

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина

УДК 006.015:626/627:004.01(043)

на правах рукописи

КОНКАНОВ МАРАТ ДЖУМАТАЕВИЧ

**Разработка нормативно-технической документации для контроля
микронапряжений при эксплуатации гидротехнических сооружений**

6D073200 – Стандартизация и сертификация

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Р.К. Ниязбекова

Научный зарубежный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Ю.Р. Кривобородов
(Российский химико-
технологический университет
им. Д.И. Менделеева)

Республика Казахстан
Нур-Султан, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СТАНДАРТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ	8
1.1 Общие сведения о гидротехнических сооружениях.....	8
1.2 Безопасность гидротехнических сооружений.....	12
1.3 Введение в структурный мониторинг состояния конструкций.....	21
Выводы по разделу.....	26
2 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ (ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНИМЫЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МТС)	27
2.1 Возникновение и контроль микронапряжений.....	27
2.2 Внешние датчики.....	29
2.2.1 Тензометрические датчики.....	29
2.2.2 Беспроводные датчики.....	30
2.3 Встроенные датчики.....	30
2.3.1 Волоконно-оптические и брэгговские датчики.....	30
2.3.2 Пьезоэлектрические датчики.....	31
2.3.3 Электрохимические датчики.....	32
2.3.4 Самочувствительный бетон.....	33
Выводы по разделу.....	34
3 СМАРТ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ	36
3.1 Введение в смарт композиты.....	36
3.2 Обзор материалов для получения смарт композитов.....	39
3.2.1 Функциональные материалы.....	40
Выводы по третьему разделу.....	44
4 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	45
4.1 Методы исследования.....	45
4.2 Характеристика материалов.....	46
4.3 Приготовление образцов.....	48
4.4 Формование образцов.....	48
4.4.1 Цементный раствор.....	48
4.4.2 Фибробетон.....	49
Выводы по разделу.....	50
5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ	51
5.1 Обоснование выбора средств измерений.....	51
5.2 Обоснование выбора электродов.....	51
5.3 Обоснование метода косвенного измерения.....	54
Выводы по разделу.....	55

6 ИССЛЕДОВАНИЕ	МЕХАНИЗМОВ	
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ	ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ	
ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ		57
6.1 Определение порога протекания тока.....		57
6.2 Исследование микроструктуры и микромеханической модели цементных композитов.....		60
6.3 Подбор дополнительных параметров.....		63
6.4 Исследования электромеханических свойств разработанных цементных растворов.....		64
6.5 Исследование влияния частоты электрического тока на результат измерений.....		71
6.6 Показатель прочности на сжатие разработанных композитов.....		73
6.7 Показатель прочности на изгиб.....		75
6.8 Испытания на морозостойкость.....		76
6.9 Определение электромеханических характеристик разработанных композитов.....		77
Выводы по разделу.....		78
7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕРЕНИЯ		
МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ		80
7.1 Влияние геометрических параметров.....		80
7.2 Влияние температуры образца.....		82
7.3 Влияние хранения и кондиционирования образцов.....		82
7.4 Параметр проводимости в зависимости от состава жидкости.....		86
7.5 Влияние температуры.....		87
7.6 Влияние хранения и кондиционирования образца.....		88
7.7 Влияние частоты измерения на значение полного сопротивления.....		90
Выводы по разделу.....		91
8 ЧИСЛЕННОЕ (КОМПЬЮТЕРНОЕ) МОДЕЛИРОВАНИЕ		94
8.1 Разработка микроструктуры.....		94
8.2 Числовое моделирование для определения микронапряжений.....		95
8.3 Описание формул для репрезентативных ячеек.....		96
8.4 Модуль формирования электрических сигналов.....		102
Выводы по разделу.....		105
9 ТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ		107
Выводы по разделу.....		110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		111
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		115
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Фотографии с процессов исследований и испытаний, образцов разрабатываемых композитов		127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Акт внедрения		131
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Проект национального стандарта		132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Согласно данным Казахского научно-исследовательского института водного хозяйства доля напорных гидротехнических сооружений, применяемых в Казахстане для сбора и аккумуляции огромных запасов водной энергии и требующих капитального ремонта составляет более 60% [1]. В гражданском, промышленном, гидротехническом, теплоэнергетическом, дорожном и других видах строительства наиболее широко распространенным строительным материалом является бетон. Бетонные гидротехнические сооружения подвергаются постоянным разрушениям структур по следующим причинам: многолетним циклам замораживания и оттаивания, просачиванию вод, эрозии и выветривания, а также в результате протекания, называемых, «щелочно-кремниевых» реакций, т.е. коррозией бетона, вызванной реакцией, протекающей между диоксидом кремния заполнителя со щелочами в составе цемента [2].

Таким образом, исследования проблем, связанных с мониторингом технического состояния сооружений из железобетонных конструкций, имеют огромное значение, особенную актуальность они приобретают при проектировании эксплуатации гидротехнических сооружений, основания которых находятся под давлением воды или грунтовых вод, где наряду с прочностью конструкционный материал должен обладать высокой водонепроницаемостью [3]. Даже микротрещины во внутренней структуре бетона являются концентраторами микронапряжений, которые в условиях климата многих регионов Казахстана, могут привести к более серьезным повреждениям. По этой причине необходимо проведение периодического контроля и мониторинга таких сооружений.

Поэтому разработка комплексных мер по контролю микронапряжений при эксплуатации гидротехнических сооружений представляется одной из приоритетных современных вызов, по причине того, что состояние несущих элементов сооружений и зданий и безопасность их эксплуатации требуют систематического контроля технического состояния. Данное исследование позволит определить способы контроля и мониторинга зданий и сооружений и обеспечить решение задач государственного значения – безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений, предназначенных для применения в агропромышленном комплексе, и уменьшение рисков техногенных катастроф.

В данной работе выдвигаются новые рекомендации по контролю микронапряжений в процессе создания и эксплуатации гидротехнических сооружений в соответствии с международными нормами.

Целью диссертационной работы является подготовка научного обоснования для разработке нормативно-технической документации по контролю микронапряжений в гидротехнических сооружениях, обеспечивающих мониторинг их безопасности.

Исходя из определенной цели исследования, были определены **следующие задачи:**

- провести анализ существующих стандартизованных и нестандартизованных методов мониторинга состояния конструкций;
- разработать составы и способы получения цементных композитов применяемых в строительстве гидротехнических сооружений;
- исследовать влияние промышленных отходов на механические и электрические свойства композита;
- разработать рекомендации по производству сенсорных цементных композитов;
- разработать методику оценки неопределенности измерений, которая может быть использована испытательными лабораториями в качестве стандартизованных методов.

Объект исследования: гидротехнические сооружения.

Предмет исследования: исследование электрической проводимости конструкционных материалов на основе цемента в зависимости от микронапряжений в структуре материала.

Научная новизна результатов исследований состоит в:

- научно обоснованы и экспериментально подтверждены составы и способы получения цементных композитов с улучшенными механическими свойствами, которые возможно применять в качестве строительного материала для гидротехнических сооружений;
- изучено и объяснено улучшение электропроводных свойств получаемых цементных композитов на основе промышленных отходов при замещении цемента от 10 до 20%;
- экспериментально подтверждено, что полученные оптимальные составы цементных композитов пригодны к применению в качестве многофункциональных строительных материалов;
- впервые использованы остатки бокситов (красный шлам) в сочетании с волокнами поливинил алкоголя, при этом полученный цементный композит обладает улучшенными электромеханическими свойствами, которые были определены в сравнении с эталонными образцами, изготовленными согласно требованиям международных и национальных стандартов;
- разработана методика оценки неопределенности измерений, которая может применяться для сопоставления результатов измерений электрического сопротивления сенсорных цементных композитов.

Практическая ценность и реализация работы

- разработаны оптимальные составы и способы получения эффективных цементных композитов;
- предложен простой и эффективный метод смешивания красного шлама в составе цементного композита;
- улучшены технические свойства цементного композита;
- предложен метод оценки неопределенности, который апробирован в испытательной и калибровочной лаборатории;

- эффект по уменьшению вредного воздействия на окружающую за счет использования промышленных отходов производства алюминия и сжигания топлива на тепловых энергоцентралях;
- экономический эффект от внедрения результатов исследований составляет 60 млн. тг. при годовом выпуске 150 тонн (по ценам 2022 г.).

Основные положения, выносимые на защиту

- результаты оптимизации и способы получения сенсорных цементных композитов;
- влияние промышленных отходов производства алюминия на электромеханические свойства цементного композита;
- разработка практического метода по оценке неопределенности измерений при проведении измерений микронапряжений конструкции.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением методов статистического анализа и расчетов и использованием в исследованиях передового лабораторного и измерительного оборудования, обеспечивающих требуемый уровень точности и достоверности измерений.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работы были представлены на международных конференциях:

1. Актуальные научные исследования в современном мире: XXV международная научная конференция (Переяслав-Хмельницкий, 2017 – май).
2. «Сейфуллинские чтения-14: Молодежь, наука, инновации: цифровизация – новый этап развития»: республиканская научно-теоретическая конференция (Астана, 2018 – апрель).
3. XXII Всемирный конгресс Международной конфедерации по измерительной технике – XXII World Congress of the International Measurement Confederation IMEKO 2018 (Белфаст, 2018 – сентябрь).

Основные положения диссертационной работы опубликованы в четырех печатных изданиях:

1. On the Issue of an Ash Microsphere Application as a Framework Forming Filler in Composite Materials // Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2018. – Т. 781. – С. 176-181. CiteScore 0.33. SJR 0.180. Процентиль 14% (Q4).
2. Ash Deposits CHP-as an Additional Source of Raw Material for Construction Production // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Т. 70. – С. 649-654. CiteScore 0.73. SJR 0.273. Процентиль 36% (Q3).
3. Investigation of the properties of composite materials based on cements containing micro-and nanoparticles from red mud //Technology. – 2018. – Т. 9. – №. 8. – С. 715-724. CiteScore 2.76. SJR 0.250. Процентиль 40% (Q3)
4. Environment-Friendly, Self-Sensing Concrete Blended with Byproduct Wastes //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №7. – С. 1925. CiteScore 3.72. SJR 0.592. Процентиль 93% (Q1).

Подана заявка на получение международного патента PCT.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из вводной части, девяти разделов и заключительной части. Выполнена на 128 страницах печатного текста, содержит 32 рисунка и 20 таблиц, список источников из 171 наименований и трех приложений.

1 СТАНДАРТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

1.1 Общие сведения о гидротехнических сооружениях

Нормативно-технические документы в области архитектуры и градостроительства Республики Казахстан должны совершенствоваться на базе, действующей в переходный период в Казахстане, в соответствии с основами управленческого строительства, законодательства, правового регулирования архитектуры, градостроительства и строительства и рекомендуемыми требованиями, условиями и ограничениями, нормативно-техническими документами, международными нормативными правовыми актами.

Главная направленность государственных нормативов-устойчивое функционирование построенных объектов при эксплуатации, обеспечение безопасности и надежности строительства, защита прав потребителей строительной и проектной продукции, обеспечение охраняемых законом потребностей общества и граждан в создании благоприятных условий и безопасности жизни и среды обитания при осуществлении архитектурной, градостроительной и строительной деятельности.

Состав, порядок утверждения, согласования, разработки проектной документации на гидротехническое строительство должны отвечать установленным требованиям.

Гидротехника является разделом промышленного и гражданского строительства, исследующий вопросы и проблемы технического использования населением водных ресурсов и защите от возможных вредоносных эффектов путем проектирования и создания специальной инфраструктуры, включающей мосты, плотины, каналы и дамбы.

Гидротехника связана с управлением водными ресурсами, что обуславливает включение в ее состав следующих три технических аспекта:

- использование воды и за счет гравитации получения энергии;
- защитой водоемов и защитой от воды;
- мелиорация и ирригация.

Гидроэлектрические комплексы в зависимости от назначения подразделяют на энергетические и ирригационные или транспортные. Однако в большинстве случаев строятся сложные водные сооружения, которые решают одновременно несколько проблем водопользования. Особенно важны гидротехнические сооружения, которые осуществляют комбинированные функции по ирригации и водоснабжению, гидроэнергетике и борьбы с наводнениями, а также защиты от наводнений и пополнения запасов воды для судоходства. Часто, помимо своего основного назначения, плотины имеют дополнительные преимущества, такие как использование в качестве зон отдыха, заповедников и туристических достопримечательностей. Сегодня крупные проекты водной инфраструктуры, такие как водохранилища и плотины, должны разрабатываться как многоцелевые проекты, чтобы

максимально оптимизировать затраты и увеличивать функциональность ГТС для выполнения различных целей использования и защиты.

В случае защиты от наводнений, следует отметить, что водохранилища по своей природе положительно влияют на снижение риска наводнений в нижнем бьефе, удерживая большие объемы притока, так что пиковый отток гасится. В случае засухи, существующие плотины и водохранилища, а также будущие проекты должны играть ключевую роль в уменьшении последствий изменения климата во всем мире, особенно в полузасушливых и засушливых регионах.

В процессе проектирования, исходя из назначения конструкций и конкретных природных условий, необходимо выбрать наиболее рациональное выравнивание расположения основных конструкций гидроэлектрокомплекса, его расположения, выбора типа и параметров конструкций напора воды, глубины фундаментов и глубины подпора, сопряжения с массой породы на опоре с боковой стороны долины, а также технологической схемы проведения работ по строительству.

Анализ ситуаций с плотинами показывает, что случаи, когда их разрушение приводило к ужасным катастрофам, происходили не из-за ошибок в расчетах или при выборе материала, а из-за отсутствия фундаментов – в основном из-за недостатка – часто из-за водонасыщенных грунтов, устранение которых привело к очень страшным катастрофам, которые были результатом неосведомленности о геологических и гидрогеологических условиях грунтов фундамента. Примером тому может служить катастрофа на водоразделе Вайонт в Италии.

В 1959 году на VI Конгрессе на больших плотинах итальянские гидротехники Л. Сементс, Н. Биадена, М. Панчини сообщили о самой высокой в мире дамбе на реке Вайонт, высота которой составляет 265,5 м (расположена на удалении 70 км к северу от Венеции). В докладе были подробно освещены проектные особенности плотины. Для сброса паводковых вод на вершине плотины предусмотрено 10 отверстий длиной 6,6 м каждый, два туннеля и один нижний сбросной путь. Для укрепления фундамента плотины предусмотрено Аральское цементирование горных пород с объемом буровых работ 37000 м³. Для предотвращения фильтрации воды под плотинной и на ее берегах установлен раствор объемом 50 000 м³.

Плотину рассчитывали с помощью четырех аналитических методов (независимые дуги, испытательные нагрузки и др.). Кроме того, структура плотины была исследована в институте в Бергамо по двум моделям (в масштабе 1:35). Пробные испытания позволили упростить плотину за счет уменьшения ее толщины. О геологических условиях было сказано, что долина Вайонта состоит из известняков и доломитов, характерных для Восточных Альп, слои впадают в высокое течение реки и что она благоприятна для поддержания плотины.

Плотина была построена в 1960 году, а 9 октября 1963 года, став одной из самых серьезных аварий в истории гидротехники, унесла жизни более 2600 человек. Причиной стал оползень, обрушившийся на водоем. Самая высокая стройная арочная плотина в мире уцелела, и все расчеты дизайнеров были

верны. Анализ послеаварийных материалов показал, что геологи не учли, что слои известняка образуют синклиналильный пласт, ось которого совпадает с направлением долины. В этом случае северное крыло срезается с дефектом. В 1960 году возле плотины на левом берегу образовался оползень объемом 1 млн. м³. В 1960-1961 гг. когда оползни возобновились, пробили 2-километровый тоннель аварийного сброса. Для наблюдения за развитием оползневых процессов была создана сеть геодезических эталонов, но, как оказалось, эталоны не попали на основную скользящую поверхность. В 1961-1963 гг. наблюдалась непрерывная гравитационная сила. К вечеру 9 октября 1963 года 240 млн. м³ почвы были вытеснены в водохранилище со скоростью 15-30 м/с в течение 30 секунд. За 10 секунд большая волна высотой 270 м прошла 2-километровый водоем, преодолев плотину и, сметая все на своем пути, упала в долину. В Вене и Брюсселе зафиксированы сейсмические толчки.

Гидротехнические сооружения выполняют важную роль в агропромышленном комплексе, т.к. оказывают влияние на экономику, экологическую и социальную сферы области или региона.

Основная функция гидротехнического сооружения состоит в том, чтобы изменить естественное поведение водоема (река, озеро, море, грунтовые воды) путем регуляции его стока. ГТС предназначены для целевого использования в интересах народного хозяйства и охраны окружающей среды, кроме того, они применяются для производства электроэнергии, борьбы с наводнениями, водоснабжения, борьбы с наносами, судоходства, ирригации и осушения, рыбоводства и рыболовства, охраны окружающей среды и рекреации. Обычно ряд гидротехнических сооружений (т.е. гидросооружений) общего или специального назначения сооружается в виде единого или интегрированного гидротехнического объекта, комплексно служащего вышеуказанным целям. Гидротехнические сооружения общего и специального назначения, входящие в состав гидротехнического сооружения, можно дополнительно разделить на основные, вспомогательные и временные сооружения.

Гидротехнические сооружения погружены или частично погружены в воду. Их можно использовать для отклонения, изменения или полной остановки естественного потока. Гидротехнические сооружения, предназначенные для интегрированных речных, озерных или морских гидротехнических сооружений, относятся к речным, озерным и морским гидротехническим сооружениям соответственно. По особенностям воздействия на речной сток основные гидротехнические сооружения различают как водоподпорные, водотранспортные и специальные.

ГТС являются уникальным средством, которое позволяет осуществлять регулирование, управлять водозабором и контролировать транспортировку водных ресурсов из объектов водоснабжения для потребностей агропромышленного комплекса, а также осуществлять сброс сточных вод [4]. От технического состояния ГТС полностью зависит водообеспеченность объектов агропромышленного комплекса.

В этой связи последнее десятилетие в Казахстане проводятся работы по формированию комплексного подхода в обеспечении безопасности ГТС. Так например, в 2017 году опубликована для обсуждения Концепция Закона «Об безопасности гидротехнических сооружений».

Разработаны строительные нормы, которые регламентируют качественные и количественные технические требования по безопасности при проектировке и строительстве объектов гидротехнической инфраструктуры, а также в период эксплуатации сооружения.

Разработан документ П РК 3.04-103-2014, где изложены «нормативные требования для проектирования основания гидротехнических сооружений всех классов, в том числе гравитационных, арочных и контрфорсных плотин, подпорных стенок, шлюзов, шельфовых и портовых сооружений, естественных склонов и искусственных откосов на участках расположения гидротехнических сооружений».

Разработан нормативный документ СН РК 3.04-09-2018 «доказательной базы технических регламентов по вопросам безопасности плотин бетонных, железобетонных и из грунтовых материалов, гидроэлектростанций, насосных станций, подпорных стен, судоходных шлюзов, рыбопропускных и рыбозащитных сооружений, а также сооружений по защите от наводнений, селей и овраг образования, который направлен на внедрение параметрического метода нормирования в строительной сфере».

Также пересмотрены и обновлены «единые комплексные требования по обеспечению безопасности, предъявляемые к выполнению подготовительных и строительно-монтажных работ при производстве общестроительных, дноуглубительных и подводно-технических работ, возведении оснований, отсыпки, массивов, берм, фундаментов и устройстве берегоукрепительных, набережных, причальных, оградительных сооружений при строительстве и реконструкции и расширении гидротехнических морских и речных транспортных сооружений, а также при изготовлении конструкций и элементов для возведения этих сооружений на полигонах строительных организаций, которые изложены в новой редакции СН РК 3.04-10-2018 «Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения».

На территории Казахстана расположено более 1700 ГТС, из этого числа 97% сооружений эксплуатируются более 25 лет, таким образом более 20 ГТС находятся в аварийном состоянии. В этой связи, в Водный кодекс Республики Казахстан введено понятие «многофакторного обследования ГТС». Кроме того, в начале 2020 года Правительством Республики Казахстан принята концепция Концепция государственной программы по управлению водными ресурсами Казахстана на 2020-2030 годы.

Кроме того, на территории Республики Казахстан могут применяться национальные стандарты Российской Федерации, устанавливающие требования по безопасности к ГТС.

1.2 Безопасность гидротехнических сооружений

Вода является одним из главных ресурсов, без которого не возможна не только жизнедеятельность людей, но и не возможна сама жизнь человека. Вместе с тем водные катаклизмы могут являться одними из самых опасных и неожиданных природных явлений. Люди строят специальные гидротехнические сооружения, чтобы обезопасить территорию жизнедеятельности и иметь необходимый запас воды.

В современном мире насчитывается около 58,4 тыс. плотин, из них 37,4 тыс. возведено за последние 65 лет. Частичное или полное разрушение и/или авария гидротехнических сооружений может привести к серьезным последствиям, начиная от причинения ущерба имуществу, причинению вреда экономике и окружающей среде, заканчивая гибелью людей. Это подчеркивает важность и необходимость контроля безопасности эксплуатации и своевременного обслуживания гидротехнических сооружений [5].

Основными мероприятиями по эксплуатации и обслуживанию гидротехнических сооружений являются:

- гидрологические наблюдения и прогнозы;
- мониторинг за безопасностью гидротехнических сооружений;
- мониторинг состояния гидротехнических сооружений;
- восстановительные;
- обнаружение и уменьшение старения гидротехнических сооружений

[6].

Безопасная эксплуатация гидротехнических конструкций в первую очередь основывается на гидрологическом прогнозировании, зависящая от наблюдения и прогноза водного режима.

До 1980-х годов наблюдение и прогнозирование водного режима в водосборах и водохранилищах основывалось на ручных операциях и сообщениях, касающихся гидрологии и погоды, которые передавались по телеграфу или телефону. С 1980-х годов было начато применение средств автоматизации для наблюдения и прогнозирования водного режима [7].

Методы анализа и оценки, направленные на определение гидрологического состояния в будущем через гидрологическое состояние на более ранней и нынешней стадиях называется гидрологическим прогнозом. Он играет важную роль в безопасном строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Гидрологическое прогнозирование должно обеспечивать прогнозную и информационную ценность и период прогнозирования с достаточной точностью. По периоду прогноза гидрологический прогноз можно разделить следующим образом:

- краткосрочный прогноз паводков на несколько дней, теоретическая основа которого – в основном служит целям операций по борьбе с наводнениями;

- средне- и долгосрочное гидрологическое прогнозирование, которое обычно разрабатывается организациями по метеорологии, в основном служит целям мероприятий по выработке электроэнергии;
- прогноз паводков на участке реки, по которому прогнозируется водный режим нижнего участка реки;
- прогнозирование количества осадков и стока на водосборе, с помощью которого прогнозируется гидрография паводка на выходе из водосбора с использованием осадков над водоразделом;
- прогнозирование паводков водосбора реки, ручья и т.д.

Современный уровень технического развития позволяет создавать автоматизированные системы с обработки информации и предоставления результатов прогнозирования в реальном времени.

Следует отметить, что методы среднесрочного и долгосрочного гидрологического прогнозирования обычно отличаются от методов краткосрочного прогнозирования паводков. В международной практике используются три типа среднесрочных и долгосрочных методов гидрологического прогнозирования:

1. Методы метеорологии. На основе взаимосвязи между долгосрочным изменением стока и крупномасштабным изменением климата прогнозируется долгосрочные изменения гидрологических элементов с использованием предшествующих характеристик атмосферной циркуляции.

2. Статистические методы. На основе анализа большого количества долгосрочных исторических гидрологических и метеорологических данных и статистической взаимосвязи между прогнозируемым объектом и факторами прогнозируется средне- и долгосрочное изменение гидрологических элементов.

3. Методы физики космоса и Земли. Взаимосвязь между изменением физических факторов космоса и Земли и долгосрочным изменением гидрологических элементов в соответствующих регионах является основой для среднесрочного и долгосрочного гидрологического прогноза.

Для гидротехнических сооружений, таких как дамбы и плотина, мероприятия по обеспечению безопасности эксплуатации начинается с первоначального исследования основания плотины и продолжается на протяжении их проектирования, строительства и последующей эксплуатации. На этих этапах обычно решается множество технических проблем, связанных с прочностью конструкции, тем не менее существует риск того, что не все проблемы проявились или были обнаружены к моменту завершения строительства плотины.

Обследование конструкции – это постоянное наблюдение за физическим состоянием и работой гидротехнических сооружений, таких как плотины. Методика обследования должна быть разработана таким образом, чтобы с помощью нее можно было обнаруживать дефекты на ранней стадии, для своевременного принятия мер по корректирующим мероприятиям и обеспечению безопасности конструкции. Ранее считалось достаточным обеспечить требуемую безопасность объектов гидротехнической

инфраструктуры на стадии проектирования и последующем строительстве [8]. В современных условиях в период эксплуатации ГТС обязательна всесторонняя проработка вопросов безопасности. Особо опасные последствия для ГТС вызваны переходом через эти сооружения за пределы расчетного расхода воды при пониженных размерах водосбросных сооружений. Ежегодно в мире из-за сверхвысоких наводнений происходит около 3000 аварий из-за недостатков проектно-технических решений, а также из-за плохой работы эксплуатационных служб.

Наблюдение и мониторинг следует начинать как можно раньше в период жизненного цикла конструкции, чтобы выявить развитие любых дефектов и разрушений и предоставить полную справочную информацию о характеристиках конструкции. Любое необычное поведение, независимо от того, насколько оно кажется незначительным, должно быть выявлено и задокументировано, потому что это может быть предупреждением небезопасности конструкции.

Каждое гидротехническое сооружение должно иметь свою собственную программу обследования, объем которой должен соответствовать размеру плотины и емкости водохранилища, населению, подвергающемуся риску, и другим последствиям разрушения плотины, и, конечно же, экономической ценности сооружения для владельца.

Программа надзора должна включать ряд инспекционных мероприятий, от обычных инспекций эксплуатационным персоналом до всесторонних инспекций экспертами; систему комплексного мониторинга с помощью приборов для сбора информации или данных, относящихся к характеристикам конструкции; и ряд оценок безопасности (анализ безопасности или оценка безопасности), основанный на интерпретации собранных данных.

Одно из самых важных мероприятий в программе обследования гидротехнических конструкций, особенно плотинами, – это регулярные проверки безопасности ее отклонений и ухудшений, а также определения соответствия характеристик нормам конструкционной и эксплуатационной безопасности. Типы проверки безопасности различаются в зависимости от периодичности и целей проверки: ежедневные проверки, периодические проверки и специальные проверки.

– предпринимаются владельцем плотины в рамках своих обязанностей по эксплуатации плотины. Регулярные инспекции должны быть включены в повседневную работу обслуживающего персонала. В постоянно действующих операционных процедурах должны быть изложены руководящие принципы в отношении времени и частоты инспекций, а также требования к отчетности по инспекциям. Однако для этих проверок не существует стандарта отчета, поскольку они могут варьироваться от короткой еженедельной проверки для небольшой дамбы до проверки дважды в день для больших конструкций. Плановые проверки обычно проводятся раз в неделю в период строительства, 1-2 раза в день в период заполнения и раз в месяц во время нормальной

эксплуатации. В сезон паводков или в случаях высокого уровня наполнения следует увеличить частоту проверок.

Для бетонных плотин контрольный перечень проверок может содержать следующее:

1. Тело плотины. Проверяется дифференциальное движение между соседними монолитами плотины; деформация швов и гидроизоляция; растрескивание и протечка внешней поверхности; повреждение, эрозия и вымывание бетона; состояние сливных отверстий; просачивающийся сток и его химический состав; и т.п.

