данных сделан вывод, что параметры эквивалентной схемы характеризуют разные процессы, которые с разной скоростью отзываются на обработку цементобетона водой и сушку. Эти процессы можно отдельно отслеживать с помощью импедансной спектроскопии. Однако необходимы дополнительные исследования, чтобы разобраться в природе этих процессов.

Было установлено, что закладочный состав №2 обладает наибольшей прочностью по сравнению с другими составами (прочность при одноосном сжатии через 28 суток твердения составила 101,9 МПа) и имеет следующее соотношение компонентов (в процентном соотношении от MgO): 40% CaSO₄, 0,5% суперпластификатора С3, 0,5% H₃BO₃. Однако теоретическая прочность, полученная с помощью уравнений регрессии, оказалась незначительно выше у состава №1 (79,9 МПа по сравнению с прочностью, равной 77,4 МПа у состава №2). Полученные результаты подтверждают имеющиеся в литературе представления о том, что для сложных многофакторных систем с взаимным влиянием факторов однозначно по величине и знаку коэффициентов в уравнении регрессии очень трудно судить о влиянии каждого фактора на параметр оптимизации. При изучении влияния состава порошкового компонента на некоторые технологические характеристики закладочных составов (начало схватывания, плотность, прочность при одноосном сжатии), а также их оптимизации необходим полный анализ полученных уравнений регрессии.

Разработаны рекомендации по обеспечению безопасности при производстве бетонных смесей с улучшенными прочностными характеристиками.

Результаты исследования представлены на 54-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Список опубликованных работ

1. Бондаренко, С. Н. Исследование пористой структуры и кинетики удаления влаги из цементобетонных материалов методом импедансной спектроскопии / С. Н. Бондаренко, П. В. Чулкин, Д. Е. Дударев, Е. С. Коликова, // Новые горизонты – 2017 : сборник материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, 2-3 ноября 2017 г. : в 2 т. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 47-50.

2. Дударев, Д. Е. Электрохимический мониторинг удаления влаги из цементобетонных материалов с открытой пористой структурой / Д. Е. Дударев, Е. И. Васильева, С. Н. Бондаренко // Новые горизонты – 2017 : сборник материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, 2-3 ноября 2017 г. : в 2 т. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 59-61.