2. Фундамент плотины и устои. Проверяется наличие сдавливания, разрезания, разрыхления, растрескивания и т.д. В горных породах; надрезы, трещины и протечки на контактной поверхности плотины и фундамента; растрескивание, скольжение, выщелачивание и обходное просачивание в горном массиве примыкания; дренажные устройства; просачивание и прозрачность (химический состав).

3. Противопаводковые работы. Заиливание, засорение и повреждение входных патрубков; растрескивание и повреждение водосбросных сооружений; очистка и истирание рассеивателей; заиление и размыв русла нижнего течения.

4. Прочее. Проверяется наличие обнажения грунтовых вод вокруг плотины; изменение трещин на откосах берегов; положение ворот, пазов, опор и пломб; подъемник, система управления электроэнергией и резервные источники электроэнергии.

Периодические осмотры с целью выявления физических недостатков ГТС обычно проводятся инженерами путем визуального осмотра и анализа данных мониторинга. В отчете об инспекции следует полностью задокументировать состояние плотины и все недостатки или небезопасные факторы, а также изложить стратегию принятия корректирующих мер. Эти проверки обычно проводятся 2-3 раза в год. Время периодической проверки зависит от погодных условий в регионе. Например, если существует определенный сезон дождей, инспекции рекомендуется проводить сразу после сезона дождей, чтобы можно было спланировать и провести ремонтные работы до следующего сезона. Во время весеннего половодья осуществляется регулярный сброс воды с объекта.

Периодические осмотры с целью выявления физических недостатков ГТС обычно проводятся инженерами путем визуального осмотра и анализа данных мониторинга. В отчете об инспекции следует полностью задокументировать состояние плотины и все недостатки или небезопасные факторы, а также изложить стратегию принятия корректирующих мер. Эти проверки обычно проводятся 2-3 раза в год. Время периодической проверки зависит от погодных условий в регионе. Например, если существует определенный сезон дождей, инспекции рекомендуется проводить сразу после сезона дождей, чтобы можно было спланировать и провести ремонтные работы до следующего сезона.

Мониторинг технического состояния конструкции – это сбор, представление и оценка информации контрольно-измерительными приборами, установленными на/в гидротехнических сооружениях, который предназначен

для обнаружения ухудшения фактических характеристик конструкции, выявления трендов или поведения структурных разрушений для установления соответствия проектным требованиям или обеспечение подтверждения обоснованных допустимых отклонений в рамках проекта, для исправления проблем проектирования конструкции, которые не могли быть обнаружены на этапах проектирования и строительства, а также для установления исходной модели характеристик, по которой могут быть оценены последующие наблюдения. На сегодняшний день использование контрольно-измерительных приборов и датчиков для мониторинга гидротехнических сооружений в крупных и средних проектах широко распространено в международной практике. КИП должны охватывать возможности по мониторингу критических особенностей плотины, но в целях получения данных для сравнения и анализа некоторые из них также следует размещать в местах, где ожидается нормальное поведение.

Объем и степень сложности отдельных наборов КИП сильно различаются от объекта применения. Проектировщик, инженер-аналитик или инженер-инспектор должны определить проблемы, которые необходимо отслеживать, и включить соответствующие приборы в состав конструкции. Например, для маленькой дамбы можно сделать вывод, что нет необходимости в каких-либо приборах. Для гидротехнических сооружений 1 и 2 классов наиболее значимые параметры в мониторинге сгруппированы следующим образом:

1. Мониторинг рабочего состояния (мониторинг факторов окружающей среды), включая уровни воды вверх и вниз по течению, температуру воды в водохранилище, температуру окружающей среды, заиление перед плотиной, заиление и очистку вниз по течению.

2. Мониторинг протечек и протечек, включая отводы просачивающейся воды, байпас, прозрачность и химический анализ просачивающейся воды, поднятие в теле бетонной плотины, фреатическую линию в теле плотины насыпи и подъем в основании.

3. Внешняя и внутренняя деформация, включая горизонтальные и вертикальные смещения, раскрытие и сдвиг швов и трещин, изгиб и наклонную деформацию бетонной плотины, а также укрепление плотины насыпи.

4. Напряжение/деформация и температура, включая напряжение и деформацию внутри бетонной плотины, напряжение стального стержня, напряжение стального листа водозаборника и спирального корпуса, температуру в бетоне и скале фундамента, поровое давление в плотине насыпи и давление грунта.

5. Устойчивость берегового откоса участка плотины, сейсмический отклик плотины и гидравлические узлы.

Предпочтительная частота мониторинга изменяется со временем и связана с факторами отслеживаемых характеристик, стадией ЖЦП плотины и наличием каких-либо проблем или происшествий. После первого запруживания воды мониторинг проводится каждый день или через каждые десять дней и последующие пять лет мониторинг требуется проводить через каждые десять

дней или каждый месяц. После пяти лет службы обычно требуется один мониторинг за каждый месяц или квартал. Уровень верхнего и нижнего бьефа, а также температуру окружающей среды следует измерять каждый день. Частота внутреннего мониторинга должна быть устанавливаться с момента заполнения в течение одного месяца, сериями по 4 часа, 8 часов, 24 часа, 5 дней до планового интервала. Особые случаи, такие как наводнения и землетрясения, потребуют более интенсивного мониторинга. Частота контроля подлежит корректировке после длительного периода эксплуатации.

Оценка безопасности ГТС заключается в анализе данных, полученных в результате инспекций и мониторинга безопасности, которые могут быть довольно сложными и требовать дополнительного привлечения экспертов. При необходимости в состав комиссии должны быть привлечены геологи, гидрологи и других специалистов с соответствующим опытом. Следует также рассмотреть возможность независимой проверки инженерами, не участвовавшими в проектировке ГТС.

Частота проверок безопасности обычно зависит от возраста конструкции и пригодности технологии, используемой на этой конструкции – обычно в течение 3-5 лет вначале с момента начала эксплуатации. После первой проверки безопасности проверка безопасности проводится с интервалом в 5-10 лет. Для плотин, прослуживших более 30 лет, требуется всесторонний аудит и оценка безопасности, поскольку естественные условия (такие как заиление, промывка) и режим работы могут значительно измениться после долгой эксплуатации, также существенно сказывается старение вспомогательных конструкций и материалов.

Отчет об оценке безопасности должен включать следующее:

1. Заключение о безопасности с указанием того, находится ли ГТС в удовлетворительном состоянии и соответствии текущим проектным критериям.
2. Отчет о комплексной проверке.
3. Установленные нормы и допустимые отклонения (и их основы для обзорного анализа).
4. Методы анализа и результаты оценки (числовые и физические).
5. Выявление любых недостатков ГТС, включая рейтинги критичности этих недостатков.
6. Рекомендации по восстановительным работам, действиям в чрезвычайных ситуациях и/или дальнейшим исследованиям, которые следует предпринять, и графики для этих действий.

В оценке безопасности ГТС классифицируются на три группы: опасные, дефектные и обычные ГТС. Владелец ГТС несет ответственность за принятие и документирование соответствующих корректирующих мер. При незначительной опасности ГТС предпринимают действия по ее укреплению и предупреждению прорывов [8].

Стандарты и нормы промышленного и гражданского строительства разрабатываются для обеспечения безопасности населения и окружающей инфраструктуры [9]. Регулирование в области проектирования, строительства и

обслуживания сооружений, включая здания и мосты, является прерогативой государства. Во этой связи государственные органы, а также общества, учреждения и ассоциации регулярно разрабатывают и дополняют нормы, правила и стандарты. Одним из первых практических руководств по мониторингу технического состояния конструкции стало Руководство по МТС, выпущенное Канадским Ресурсным Центром по Интеллектуальному мониторингу для инновационных конструкций [10]. Подобные стандарты способствуют улучшению мониторинга безопасности конструкции, требуя установки датчиков на существующих конструкциях, которые будут информировать лиц, принимающих решения о потенциальной опасности, своевременно для принятия необходимых мер и определения дальнейшего периода эксплуатации конструкции. Кроме того, улучшенные стандарты обеспечат более длительный срок службы недавно построенных мостов при различных воздействиях окружающей среды за счет внедрения систем мониторинга надлежащего уровня. Как видно, организации по стандартизации регулярно обновляют свои нормы и стандарты в соответствии с географическими и экологическими изменениями.

Ученые разработали методы вероятностных исследований автомобильных мостов, предлагающие решения, основанные на надежности конструкций с учетом сценариев бедствий и катастроф [11, 12]. Поскольку государственное финансирование для ремонта железных дорог, мостов и других сооружений ограничено, то установка датчиков может помочь в определении приоритетов тех конструкций, которые необходимо отремонтировать в первую очередь [13]. Фактические, результаты исследований в области сенсоров и технологий мониторинга могут быть применены в качестве аргументов в пользу того, что сенсоры должны быть включены в последующие строительные конструкции, а не просто добавляться к существующей инфраструктуре.

На сегодняшний день существуют определенные строительные стандарты, описывающие добавление систем МТС к существующим инфраструктурам [14]. Если бы национальные органы по стандартизации могли регулировать и стандартизировать системы МТС в контексте новых стандартов проектирования, их применение: 1) могло бы помочь идентифицировать существующую разрушающуюся инфраструктуру; 2) стать неотъемлемым компонентом проектных требований; и 3) регулировать методологию, необходимую для количественной оценки структурных повреждений в будущих возможных сценариях. Сотрудничество между разными странами в области гражданского строительства приносит пользу исследователям и инженерам во всем мире. Например, повторное использование последних существующих стандартов проектирования в новой дисциплине, адаптированной в одной стране, может значительно сократить время и стоимость решения тех же технических и нормативных вопросов в других странах. Более того, вновь разрабатываемы нормативно-технические документы в разных странах могут достичь более высокого качества, если

разрабатывающие органы собирают и учитывают знания и опыт других стран [15]. За последние два десятилетия в разных странах были успешно внедрены системы МТС долгосрочного применения на мостах разного типа, протяженности и уровня значимости. Кроме того, системы мониторинга в реальном времени были установлены на ряде мостов в Китае, включая мост через залив Чжаньцзян; в Мост Хиру; и мост через реку Биньчжоу через реку Хуанхэ. Однако остается разрыв между развитием систем МТС на мостовых конструкциях и требованиями, стандартами по МТС [16].

На сегодняшний день существуют документы, устанавливающие рекомендации по выбору и применению систем МТС; тем не менее, эти документы не затрагивают технических требований к МТС и датчикам, и, как правило, они не направлены на обязательное применение в части требования по монтажу в проектируемые конструкции. В таблице перечислены результаты сравнительного анализа нормативно-технических документов Австралии, Китая, Канады, Европейского Союза, Великобритании, Швейцарии и США по обслуживанию и мониторингу ГТС. Указанные документы опубликованы на веб-сайтах различных региональных, национальных или международных организаций по стандартизации. Стандарты, представленные в этой таблице, доступны для широкого круга. Европейский Союз разработал документ по структурной оценке, мониторингу и контролю (SAMCO) для обслуживания инфраструктуры и предотвращения стихийных бедствий. База данных SAMCO в основном используется для обслуживания инфраструктуры, особенно для управления мостами. Системы МТС в Великобритании применяются к различной гражданской инфраструктуре (например, плотинам, мостам, морским установкам, ядерным установкам и т.д.). В Великобритании плотины были первыми сооружениями, для которых законодательство предписывало инспекции в рамках МТС, и последнее время больше внимания уделяется мостам. Рекомендации по внедрению МТС в Великобритании включают требования по низкой стоимости систем (инвестиции) и высокой прибыльности (доходность). Реализация датчиков, то есть общее количество датчиков, которые будут установлены на конструкции, их расположение, SHM в Великобритании применяется к различной гражданской инфраструктуре (например, плотинам, мостам, морским установкам, ядерным установкам и т.д.). В Великобритании плотины были первыми сооружениями, в отношении которых законодательство требовало инспекций SHM, хотя в последнее время больше внимания уделяется мостам. Реализация датчиков, то есть общее количество датчиков, которые будут размещены на конструкции, их расположение, расстояние между ними, а также алгоритмы и обработка должны быть соответствующим образом определены заранее, чтобы избежать перегрузки данных, включая количество измерений, технические требования и разные уровни точности для разных наборов собираемой информации. Воздействие окружающей среды, включая шум, на системы МТС может серьезно повлиять на обнаружение или создавать помехи в работе.

Органы по стандартизации Австралии и Канады также предлагают различные решения для развития МТС. Австралийская сеть МТС (ANSHM) была создана в 2009 году для (1) ускорения развития МТС, (2) увеличения практических результатов в данной области, (3) улучшения национальных и международных исследований в области МТС и (4) повышения осведомленности населения о значимости МТС в Австралии. В статьях, опубликованных ANSHM, обсуждаются различные компоненты, используемые в МТС, и предлагаются предложения относительно будущих МТС в Австралии.

Канадский Ресурсный Центр по Интеллектуальному мониторингу для инновационных конструкций, представил стандарты по базовым методам в МТС [17]. Данные стандарты также охватывают такие аспекты, как ремонт и усиление конструкций (использование армированных волокном полимеров), интеллектуальный мониторинг (встроенные оптоволоконные датчики, датчики с волоконной решеткой Брэгга), экономический эффект (срок службы конструкций будет продлен с помощью МТС), удаленный мониторинг, и интеллектуальная обработка [17, р. 90]. Хотя стандарты МТС этих учреждений могут не соблюдаться их правительствами.

Американские федеральные организации не требуют добавления датчиков к мостам и конструкциям при проектировании и строительстве инфраструктуры.

Успех развития МТС в США и других странах можно отнести к отдельным университетам, штатам и техническим комитетам. В исследовании МТС мостов и зданий есть межстрановые совместные проекты, но они носят академический характер. Если бы определяющие стандарты по МТС и датчикам могли бы реализованы во всем мире, как это было сделано в других областях технического проектирования, то нормативные требования могли бы одновременно и более эффективно развиваться в сфере применения МТС (таблица 1).

Таблица 1 – Обзор стандартов по МТС, применяемых в странах мира

Страна	Наименование	Краткое описание
1	2	3
Австралия	Мониторинг технического состояния в Австралии	Представляет историю МТС, последние разработки и исследования, проведенными Австралийскими университетами
Китай	Техническая спецификация системы мониторинга состояния конструкций для мостов в Тяньцзине	Разработана для МТС мостовых сооружений в Тяньцзине.
Китай	Стандарт проектирования систем мониторинга состояния конструкций	Используется для МТС сооружений гражданского строительства в период строительства и обслуживания
Китай	Технические нормы анализа строительного процесса и мониторинга строительной техники	Разработан для строительных процессов, в части анализа и контроля зданий

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Китай	Технический кодекс по мониторингу конструкций и мостовых сооружений	Стандарт по МТС многоэтажных и высотных конструкций в Китае
Канада	Рекомендации по мониторингу состояния конструкций	Демонстрирует преимущества МТС для начинающих инженеров в этой сфере
Канада	Армирование бетонных конструкций фиброармирующими полимерами (ФАП)	Предоставляет рекомендации по проектированию для бетонных конструкций, армированных при помощи ФАП
Европейский союз	Глоссарий мониторинга SAMCO (Структурная оценка, мониторинг и контроль)	Применение структурной динамики для проведения МТС на основе вибрационных методов
	Мониторинг внешней вибрации	Введение в мониторинг внешней вибрации
	Руководство по структурному мониторингу	Обзор демпфирующих устройств и алгоритмов управления
	Руководство по оценке существующих конструкций	Принципы и процедуры оценки конструкций
	Руководство по мониторингу состояния конструкций	Введение в существующие процедуры, технологии и рекомендации по применению МТС
	Отчет по управлению мостами	Введение в управление и требованиям мостами
	Структурный мониторинг состояния инфраструктуры ПГС	История и новейшие разработки МТС
Швейцария	Основы сбережения сооружений	Введение в сохранение существующих конструкций
США	Разработка типового руководства по мониторингу состояния основных мостов	Знакомит с концепциями МТС и описывает принципы мониторинга показателей состояния мостов как в аналитических, так и в экспериментальных условия
США	Правила для обеспечения долговременной работы мостов	Представляет собрание 51 правил, применяемых для сбора данных, интеллектуального анализа данных мостов, визуального осмотра, отбора проб и материалов, оценки мостов и данных управления

1.3 Введение в структурный мониторинг состояния конструкций

Строительные материалы и композиты на основе цемента незаменимы для различных инженерных конструкций: высотных зданий, мостах, путепроводах, плотинах, туннелях и автомагистралях. Такую распространенность цементные материалы получили за счет доступности и распространенности исходного сырья, простоты в обращении, низкой

стоимости и, самое главное, за счет высокой прочности и долговечности при эксплуатации. Тем не менее, хрупкость бетона, старение и разрушение бетона зачастую могут служить причинами обрушения конструкций, а также риску имущества и нанесению вреда здоровью граждан. Таким образом, мониторинг технического состояния конструкций и основных элементов конструкций является важным для своевременного определения трещин, дефектов и повреждений бетона и предотвращения последующего разрушения конструкций. Системы детектирования, такие как, пленочные тензометрические датчики, оптический кабель, пьезокерамические сплавы и сплавы с памятью формы исследовались для мониторинга состояния конструкций из цемент содержащих материалов в течение многих лет.

Система мониторинга выполняет решение такой из важных практических аспектов как увеличение срока ремонта конструкции за счет данных постоянного инструментального контроля. Необходимость проведения ремонта определяется на основе оценки технического состояния строительных конструкций используя контрольные показатели в виде собственных частот колебаний, прогиба, осадки, наклона и предела прочности материала, которые находятся с использованием автоматически работающих измерительных устройств. В связи с чем отсутствует необходимости назначения ремонта по графику. В последние годы наметилась тенденция более широкого использования автоматизированных систем мониторинга технического состояния конструкций (МТС).

Мониторинг технического состояния (МТС) бетонных конструкции относится к процессам стратегии диагностики и идентификации повреждений [18]. Существующие методы ручной периодической оценки состояния конструкции через определенные интервалы времени могут быть дорогостоящими и трудоемкими. Достижения в области сенсорных технологий, беспроводной связи, методов обработки данных и искусственного интеллекта в сочетании с постоянно растущим числом устаревших структур и стремлением минимизировать затраты на техническое обслуживание, снижение количество сбоев в работе и непредвиденных простоев привели к разработке более умных методов МТС [19-22].

Современные системы МТС могут применяться на постоянной основе и способны к непрерывной и систематической диагностике, мониторингу и оценке структурных и экологических условий. Полученные данные затем используются для оценки ключевых параметров производительности конструкции, чтобы сделать выводы о состоянии или производительности конкретной инфраструктуры. В конечном счете данный процесс помогает принять оптимальное решение о необходимости обслуживания и предотвращения катастрофических разрушения конструкции. Отслеживание таких параметров, как наличие дефектов, трещин, деформации, давления, уровня рН, влажности или температуры, может помочь в определении источника и уровня повреждения [19, p. 22; 23].

МТС проводится с применением методов разрушающего и неразрушающего контроля. Разрушающие методы, например, химический анализ требуют извлечения и последующей обработки образца. Таким образом, такой метод контроля является трудоемким, дорогостоящим и позволяет получать результаты только после проведения лабораторных испытаний. С другой стороны, методы неразрушающего контроля, включая метод акустическую эмиссию [24], ударного отскока [25] (СТ РК EN 12504-2-2011) и ультразвуковой контроль (СТ РК ИСО 1920-7-2009), являются более простыми, более экономичными и могут давать результаты без необходимости в проба извлечении [22, р. 495; 26]. Тем не менее, большинство разрушительных и неразрушающих методов не предоставляют данные непрерывного мониторинга здоровья, требующие использования интеллектуальных датчиков для решения этой проблемы.

Технологии оценки, применяемые МТС в зависимости от производительности и степени сложности могут быть классифицированы как показано на рисунке 1 [22, р. 497]. Многие оценки неразрушающего контроля, включая ультразвуковой контроль (СТ РК ИСО 1920-7-2009), которые поддерживают только обнаружение локальных повреждений (таких как обнаружение трещин), могут быть классифицированы как уровень I или II [9, р. 95; 27]. Датчики, в зависимости от их принципа работы, могут быть классифицированы от уровня II до уровня V. Умные композиты, самовосстанавливающиеся бетоны и умные конструкции классифицируются на уровни IV и V. Эти технологии все еще находятся в зачаточном состоянии, но ожидается, что они станут применяться в МТС.



Рисунок 1 – Классификация МТС по характеристикам и степени сложности

Непрерывный и in-situ мониторинг характеристик бетона в определенных условиях воздействия является ценным инструментом для получения реальной оценки степени износа и эксплуатационных характеристик конструкции. Датчики могут использоваться для сбора широкого спектра данных от отверждения бетона до его ежедневной производительности, а также его появления или развития коррозии (в бетоне или арматуре) в разные моменты его жизненного цикла. Встраивание датчиков в бетонные конструкции – это многообещающий, неразрушающий подход, способный собирать беспрецедентные объемы данных. От быстрых начальных испытаний до изменяющихся данных о производительности встроенные датчики могут обеспечить плавное обновление и долговременное управление данными о производительности конструкции. Основные параметры производительности конструкции (ППК) могут отслеживаться в течение срока полезного использования конструкции с использованием различных типов датчиков [22, p. 501].

Типичная автоматизированная система МТС для бетона работает по следующему принципу [22, p. 503; 23, p. 592]: данные ППК собираются от встроенных датчиков, таких как рабочие нагрузки, трещины, скорость коррозии, влажность и pH. Полученные данные поступают в систему обработки и визуализации данных. Собранные данные передаются через провод или беспроводную систему передачи. Хотя способ беспроводной передачи является более дорогим и имеет более низкую скорость передачи, предпочтительно использовать подводный провод, поскольку провода не являются практичным вариантом для многих структурных конфигураций, и на более длинных расстояниях отношение сигнал/шум может стать проблематичным. Компьютерное программное обеспечение может использоваться для визуализации данных, передаваемых беспроводным способом, на считывающее устройство. Строители могут понимать и принимать решения на основе представленных графиков. Дальнейшее развитие позволит раннее обнаружение обширной коррозии, определение срока службы и долгосрочной надежности гражданской инфраструктуры. Это продвижение может легко заменить примитивный способ забивания железобетона в поисках пустот и повреждений.

Бетонные датчики либо встроены в конструкционный материал, либо прикреплены к поверхности элемента для оценки повреждений в реальном времени. Они могут быть размещены в новых или существующих структурах. В случае существующих конструкций используемый раствор должен иметь химический профиль, аналогичный существующему бетону. Поверхностные датчики подходят для существующих конструкций. В строящихся конструкциях рекомендуется установка встроенных датчиков до или во время литья. В то время как бетонные датчики предлагают значительные преимущества по сравнению методами разрушающего контроля, все они имеют свои определенные отличительные особенности и недостатки. Датчики с батарейным питанием имеют ограниченный срок службы, а кабельные датчики нецелесообразны в обращении. Встраивание датчиков в конструкцию может

привести к появлению небольших трещин (<1 мкм), которые могут ускорить проникновение опасных хлорид-ионов или влаги. Конкретные датчики подвергаются жесткой жизни. Таким образом, они должны быть достаточно прочными, чтобы противостоять морозам, экстремальным температурам, нагрузкам, агрессивным средам (в соленой, щелочной или кислой среде) и долгосрочному размещению в бетоне. Они могут даже подвергаться воровству и вандализму в течение срока их службы. Тем не менее, для долгосрочного мониторинга дрейф сенсора является большой проблемой, особенно для встроенных систем, потому что калибровка затруднена или невозможна [28].

Выбор датчиков для конкретной конструкции представляет собой сложную процедуру, основанную на нескольких факторах, включая актуальность, надежность датчика, временной интервал мониторинга (долгосрочный или краткосрочный), временной масштаб мониторинга (периодический или непрерывный), тип конструкции для быть контролируемым, аспект структуры должен контролироваться, и способ, которым вызывается реакция в структуре (статическая нагрузка - динамическая нагрузка – окружающая вибрация) [29]. Есть также несколько технологий, лежащих в основе сенсорного дизайна.

Система МТС может иметь разные уровни сложности. Например, система МТС, предназначенная для моста, может иметь минимальную, общую или сложную компоновку, как показано в таблице 2 [22, р. 502]. Используемые типы датчиков: вибрационные тензодатчики (VWSG), термисторы, оптоволоконные (SOFO) датчики, тензодатчики сопротивления, акселерометры, линейные потенциометры (LP) и датчики контроля коррозии [30].

Таблица 2 – Комплектация систем МТС моста в зависимости от уровня сложности

Минимальная	Общая	Сложная
Метеостанция Датчик температуры Волоконно-оптический датчик Датчик механического напряжения Инклинометр Коррозионная ячейка Двухосный акселерометр	То же, что в минимальном + следующее: Лазерный датчик смещения Система глобального позиционирования (GPS) Станция взвешивания (WIM) Трехосный акселерометр Анемометр Датчик влажности Датчик давления грунтовых вод Сейсмический акселерометр	То же, что и в Общей + следующее: Датчик износа дороги СВЧ интерферометрический радар Датчик акустической эмиссии Pyradometer Фотограмметрия Датчик гидравлического давления Наземный радиолокатор Мостовая станция WIM Термография

Степень сложности МТС напрямую влияет на качество и стоимость системы. Сложные системы МТС могут иметь многочисленные преимущества от мониторинга состояния до управления рисками и активами, в частности, в

труднодоступных структурах. В идеале такие системы должны работать с минимальным количеством датчиков. Однако такие системы требуют использования нескольких датчиков и сложных технологий и систем обработки данных. Стоимость такой системы должна быть обоснована, а выбор датчика и конструкция МТС всегда должны использоваться в сочетании с окупаемостью.

Тема МТС конкретных инфраструктур очень сложна и обширна и может быть оценена с разных точек зрения. Это можно увидеть из использованных принципов физического мониторинга, разработанных датчиков и систем мониторинга и способов их настройки или даже стандартизации [31]. Оценка этого предмета с разных точек зрения не только может улучшить наше понимание этого сложного предмета, но и создаст основу для дальнейших достижений и инноваций в этой области.

Выводы по разделу

Данные, полученные в результате мониторинга физических величин в инфраструктурах (например, напряжение и температуры), могут применяться для информирования владельцев и пользователей ГТС об их потенциальной опасности и риске. Это особенно актуально, учитывая, что системы МТС могут оценивать и количественно определять потенциальное повреждение конструкции [32]. Технологии МТС могут обеспечить оценку безопасности конструкции при рассмотрении ее пригодности к эксплуатации, особенно после разрушительных событий, когда необходимо быстро оценить конструкции с точки зрения повреждений, помогая принимать решения [16, р. 15]. МТС также применяется для количественной оценки долговечности и устойчивости конструкций и разрушения в течение ожидаемого срока службы, и, следовательно, они должны разрабатываться с учетом как долговечности, так и устойчивости датчиков в соответствии структуре, в которую установлены.

Системы МТС начали широко применяться в начале 2000-х годов, технологии МТС были внедрены на длиннопролетных мостах. Тем не менее за годы роста МТС были обнаружены проблемы эксплуатации МТС на мостах. Пользователи систем МТС столкнулись с проблемой, что не могли определить конкретный срок службы датчиков, установленных на мостах, и не были знакомы с процедурами технического обслуживания после установки [16, р. 12]. Кроме того, отсутствуют документы, определяющие требования к количеству датчиков и расчету стоимости систем МТС для мостов. Также, большие объемы данных, полученные от систем МТС, не подвергались систематическому анализу и глубокому анализу, и эта информация не могла использоваться для принятия решений по обслуживанию моста. Следовательно, существующие документы и стандарты системы МТС не содержат указаний или правил, которые можно было бы стандартизировать и применять. Вышеуказанные проблемы могут быть решены, если будут включены всесторонние исследования и результаты исследований будут внедрены в практику.

2 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ (ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНИМЫЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МТС)

2.1 Возникновение и контроль микронапряжений

Уже около 20 лет модели микромеханики сплошных сред, основанные на задачах упругих матричных включений Эшелби или Лоуса [33, 34], такие как классические схемы Мори-Танака или самосогласованные схемы [35-37], успешно вошли в области био- и геоинженерии и используются для изучения важных зависимостей «структура-свойство» в бетонах [38-40] в масштабах длины от десятков нанометров до нескольких сантиметров [41].

В микромеханике сплошных сред композитный материал считается однородным в макромасштабе, но гетерогенным в микромасштабе. При этом на микроуровне выделяют так называемый элемент представительного объема (ЭПО), имеющей характеризующий размер ℓ [42]. Это удовлетворяет принципу разделения шкал [37, р. 810]:

$$d \ll \ell \ll D \quad (1)$$

где d обозначает характерную длину неоднородностей в пределах ЭПО, а D обозначает размер структуры, образованной с помощью данного ЭПО, или характерную длину приложенной внешней нагрузки. Отношение ℓ / d обычно находится в диапазоне от 2 до 3, тогда как отношение D / ℓ обычно находится в диапазоне от 5 до 50 [43].

В общем случае, микроструктура каждого ЭПО бетона слишком сложна, чтобы ее можно было рассматривать детально. Поэтому вместо это вводятся квазиоднородные подобласти [42, р. 2693]. Их называют фазами материалов. Гомогенизированные свойства ЭПО определяются свойствами фаз материалов, их формой, объемными долями и взаимодействиями [37, р. 809].

Структура бетона, состоящая из цементной пасты, мелкого и крупного заполнителей, рассматривается как два матрично-включенных композита, представленных на двух уровнях наблюдения. Идеальный бетон рассматривается как сплошная матрица цементного раствора, вмещающая сферические включения крупного заполнителя, как указано на рисунке 2а. Цементный раствор, в свою очередь, рассматривается как сплошная матрица цементной пасты с сферическими включениями мелкого заполнителя, как указано на рисунке 2б.

Следуя заключениям Пихлера и Хельмиха [44], Кенигсбергера [45] представим микроструктуру бетона, изготовленного из обычного Портланд цемента, как иерархическую модель из трех ЭПО. В крупном масштабе наблюдения, ЭПО в сантиметровом диапазоне представляется, как цементная паста, которая состоит из сферических частиц щебня, гравия (песка), включенного в матрицу цементного камня, как указано на рисунке 2а. На среднем масштабе наблюдения, ЭПО представляется в субмиллиметровом

диапазоне, как цементная паста, состоящая из сферических непрореагировавших зерен клинкера, включенных в гидратированную матрицу, как указано на рисунке 2б. На самом мелком уровне наблюдения, микромиллиметровый ЭПО представляется в виде гидратированной матрицы, которая состоит из сферических капиллярных пор, включенных в игловидные гидратные фазы, которые равномерно ориентированы во всех направлениях пространства [45, р. 85].

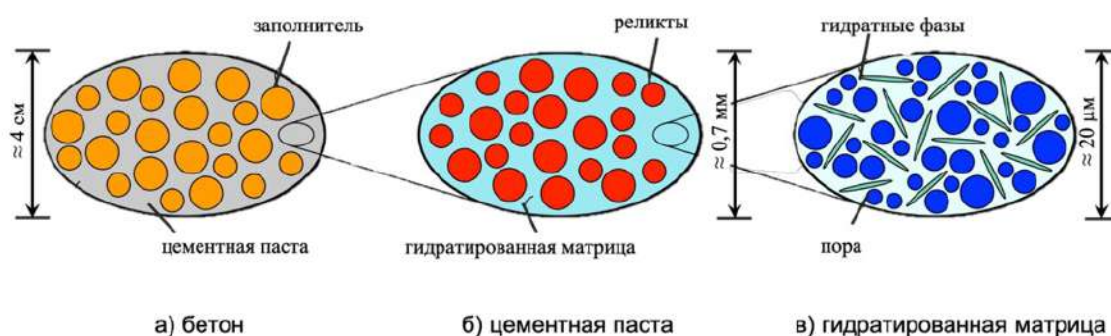


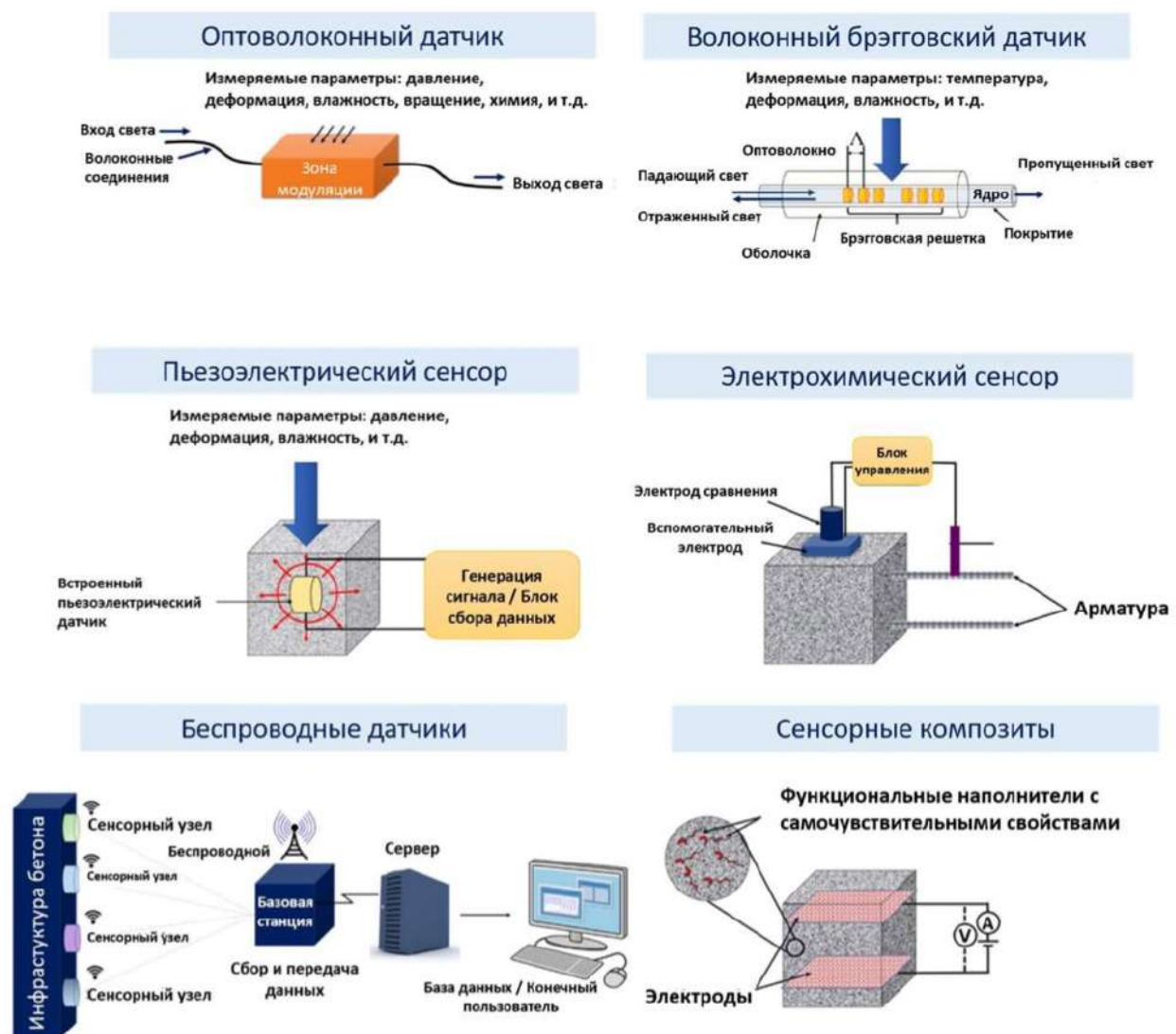
Рисунок 2 – Органограмма бетона

Передовые технологии для разработки датчиков, применяемых в настоящее время для МТС конструкций:

1. Волоконно-оптические и брэгговские датчики.
2. Пьезоэлектрические датчики.
3. Электрохимические датчики.
4. Беспроводные датчики.
5. Бетон самочувствительный.

Эти датчики могут быть разделены на две группы. В одну группу входят все датчики, которые монтируются снаружи к элементу конструкции для создания для проведения МТС – внешние датчики. Другая группа включает встроенные датчики, которые встроены в несущую часть конструкции. Чтобы получить данные для определения работоспособности конструкции, необходимо, чтобы внешние датчики должны быть размещены в разных положениях на структурном элементе конструкции. Кроме того, необходимо учитывать, что все типы датчиков имеют разные возможности измерять физические и химические параметры, так например, обычный тензометр способен воспринимать напряжение, тогда как волоконно-оптические датчики способны воспринимать напряжение и влагу. В зависимости от цели проведения измерения для МТС, правильный датчик должен быть выбран и применен. Но гораздо более важный фактор, который является одной из главных проблем всех датчиков – это долговечность, надежность и стабильность воспринимающей способности в течение срока службы конструкции [21, р. 725].

Иллюстрация каждой сенсорной технологии [22, р. 505] представлена на рисунке 3.



а – оптоволоконного датчика; б – волоконный датчик решетки Брэгга; в – пьезоэлектрический датчик; г – электрохимический датчик; д – беспроводная система датчиков; е – самораспознающий бетон

Рисунок 3 – Изображение образцов

2.2 Внешние датчики

2.2.1 Тензометрические датчики

Тензодатчики электрического сопротивления или также известные как тензодатчики являются наиболее используемые датчики в исследованиях. Функциональность тензодатчиков очень проста и надежна. Датчик настроен на постоянный электрический ток. С приложенным усилием или деформацией датчик изменяет электрическое сопротивление. Обнаружив эти изменения, можно измерить деформацию образца в месте установки датчика. Тензодатчики в основном крепятся на поверхности, но могут также закладывается в бетон или устанавливается на арматурные стержни бетонных конструкций, параметром тестирования тензодатчиков является только деформация [46]. Причины, по

которым тензодатчики широко используются для измерения деформации, потому что они просты в установке, имеют меньшую стоимость и отличную воспроизводимость. Они также показывают очень хорошее соответствие между измеренным и оцененным напряжениями. Но чувствительность, также выраженная калибровочным фактором, очень низкая в диапазоне от 2 до 5. Кроме того, на тензодатчики легко влияют электромагнитная интерференция. Дополнительные недостатки: склонность к дрейфу и высокая чувствительность к влаге и влажности, что делает датчики менее долговечными и не подходит для долгосрочного мониторинга. В случае крупных образцов, тензодатчики не будут охватить все возможные положения изгиба, которые могут привести к непредвиденному внезапному разрушению образца [47]. Некоторые из этих аспектов незначительны для лабораторных испытаний, но имеют чрезвычайно высокую актуальность для МТС, что делает тензодатчики незаменимыми для применения в течение длительного времени для целей МТС.

2.2.2 Беспроводные датчики

Беспроводные датчики на самом деле являются узлами и платформами для автономного сбора данных, поэтому они не являются настоящими датчиками. Традиционные конструктивные датчики, такие как пьезоэлектрические площадки, могут быть прикреплены к беспроводным платформам и могут использовать преимущества своих мобильных вычислительных и беспроводных элементов связи (рисунок 2e). Беспроводная технология устраняет необходимость в обширной проводке между датчиками и системой сбора данных, следовательно, они имеют меньшие затраты на установку и позволяют гибко конфигурировать систему. Однако беспроводные датчики на батарейках по-прежнему связаны со значительными проблемами, связанными с их энергопотреблением, размером, стоимостью, дальностью связи, конструкцией оборудования и риском потери данных. Беспроводные альтернативы, известные как датчики радиочастотной идентификации (RFID), в настоящее время исследуются для решения проблем энергопотребления беспроводных датчиков [48].

2.3 Встроенные датчики

2.3.1 Волоконно-оптические и брэгговские датчики

Одной из наиболее быстро растущих областей МСК в гражданском строительстве является разработка и использование волоконно-оптических датчиков (ВОД). Оптоволоконная чувствительная функция основана на изменениях характеристик светового сигнала, передаваемого по оптоволокну. Типичное оптическое волокно изготовлено из стекловолокна. Хотя полимерные оптические волокна (ПОВ) были введены в то же время, что и стеклянные волокна, и с ними гораздо легче обращаться, на рынке ВОД преобладают стеклянные оптические волокна (СОВ). Полимерные волокна также способны регистрировать гораздо более высокие скорости деформации (до 100%), в то время как предел стекловолокна составляет около 2% [49].

Оптическое волокно изготовлено из цилиндрического сердечника, заключенного в концентрическую оболочку, и полимерного или металлического покрытия (например, акрилата, полиимида, алюминия или золота). Он способен передавать свет и сигнал на очень большие расстояния без необходимости усиления. Воздействие внешних возмущений или деформации (например, растяжения, изгиба или деформации) оптического волокна влияет на передаваемый оптический сигнал и приводит к изменению характеристики выходного сигнала (например, фазы, частоты, поляризации или интенсивности) или сдвигу в отраженной длине волны. Эти изменения могут быть связаны с измеряемым параметром (рисунок 2а). Оптоволоконные датчики имеют ряд преимуществ перед другими методиками считывания, включая более высокую чувствительность, уменьшенный размер и вес, невосприимчивость к электромагнитным помехам (EMI), а также являются относительно недорогими [50]. Волоконно-оптические датчики бывают разных типов, включая интерферометрические, интенсивные, микроизгибные, поляриметрические, длины волн, распределенные (с использованием методов рассеяния Бриллюэна, Рэлея или комбинационного рассеяния), волоконно-оптические брэгговские решетки (FBG) и гибридные датчики [51].

Среди ВОД датчики FBG являются наиболее часто используемыми ВОД в МТС и особенно универсальны (рисунок 2б). Метод FBG был впервые изобретен Хиллом и коллегами [35, р. 217]. Однако это стало распространенным методом только после 1989 года, когда Morey et al. [52], сообщили о изготовлении датчиков FBG путем воздействия на волокно со стороны интерференционной картины, сформированной ультрафиолетовым излучением. С тех пор было исследовано и протестировано значительное количество различных преобразователей. FBG – это периодическое изменение показателя преломления по длине волокна, образованного в результате воздействия на сердечник интенсивной оптической интерференционной картины. Датчики FBG превосходят волоконно-оптические (или даже электронные датчики) методы с точки зрения стабильности измерений и нечувствительности наведения/соединения. Эти датчики имеют то преимущество, что имманентно защищены от флуктуаций интенсивности сигнала, поскольку они имеют спектрально кодированный сигнал [22, р. 502]. Недостатки ВОД включают в себя дорогостоящий характер его системы запросов, хрупкость, необходимость в специалистах по проектированию и развертыванию волокон и необходимость в нескольких повторителях для усиления сигнала.

2.3.2 Пьезоэлектрические датчики

Обнаруженный братьями Кюри в начале 1880-х годов [53], пьезоэлектрический эффект стал центральным элементом для реализации многочисленных его применений. Пьезоэлектрический датчик может измерять изменения параметров, таких как акустическая эмиссия, температура, деформация, сила, давление или ускорение. Он преобразует эти параметры в

измеримый электрический заряд. Пьезоэлектрические материалы могут преобразовывать электрическую энергию в механическую энергию и, наоборот, механическую энергию в электрическую энергию. Пьезоэлектрические материалы могут играть разные роли; они могут функционировать как датчики, исполнительные механизмы, ускорители и преобразователи. Например, структурные повреждения, такие как смещение, начало трещины или распространение, генерируют волны напряжения за счет внезапного выделения энергии, которое можно обнаружить с помощью методов пассивной акустической эмиссии (АЭ) и пьезоэлектрических датчиков [54, 55]. Среди пьезоэлектрических материалов (керамика, полимеры и композиты) пьезоэлектрические керамические материалы являются наиболее доминирующим типом материала. Они имеют очень стабильные механические свойства в широком диапазоне температур. Они могут выдерживать температуры до 350°C, не теряя своей конверсионной способности между электрической энергией и механической энергией [56].

Пьезоэлектрические керамические материалы ($\text{Pb} [\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}] \text{O}_3$, цирконат-титанат свинца или PZT) с широкополосным излучением и акустическим импедансом около 30 МРэлей являются наиболее популярными электромеханическими преобразователями, когда требуются более высокие частоты (например, для локальных обнаружений повреждений). PZT содержит почти 60 мас.% Свинца (Pb); поэтому несколько альтернативных бессвинцовых пьезоэлектрических материалов, таких как BaTiO_3 (BT), $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (NBT), $\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (KBT), BiFeO_3 (BFO), $\text{K}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{NbO}_3$ (KNN) или а Их сочетание в настоящее время изучается. Однако применение пьезоэлектрических материалов без содержания свинца ограничено по сравнению с PZT [57]. Согласно европейскому стандарту EN 50324 свойства PZT можно классифицировать как мягкие или твердые. Мягкие материалы PZT являются идеальными кандидатами для приводов и датчиков, в то время как твердые материалы PZT подходят для мощных применений и ультразвуковых преобразователей. Использование пьезоэлектрических пластирей и «умных пластирей» было зарегистрировано для мониторинга состояния конструкций, восстановления и демпфирования вибраций. В конструкции пьезоэлектрических преобразователей и датчиков все еще есть некоторые недостатки, которые могут приводить к ложным показаниям в конструктивных условиях. Проблемы проектирования включают, но не ограничиваются растворимостью в воде некоторых пьезоэлектрических кристаллов (не подходит для влажных сред), влиянием температуры на пьезоэлектрические свойства, ограничениями в улучшении пьезоэлектрических свойств (например, коэффициентом электромеханической связи). акустический импеданс), постепенное ухудшение электромеханических свойств преобразователя PZT и влияние связующего слоя между пластирем PZT и бетонной конструкцией.

2.3.3 Электрохимические датчики

В электрохимическом датчике отклик напрямую связан с составом или количеством определенного химического элемента, наличием определенного элемента или иона или химической активностью. Потенциометрические, амперометрические и кондуктометрические являются тремя основными типами электрохимических датчиков [58]. В потенциометрических датчиках разность потенциалов между двумя электродами предоставляет информацию о составе образца. РН-электрод является наиболее часто используемым потенциометрическим устройством. Амперометрический датчик измеряет ток, протекающий между контрольным электродом и рабочим электродом, как результат потенциала, используемого для окисления или восстановления электроактивных частиц. Типичный амперометрический датчик состоит из твердого вспомогательного рабочего электрода (такого как углерод, платина и золото), электрода сравнения (такого как Ag/AgCl , $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$) и противозэлектрода из проводящего материала (обычно платины), (рисунок 3-г). Противозэлектрод имеет больший размер, чем рабочий электрод, и подает ток на рабочий электрод [59]. Кондуктометрический датчик измеряет проводимость пленки или объемного материала на ряде частот. Датчики смешанной оксидной проводимости часто используются в качестве датчиков влажности. В электрохимических датчиках качество измерения сильно зависит от стабильности электрода сравнения. Низкобюджетные датчики ненадежны и могут со временем дрейфовать, в то время как стабильные эталонные датчики, такие как ERE20, довольно дороги.

Использование электрохимических датчиков является популярным подходом к мониторингу коррозии железобетонных конструкций. Измерение потенциала разомкнутой цепи на основе ГОСТ Р 52804 [8, с. 106] является примером электрохимического датчика, используемого в бетоне МТС, который измеряет электрохимический потенциал между тестируемым рабочим электродом из черной стали и электродом сравнения. Поверхностный потенциал, удельное сопротивление бетона (ρ), поляризационное сопротивление (R_p), анализ шума и гальванический ток (i_{gal}) являются другими типами широко используемых электрохимических датчиков для SHM бетонной инфраструктуры. Электрохимические датчики могут быть оснащены беспроводными системами для передачи данных.

2.3.4 Самочувствительный бетон

В самочувствительном бетоне преобразователь используется для приведения в действие и измерения одновременно. Материалы с собственными чувствительными свойствами, такие как углеродные нановолокна (CNF), углеродные нанотрубки (УНТ), полупроводниковые или проводящие наночастицы, смешиваются в бетоне, образуя пьезоэлектрические композиты на основе бетона. Измеряемые электрические выходы обычно измеряются методами постоянного тока (DC). Само чувствительные конкретные области применения варьируются от обнаружения движения до пограничной / военной

безопасности (рисунок 3е) [60] Поскольку углерод является наиболее экономически эффективным электропроводящим элементом, обычно самочувствительные ПМК изготавливаются из углеродных волокон (CF), углеродных частиц (CP), армированных полимерами (CFRP-CPRP) или гибридных композитов, содержащих арамид/углерод или стекло/углерод (CF-GFRPs) [46, p. 1315]. Эти проводящие компоненты образуют электрическую сеть внутри бетона. Концепция самочувствительного бетона основана на принципе пьезорезистивности и изменениях объема электрического удельного сопротивления электропроводящего бетона. Деформация и повреждение нарушают проводящую сеть, приводя к изменению удельного электрического сопротивления. Это указывает на то, что увеличение электрического сигнала происходит из-за образования или распространения трещины, в то время как уменьшение удельного сопротивления происходит из-за закрытия трещины. Эта техника все еще находится в стадии развития. Такие факторы, как плохая воспроизводимость чувствительности, детектирование поведения в сложно напряженных состояниях, воздействие и роль функциональных наполнителей, агрегатов и методов диспергирования, необходимо оптимизировать и дополнительно изучить. Суровые условия окружающей среды также дестабилизируют электрические свойства самоочувствительного бетона и резко снижают точность измерений. Влияние внешних элементов, таких как влага и химические вещества (например, хлориды, сульфаты) на способность к самодетектированию, еще не полностью оценено [46, p. 1321; 61].

Выводы по разделу

Применение автоматизированных систем для контроля технического состояния ГТС позволяет снизить риск возникновения значимых дефектов конструкции в период возведения, а также во время дальнейшей эксплуатации построенного объекта. Это достигается путем определения текущих значений параметров ГТС и сравнения их с запроектированными расчетными значениями, что позволяет своевременно идентифицировать образования дефектов в конструкции даже на раннем этапе.

Вместе с тем применение первичных тензометрических, пьезометрических и струнных преобразователей в системах мониторинга позволяет говорить об «умных» конструкциях и «умных» материалах, т. к. датчики внедряются непосредственно в конструкцию при заливке бетона и являются составной частью материала. Таким образом, бетон с внедренными датчиками приобретает свойства «самораспознавания», «определения» или детектирования, происходящих изменений его же структуры. В таблице 3 представлен обобщенный анализ свойств используемых датчиков и методов МТС.

Таблица 3 – Сравнение используемых типов датчиков

Сенсорный датчик и методы	Способ монтажа	Особенности и способы применения	Ограничения	Авторы
Тензодатчик	Крепление к поверхности	Широкое применение; низкая стоимость	Низкая чувствительность и долговечность; комплексная сборка; встраиваемый	Нилд и Бакер и др.
Оптоволокно	Встроенный	Точная; высокая чувствительность; непроводящий; долговечность	Тысячи тенге за шт. уязвимый; встраиваемый.	Леунг и Батлер и др.
Пьезо - керамика	Встроенный	Широкое применение; точный; высокая чувствительность; долговечность	Тысячи тенге за шт.; уязвимый; встраиваемый	Сан и Су и др.
Сплав с памятью формы	Встроенный	Точная; высокая чувствительность; хорошее демпфирующее свойство	Тысячи тенге за шт.; встраиваемый	Му и др.
X-скан или C-скан	Бесконтактный	Широкое применение; неразрушаемый;	Сотни тысяч тенге каждая; дополнительный анализ; не в режиме реального времени; радиоактивность	Судзуки и др.
Камеры высокого разрешения	Бесконтактный	Удобный; простота в эксплуатации;	Десятки тысяч тенге за шт.; уязвимый	Аглара и Тахир
Сенсорные цементные композиты	Встроенный	Чувствительность; точный; внутренняя; низкие затраты; хорошая долговечность	Требует внешнего электрического напряжения	Чен и Бантия и др.
Примечание – Составлено по источникам [16, р. 12; 17, р. 91; 21, р. 750; 62-68]				

Имеется положительный опыт применения таких систем в Казахстане. Но не смотря, на их преимущества, в целом подобные датчики имеют ряд недостатков, которые ограничивают возможность их ремонта, замены и продолжительности срока эксплуатации. В качестве решения указанных проблем предлагается применение композитных бетонов с содержанием красного шлама (так называемых, самораспознающих бетонов) как вариант замены бетонных конструкций со встраиваемых в них датчиками.

3 СМАРТ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

3.1 Введение в смарт композиты

Самым доступным и распространенным строительным материалом для объектов гидротехнического строительства является бетон. Этому способствует в немалой степени относительная доступность сырья и в целом низкая себестоимость его изготовления. При этом бетон имеет свои недостатки, например, водопроницаемость, что ведет к ослабеванию его внутренней структуры. В немалой степени разрушение бетона связано с процессами старения самого материала, вызванного средой его применения, в частности, полное или частичное погружение элементов ГТС по воду. Также отсутствие своевременного контроля и регулярного технического обслуживания тоже могут приводить к быстрому износу материала. При изучении структуры бетона, можно обнаружить, что в процессе его затвердевания формируются разрушения в наномасштабе. Объединение наноразмерных трещин далее формирует разрушения на микроуровне. Микротрещины приводят к образованию макродефектов, которые в дальнейшем приводят к разрушению структуры конструкции [69].

В настоящее время все большее распространение среди исследователей находят так называемые смарт композиты (СК), также в зарубежной литературе распространено название сенсорных цементных композитов (СЦК) или самораспознающие (самочувствительные) бетоны (СК) и пьезорезистивные бетоны (композиты) [69, с. 7].

СК являются группой конструкционных композитных материалов, которые могут определять внутреннее состояние собственной структуры без необходимости внедрения в материал сенсоров или прикрепления к ним внешних специальных устройств, применяемых для неразрушающего контроля [69, с. 7].

Напряжения, деформации, трещины и разрушения могут контролироваться в процессе эксплуатации путем измерения электрического сопротивления СК. По сравнению с традиционными датчиками, применяемыми для контроля сооружений, СК обладают высокой чувствительностью, хорошими механическими свойствами, естественную совместимость и простоту обслуживания [69, с. 7].

СК обладают способностью определять свои собственные деформации и повреждения, что достигается путем детектирования изменений их удельного электрического сопротивления, основанного на эффекте пьезорезистивности [69, с. 8].

Обычный бетон, как правило, является плохим электрическим проводником и поэтому для достижения эффекта пьезорезистивности композитный бетон должен содержать проводящий элемент. Композитные СК могут быть изготовлены из обычного бетона путем добавления в него

функциональных наполнителей, так как: стальные волокна, никелевая крошка, углеродные волокна, технический углерод и углеродные нанотрубки [69, с. 8].

Эти компоненты формируют проводящую «электрическую сеть» внутри композита. Когда СК подвергаются деформации или повреждаются, то состояние проводящей сети нарушается (изменяется), что приводит к изменению электрического сопротивления. Проводящая сети и результирующее изменение сопротивления сильно зависят от типа проводящего компонента, его количества, а также от его распределения. Одним из преимуществ СК является то, что функциональные наполнители сами по себе применяются в качестве упрочняющего материала, поэтому состав СК может быть подобран таким образом, что бы выполнять одновременно задачи упрочнения конструкции и мониторинга ее состояния [69, с. 8].

Принято классифицировать смарт бетоны на «собственно» самораспознающие и «несобственно» самораспознающие [70, 71]. Данная классификация базируется на том какой именно элемент структурного материала распознает внутренние (структурные) или внешние (окружающей среды) изменения. Если детектирующим элементом является бетон, то говорят о «собственно» самораспознающем или самодиагностирующем бетоне. Если детектирующим элементом является внедренный в структуру бетона датчик или преобразователь, то такой бетон является «несобственно» самораспознающим.

На рисунке 4 представлена классификация самораспознающих «умных» бетонов [72].



Рисунок 4 – Краткая классификация самораспознающих бетонов

Внедряя различные датчики и преобразователи можно получать несобственно самораспознающие бетоны, которые способны определять большое количество параметров конструкции: напряжение, сжатие, сдвиги, влажность, коррозию, температуру, гидратацию бетона, нарушение связей в бетоне, а также мониторинг прочности бетона [73].

Цементные сенсорные композитные материалы, изначально изучались как бетоны с низким электрическим сопротивлением и проводящие электрический ток, их разработки изучались как советскими, так и зарубежными учеными начиная с 1960-х годов. Основные области применения получаемых материалов были направлены на использование в качестве обогревательных и заземляющих материалов, а также материалов способных экранировать электромагнитное излучение. Тем не менее, детальное изучение электропроводящих цементных композитов, в качестве многофункциональных сенсорных композитных материалов было начато в начале 1990-х годов [74], когда была предложена идея «умных бетонов» или «умной бетонной структуры». Одним из первых подобных материалов был бетонный композит с углеродным волокном, который выступал в качестве сенсора на сжатие и растяжение. После успешного вышеуказанного эксперимента, подобные «самораспознающие» сенсорные цементные материалы получают внимание ученых. На рисунке 5 представлено количество публикаций за последние 29 лет, которые индексируются в базах публикаций Thomson Reuters и Scopus имеют следующие ключевые слова «self-sensing cement compositions».

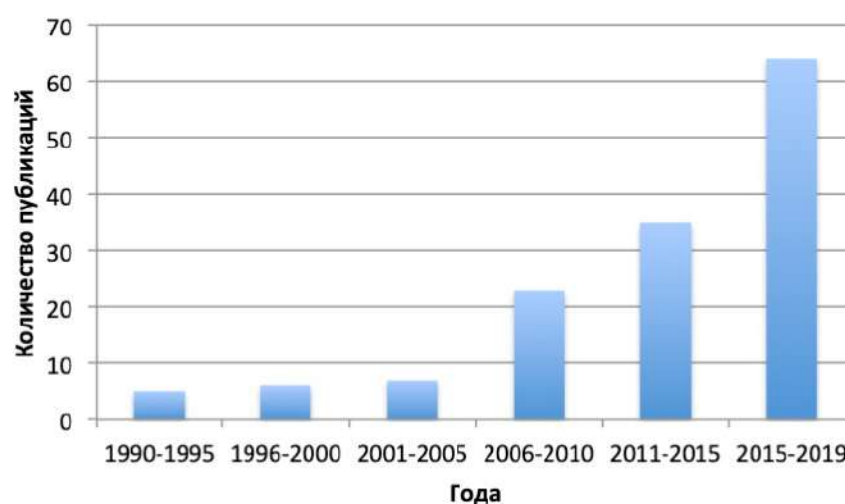


Рисунок 5 – Публикации по вопросам смарт цементных материалов

Не смотря на большое количество исследований, результаты очень различные, а используемые материалы достаточно сложны и дорогостоящие. Данное исследование направлено на разработку относительно простого состава и метода получения пьезорезистивных цементных композитов, который возможно применять в качестве мультифункционального материала для мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений.

Функционирование смарт бетона как детектирующего элемента достигается пьезорезистивным эффектом матриала-наполнителя, диспергированного в бетонной матрице. Поскольку бетонная матрица является непроводящим материалом, проводящий наполнитель оказывает преобладающее влияние на свойства проводимости конечного материала.

Композитные смарт бетоны могут быть изготовлены из обычного бетона путем добавления в него функциональных наполнителей, так как: стальные волокна, никелевая крошка, углеродные волокна, технический углерод и углеродные нанотрубки [69, с. 8].

Эти компоненты формируют проводящую «электрическую сеть» внутри композита. Когда СК подвергаются деформации или повреждаются, то состояние проводящей сети нарушается (изменяется), что приводит к изменению электрического сопротивления. Проводящая сеть и результирующее изменение сопротивления сильно зависят от типа проводящего компонента, его количества, а также от его распределения [69, с. 8].

Обычно количественная оценка производительности самораспознавания композитных бетонов определяется путем измерения относительного изменения сопротивления ОИС, которое выражается как [69, с. 9; 75]:

$$\text{Относительное изменение сопротивления (ОИС)} = \frac{(R-R_0)}{R_0} \quad (2)$$

где R_0 и R – начальные и конечные значения сопротивления, соответственно.

Кроме того, зачастую для количественной оценки «чувствительности» композитного бетона коэффициент применяется безразмерный преобразования КП [69, с. 9; 76].

$$\text{КП} = \frac{(\text{ОИС})}{\varepsilon} \cdot 100 \quad (3)$$

где ε – механическая деформация.

3.2 Обзор материалов для получения смарт композитов

СК по своей природе являются многофазными, многомасштабными многокомпонентными композитами. На макроскопическом уровне СК являются двух фазным материалом, состоящим из функциональных наполнителей, распределенных в бетоне-матрице как показано на рисунке 6 [69, с. 8; 77]. Наполнители распределены в бетон-матрице с образованием проводящей сети. Бетон-матрица, образованная минеральными заполнителями склеенными связывающими веществами, поддерживает функциональные наполнители и удерживает их на месте. В качестве связывающих материалов могут выступать цемент, асфальт или даже полимеры [69, с. 8].

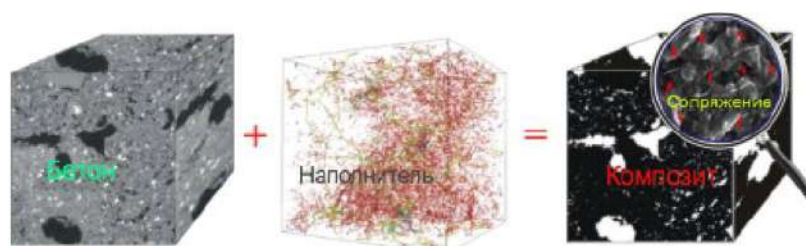


Рисунок 6 – Структура самораспознающих бетонов

На микроскопическом уровне СК является трехфазным материалом, который состоит из границ взаимодействия между наполнителями и бетоном [69, с. 8; 78].

В общем случае, материалы, применяемые для изготовления СК делятся на три категории: материал бетонной смеси, функциональные наполнители и вспомогательный материал для дисперсии наполнителя [78, р. 395].

3.2.1 Функциональные материалы

Текущие исследования самосенсорных бетонов в основном сосредоточены на следующих аспектах: виды и концентрация наполнителя, равномерное распределение наполнителей в матрице, сенсорные свойства при различных условиях нагрузки и изменениях окружающей среды.

На рисунке 7 показано распределение количества публикаций согласно указанной тематике за период с 1990 годов по 2019 год по странам мира.

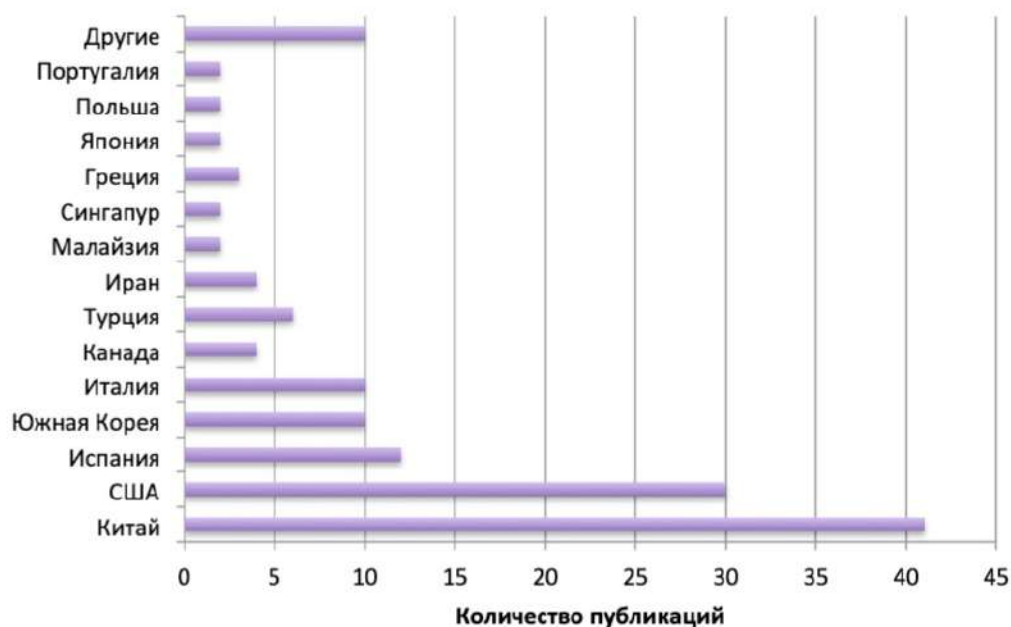


Рисунок 7 – Количество публикаций по странам

Как видно из рисунка 2, большинство авторов проводящих исследования самосенсорных бетонов, из Китая, Америки, Испании и Южной Кореи. Это может быть обусловлено наличием большой инфраструктуры, построенной из бетона, например, транспортные развязки, многоэтажные офисные здания и промышленные объекты. Результаты исследования умных композитов могут быть в будущем применимы для таких стран и использованы для автоматизации контроля состояния конструкций, регистрации скорости и массы автотранспорта в движении.

В таблице 4 представлены результаты анализа публикаций по направлениям исследований.

Таблица 4 – Предметы исследований

Предмет исследований	Количество публикаций
Чувствительность к разрушениям	15
Чувствительность к растяжению/сжатию	27
Электрическая проводимость	12
Пьезорезистивность	21
Электрическое сопротивление	16
Материалы-наполнители	20
Способ диспергирования	21
Прочее	10

Не смотря, на достигнутый прогресс в данных исследованиях, результаты исследований различны, а применяемые составы материалов сложны. В таблице 2 представлены основные материалы, которые используются для получения умных цементных композитов.

Функциональный наполнитель является важным компонентом самосенсорных композитов (ССК), потому что в основном за счет него достигается чувствительность умных бетонов. К настоящему времени доказано, что более десяти типов наполнителей эффективны для изготовления ССК, которые указаны в таблицах 5, 6, 7 [79].

Таблица 5 – Описание функциональных наполнителей для бетона

Матрица	Наполнитель	Оптимальная концентрация
Бетон	Углеродное волокно	
	Углеродное волокно и углеродное нано-волокно	
	Углеродная нано-трубка	
	Углеродная нано-трубка и наноразмерный технический углерод	
	Много стенная углеродная нано-трубка	
	Графеновые нанопластинки	
	Никелевая пудра	
	Железная проволока	
Примечание – Составлено по источникам [80-91]		

Таблица 6 – Описание функциональных наполнителей для цементного раствора

Матрица	Наполнитель	Оптимальная концентрация
1	2	3
Цементный раствор	Технический углерод	
	Углеродное волокно	
	Углеродное нано-волокно и поливиниловое волокно	
	Углеродное нано-волокно	
	Углеродная нано-трубка	
	Углеродная нано-трубка, углеродное волокно	

Продолжение таблицы 6

1	2	3
	Углеродная нано-трубка, графеновые нанопластины, технический углерод, углеродное волокно	
	Много стеновая углеродная нано-трубка	
	Графит	
	Нанопластины оксида графена	
	Графеновые нанопластины	
	Железная проволока	
	Поливинилалкогольные волокна и технический углерод	
Примечание – Составлено по источникам [74, p. 25; 80, p. 783; 92-115]		

Таблица 7 – Описание функциональных наполнителей для цементной пасты

Матрица	Наполнитель	Оптимальная концентрация	
Цементная паста	Технический углерод		
	Углеродное волокно	>0.2 об.%	
	Углеродное волокно и углеродная нано-трубка		
	Углеродное волокно и железная проволока		
	Углеродное нано-волокно	1.25 об.%	
	Углеродная нано-трубка		0.1 мас.%
			0.05–0.1 мас.%
			1.0 об.%
			0.8 мас.%
	Углеродная нано-трубка, графитовые нановолокна, графит		
	Много стеновая углеродная нано-трубка		
	Оксид графена		
Пластины нанографита			
Наноразмерный порошок цирконат-титанат свинца			
Резиновые волокна			
Примечание – Составлено по источникам [73, p. 44507; 85, p. 219; 87, p. 203.; 99, p. 23; 106, p. 1069; 116-136]			

Используя комбинации функциональных наполнителей, т.е. гибридные наполнители, можно обеспечить определенные сенсорные свойства ССК, что не возможно достичь ни одним из наполнителей в отдельности. Это достигается за счет дополнительного влияния различных наполнителей на изменение детектирующих свойств. Таблица 8 обобщает классификацию функциональных наполнителей.

Среди этих функциональных материалов характерны пять типов, включая углеродное волокно (УВ), углеродные нанотрубки (УНТ)/углеродные нановолокна (УНВ), стальной шлак (СШ) и никелевая пудра (НП).

Таблица 8 – Классификация функциональных материалов

Критерий	Категории
Вещество	Модификации углерода Металлы и их оксиды
Форма	Волокна Частицы
Размер	Макроразмеры Микроразмеры Наноразмеры
Проводящая способность	Проводник Полупроводник Диэлектрик
Способ применения	Отдельный Гибридный
Поверхность	Обычная Модифицированная

УВ прочнее, чем СШ и более химически стабильно, чем стекловолокно в щелочной среде. Кроме того, УВ имеет низкую плотность, и его соотношение прочности к плотности является одним из самых высоких среди всех типов волокон. Кроме того, УВ обладает высокой электропроводностью [82, р. 17].

УНТ/УНВ обладают превосходными физическими свойствами, такими как высокая прочность и модуль Юнга (прочность на растяжение и модуль Юнга в УНТ в 20 и 10 раз выше, чем у УВ соответственно), высокая сила сцепления с матрицей, большой изгиб и высокая пластичность (удлинение при разрыве УНТ в 18 раз больше, чем у УВ), и отличная электропроводность.

Чрезвычайно высокое соотношение сторон, полая структура и низкая плотность УНТ/УНВ позволяют легко формировать проводящую и механическую армирующую сеть внутри матрицы с уровнем концентрации УНТ, равным всего 0,05 мас.%. УНТ/УНВ также обладают интересными сенсорными свойствами. Их электрические свойства линейно изменяются в зависимости от уровня напряжения/деформации, когда они подвергаются воздействию внешней нагрузки. Следует отметить, что самоочувствительное поведение бетона сильно зависит от нескольких параметров наполнителей, таких как компонент материала, морфология (например, форма, размер, длина, состояние поверхности и степень агрегации и агломерации) и уровень концентрации. Результаты исследований вышеупомянутого ССК показывают, что волокнистые наполнители, имеющие высокое отношение длины к диаметру, могут изменять чувствительность бетона при более низкой концентрации по сравнению с наполнителями в форме частиц. Эффективная концентрация не превышает 1% для волоконных наполнителей, тогда как для частиц-наполнителей она составляет не менее 5%. Однако необходимо уделять дополнительное внимание дисперсии волоконных наполнителей по сравнению с наполнителями из частиц, поскольку волоконные наполнители труднее диспергировать и легче повредить во время изготовления бетона.

Одним из преимуществ СК является то, что функциональные наполнители сами по себе применяются в качестве упрочняющего материала, поэтому состав СК может быть подобран таким образом, что бы выполнять одновременно задачи упрочнения конструкции и мониторинга ее состояния [69, с. 10].

Выводы по третьему разделу

Исследования электропроводности бетона привлекают внимание многих исследователей в течение нескольких последних десятилетий [14, р. 346.; 15, р. 895; 16, р. 12; 17, р. 91]. Электрические свойства бетона проявляются в результате включения в него такие дополнительные фазы (наполнители), которые резко улучшают электрические свойства конечного материала [17, р. 99]. Такие исследователи как Хан, Кьярелло [137], Матерацци, Бантия [67, р. 806] и Ажари применяют углеродные волокна, трубки, чистый графитовый порошок и графен различных дозировок для увеличения удельной электропроводности бетона [46, р. 1305; 120, р. 131; 130, р. 269]. Однако высокая стоимость этих нанонаполнителей является основной причиной ограничения их применения. С другой стороны, некоторые исследователи достигли низкого удельного электрического сопротивления, используя промышленные отходы и побочные продукты производства в качестве наполнителей [138, 139]. Эти отходы богаты оксидом алюминия, оксида кремния и железа, что делает их хорошими кандидатами для использования в качестве проводящих добавок в бетоны и растворы [140, 141]. Все эти исследования показывают хорошие результаты, но недостаток этих исследований заключается в том, что данные составы были основаны на использовании сложных пластификаторов и добавок, в дополнение к использованию различных подходов для уменьшения влияния сил Ван-дер-Ваальса [142], чтобы добиться равномерного распределения электропроводящих заполнителей и гомогенности в бетоне [143]. Улучшение электрических свойств бетона (т. е. электрической проводимости) позволит обеспечить основные промышленные потребности, связанные мониторингом состояния конструкций, с контролем вибрации, безопасностью и надежностью зданий, а также растущими затратами на управление обширной инфраструктурой в развитых странах [144]. Проводимость бетона может быть легко связана с его удельным сопротивлением, которое может быть индикатором для оценки характеристик бетона [145].

Данные исследования, направлены на улучшение электропроводности бетона путем использования отхода переработки бокситов – красного шлама. Остатки бокситов так же, как и стальной шлам, в основном состоят из оксидов железа и оксида алюминия. Таким образом, далее приведены результаты исследований на предмет возможности применения красного шлама в качестве функционального наполнителя, который не только улучшает пьезрезистивные свойства бетона, но и повышает его механические свойства.

4 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Методы исследования

В качестве методологической основы диссертационной работы применялся комплексный анализ цементных композитов.

Метод математического планирования эксперимента применялся для разработки составов смесей.

Методы математической статистики применялись для обработки результатов эксперимента и проведения оценки неопределенности измерений.

Химический и фазовый состав используемых материалов осуществлялся с применением современных методов анализа: рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный согласно ASTM C1365-18 и СТ РК ISO 29581-2.

Электрофизические свойства материалов анализировались при помощи кондуктометрических измерений и измерений электрического сопротивления прямым и косвенным методом.

Реомеханические свойства цементных композитов определяли согласно следующим стандартам:

Гранулометрический состав – ISO 13320:2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods.

Нормальная плотность цементного теста – СТ РК ИСО 9597-2011.

Сроки схватывания – СТ РК ИСО 9597-2011.

Средняя плотность – ГОСТ 10181-2014 Смесей бетонные. Методы испытаний и ASTM C138/C138M-17a.

Прочность на сжатие и изгиб – ISO 679:2009 Cement – Test methods – Determination of strength, ГОСТ 30744-2001, ASTM C109/C109M-20a, ASTM C349-18.

Морозостойкость и климатические испытания - ASTM C666/C666M-15 и ГОСТ 10060-2012.

Минералогический состав цементных смесей был определен при помощи метода рентгенодифракционного анализа. Для проведения данного анализа был использован дифрактометр Bruker D8, оснащенный Cu-излучателем, работающий при напряжении 40 кВ и силе тока 30 мА, диапазон углов сканирования 2θ был установлен в пределах $5-60^\circ$. Режим сканирования: непрерывный быстрый PSD при времени счета на каждом шаге 0,2 с. Сущность рентгеновского метода анализа заключается в изучении дифракционной картины, получаемой приотражении рентгеновских лучей атомными плоскостями в структурекристаллов. Основываясь на том, что интенсивность дифракционного отражения определенной фазы является прямой пропорциональной в зависимости от объемной доли конкретной фазы в исследуемом многофазном материале, делают вывод о количественном значении искомой фазы в композите. Рентгено-дифракционный анализ заключается в проведении количественного сопоставления эталонных линий известной интенсивности, полученных в определенных условиях, с линейной

интенсивностью для исследуемых фаз, полученными в подобных условиях (рисунок 8).

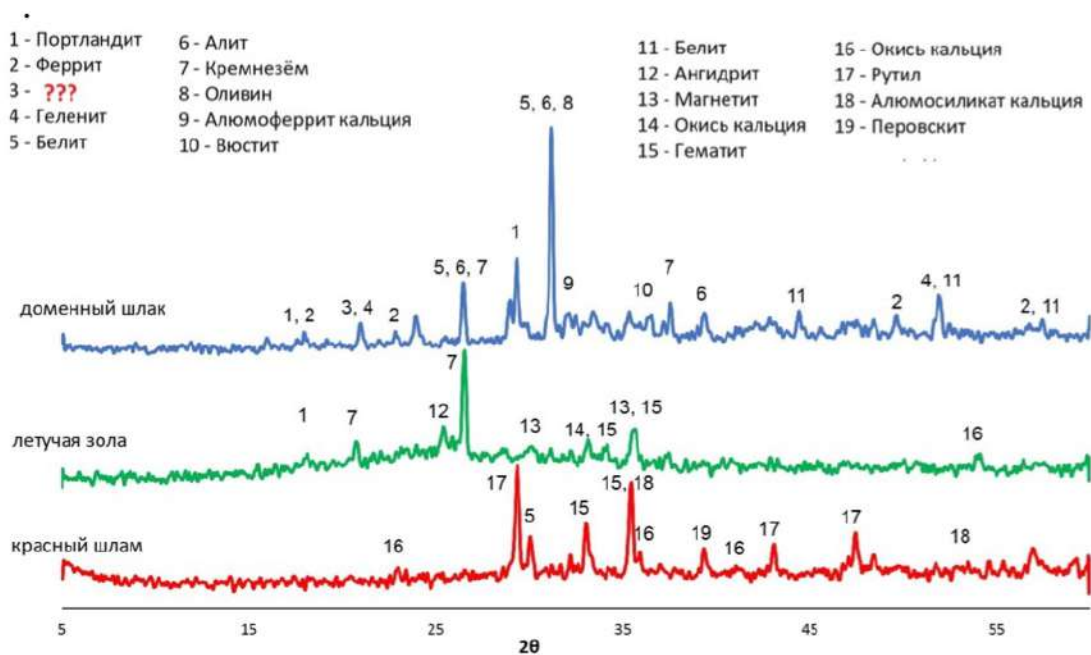


Рисунок 8 – Результаты рентгено-структурного анализа

Измерение pH 1% водного раствора проводилось при помощи прибора Fisher Scientific Accumet AB15. Для данного теста 1 грамм цементной смеси был растворен в 100 граммах дистиллированной воды. Раствор был помещен в взбалтыватель (шейкер) на 30 минут со скоростью 200 оборотов в минуту. Затем, раствор оставили в спокойном состоянии на 30 минут и после чего были произведены замеры значения pH.

Размер частиц материалов был определен при помощи электростатического классификатора TSI Electrostatic Classifier.

Прочность на сжатие 50-миллиметровых кубических образцов цементного раствора и 160-миллиметровых образцов-призм композитного бетона определяли в соответствии с ASTM C109 и ГОСТ на периодах набора прочности 3, 7 и 28 дней с использованием лабораторного пресса FORNEY. Были испытаны три образца для каждого периода, затем определено среднее значение прочности на сжатие и на изгиб. Начальное и конечное время схватывания цементных паст измеряли в соответствии с ASTM C191 с использованием аппарата Вика, количество воды, для измерения времени схватывания было выбрано для получения нормальной консистенции согласно ASTM C187.

Химический состав портланд цемента типа I (ПЦ) угольной летучей золы, доменного шлака и красного шлама, который был определен с помощью рентгено-флуоресцентной спектрометрии (XRF).

4.2 Характеристика материалов

В для приготовления исследуемых цементных смесей использовались следующие материалы

- 1) обычный Портланд цемент (ОПЦ) 42,5;
- 2) натуральный кварцевый песок, который для изготовления фибробетона был дополнительно просеян через сито 500 микрон;
- 3) угольная летучая зола типа F (ЛЗ), которая была получена от Луисвиллской угольной электростанции в Луисвилле, штат Кентукки (объемная плотность 1260 кг/м³);
- 4) красный шлак (удельный вес - 1,9) был получен с Павлодарского глиноземного завода в Павлодаре, Казахстан, на котором ежегодно производится 1,5 млн. тонн глинозема;
- 5) доменный шлак с объемной плотностью 2027 кг/м³ был поставлен компанией Phoenix-Services;
- 6) волокна из поливинилалкоголя, данные волокна имеют диаметр 39 мкм, длину 8 мм, усилие на растяжение 1600 МПа;
- 7) пластификатор на основе поликарбоксилата;
- 8) пистая проточная вода.

Химический состав Портланд цемента типа I (ПЦ) угольной летучей золы, доменного шлака и красного шлака, который был определен с помощью рентгено-флуоресцентной спектрометрии (XRF), представлен в таблице 9. Угольная летучая зола и используемый доменный шлак имел весовое соотношение SiO₂/Al₂O₃, равное 1,53, 4, и весовое соотношение SiO₂/CaO 3,3 и 0,35 соответственно. В случае красного шлака весовое отношение кремнезема к оксиду оксида алюминия и оксида кремния к оксиду кальция было найдено равным 0,46 и 0,50 соответственно.

Таблица 9 – Химический состав материалов (%)

Элемент	ПЦ	ЛЗ	ДШ	КШ
SiO ₂	21,2	45,53	15,6	12,6
CaO	61,7	8,99	44,7	19,3
Al ₂ O ₃	5,7	26,7	3,9	21,7
Fe ₂ O ₃	2,3	9,76	20,9	31,8
MgO	2,6	2,75	7,2	0,39
MnO	-	-	4,4	0,29
K ₂ O	1,03	1,72	0,02	2,55
Na ₂ O	0,24	0,38	0,05	2,9
SO ₃	3,7	3,97	0,8	-
TiO ₂	-	-	0,4	7,3
P ₂ O ₅	-	-	1,7	0,9
Прочее	1,53	0,2	0,33	0,27

Размер частиц материалов был определен при помощи электростатического классификатора TSI Electrostatic Classifier, результаты анализа представлены на рисунке 9. Медиана размеров частиц летучей золы, доменного шлака и красного шлака составляют 18, 49 и 43 мкм соответственно. В целом, тонкость помола (удельная площадь поверхности) конечного продукта зависит от способа измельчения (измельчение при помощи шаровой мельницы, планетарной мельницы или криомельницы). Тем не менее, затраты энергии являются основным параметром, который ограничивает размер частиц.

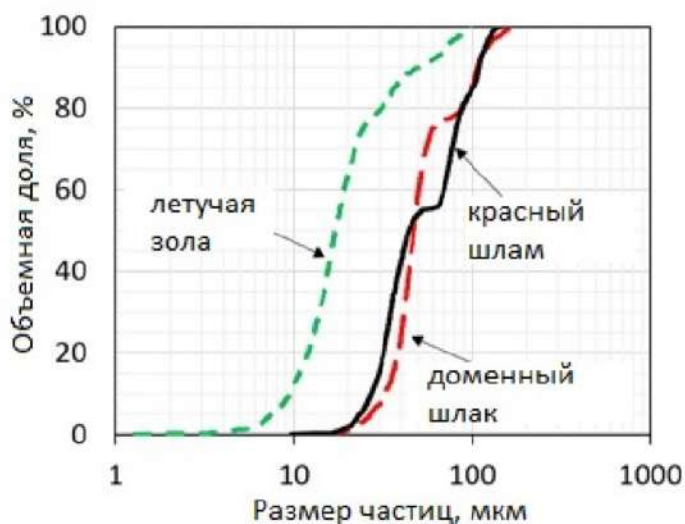


Рисунок 9 – Размер частиц

4.3 Приготовление образцов

Для изучения свойств цементных композитных материалов для данного исследования были изготовлены образцы цементного раствора кубической формы и образцы призматические образцы фибробетона (инженерного цементного композита).

Для смешивания материалов (цемент, добавки, кварцевый песок и вода) использовалась лабораторная мешалка (миксер). Эти соотношения были разработаны, чтобы обеспечить химический состав и достаточную электропроводность. Перед добавкой в материалы-заменители были размолоты в течение 8 часов с использованием шаровой мельницы со скоростью 65 об/мин и соотношением материалов к шарам 43%.

Перед добавкой все материалы-заменители были размолоты в течение 8 часов с использованием шаровой мельницы со скоростью 65 об/мин и соотношением материалов к шарам 43%.

Массовые соотношения вводимых добавок, использованного для производства цементных смесей определены далее в разделе 6.4.

4.4 Формование образцов

4.4.1 Цементный раствор

Приготовление образцов цементного раствора производилось в следующей последовательности, как показано на рисунке 10:

1) указанная дозировка каждого из материалов была добавлена к портландцементу, и смесь перемешивалась в течение 3 минут с низкой скоростью;

2) затем добавляли воду и цементную пасту перемешивали в течение 30 с;

3) постепенно добавляли кварцевый песок с соотношением песка/цемента 2,75 для всех шестнадцати образцов, и затем раствор оставляли в покое в течение 90 с;

4) и, затем, весь раствор перемешивался на средней скорости в течение 60 с.

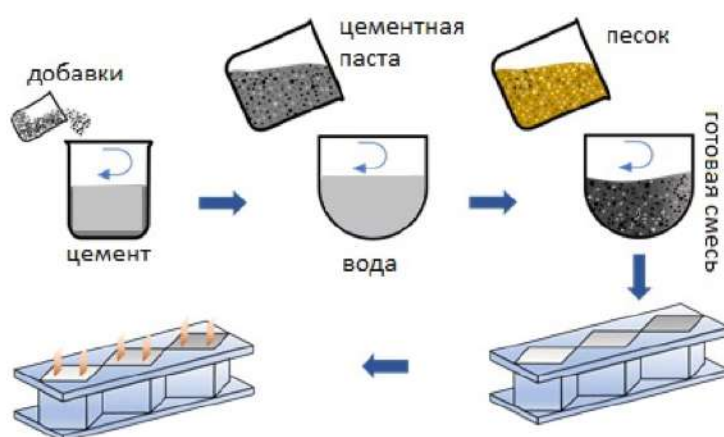


Рисунок 10 – Приготовление образцов цементного раствора

Образцы были залиты кубические формы со сторонами в 50 мм в соответствии с ASTM C109. В качестве встроенных электродов были использованы две медные пластины (25×50×0,2 мм), которые были помещены в образцы на расстоянии 10 мм от краев каждого куба во время формования образцов. В качестве внешнего электрода была использована медная фольга толщиной 0,07 мм, была приклеена проводящей серебряной краской с противоположных торцов куба. Образцы встряхивали на вибрационном столе, чтобы уменьшить количество пузырей воздуха и обеспечить уплотнение. Через 24 часа образцы были разформованы и помещены в камеру для набора прочности при температуре 20°C и относительной влажности 95%.

4.4.2 Фибробетон

Приготовление образцов инженерного цементного композита производилось в следующей последовательности:

1) все твердые компоненты (ОПЦ, ЛЗ, песок и требуемое количество КШ) были смешаны вместе со скоростью 100 об/мин в стандартном миксере;

2) пластификатор был растворен в воде и полученный раствор добавлен в сухую смесь и перемешан в течение 1 минуты на скорости 150 об/мин и затем на скорости 300 об/мин дополнительные 2 минуты;

3) ПВА волокна добавлены к раствору и смешивание происходило в течение трех минут на скорости 150 об/мин.

Образцы были залиты призматические формы со сторонами в 160мм×40×40 в соответствии с ASTM C109. В качестве встроенных электродов были использованы две медные пластины (25×50×0,2 мм), которые были помещены в образцы на расстоянии 10 мм от краев каждого куба во время формирования образцов. В качестве внешнего электрода была использована медная фольга толщиной 0,07 мм, была приклеена проводящей серебряной краской с противоположных торцов куба. Образцы встряхивали на вибрационном столе, чтобы уменьшить количество пузырей воздуха и обеспечить уплотнение. Через 24 часа образцы были разформованы и помещены в камеру для набора прочности при температуре 20°C и относительной влажности 95%.

Выводы по разделу

Для оценки эффективности разрабатываемых цементных композитов были использованы методы описанные в национальных, межгосударственных или международных стандартах за исключением методов определения электрических параметров в связи с отсутствием разработанных стандартов. Но для оценки электрических параметров применены методы. В рамках данного исследования проведены эксперименты по изучению зависимости влияющих величин и оценка влияние на окончательный результат измерений. Результаты экспериментов методов будет представлен в разделе 5.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

5.1 Обоснование выбора средств измерений

Чувствительность СК возникает в следствие изменений проводящей сети внутри композита, поэтому удельное сопротивление композита полностью характеризует чувствительность композита [74, с. 25; 77, с. 114]. Кроме того, некоторые исследователи нашли несколько других пригодных для измерения параметров (например, реактивное сопротивление [146], полное сопротивление, емкость) [147], поверхностное электрическое сопротивление [96, с. 85] и относительные диэлектрическая проницаемость [148] для характеристики детектирования СК. Но в данной работе будут исследоваться электромеханические свойства через электрическое сопротивления (удельное сопротивление) в связи с тем, что это достаточно распространенная характеристика и простой ее измерений.

Таким образом, электрическое сопротивление в данном исследовании измерялось прямым методом с применением RLC-метра Agilent в диапазоне частоты от 100 Гц до 100 кГц для двухпроводной схемы и путем косвенных измерений тока и напряжения для четырехпроводной схемы подключения. Измерение электрического сопротивления косвенным методом проводилось путем задания генератором сигналов ВК Precision 4071A электрического сигнала напряжением 5 В в диапазоне частот от 0,1 кГц до 100 кГц, с последующим измерением напряжения двухканальным осциллографом Tektronix TDS 1002 и силы тока цифровым мультиметром Radio Shark. Следует отметить, что частота сигнала 10 кГц была выбрана в качестве опорной по причине ограниченной полосы пропускания мультиметра. Подробнее схемы подключения будут рассмотрены далее.

5.2 Обоснование выбора электродов

Электроды соединяют СК и измерительные оборудование. Их изготовление является ключевой проблемой в исследованиях и применении СК, так как электроды имеют непосредственно связь с точностью измерения чувствительного сигнала. Изготовление электродов для СЦК включает в себя три аспекта: выбор электродных материалов, фиксация электродов, и расположение электродов [149]. Материалы электродов должны иметь две основные особенности: низкое электрическое сопротивление и стабильное свойство по электропроводимости. К настоящему времени материалы, используемые в качестве электродов из СК в основном включают в себя металл (например, медь, нержавеющей сталь и свинец) чешуйки с отверстием или без, металл (например, медь) и нержавеющей сталь) фольга, металл (например, медь и нержавеющей сталь) сталь) сетка, медная петля, металл (например, медь и нержавеющей сталь) сталь) прутки, карбоновый стержень, медная лента/провод, проводящая краска (например, серебро, медь и краска СВ). Они по отдельности или совместно могут служить в качестве электродов, которые прикрепляются,

встраиваются, обшиваются вокруг конструкции. Среди этих стилей фиксации наиболее широко используются прикрепление и встраивание [150, 151]. Кроме того, электроды обычно применяются для схем с двумя или четырьмя контактами [77, с. 123]. В таблице 10 представлены распространенные материалы для электродов.

Таблица 10 – Виды электродов

Тип электрода	Материал электрода
Прикрепляемый	Медная пластина и смоченная вата
Прикрепляемый	Серебряная проводящая адгезия
Прикрепляемый	Серебряная эпоксидная краска и медная проволока
Встраиваемый	Медная проволочная сетка
Встраиваемый	Медная пластина
Встраиваемый	Полированная оловянная пластина
Встраиваемый	Стальная проволочная сетка
Встраиваемый	Пластина гальванизированного железа
Встраиваемый	Железная проволочная сетка
Встраиваемый	Титановая проволочная сетка

Влияние конфигурации электрода на электрическое сопротивление цементной пасты исследовали Реза [93, р. 479] и другие [152]. Первая конфигурация состояла в использовании параллельных серебряных пластины в качестве электродов на обоих концах образцов, с применением амперметра и вольтметра для измерения электрического сопротивления. Во второй конфигурации отдельный вольтметр был подключен к двум кругам серебряной пасты, установленных на поверхности образцов, сцепление с теми же серебряными пластинами для доступа к приложенному току. Третий метод включал широко используемый метод четырех электродов с четыре серебряных круга для измерения удельного электрического сопротивления цементный датчик. Стоит отметить, что не было встроенных медные сетки для замены проводящих пластин и вставки в виде электроды для измерения электрического сопротивления, поэтому измеряется сопротивление относится к поверхностному сопротивлению, а не к объему сопротивлению. Было обнаружено, что индикатор чувствительности изменялся с контактные давления на границе раздела пластин и образцов для метод параллельной пластины, при этом незначительного изменения не наблюдалось для метода четырех зондов. Это в основном из-за слабого контакта между серебряными пластинами и поверхностью цементного основания где интерфейс не был достаточно гладким. Точно так же Хан, Санчез и Соболев [153, 154] делают вывод, что встроенный электрод лучше, чем внешний, и четырехпроводный метод подключения электродов дает более стабильные результаты.

В четырехпроводном методе внешние два электрода используются для измеряют силу тока, а внутренние два электрода измеряют разность

напряжений, тогда как в двухпроводном методе два электрода используются для измерения силы тока и перепад напряжения. По сравнению с двухпроводным методом, четырехпроводной метод дает меньшее значение электрического сопротивления, так как он может устранить контактное сопротивление между электродом и цементный композит, таким образом, отражает реальное сопротивление материала [149, р. 363]. Хотя четырехконтактный метод имеет более высокую точность, с точки зрения удобства испытаний, предпочтительным является двухконтактный метод [155]. На основании измеренного значения тока и напряжения разница, удельное электрическое сопротивление (ρ) и электропроводность (γ) можно рассчитать на основе следующего уравнения:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \quad (1)$$

где V и I значения напряжения и силы тока, соответственно. A и L площадь электродов и расстояние между внутренними электродами, соответственно. Распространенные методы расположения электродов представлены на рисунке 11.

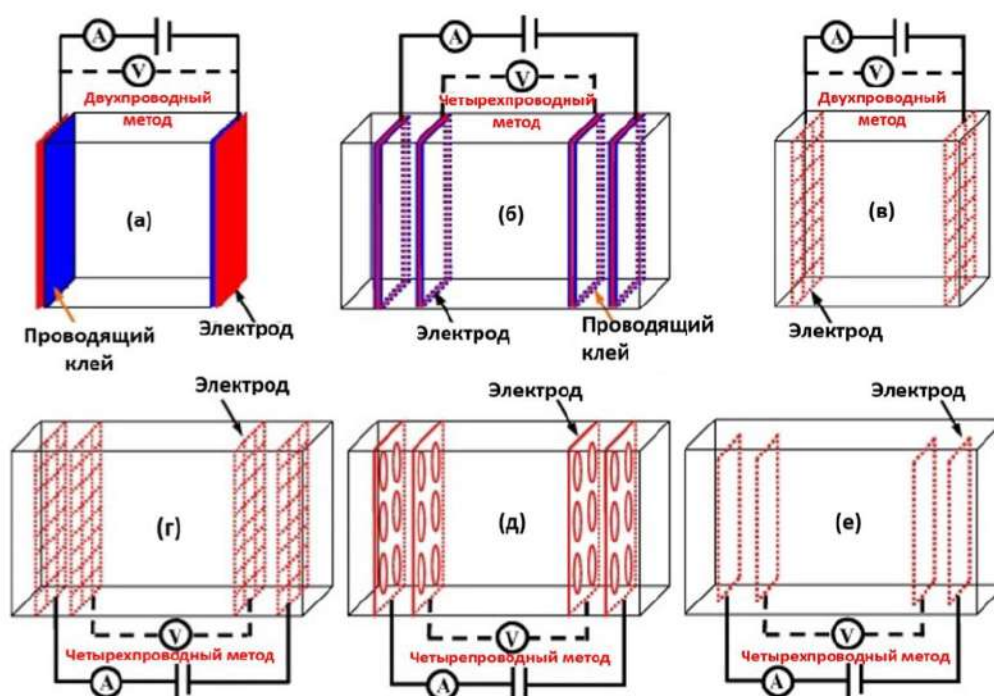


Рисунок 11 – Методы расположения электродов

В настоящее время есть шесть легко реализуемых схем подключения и расположения электродов, которые приведены на рисунке 10. Электроды прикрепляются к поверхности СК в схемах (а) и (б) [156]. Две схемы широко используется в лабораторных измерениях чувствительности СК, потому что они не ухудшают механические характеристики исследуемого образца. Однако

прикрепленные электроды легко отделяются от бетона в практическом применении. Устранение данных недостатков возможно путем применения четырехпроводной схемы, как показано на рисунке 10 (в) - (е). Встроенная проволочная сетка, перфорированная пластина или петлевой электрод могут минимизировать влияние встроенного электрода и обеспечить целостность СК. Кроме того, СК может обеспечить защиту встроенных электродов [46, p. 1337; 149, p. 368].

5.3 Обоснование метода косвенного измерения

Точность измерения электрического сопротивления имеет важное значение для использования цементных пьезорезистивных композитов. Было предложено много улучшений для достижения точной электрической устойчивости датчиков на основе цемента. В целом, на измерение электрического сопротивления оказывают влияние конфигурация электродов, применяемый переменный ток (переменный ток) или постоянный ток (DC), другие факторы, такие как сила тока/напряжения.

В соответствии с компоновкой электрода, метода измерения электрического сопротивления для СРК включают двухконтактный метод и четырехконтактный метод, как показано на рисунке 10. Хотя метод с двумя электродами имеет более простую схему измерения по сравнению с методом с четырьмя электродами, четырехпроводный метод предпочтительнее двухконтактного метода, поскольку он может устранить контактное сопротивление между электродами и СРК. Это было подтверждено во многих экспериментах на СРК с различными функциональными наполнителями [71, с. 52; 137, p. 465; 149, p. 371]. Кроме того, результаты измерения электрического сопротивления могут быть связаны с такими параметрами конфигурации электродов, как площадь электродов напряжения, размер ячейки электродов и расстояние между электродами тока и напряжения в четырехконтактном методе [157].

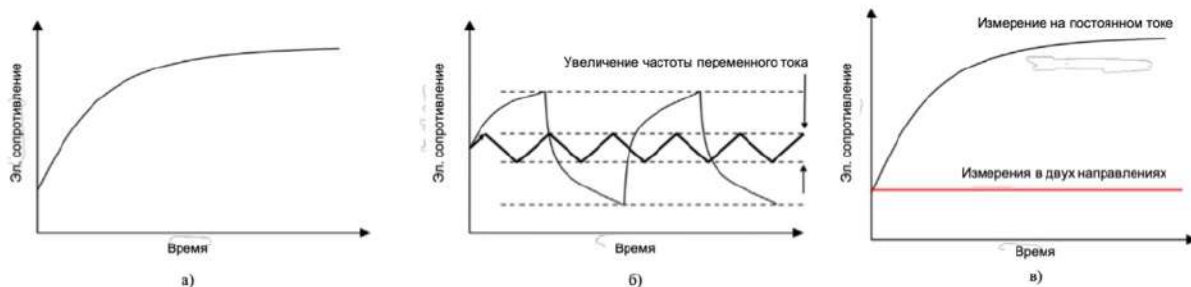
Исходя из результатов предыдущих исследований, четырехконтактный метод рекомендуется для измерения электрического сопротивления СК. Тем не менее, некоторые исследователи отметили, что, хотя измеренное значение сопротивления с помощью двухконтактного метода может быть выше, чем истинное сопротивление композитов из-за влияния контактного сопротивления, оно не влияет на способность двухпроводного метода обнаруживать изменения сопротивления композитов под нагрузкой [93, p. 476]. Кроме того, метод с двумя зондами проще и удобнее использовать по сравнению с методом с четырьмя зондами. Поэтому он все еще широко используется в исследованиях и применении СК.

При измерении электрического сопротивления СРК с использованием либо метода с четырьмя электродами, либо метода с двумя электродами, метод испытания постоянным током (DC) является самым простым способом. Тем не менее, поскольку электрическое поле постоянного тока применяется во время измерения электрического сопротивления, движение и агрегация ионов в

бетонной матрице приведет к электрической поляризации в композите, в электропроводности которого преобладает механизм ионной проводимости (детальный механизм проводимости), будет обсуждаться в разделе 7. С помощью измерения постоянного тока трудно точно измерить изменения электрического сопротивления композита, вызванные внешней нагрузкой. Один из способов свести на нет эффект поляризации при измерении электрического сопротивления постоянного тока состоит в том, чтобы прикладывать потенциал напряжения постоянного тока задолго до нагружения композита, чтобы обеспечить сопротивление плато после полной поляризации. Другой подход заключается в использовании сигналов переменного тока (переменного тока) с равными величинами положительных и отрицательных пиков для композита. Хотя поляризация все еще может наблюдаться в сигналах переменного тока, ее влияние уменьшается до приемлемого диапазона путем увеличения частоты или уменьшения амплитуды приложенного переменного напряжения [146, p. 847; 158-161].

Выводы по разделу

Приложение источника постоянного тока к тестируемому образцу, и измерения постоянного тока (DC), является наиболее простым методом измерения электрических свойств СРК. Однако экспоненциальный рост измеренного сопротивления может наблюдаться с увеличением времени измерения из-за эффекта поляризации. Следовательно, метод DC не является точным при измерении эффекта пьезорезистивности. Одним из способов устранения поляризационного эффекта является регистрация изменения сопротивления ненагруженного образца. Другой метод состоит в том, чтобы задавать фиксированное напряжение задолго до загрузки материала, чтобы достичь стабилизированного значения электрического сопротивления при полной поляризации [159, p. 423]. Кроме того, сушка образцов может привести к значительному удалению воды и свести на нет эффект поляризации [162]. Помимо всех методов, упомянутых выше, метод измерения на переменном токе заключается в применении метода переменного тока (AC) путем применения источника напряжения одинаковых величин с положительными и отрицательными пиками. На рисунке 12 представлен эффект поляризации для метода постоянного и переменного тока, сравнение с методом постоянного тока, метод переменного тока показывает меньший и обратимый эффект поляризации.



а – на постоянном токе; б – на переменном токе

Рисунок 12 – Измерение сопротивления

Примечание – Составлено по источнику [163]

Использование метода переменного тока, как было показано, устраняет эффект поляризации [164]. Исходя из результатов предыдущих исследований, четырехпроводной метод рекомендуется для измерения электрического сопротивления СК. Тем не менее, некоторые исследователи отметили, что, хотя измеренное значение сопротивления с помощью двухпроводного метода может быть выше, чем истинное сопротивление композитов из-за влияния контактного сопротивления, оно не влияет на способность двухпроводного метода обнаруживать изменения сопротивления композитов под нагрузкой [87, р. 209]. Кроме того, метод с двумя электродами проще и удобнее использовать по сравнению с методом с четырехпроводным. Поэтому он все еще широко используется в исследованиях и применении СК [77, р. 123].

6 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

6.1 Определение порога протекания тока

Для определения оптимальной дозировки функциональных наполнителей применяется методы с использованием статистической теории перколяции (наглядная демонстрация показана на рисунке 13) для анализа взаимосвязи между проводимостью цементного композита и концентрацией функциональных наполнителей [163, р. 116897]. Проводимость композита проявляет небольшое изменение с увеличением количества функциональных наполнителей, когда дозировка наполнителя ниже порога перколяции (протекания тока) и превышает порог перколяции. Ниже порога протекания проводящая сеть не образуется из-за недостаточной концентрации проводящих наполнителей. В пороговой зоне перколяции соседние проводящие материалы начинают контактировать, и образуются проводящие сети, которые приводят к снижению удельного сопротивления на несколько порядков [163, р. 116897]. Сопротивление композита будет уменьшаться с увеличением наполнителя до тех пор, пока не будет сформирован кратчайший проводящий путь. Удельное электрическое сопротивление СЦК будет меняться, когда он подвергается нагрузке. Приложенная нагрузка будет влиять на сопротивление функциональных наполнителей, изменять связь между матрицей и наполнителями, регулировать площадь контакта и расстояние туннелирования между наполнителями, а также изменять емкость, отражая чувствительные свойства СЦК [77, р. 117]. Для изолированной фазы, где электрическая сеть не сформировалась, доминирующим фактором является изменение емкости. Для переходной фазы доминирующими факторами являются изменения туннельных расстояний между наполнителями и удельного сопротивления наполнителей. Следовательно, СЦК с концентрацией проводящих наполнителей в переходной фазе обладает наилучшей чувствительностью. Для проводящей и избыточной фазы волокна, где проводящие сети образовались из-за высокой концентрации наполнителей, поэтому изменения в области контакта являются доминирующим фактором. Когда содержание волокна выше порога перколяции, СЦК имеет более стабильные, но менее чувствительные сенсорные свойства [77, р. 117]. Поэтому, поскольку порог перколяции является важным параметром для разработки и оптимизации чувствительных свойств СЦК, предыдущие исследования были сосредоточены на получении порогов перколяции для различных функциональных наполнителей.

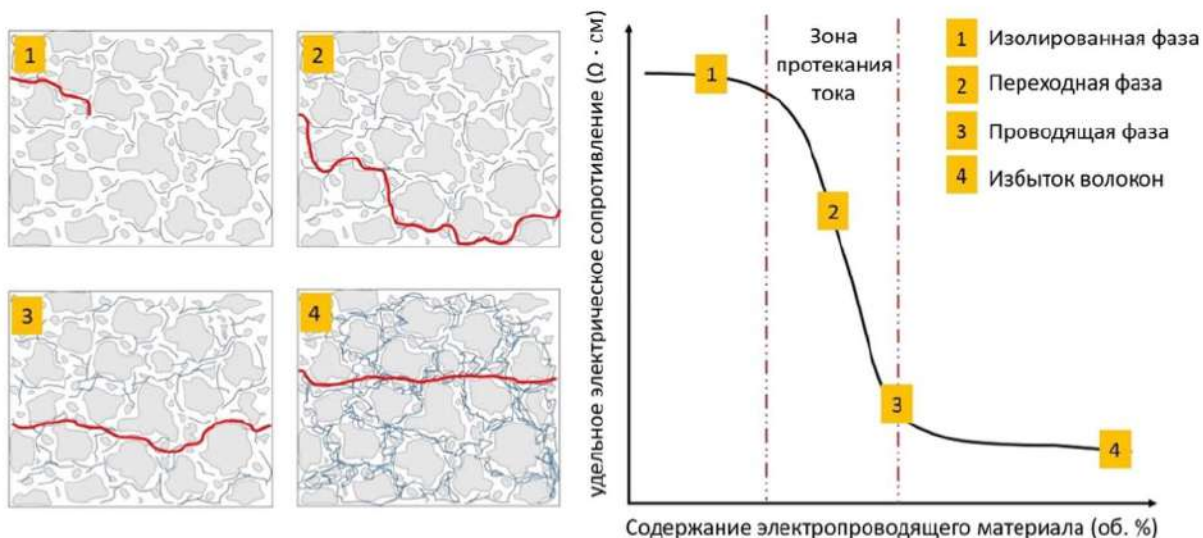


Рисунок 13 – Условия протекания тока

Примечание – Составлено по источнику [163, p. 116905]

Зален еще в 1983 выразил положения теории перколяции для композитных материалов через уравнение 3 далее, Се и другие предложили уравнение 4 для широкой номенклатуры цементной пасты и растворов с различным соотношением вода/цемент и соотношением песок/цемент [160, p. 52].

$$\sigma \alpha (\varphi - \varphi_c)^t, \quad (3)$$

где σ – проводимость композита;

φ – объемное содержание проводимого волокна;

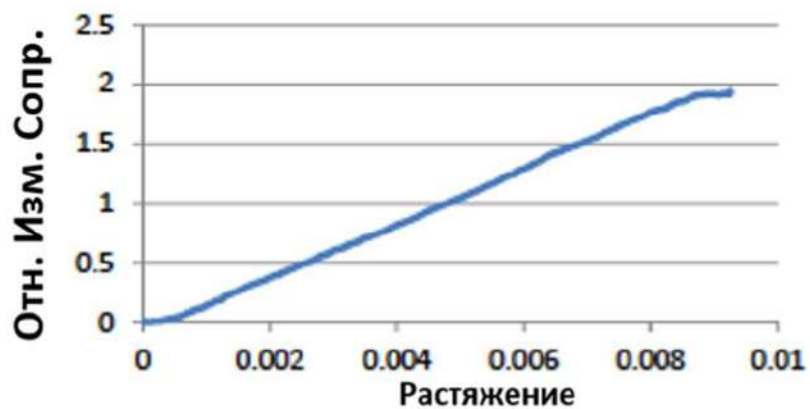
φ_c – пороговое значение объемной проводимости;

t – константа, которая зависит от микроструктуры композита.

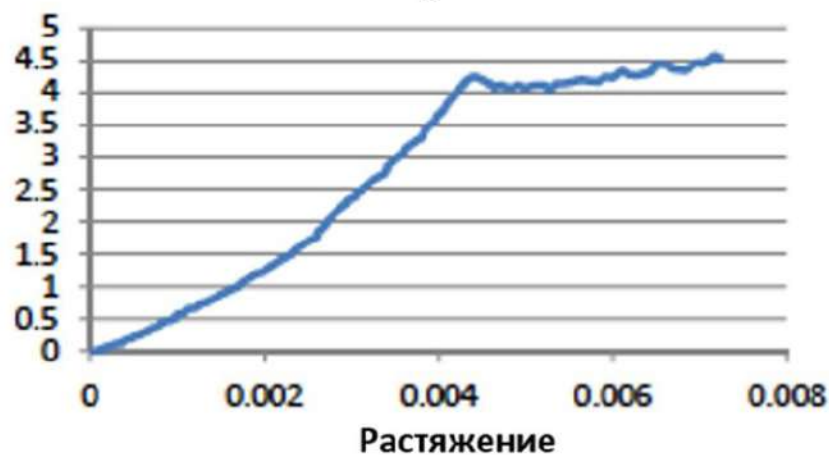
$$\sigma = 4,1(\varphi - 0,01)^{1,65} \quad (4)$$

Следует также отметить, что размер и форма волокна также являются важными факторами при определении порога протекания; например, чем длиннее волокна (до определенной степени), тем ниже порог.

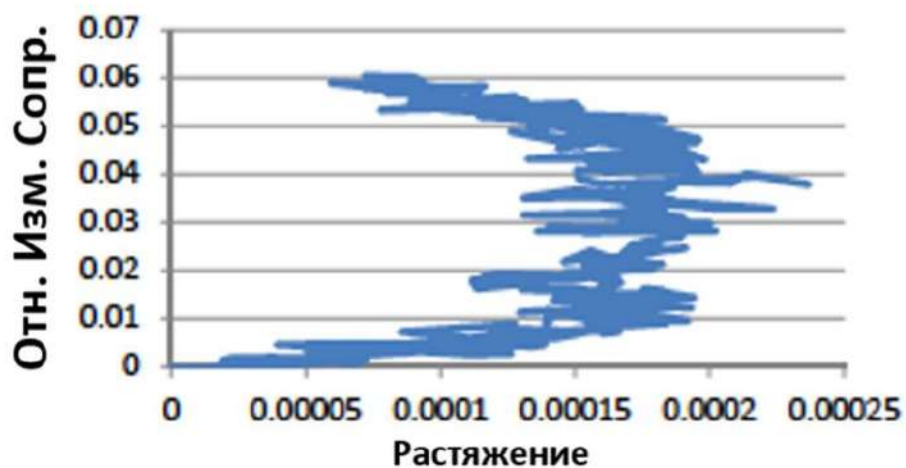
Для определения оптимального содержания ПВА волокон использовались результаты тестирования цементных паст с различным содержанием волокон. Результаты эксперимента представлены на рисунке 14.



а



б



в

а – 0%; б – 0,5%; в – 2%

Рисунок 14 – Относительное изменение сопротивления от растягивающего усилия в зависимости количества волокон

Как видно из рисунков, что электропроводность цементных паст увеличивается пропорционально увеличению содержания ПВА волокон, но

принимая в внимание стоимость волокон и предложенную формулу состава для ИЦК, было подтверждено количественное содержание 1,2% от объема. При этом количество содержания красного шлама предполагается вирировать в диапазоне от 0 до 25%.

6.2 Исследование микроструктуры и микромеханической модели цементных композитов

Большинство исследований об ИЦК были сосредоточены на процессе их изготовления и экспериментальных характеристиках. Есть ограниченные теоретические исследования, объясняющие физические принципы проводящего механизма этих композитов. Чтобы получить четкую формулировку, которая может использоваться для составного проектирования, разработка аналитических моделей привлекла больше внимания. Модель с сосредоточенными цепями является одной из наиболее популярных моделей, которая может быть собрана путем соединения конденсатора и резистора параллельно. В отличие от функциональных наполнителей, которые находятся в форме частиц, проводимость ЕССС, содержащих волокнистые материалы, не только зависит от концентрации наполнителя и перколяции, но также зависит от их сложной структуры. Среди всех ИЦК сложные микроструктуры армированных УНТ композитов затрудняют надежное прогнозирование их электропроводности, что привлекло огромное внимание [163, с. 116914].

Упрощенная микромеханическая модель была установлена Денгом и Чжэн и Такеда и соавт., которые моделируют влияние аспектного отношения волокна, проводящей анизотропии и ненапряженности на электропроводность композитов УНТ. Фэн и Цзян разработали модель смешанной микромеханики полимерного композита на основе УНТ, рассмотрев два электропроводящих механизма, которые успешно предсказывают общее удельное сопротивление композита по сравнению с экспериментальными результатами. Это исследование доказало, что размеры УНТ оказывают существенное влияние на перколяцию и проводимость композитов. Ким и другие представили микромеханическую модель, доказавшую, что основанная на УНТ ИЦК с более низкой пористостью, волнистостью УНТ и удельным сопротивлением поверхности раздела обладает улучшенными электрическими характеристиками [163, р. 116898].

Гарсия-Макиас и др. [165] разработали модель микромеханики на основе аналитической модели Дэн и Чжэн [166], для прогнозирования общей проводимости ИЦК на основе УНТ, рассматривая волнистость УНТ и неоднородные пространственные распределения. Оба эти принципа управляют проводящими механизмами: электронная тоннельная проводимость и проводящие сети были включены в разработанную модель, которая может быть определена как:

$$\sigma_{N,EH} = (1 - \xi) \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \{f_{eff}(\sigma_{EH} - \sigma_m)A_{EH}\} \sin(\varphi) d\varphi d\psi \quad (5)$$

$$\sigma_{N,CN} = \xi \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \{f_{eff}(\sigma_{CN} - \sigma_m) A_{CN}\} \sin(\varphi) d\varphi d\psi \quad (6)$$

Общую эффективную проводимость композита можно определить, используя следующее выражение:

$$\sigma_{eff} = \sigma_m + \sigma_{N,EH} + \sigma_{N,CN}$$

где $\sigma_{N,EH}$ – обозначают электропроводность, определяемую проводимость электронов (перескакиванием электронов);

$\sigma_{N,CN}$ – обозначают удельную электропроводность, обусловленную механизмом проводящей сети;

σ_m – являющуюся тензором электропроводности матрицы. На основе разработанных моделей в исследовании дополнительно обсуждались волнистость и агломерация УНТ [158, р. 379]. В качестве дополнения к предыдущему исследованию была разработана модель, способная моделировать поведение электропроводности при воздействии внешней механической нагрузки. Однако гетерогенная природа композитов на основе цемента затрудняет точное прогнозирование их электропроводности. Поэтому необходимо проводить непрерывное исследование для доступа к параметрам, используемым в разработанной модели. Кроме того, учитывая различные типы функциональных наполнителей, которые можно использовать в ИЦК, следует изучить микромеханическую модель ИЦК, содержащую различные типы наполнителей.

Рисунок 15 показывает общую структуру модели микромеханики для ИЦК. Цель этой модели состоит в том, чтобы установить критерии для композита для достижения деформационного упрочнения, определение комбинации волокно/матрица/интерфейс микромеханического параметры, которые позволили бы преобладать композитное деформационное упрочнение из-за натяжения-смягчения. Критерий прочности накладывает ограничение на растягивающее напряжение, когда происходит зарождение трещины от существующего дефекта (верхняя левая панель). Энергетический критерий относится к режиму распространения плоской трещины (верхняя правая панель) для сохранения целостности соединительных волокон во время распространения и раскрытия трещины. Если ни один из этих критериев не выполняется, составной по умолчанию является ответом нивелирования натяжения обычного фиброармированного бетона. Как модель, основанная на микромеханике, она должна включать важные микроструктурные детали и микромеханизмы деформации. Все микромеханические параметры в модели должны быть физически измеряемыми. Эти характеристики отличают микромеханические модели от феноменологических моделей повреждений. Микромеханическая модель с измеримыми параметрами пригодна для проектирования, настройки и оптимизации композита. То есть успешная микромеханическая модель служит как инструментом прогнозирования прямого составного свойства (когда известны микромеханические

параметрические значения), так и инструментом для обратного расчета микромеханических параметров, которые определяют выбор и/или адаптацию компонентов материала для желаемых составных свойств. Как по критерию прочности, так и по критерию энергии, соединение волокон играет важную роль. Множественные трещины в ИЦК перекрываются волокнами, которые принимают на себя нагрузку, сбрасываемую матрицей. Из-за волокон малого диаметра (менее 100 мкм и часто менее 50 мкм), обычно используемых в ИЦК, каждый квадратный сантиметр поверхности трещины будет перекрыт более чем тысячей волокон. Соединительные волокна частично освобождаются и растягиваются через распространяющуюся трещину, увеличивая нагрузку до тех пор, пока все больше и больше волокон не отсоединятся и не вырвутся или не сломаются. Этот процесс определяет отношение перемычки волокна к зависимости раскрытия трещины, $\sigma(\delta)$, схематично показанное на рисунке 15б. Пиковая нагрузка, которую несут соединительные волокна, определяет пропускную способность волокна σ_0 [167].

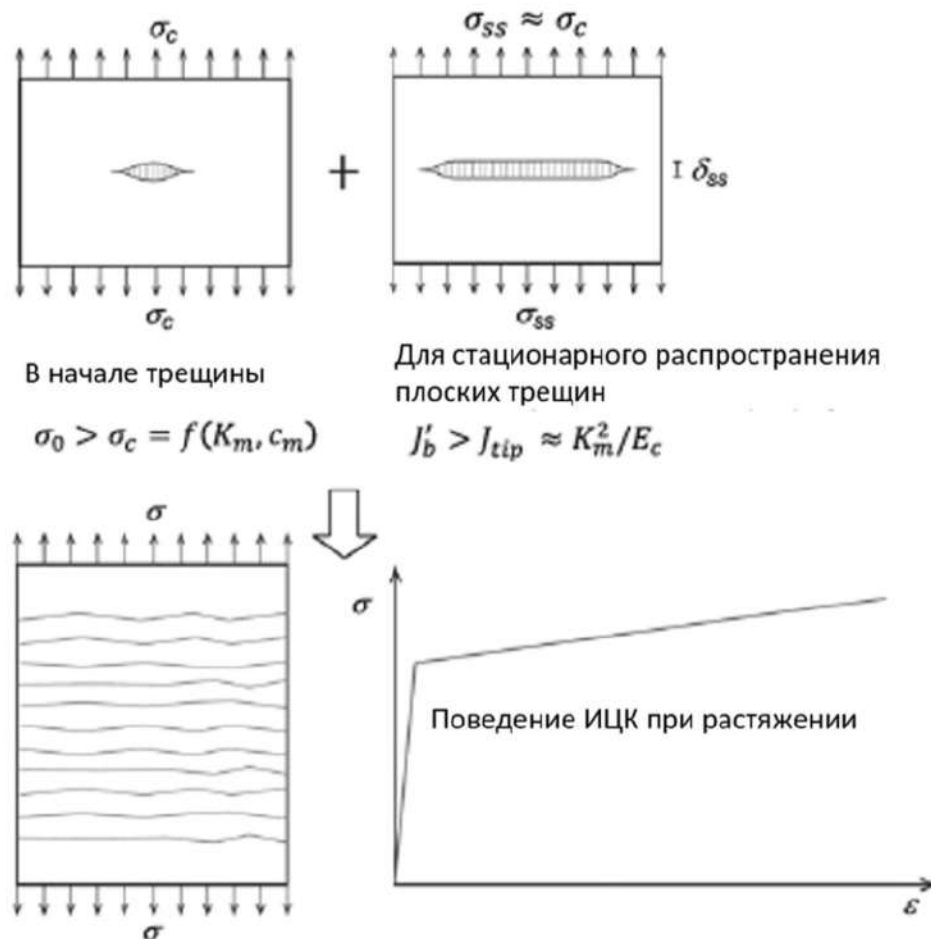


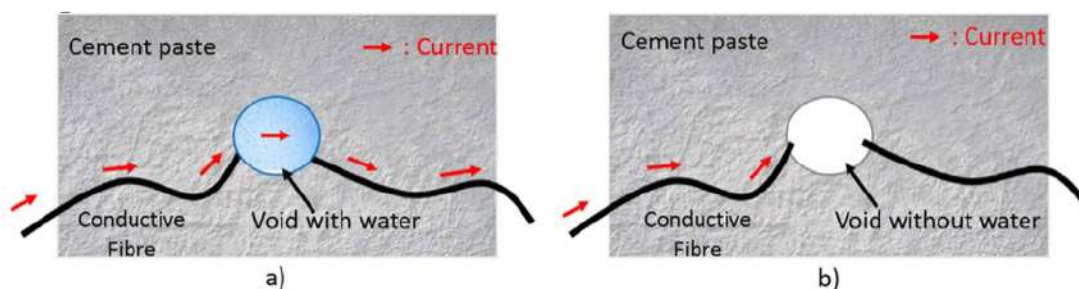
Рисунок 15 – Микромеханическая модель

Примечание – Составлено по источнику [167, р. 217]

Таким образом, исходя из моделей микромеханики для фибробетона (ИЦК) предполагается, что использование ПВА волокон соответствует условиям по контролю микронапряжений, т.е. имеет свойства склеивания внутри цементной матрице на уровне нано и микро размеров и имеют прямую пропорциональную зависимость изменения электрического сопротивления от приложенной нагрузки.

6.3 Подбор дополнительных параметров

В связи с тем, что в разрабатываемом ИЦК (фибробетоне) содержится летучая зола в массовом соотношении к цементу 1,2/1, соответственно, а также и ПВА-волокна, то предполагается введение пластификатора на основе поликарбоксилатов. Добавление пластификатора необходимо потому, что летучая зола имеет свойства высокого водопотребления, но с другой стороны необходимо удерживать водоцементного соотношение на в пределах 50-55% для исключения влияния поровой воды на результат электрических измерений. Исследовали корреляции между содержанием влаги и электрическими характеристиками ИЦК путем измерения удельного электрического сопротивления цементных композитов с 0,1 мас.% УНТ после сушки при 60°C или 95°C в течение 3 дней. Результат показывает, что образцы после сушки при 95°C имеют удельное электрическое сопротивление почти в 14 раз выше чем в образцах при температуре сушки 60 С. Высокая температура при 95°C успешно удаляет воду из пор, тем самым устраняя эффект поляризации и приводит к высокому удельному сопротивлению. Как показано на рисунке 16 вода, находящаяся в порах композита, способствует образованию непрерывной проводящей сети для прохождения тока; проводящая сеть устраняется при испарении поровой воды. Тем не менее, основным проводящим компонентом для фибробетона являются функциональные наполнители, а не ионы электролита. Хотя низкое содержание воды может привести к микротрещинам, которые препятствуют проводимости между ионами. Высокое контактное сопротивление между наполнителями и агломерированные функциональные наполнители, вызванные чрезмерным содержанием воды более важны для удельного сопротивления композитного бетона [163, p. 116907]. Таким образом, указанные исследования подтверждают необходимость добавления пластификатора с высоким коэффициентом снижения водопотребности.



а – с насыщенным содержанием воды; б – сухие

Рисунок 16 – Цементные пасты

Что позволяет уменьшить возможность оказания эффекта на электропроводимость получаемого композита, таким образом необходимое содержание воды цемента и пластификатора, определено опытным путем таким образом, чтобы расплав раствора составлял $110 \pm 5\%$. Полученные соотношения воды и цемента находились в пределах от 0,50 до 0,56.

Массовые соотношения вводимых добавок, использованного для производства цементных смесей, составили 5, 10, 15, 20 и 25% от общего веса портландцемента, как показано в таблице 11.

Таблица 11– Описание состава образцов цементного раствора

Шифр образца	Состав	В/Ц соотношение
ОПЦ	100% портландцемента	0.56
ЛЗ5	5% летучей золы и 95% портландцемента	0.56
ЛЗ10	10% летучей золы и 90% портландцемента	0.56
ЛЗ15	15% летучей золы и 85% портландцемента	0.53
ЛЗ20	20% летучей золы и 80% портландцемента	0.53
ЛЗ25	25% летучей золы и 75% портландцемента	0.50
ДШ5	5% доменного шлака и 95% портландцемента	0.53
ДШ10	10% доменного шлака и 90% портландцемента	0.51
ДШ15	15% доменного шлака и 85% портландцемента	0.50
ДШ20	20% доменного шлака и 80% портландцемента	0.50
ДШ25	25% доменного шлака и 75% портландцемента	0.50
КШ5	5% красного шлака и 95% портландцемента	0.53
КШ10	10% красного шлака и 90% портландцемента	0.53
КШ15	15% красного шлака и 85% портландцемента	0.51
КШ20	20% красного шлака и 80% портландцемента	0.51
КШ25	25% красного шлака и 75% портландцемента	0.50

6.4 Исследования электромеханических свойств разработанных цементных растворов

Для компоновки состава фибробетонов необходимо убедиться, что цементная матрица из предполагаемых к включению материалов (ЛЗ и КШ) соответствует уровню рН при которых обеспечивается функциональность ПВА волокон. Для этого были проведены исследования рН. Результаты измерений для цементных паст приведены в таблице 12.

Таблица 11 – Время схватывания и рН различных цементных смесей

Образец	Начальное схватывание, мин	Конечное схватывание, мин	рН
1	2	3	4
ОПЦ	186	480	12.90
ЛЗ5	210	496	12.92
ЛЗ10	233	509	12.82
ЛЗ15	247	512	12.73
ЛЗ20	312	515	12.55
ЛЗ25	356	523	12.44

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4
ДШ5	188	451	12.68
ДЩ10	195	457	12.87
ДШ15	201	459	12.64
ДШ20	205	462	12.55
ДШ25	217	468	12.52
КШ5	173	470	12.92
КШ10	168	463	12.76
КШ15	165	457	12.70
КШ20	157	439	12.55
КШ25	150	435	12.53

Как видно, увеличение содержания летучей золы и доменного шлака ведут к увеличению начального и конечного сроков схватывания. Но красный шлак имеет обратный эффект, увеличение красного шлака ведет к уменьшению времени схватывания. Кроме того, у всех образцов прослеживается тенденция к небольшому снижению уровня рН относительно цемента, проводя оценку результатов, формируется вывод об отсутствии влияния по уровню рН на ПВА волокна. На основании данного опыта делается вывод о применении красного шлака в качестве основного материала для замены Портланд цемента в разрабатываемом цементном композите, так он уменьшает время схватывания, что обеспечивает лучший эффект при затворении фибробетона.

В таблице 13 представлены результаты по прочности на сжатие и удельному электрическому сопротивлению цементных смесей с определенным содержанием добавок при различных сроках набора прочности: 3, 7 и 28 дней.

Таблица 13 – Показатели прочности на сжатие образцов в течение стандартных сроков набора прочности, МПа

Образец	3 дня	7 дней	28 дней
1	2	3	4
ОПЦ	16,65	22,57	32,65
ЛЗ5	13,93	20,93	27,94
ЛЗ10	14,29	20,75	26,46
ЛЗ15	14,68	20,02	24,57
ЛЗ20	15,09	18,28	23,08
ЛЗ25	15,19	17,44	22,17
ДШ5	16,64	21,49	32,58
ДЩ10	15,73	21,21	29,27
ДШ15	13,44	20,24	28,25
ДШ20	12,89	19,11	26,12
ДШ25	11,74	17,43	24,45
КШ5	14,29	18,32	31,27

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
КШ10	14,85	17,23	32,94
КШ15	14,22	16,95	27,52
КШ20	12,96	15,94	25,83
КШ25	12,46	15,82	25,15

Как видно, что увеличение содержания добавок приводит к снижению прочности на сжатие для всех образцов в раннем и поздних сроках. Стоит отметить, что на позднем сроке выдержки (28 дней) замена 5% портландцемента на ДШ и 10% портландцемента на КШ дает аналогичные результаты для ОПЦ с разницей в 0,21 и 0,88% соответственно. Эта наблюдаемая регрессия прочности на сжатие может быть обусловлена присутствием кристаллических фаз трикальций силиката и дикальций силиката в ДШ, как показано на рисунке 3, потому что данные фазы ограничено участвуют в процессе гидратации. В дополнение к этому, относительно высокое содержание оксида магния в ДШ может оказать негативное влияние на окончательный набор прочности цементного раствора [40, р. 251]. В случае летучей золы в ранних сроках (3 дня) прочность на сжатие улучшается с увеличением дозировки летучей золы, в частности, замена 25% портландцемента на летучую золу даст аналогичную прочность на сжатие 100% портландцемента. Такое повышение прочности в раннем возрасте может быть связано с присутствием оксида алюминия, который участвует в образовании гидрата кальция-алюминия. В позднем сроке (7 и 28 дней) прочность на сжатие демонстрирует противоположную тенденцию по сравнению с таковой в раннем возрасте. Это можно объяснить низким содержанием оксида кальция, который ограничивает выработку геля C-S-H во время гидратации. Интересная тенденция наблюдается, когда в качестве добавочного материала использовался красный шлам. Эта тенденция может быть обусловлена присутствием оксида кальция, оксида железа, оксида алюминия и оксида титана в аморфной фазе, которые оказали положительное влияние на набор прочности цементного раствора на сжатие.

Значения удельного электрического сопротивления в раннем и позднем сроках набора прочности были замерены без приложения нагрузки на образцы. Изменение динамики удельного электрического сопротивления при разных возрастах отверждения представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Удельное электрическое сопротивление сжатие образцов в течение стандартных сроков набора прочности, $\Omega \cdot m$

Образец	3 дня	7 дней	28 дней
1	2	3	4
ОПЦ	10,6	35,1	113,2
ЛЗ5	9,2	41,3	88,5

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4
ЛЗ10	8,1	47,1	79,3
ЛЗ15	5,8	39,7	58,1
ЛЗ20	5,2	31,6	64,3
ЛЗ25	3,5	30,2	53,1
ДШ5	7,5	28,6	37,6
ДШ10	5,1	25,1	36,7
ДШ15	4,3	21,4	33,25
ДШ20	3,5	19,45	31,6
ДШ25	2,1	17,9	28,25
КШ5	8,75	29,2	39,7
КШ10	7,6	27,1	39,1
КШ15	6,85	23,6	38,6
КШ20	5,65	21,9	37,8
КШ25	3,2	18,6	36,5

Образцы перед измерениями не высушивались (они непрерывно хранились до момента испытания), поэтому избыточное содержание воды могло способствовать к увеличению удельного электросопротивления со временем, из-за наличия ионов в воде, которая содержится в порах образцов цементного раствора [45, с. 87; 46, р. 1321]. Все испытанные образцы показывают небольшое удельное сопротивление (включая ОПЦ), однако ДШ и КШ показали самое низкое значение удельного сопротивления, что возможно обеспечивается электролитическим и электронным типом проводимости, как описано в [47, р. 879]. Введение 25% стального шлака и красного шлама снижает электрическое сопротивление раствора портландцемента в три раза, что может быть связано с относительно высоким содержанием оксидов металлов (т.е. Fe_2O_3), обнаруженных в этих материалах, как показано в таблице 1, что возможно даже в конце сроков набора прочности, когда проводимость обеспечивается за счет электронов [77, р. 115].

Сенсорные свойства цементных смесей определялись в нагруженном состоянии.

На рисунке 17 показаны максимальные относительные изменения удельного электрического сопротивления (ОИС), которые были вычислены через выражение (2):

$$ОИС = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} \quad (2)$$

где ρ_0 и ρ_i значения относительного электрического сопротивления, измеренные в начальный момент и во время нагружения образца, соответственно.

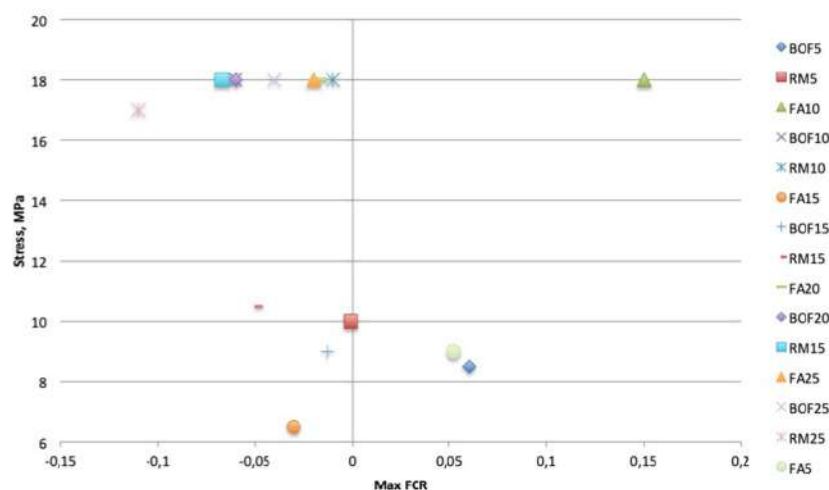


Рисунок 17 – Максимальное изменение удельного сопротивления во время нагружения образцов

Во время сжимающей нагрузки матрица цементного сенсора уплотняется, и в этом случае расстояние между электронами сокращается, что означает уменьшение электрического сопротивления [139, р. 1935]. Таким образом, значение ОИС образцов должна иметь отрицательное значение для сжимающей нагрузки [168]. В этой связи, образцы с большим содержанием материалов-добавок показали наиболее эффективные результаты сенсорными (самодетектирующими) свойствами, и, как и ожидалось, образцы с 5% добавок не обеспечивают необходимого изменения удельного сопротивления. Кроме того, был рассчитан коэффициент чувствительности к сжимающему напряжению согласно формуле (3) и результаты проведенных расчетов для разработанных цементных композитов отображены в таблице 15.

$$\text{Коэффициент чувствительности} = \frac{\max|\text{ОИС}|}{\delta} \quad (7)$$

где ОИС и δ – максимальные значения относительного изменения удельного сопротивления и определенное значение напряжения во время нагруженного состояния, соответственно.

Таблица 15 – Коэффициент чувствительности цементных растворов на 28 день набора прочности

Образец	Коэффициент чувствительности (МПа ⁻¹)
1	2
ОПЦ	0.004
Л35	0.006
Л310	0.007
Л315	0.0008
Л320	0.008
Л325	0.003
ДШ5	0.001

Продолжение таблицы 15

1	2
ДЩ10	0.005
ДЩ15	0.001
ДЩ20	0.005
ДЩ25	0.001
КЩ5	0.003
КЩ10	0.004
КЩ15	0.001
КЩ20	0.002
КЩ25	0.006

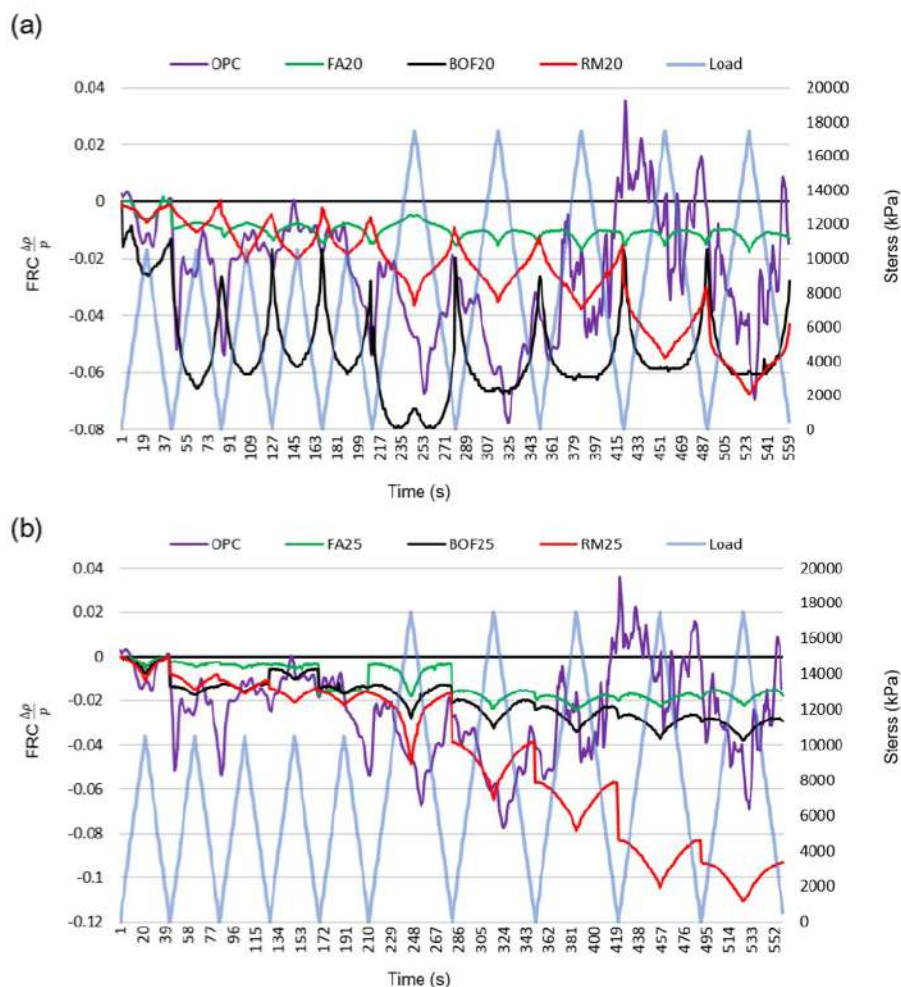
На рисунке 18 показана экспериментальная установка по определению электрических параметров образцов, зависимость между прочностью на сжатие и изменением удельного электрического сопротивления образцов цементных растворов, во время повторяющихся циклических нагрузкам 10 и 18 МПа (45-60% от разрушающей нагрузки) представлена на рисунке 19.



Рисунок 18 – Экспериментальная установка испытаний образцов

На рисунке 19а и рисунке 19б представлены результаты для образцов, содержащих 20 и 25% добавок, соответственно. Процентные содержания 20 и 25% были выбраны здесь для наглядной демонстрации изменения сопротивления. ОПЦ был использован в качестве опорного значения для

сравнения. Как видно, удельное электрическое сопротивление всех испытанных образцов уменьшается с приложением нагрузки, однако характер этого уменьшения изменяется от одного образца к другому в зависимости от типа используемой добавки. Стоит отметить, что удельное электрическое сопротивление ОПЦ уменьшалось с возрастанием нагрузки до 360 секунд, затем образец начинает демонстрировать противоположную тенденцию, которая может быть связана с появлением значительных необратимых повреждений в структуре образца [50, р. 27].



а – с 20% содержанием добавок; б – с 25% содержанием добавок

Рисунок 19 – Относительное изменение удельного сопротивления во время циклической нагрузки

Было изучено влияние промышленных отходов и побочных продуктов производства (угольной летучей золы, стального шлака доменной печи и красного шлама остаточных бокситов), добавленных в различных объемных долях в цементный раствор, приготовленный с использованием портландцемента типа I. На основе данных, полученных в этой

экспериментальной работе, были сформулированы следующие основные выводы:

1. Введение ЛЗ, ДШ и КШ в обычный портландцемент в количестве 5-25 мас.% снижает прочность на сжатие цементного раствора в раннем и позднем возрасте. С другой стороны, при 10 мас.% красного шлама некоторый прирост прочности на сжатие был достигнут через 28 дней.

2. На ранних периодах набора прочности добавление ДШ и КШ в количестве 20 мас.% увеличивает электропроводность портландцементного раствора на 36 и 30% соответственно. Это показывает усиление барьерных свойств цемента, что приводит к улучшению сенсорных (самодетектирующих) характеристик. В случае ЛЗ, дальнейшее увеличение массовой доли ЛЗ выше 20% приводит к обратному эффекту.

Добавление указанных добавок в портландцементный раствор значительно улучшало сенсорные (самодетектирующие) свойства цементного раствора. Добавление 25 мас.% ЛЗ, ДШ и КШ уменьшало относительное изменение удельного сопротивления на 21, 40 и 31% по сравнению с контрольным раствором (0% добавок), соответственно. Электропроводность портландцементного раствора улучшается с увеличением массовой доли добавок, но с относительно небольшим приростом.

На основании указанных результатов сделан вывод об использовании красного шлама в качестве материала-заменителя цемента при компоновке фибробетона.

В таблице 16 представлены составы композитных цементных смесей (фибробетонов) на которых проведены исследования электромеханических параметров.

Таблица 16 – Состав фибробетона (ИЦК)

Шифр образца	В/Ц	Цемент	ЛЗ	Песок	КШ	Пласт.	Волокна
ИЦК	0,56	1	1,2	0,8	0	0,012	2% об.
ИЦК-КШ10	0,56	0,9	1,2	0,8	0,1	0,012	2% об.
ИЦК-КШ15	0,56	0,85	1,2	0,8	0,2	0,012	2% об.
ИЦК-КШ20	0,56	0,80	1,2	0,8	0,3	0,012	2% об.

6.5 Исследование влияния частоты электрического тока на результат измерений

В целях исключения влияния частоты электрического тока образцы каждого состава фибробетона были исследованы в диапазоне частоты от 100 Гц до 100 кГц при помощи RLC-метра, как показано на рисунке 19. В (Приложение А) подробно показаны формы образов и виды испытательных установок. Результаты измерений представлены в таблице 17, а также для наглядности на рисунке 20. В таблице 17 представлены средние результаты

серии из девяти измерений и оценена девиация Стьюдента, как отклонение от среднего значения.

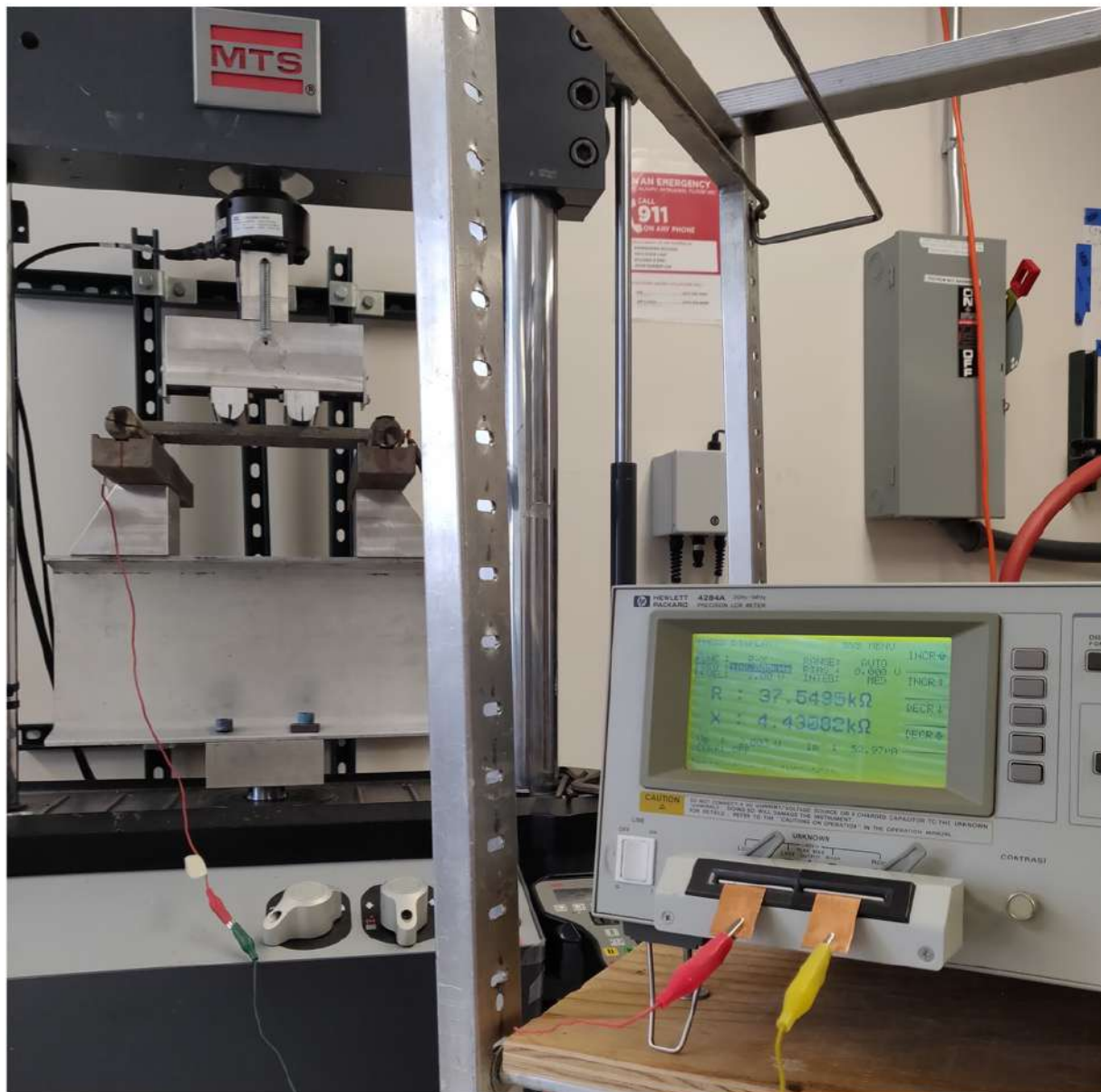


Рисунок 19 – Измерение электрического сопротивления образца купонного типа при помощи RLC-метра под действием нагрузки

Таблица 17 – Результаты измерений относительного электрического сопротивления после 28 дней выдержки (Ом-м)

Частота	100 Гц		1 кГц		10 кГц		100 кГц	
	avr	st.dev	avr	std	avr	std	avr	std
ИЦК	115,9	2,7	99,0	1,9	85,6	1,3	74,9	0,9
ИЦК-КШ10	110,5	2,3	90,9	3,2	78,5	2,3	68,9	1,8
ИЦК-КШ15	91,0	2,3	77,5	1,4	68,1	1,7	62,7	1,1
ИЦК-КШ20	83,4	2,4	68,4	2,6	60,3	1,7	56,6	1,6

Как видно из рисунка 20 значения электрического сопротивления уменьшаются с увеличением значения частоты измерений, причем таким образом, что они расположены относительно близко друг от друга при частоте 100 кГц. Кроме того, на частоте 100 кГц обеспечивается относительно низкое значение отклонения измерений, оцененное через девиацию Стьюдента.

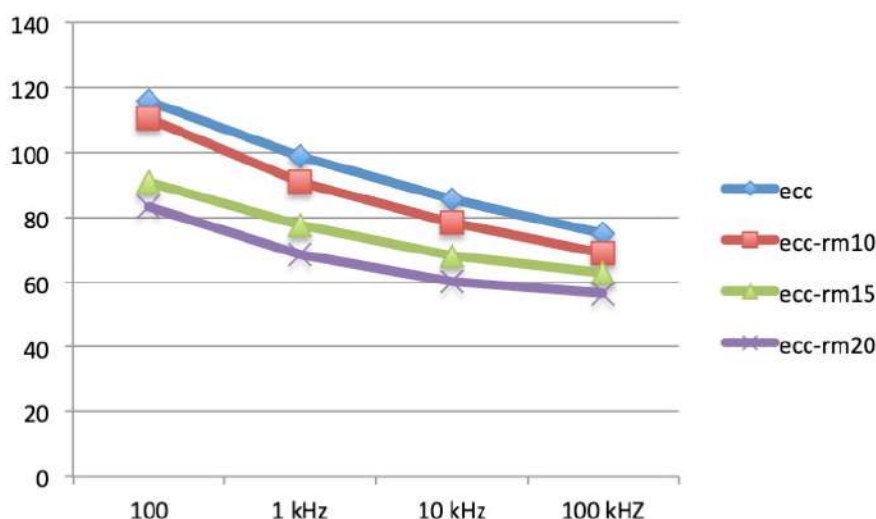


Рисунок 20 – Результаты измерений электрического сопротивления на разных частотах

Также, следует отметить тенденцию по увеличению проводимости электрического тока в зависимости увеличения содержания красного шлама, что подтверждает ранее представленные предположения от проводящих свойствах КШ.

На основании данных измерений, выбрана частота переменного тока 100 кГц на которой будут проводиться дальнейшие измерения.

6.6 Показатель прочности на сжатие разработанных композитов

Испытания прочности при сжатии производились по требованиям СТ РК ИСО 1920-4 «Testing of concrete. Strength of hardened concrete», текст которого аутентичен требованиям международного стандарта ISO 1920-4.

Результаты испытаний представлены в таблицах 18, 19, 20, 21. Для испытаний использовались образцы цилиндрической формы длиной 200 мм и номинальным диаметром 100 мм.

Показатель прочности по сжатию рассчитывался по следующей формуле (1):

$$f_{cm} = 4000 \frac{P_{max}}{\pi D^2} \quad (1)$$

где f_{cm} – прочность на сжатие, МПа;

P_{max} – максимальная нагрузка, кН;

D – среднее измеренное значение диаметра, мм.

Значение π , следует использовать с округлением до пяти знаков 3,1416 или более точнее. Результаты вычисляют с округлением до 0,5 МПа.

Таблица 18 – Результаты испытаний на сжатие образцов бетона через 3 дня набора прочности

Маркировка	Шифр	D_c (mm)	A (mm ²)	P_{max} (kN)	f_{cm} (MPa)
SP1	ИЦК	101,9	8159,2	81,5	39,9
SP2	ИЦК	98,9	7680,2	73,8	38,4
SP3	ИЦК	98,8	7668,7	63,2	32,9
SP4	ИЦК-КШ10	100,2	7890,8	73,8	37,4
SP5	ИЦК-КШ10	100,6	7945,5	66,3	33,4
SP6	ИЦК-КШ10	100,3	7894,0	74,4	37,7
SP7	ИЦК-КШ15	100,0	7857,3	65,2	33,2
SP8	ИЦК-КШ15	99,0	7700,8	75,0	39,0
SP9	ИЦК-КШ15	100,1	7863,8	73,4	37,3
SP10	ИЦК-КШ20	100,8	7974,2	55,8	28,0
SP11	ИЦК-КШ20	101,1	8021,3	63,6	31,7
SP12	ИЦК-КШ20	100,7	7964,8	59,0	29,6

Таблица 19 – Результаты испытаний на сжатие образцов бетона через 7 дней набора прочности

Маркировка	Шифр	D_c (mm)	A (mm ²)	P_{max} (kN)	f_{cm} (MPa)
SP1	ИЦК	101,9	8159,2	85,8	42,0
SP2	ИЦК	98,9	7680,2	82,3	42,9
SP3	ИЦК	98,8	7668,7	85,7	44,7
SP4	ИЦК-КШ10	100,2	7890,8	55,0	27,9
SP5	ИЦК-КШ10	100,6	7945,5	80,4	40,5
SP6	ИЦК-КШ10	100,3	7894,0	65,0	32,9
SP7	ИЦК-КШ15	100,0	7857,3	68,3	34,8
SP8	ИЦК-КШ15	99,0	7700,8	79,4	41,2
SP9	ИЦК-КШ15	100,1	7863,8	70,2	35,7
SP10	ИЦК-КШ20	100,8	7974,2	71,1	35,7
SP11	ИЦК-КШ20	101,1	8021,3	80,1	40,0
SP12	ИЦК-КШ20	100,7	7964,8	75,9	38,1

Таблица 20 – Результаты испытаний на сжатие образцов бетона через 28 дней набора прочности

Маркировка	Шифр	D_c (mm)	A (mm ²)	P_{max} (kN)	f_{cm} (MPa)
1	2	3	4	5	6
SP1	ИЦК	101,9	8159,2	78,2	38,3
SP2	ИЦК	98,9	7680,2	85,2	44,4
SP3	ИЦК	98,8	7668,7	72,7	37,9

Продолжение таблицы 20

1	2	3	4	5	6
SP4	ИЦК-КШ10	100,2	7890,8	87,9	44,6
SP5	ИЦК-КШ10	100,6	7945,5	89,7	45,2
SP6	ИЦК-КШ10	100,3	7894,0	104,3	52,9
SP7	ИЦК-КШ15	100,0	7857,3	105,7	53,8
SP8	ИЦК-КШ15	99,0	7700,8	102,9	53,4
SP9	ИЦК-КШ15	100,1	7863,8	99,4	50,6
SP10	ИЦК-КШ20	100,8	7974,2	107,4	53,9
SP11	ИЦК-КШ20	101,1	8021,3	101,1	50,4
SP12	ИЦК-КШ20	100,7	7964,8	118,0	59,2

Таблица 21 – Результаты испытаний на сжатие образцов бетона через 90 дней набора прочности

Маркировка	Шифр	D_c (mm)	A (mm ²)	P_{max} (kN)	f_{cm} (MPa)
SP1	ИЦК	101,9	8159,2	110,4	54,1
SP2	ИЦК	98,9	7680,2	106,6	55,5
SP3	ИЦК	98,8	7668,7	104,4	54,5
SP4	ИЦК-КШ10	100,2	7890,8	113,6	57,6
SP5	ИЦК-КШ10	100,6	7945,5	114,4	57,6
SP6	ИЦК-КШ10	100,3	7894,0	112,1	56,8
SP7	ИЦК-КШ15	100,0	7857,3	111,6	56,8
SP8	ИЦК-КШ15	99,0	7700,8	111,4	57,9
SP9	ИЦК-КШ15	100,1	7863,8	112,4	57,2
SP10	ИЦК-КШ20	100,8	7974,2	125,5	62,9
SP11	ИЦК-КШ20	101,1	8021,3	128,7	64,2
SP12	ИЦК-КШ20	100,7	7964,8	128,3	64,5

Как видно из полученных результатов, замена красного шлама оказывает положительный эффект на показатель прочности на сжатие на поздних сроках твердения (28 и 90 дней). На ранних сроках от 3 до 7 дней наблюдается падение прочности образцов с содержанием красного шлама выше 10%. Данная тенденция может быть объяснена наличием аморфной фазы трикальций силиката в КШ, который имеет гидратация которого заканчивается на интервалах более 20 дней.

6.7 Показатель прочности на изгиб

Испытания прочности на изгиб приводились согласно ГОСТ 30744. Для испытаний использовались образцы-балки размерами 160x40x0 мм. Испытания проводились на серии из трех образцов. Результаты испытаний представлены в таблице 22. В скобках указаны значения девиации Стьюдента.

Таблица 22 – Результаты испытаний на изгиб (МПа)

Маркировка	3 days	7 days	28 days
ИЦК	8.0 (1.3)	10.7 (4.3)	17.8 (0.5)
ИЦК-КШ10	8.1 (0.1)	5.4 (1.2)	18.1 (1.3)
ИЦК-КШ15	10.2 (2.0)	8.4 (0.7)	14.0 (0.9)
ИЦК-КШ20	13.0 (2.7)	8.3 (1.1)	13.3 (0.8)

Согласно полученным результатам, наибольшую прочность на изгиб приобретают образцы с 10% содержанием КШ на позднем сроке выдержке (28 дней). Образцы с содержанием КШ 15 и 20% показывают падение прочности по сравнению с контрольным образцом (ИЦК). Это можно объяснить наличием алюминатов кальция в составе КШ, а также наличием оксида марганца, что может отрицательно влиять на набор прочности.

6.8 Испытания на морозостойкость

Испытания на морозостойкость проведены согласно ГОСТ 10060 на образцах кубической формы со стороной 100 мм, испытания проведены по усвоенной методике за 50 циклов. Результаты испытаний представлены в таблице 23. После каждых 10 циклов замораживания-оттаивания был определен показатель прочности на сжатие.

Таблица 23 – Результаты испытаний на морозостойкость

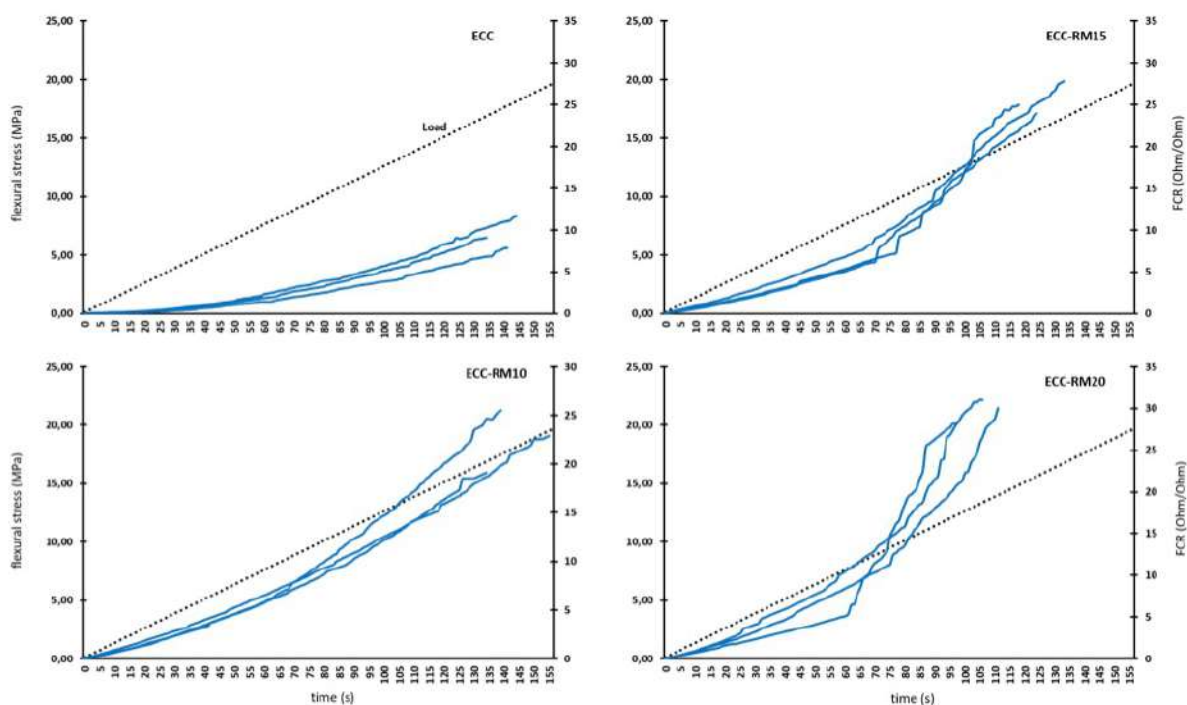
Маркировка	Шифр	H (mm)	W (mm)	L (mm)	Прочность на сжатие, МПа					
					0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SP1 (cont)	ИЦК	103,1	101,5	100,2	45,6	53,6	50,1	48,1	45,3	37,8
SP2 (cont)	ИЦК	96,0	96,1	103,3	51,4	59,5	54,6	55,1	47,9	41,7
SP3 (cont)	ИЦК	104,1	98,4	101,9	54,5	55,6	49,7	41,3	48,4	38,8
SP4 (cont)	ИЦК	100,8	100,9	102,1	47,3	53,0	40,5	44,8	53,7	43,7
SP5 (cont)	ИЦК	102,2	97,5	99,9	47,7	57,8	50,7	52,0	44,0	29,9
SP6 (cont)	ИЦК	101,2	99,7	102,2	51,9	55,7	52,9	47,1	43,1	40,1
SP7	ИЦК-КШ10	100,5	101,6	98,2	54,2	51,3	55,6	54,5	49,6	49,3
SP8	ИЦК-КШ10	105,4	99,7	100,4	53,1	50,8	51,0	51,3	49,1	44,8
SP9	ИЦК-КШ10	95,4	101,7	99,9	55,7	44,5	51,0	57,8	49,6	43,5
SP10	ИЦК-КШ10	102,1	98,4	97,9	51,7	49,3	52,7	55,6	45,3	51,3
SP11	ИЦК-КШ10	100,1	102,3	102,1	56,2	52,1	48,8	50,1	54,3	46,6
SP12	ИЦК-КШ10	102,5	98,7	103,8	51,5	51,1	52,5	57,4	48,9	46,4
SP13	ИЦК-КШ10	96,8	100,7	99,7	54,5	51,3	51,4	58,5	45,3	43,5
SP14	ИЦК-КШ10	101,8	99,8	96,2	53,0	50,3	53,8	50,6	48,3	50,7
SP15	ИЦК-КШ10	102,4	97,2	99,3	49,7	49,7	52,8	53,8	47,1	48,8
SP16	ИЦК-КШ10	103,3	98,4	101,1	54,2	48,2	53,5	52,6	50,1	45,0
SP17	ИЦК-КШ10	101,8	102,2	101,6	53,9	46,7	51,9	60,0	56,8	42,8
SP18	ИЦК-КШ10	102,2	98,4	100,2	52,0	47,1	56,3	54,0	58,2	45,9
SP19	ИЦК-КШ15	101,2	99,6	101,3	52,4	54,4	57,0	59,0	48,4	57,7

Продолжение таблицы 23

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SP20	ИЦК-КШ15	100,4	99,5	97,7	55,4	58,1	60,3	55,3	63,8	47,6
SP21	ИЦК-КШ15	95,6	102,2	99,1	58,6	59,1	61,4	58,6	55,3	52,2
SP22	ИЦК-КШ15	100,3	99,7	99,1	58,4	56,0	57,5	58,0	49,2	56,6
SP23	ИЦК-КШ15	102,1	100,9	100,6	56,4	55,2	58,2	56,9	56,1	59,9
SP24	ИЦК-КШ15	98,5	100,3	98,8	52,8	53,4	58,0	54,4	55,8	48,9
SP25	ИЦК-КШ15	98,2	99,1	101,3	54,0	52,1	57,6	58,9	56,8	46,0
SP26	ИЦК-КШ15	96,4	100,3	97,4	59,5	61,8	57,9	56,3	55,9	56,1
SP27	ИЦК-КШ15	95,0	100,8	104,0	56,9	55,5	63,4	59,0	50,3	59,3
SP28	ИЦК-КШ15	100,0	97,5	100,4	51,6	53,9	59,7	49,5	61,7	56,9
SP29	ИЦК-КШ15	98,8	98,0	99,1	50,8	54,9	56,6	58,5	54,1	50,6
SP30	ИЦК-КШ15	101,7	100,3	102,0	56,5	56,1	62,7	56,1	50,1	54,9
SP31	ИЦК-КШ20	99,6	99,6	101,1	51,1	59,0	62,9	55,2	64,4	52,4
SP32	ИЦК-КШ20	102,4	99,2	99,4	53,9	66,1	61,0	58,4	56,4	46,7
SP33	ИЦК-КШ20	99,4	99,2	102,0	53,5	64,7	66,8	55,9	61,6	53,5
SP34	ИЦК-КШ20	102,4	101,5	102,1	60,5	55,1	65,0	50,9	50,5	53,7
SP35	ИЦК-КШ20	98,6	96,9	101,2	62,6	58,2	62,5	57,0	50,1	56,0
SP36	ИЦК-КШ20	100,4	99,5	100,3	53,0	60,8	67,0	52,7	54,5	41,4
SP37	ИЦК-КШ20	98,0	100,4	95,9	57,8	62,2	60,7	61,1	59,2	53,9
SP38	ИЦК-КШ20	98,9	105,2	101,8	59,3	60,9	61,7	62,6	51,2	61,3
SP39	ИЦК-КШ20	100,4	97,7	96,6	57,7	60,7	67,5	62,6	58,9	55,4
SP40	ИЦК-КШ20	96,5	102,6	102,8	54,0	61,3	57,0	58,1	56,9	51,1
SP41	ИЦК-КШ20	97,8	103,3	101,1	60,3	62,6	63,4	54,5	48,4	53,0
SP42	ИЦК-КШ20	100,3	98,1	101,7	60,4	61,5	64,3	64,5	59,5	47,8

6.9 Определение электромеханических характеристик разработанных композитов

В ходе проведения испытаний прочности на сжатие проводились измерения удельного электрического сопротивления. На рисунке 21, представлены результаты относительного изменения сопротивления в зависимости от увеличения нагрузки на изгиб.



а – обычный ИЦК (фиброкомпозит); б – ИЦК (фиброкомпозит) с 10% содержанием красного шлама; в – ИЦК (фиброкомпозит) с 15% содержанием красного шлама; г – ИЦК (фиброкомпозит) с 20% содержанием красного шлама

Рисунок 21 – Определение электромеханических показателей

Как видно из представленных результатов все образцы, даже контрольные образцы без добавки КШ демонстрируют прямо пропорциональную зависимость изменения электрического сопротивления с увеличением прилагаемой нагрузки. Наибольшее значение ОИС (28-30%), как и ожидалось, показывают образцы с 20% содержанием КШ. При этом как видно из рисунка, необратимые изменения в структуре композита которые приводят к резкому увеличению электрического сопротивления, происходят при нагрузке в 30-40% от максимальной нагрузки на разрушение. Образцы с содержанием КШ 15% показывают тоже достаточно высокий отклик ОИС (23-25%), а образцы с содержанием КШ 10% имеют средний показатель ОИС на уровне 20%, при этом с почти линейной зависимостью от приложенной нагрузки. Это свидетельствует о формировании достаточных микромеханических связей между компонентами в системе фибра (ПВА волокна) – частицы (ОПЦ, КШ, ЛЗ, песок), которые достаточны для обеспечения механических и электропроводных свойств.

Выводы по разделу

Как было отмечено выше, фибробетон является цементным композитом с микромеханической моделью. Для получения высоких показателей фибробетона, подбор компонентов осуществляется таким образом, что обеспечить максимально эффективное взаимодействие С-S-H геля и волокна.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при заданных технических условиях (упрощении процесса и состава изготовления фибробетона) оптимальное значение замещения цемента с применением КШ составляет 10%. При данном соотношении наблюдается повышение показателей прочности и повышение проводимости получаемого цементного композита, т.е. можно говорить о получении многофункционального цементного композита, который выполняет функции как строительного материала, так и функции определения образования микротрещин, путем изменения своего внутреннего электрического сопротивления. В следующем разделе приведены факторы, влияющие на результаты измерений с приведением зависимостей, рассчитанными с применением программного обеспечения.

7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ

Электрические свойства материалов на основе цемента изучались почти столетие [169]. Одним из распространенных практических приложений измерений электрических величин является стандартное испытание, обычно называемое испытанием на быструю проницаемость хлоридов. Этот тест измеряет заряд, прошедший в насыщенном образце во времени, когда приложено постоянное напряжение. Несмотря на то, что он широко используется, испытание на быструю проницаемость для хлоридов имеет несколько недостатков, связанных с его относительно длительным временем подготовки образца, его разрушающий характер, а также нагрев образца, который влияет на результаты [169, р. 93]. Учитывая эти ограничения, растет интерес к разработке неразрушающих измерений удельного сопротивления для замены теста на быструю проницаемость хлоридов. Преимущество тестов на сопротивление заключается в том, что они могут быть недорогими, повторяемыми и быстрыми в выполнении [169, р. 94].

Зарубежные организации по стандартизации, такие как AASHTO и ASTM, находятся в процессе разработки стандартных методов испытаний для испытания поверхностного удельного сопротивления, и было проведено многопользовательское исследование для оценки изменчивости двух быстрых испытаний удельного сопротивления. Несмотря на то, что в течение последних 30 лет существенные исследования были сосредоточены на электрических методах для описания структуры материала и транспортных свойств, сравнительно небольшое количество исследований было сосредоточено на роли подготовки и геометрии образца.

7.1 Влияние геометрических параметров

Несколько различные геометрические параметры образцов использовались для измерения электрических свойств получаемых цементных композиций. В этом разделе описываются эти параметры и обсуждается, как они могут быть связаны друг с другом. Наиболее часто используемые размеры показаны на рисунке 21. Первый параметр называется поверхностным удельным сопротивлением (рисунок 21а). Для испытаний на поверхностное удельное сопротивление используют четырехпроводную конфигурацию подключения датчиков, в которой переменный ток пропускается между внешними датчиками, а напряжение измеряется между внутренними датчиками. В этом исследовании использовался стандартный образец цилиндра диаметром 100 мм и длиной 200 мм с расстоянием между зондами 38 мм.

Второе исполнение образцов типично для одноосного испытания, в котором набор пластинчатых электродов помещается на концах цилиндрического образца и используется для измерения сопротивления через цилиндр (призму) (рисунок 21б). Третьим параметром является геометрия, оцененная в этом исследовании, где использован набор вставных стержней из

нержавеющей стали. Стандартный испытательный цилиндр 150×300 мм использовался с двумя врезанными резьбовыми стержнями, как показано на рисунке 1с. Тесты, выделенные в этом исследовании, основаны на измерении электрического сопротивления между электродами на образце. Это электрическое сопротивление может быть связано с независимым от геометрии свойством, известным как удельное сопротивление, используя подход, показанный в уравнении (1):

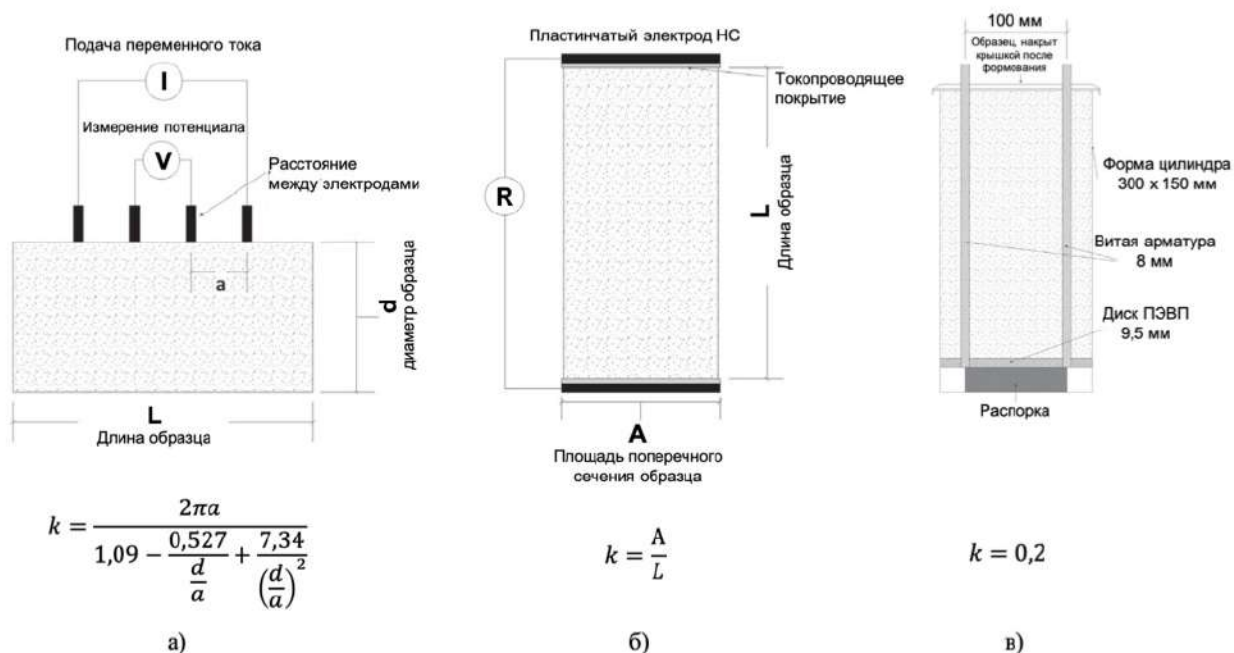
$$\rho = Rk$$

где ρ = удельное сопротивление материала;

R = измеренное сопротивление;

k = поправочный коэффициент геометрии

Поправочный коэффициент геометрии может быть определен численно или экспериментально и показан на рисунке 22 для геометрий, описанных выше. В дополнение к этим геометриям, для этого типа испытаний можно использовать широкий диапазон геометрий электродов и размеров образцов, при условии, что можно определить геометрический фактор, с примерами, приведенными в литературе.



a – поверхностное приложение электродов (применимо только для образцов с $d/a < 4.0$ и $L/a > 5.0$); b – односое приложение электродов; v – встроенные электроды (коэффициент k , применим только для этой геометрии образца)

Рисунок 22 – Геометрия и поправочный коэффициент геометрии (k) для цилиндрических образцов (НС = нержавеющая сталь; ПЭВП = полиэтилен высокой плотности)

7.2 Влияние температуры образца

Температура образца может существенно влиять на измеренное удельное сопротивление. Повышение температуры образца приводит к увеличению подвижности ионов в поровом растворе и уменьшению измеренного удельного сопротивления. Хотя для учета температуры было предложено несколько подходов, поправка, исследованная авторами, является вариацией закона Аррениуса, как показано в уравнении (2):

$$\rho_{t-ref} = \rho_t \cdot \exp \left[\frac{E_{A-cond}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$$

где ρ_{t-ref} = удельное сопротивление (Ом•м) при эталонной температуре (23°C);

ρ_t = удельное сопротивление (Ом•м) при температуре испытания;

E_{A-cond} = энергия активизации проводимости $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right)$;

R = универсальная газовая постоянная (8,314 Дж[моль • К]),

T = testing temperature (K), and

T_{ref} = контрольная температура (K)(23 ° C).

Хотя изменения температуры могут влиять на скорость гидратации материалов на основе цемента, эта поправка предназначена для учета влияния температуры на электрические измерения, а эффекты гидратации рассматриваются отдельно. В этой работе исследовалось влияние температуры на удельные сопротивления образца.

7.3 Влияние хранения и кондиционирования образцов

Еще один важный фактор, который может повлиять на электрические измерения – это то, как образцы хранятся и кондиционируются. Чтобы наилучшим образом проиллюстрировать этот подход, модель Виртуальной лаборатории по испытаниям цемента и бетона, разработанная Национальным институтом стандартов и технологий, использовалась для моделирования раствора с сорокадвухпроцентным отношением воды и цемента. Во время эксперимента исследовались три разных условия выдержки образцов в период набора прочности:

- сохранение герметичности в период набора прочности и испытаний;
- сохранение герметичности в период набора прочности и сатурация водой при проведении испытаний;
- сатурация водой в период набора прочности и испытаний.

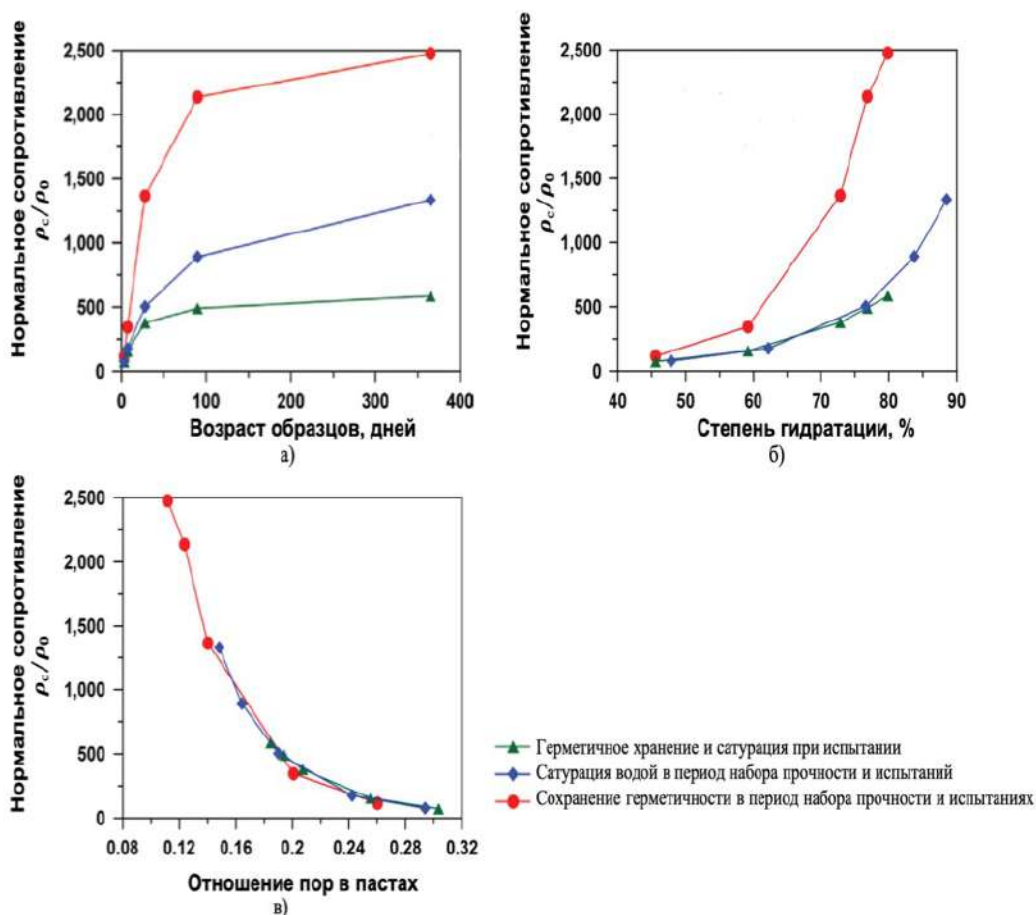
В ходе эксперимента установлены два важных фактора влияющих на значение сопротивления образца, во-первых это показатель гидратации цементного раствора и во-вторых уровень сатурации.

В ходе экспериментального моделирования были рассчитаны показатели удельного сопротивления жидкости, которая использовалась для сатурации и затем рассчитаны значения по удельном сопротивлению жидкости, которая находилась в микропорах образца. Было установлено, что наименьшее значение

удельного электрического сопротивления имели образцы и партии, где сатурация производилась постоянно и во время хранения и во время испытаний.

Хотя структура пор и степень гидратации обоих образцов были одинаковыми, различие можно объяснить содержанием влаги (или степенью насыщения) в образце (рисунок 23). Был апробирован подход для учета изменений удельного сопротивления в частично насыщенном бетоне с использованием уравнения (3):

$$\rho^* = \rho S^{n-1+\delta}$$



а – в зависимости от возраста образца; б – в зависимости от степени гидратации; в – в зависимости от фракции насыщенной пористости в пасте для трех условий отверждения

Рисунок 23 – Результаты моделирования в виртуальной лаборатории испытаний цемента и бетона одной и той же смеси воды и цемента (0,42) - растворной смеси для определения нормального удельного сопротивления

Примечание – Данные показаны через 3, 7, 28, 90 и 365 дней и представлены в норму по удельному сопротивлению жидкости в порах

$$\rho_{t-ref} = \rho_t \cdot \exp \left[\frac{E_{A-cond}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$$

где ρ_{t-ref} = удельное сопротивление (Ом·м) при температуре $T_{ref} = 23$ °С;
 ρ_t – удельное сопротивление (Ом·м) при температуре испытаний T ;
 E_{A-cond} – энергия активации проводимости (кДж/моль);
 R – универсальная газовая постоянная.

Параметр δ описывает ионную силу раствора поровой жидкости (непрореагировавшей воды) и то, как он изменяется во время сушки. Для раствора, использованного в этом исследовании (физические эксперименты), степень насыщения варьировалась от 85% до 100%. Следует отметить, что показатель степени ($n - 1 + \delta$) 4,15 сопоставимы с данными, представленными Вайсом и группой исследователей из моделирования [170]. Рисунок 21 также показывает, что хранение образцов в известковой воде привело к большей степени гидратации, чем это достигается в запечатанных образцах. Точки данных на рисунке 23б свидетельствуют о том, что в зависимости от кондиционирования пробы возникали различные степени гидратации. На рисунке 23а представлены эти измерения на одних и тех же периодах хранения.

В ходе испытаний сделан вывод, что образцы, которые постоянно подвергались сатурации при наборе прочности демонстрируют резко отличающиеся результаты. Партия образцов, которые постоянно насыщались водой показывает одинаковые результаты с партией образцов, которые постоянно хранились герметично.

На рисунке 23в эти результаты модели показывают, что для данного образца удельное сопротивление при любой степени насыщения может быть оценено из одного измерения, учитывая, что относительное изменение проводимости порового раствора также можно прогнозировать. Эти модели также предполагают, что измерения удельного сопротивления могут быть оценены с точки зрения доли насыщенной пористости в цементной пасте, как показано на рисунке 23в [170, р. 1099]. Предполагается, что для образцов, хранящиеся в период отверждения в насыщенной известковой воде, объем раствора, в котором хранятся образцы, может влиять на измерения удельного сопротивления. Это влияние может быть вызвано возможной концентрацией порового раствора или разбавлением в результате выщелачивания. Этот эксперимент наглядно показывает зависимость влияния объема раствора для хранения на размер образца, который был использован для насыщенного известково-водного отверждения.

Материалы

Образцы были изготовлены из раствора и пасты, каждый с водо-цементным отношением 0,42 по массе. Растворная смесь состояла из 55% по объему заполнителя, изготовленного из мелкого заполнителя с удельным весом 2,61 и поглощающей способностью 2,20% по сухой массе. На рисунке 23 показано, как виртуальная лаборатория испытаний цемента и бетона моделирует одну и ту же смесь воды и цемента (0,42) растворной смеси для нормализованного удельного сопротивления по (а) возрасту образца, (б) степени гидратации и (в) доле насыщенной пористости в паста для трех условий отверждения (данные показаны через 3, 7, 28, 90 и 365 дней и

представлены в норме по удельному сопротивлению жидкости в порах). (а) (b) (c) Обычный портландцемент с тонкостью помола $375 \text{ м}^2/\text{кг}$, удельным весом 3,17 и предполагаемым составом Бото 60% C_3S (трикальций силикат), 10% C_2S (дикальций силикат), 9% C_3A (трикальций алюминат) и 10% C_4AF (тетракальций алюмоферрит) по сухой массе. Цемент содержал щелочь с содержанием 0,35% Na_2O (оксид натрия) и 0,77% K_2O (оксид калия). На основании химического состава было рассчитано, что предельное теоретическое тепловыделение составляет 512 Дж/г с использованием табличной теплоты гидратации каждой фазы. Образцы хранили в насыщенном известью растворе, который изготавливается при дозировке извести 3,0 г/л раствора для обеспечения насыщенного раствора. При насыщении растворимость чистого гидроксида кальция составляет 1,2 г/л воды.

Экспериментальное оборудование, используемое для тестирования устойчивости

Сопротивление образца измерялось четырьмя измерителями удельного сопротивления. Для каждого измерения использовали переменный ток, но измерения проводили на разных частотах. Proseq Resipod использовался для тестирования удельного сопротивления (рисунок 21a) при фиксированном расстоянии между наконечниками зонда 38 мм и одноосного измерения удельного сопротивления (рисунок 21б) с использованием одноосного комплекта для измерения удельного сопротивления, доступного от Proseq, и работал на частоте 40 Гц, M.C. Miller 400D использовался в одноосном испытании на удельное сопротивление (рисунок 21б) при частоте 80 Гц. Одноосные измерения (рисунок 21b) с использованием измерителя RCON проводились на одной частоте (1 кГц), за исключением модели эквивалентной схемы, которая обсуждается ниже. Для количественной оценки эффекта измерения единой частоты использовался импедансный спектрометр Solatron 1260A в диапазоне частот от 1 Гц до 10 МГц.

Экспериментальные результаты и аналитические поправки на геометрию.

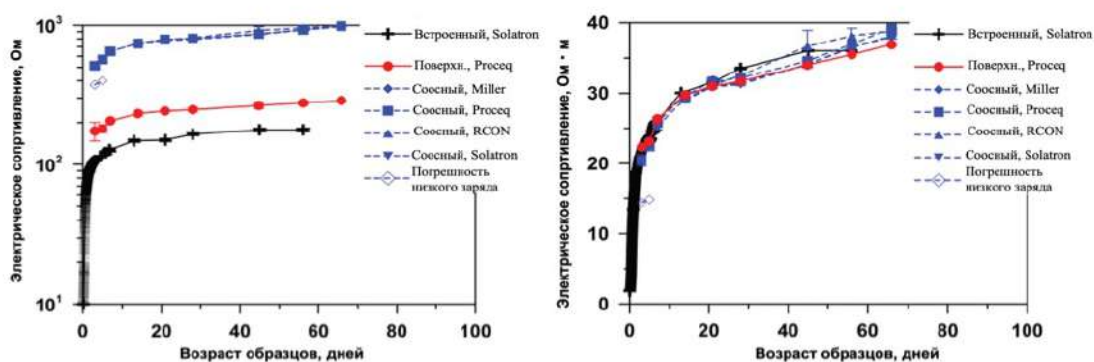
Измерения электрического сопротивления были сделаны на запечатанных образцах (то есть образцы нагреты в двойных пластиковых пакетах между испытаниями); результаты показаны на рисунке 22a. Когда для расчета удельного электрического сопротивления была применена соответствующая поправка на геометрию (с использованием уравнения 1 и значений, указанных на рисунке 22), результаты, полученные на разных образцах разной геометрии, были вполне сопоставимы (рисунок 22б).

Интересно отметить, что некоторые из одноосных измерений раннего возраста, выполненных с помощью измерителя удельного сопротивления Миллера (синие линии), видно, что сопротивление значительно ниже. Эти более низкие измерения были прослежены до низкого уровня заряда батареи. Когда батарею заменили для второй серии экспериментов, результаты были сопоставимы с другими экспериментальными результатами. Данная зависимость от степени заряда, однако, показывает ценность наличия стандартного неизменного эталонного образца, который можно использовать

каждый день для подтверждения правильности работы измерительного устройства.

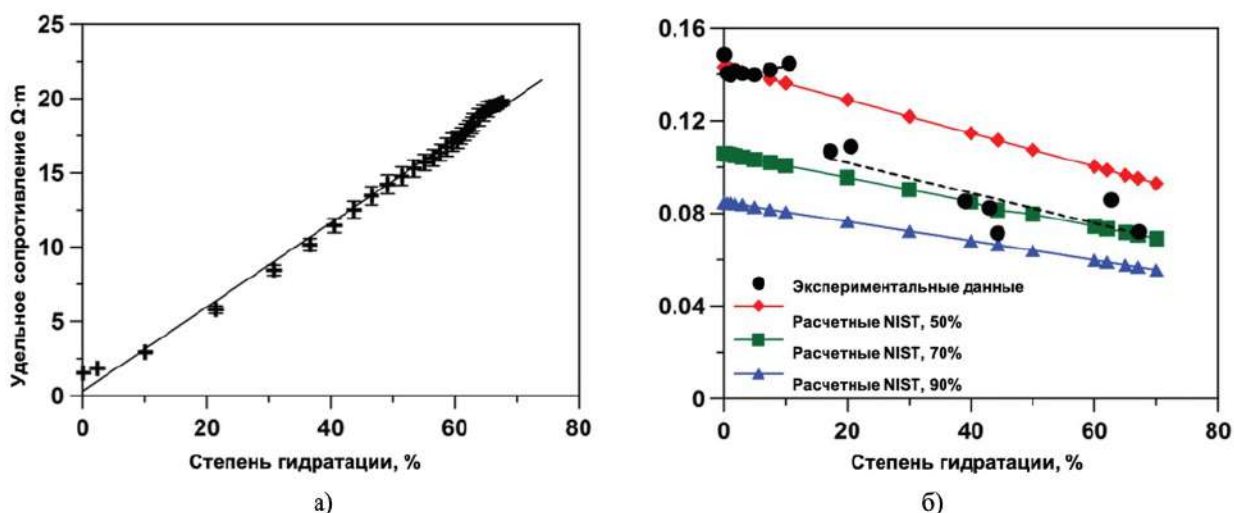
7.4 Параметр проводимости в зависимости от состава жидкости

Удельное сопротивление герметичного раствора измеряли и наносили на график в зависимости от степени гидратации, определенной по изотермическим измерениям калориметра (рисунки 24, 25). Удельное сопротивление было почти линейной функцией степени гидратации, которая аналогична ранее сообщенным данным. Поровой раствор, который является основной проводящей фазой в материалах на основе цемента, имеет удельное сопротивление на несколько порядков величины ниже, чем у твердой и паровой фаз. Чтобы изучить, как раствор пор изменяется с гидратацией, раствор пор извлекали из образцов пасты с отношением воды к цементу 0,42. Растворы экстрагировали в возрасте 10 минут и 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 часов, пока они были в свежем состоянии, с помощью системы фильтрации под давлением Millipore. В процедуре использовался газообразный азот при давлениях до 200 кПа. Экстракция, выполненная на отвержденных образцах, проводилась в возрасте 1, 3, 5 и 7 дней с использованием матрицы высокого давления при давлениях до 380 МПа. Извлеченные растворы измеряли на удельное сопротивление, используя ячейку раствора пор, описанную Castro [171]. Экспериментально измеренные растворы пор сравнивали с моделью, разработанной Bentz для онлайн-инструмента (<http://concrete.nist.gov/poresolncalc.html>). Эта модель предсказывает электрические свойства порового раствора, используя только массу воды, цемента и дополнительных материалов; химический состав этих материалов (то есть их массовые процентные доли Na_2O , K_2O и SiO_2 (диоксид кремния) и предполагаемая степень гидратации. Модель оценивает состав раствора пор, а затем оценивает электрические свойства этого раствора пор.



а – изменение сопротивления от возраста образцов; б – изменение удельного сопротивления

Рисунок 24 – Измерения, проведенные на герметичных образцах раствора с различной геометрией (погрешности представлена как стандартное отклонение трех образцов)



а – герметичные образцы раствора (столбцы погрешности выражены как стандартное отклонение трех образцов); б – извлеченный поровый раствор по сравнению с результатами модели для различных процентов растворения щелочи по данным Национального института стандартов и технологий NIST

Рисунок 25 – Измерения реакционной способности

Однако в этой модели необходимо сделать предположение о доле щелочей, которые первоначально растворяются в растворе. Хотя значение 75% является типичным значением по умолчанию, которое можно использовать, предполагаемые значения 50, 70 и 90% показаны на рисунке 4b вместе с экспериментальными результатами. Первоначально значение 50% щелочей, растворяющихся в растворе, кажется подходящим; однако между степенью гидратации от 10 до 20% это значение внезапно увеличилось до 70%. Интересно, что это увеличение, по-видимому, относится к плечу кривой тепловыделения, которая наблюдалась для этой системы, и которая в целом относится к возобновленной реакции фазы алюмината кальция в цементе. В настоящее время существует несколько методов для быстрой оценки удельного сопротивления порового раствора, включая извлечение порового раствора, оценку с использованием такого подхода, как метод на веб-сайте NIST, и встроенных датчиков.

7.5 Влияние температуры

Температура также может влиять на измеренный электрический отклик. Например, удельное сопротивление, измеренное с использованием одного и того же зрелого образца, может отличаться на целых 80%, когда температура образца колеблется между 10°C и 45°C. Это в первую очередь является результатом повышенной ионной подвижности раствора пор материала и может быть описано с использованием подхода Аррениуса. Энергия активации проводимости (E_{Acond}) может быть определена с использованием наклона графика натурального логарифма удельное сопротивление и обратная температура, как показано на рисунке 25. При этом значение энергии, при которой начинается проводимость, является градиентом прямой и обратного

значения универсальной газовой постоянной $-8,314 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ [170, р. 1103]. На рисунке 25 показаны результаты для цилиндрических образцов на долгих периодах выдержки (с закрашенными обозначениями) и извлечены раствор пор (незакрашенные символы). Герметизированные образцы демонстрировали энергию активации проводимости $23,4\pm 0,13 \text{ кДж/моль}$, образцы, хранившиеся с отношением объемного растворения 2,0, имели среднее значение $21,5\pm 0,08 \text{ кДж/моль}$, а образцы, хранившиеся с отношением раствор-образец 11,4, демонстрировали значение $19,9\pm 0,42 \text{ кДж/моль}$. Ранее сообщенные значения для энергии активации проводимости в образцах раствора включали $18,7\pm 2,5 \text{ кДж/моль}$, значения, превышающие 20, и находились в диапазоне от 16 до 30 кДж/моль. Энергия активации проводимости была также измерена на поровом растворе, извлеченном из образцов в возрасте 12 и 24 ч, что привело к значениям $8,7\pm 0,18 \text{ кДж/моль}$ и $7,7\pm 0,12 \text{ кДж/моль}$ соответственно. Ранее сообщенные результаты для синтетических и экстрагированных растворов варьировались от 8,98 до 13,8 кДж/моль. Как отмечает Раджабипур, эта разница между измеренными энергиями активации проводимости, полученными для извлеченного раствора пор и одноосных цилиндров, по-видимому, свидетельствует о том, что микроструктура материала также может влиять на эти измерения. Это различие может быть частично вызвано ограничением, обусловленным пространством пор, сужением пор, эффектами поверхностного поглощения или изменениями объема поровой жидкости во время нагревания и охлаждения. Необходима дополнительная работа, чтобы полностью понять причины этих изменений.

7.6 Влияние хранения и кондиционирования образца

Проводимость электрического тока происходит главным образом через поровую жидкость в цементной системе (рисунок 26).

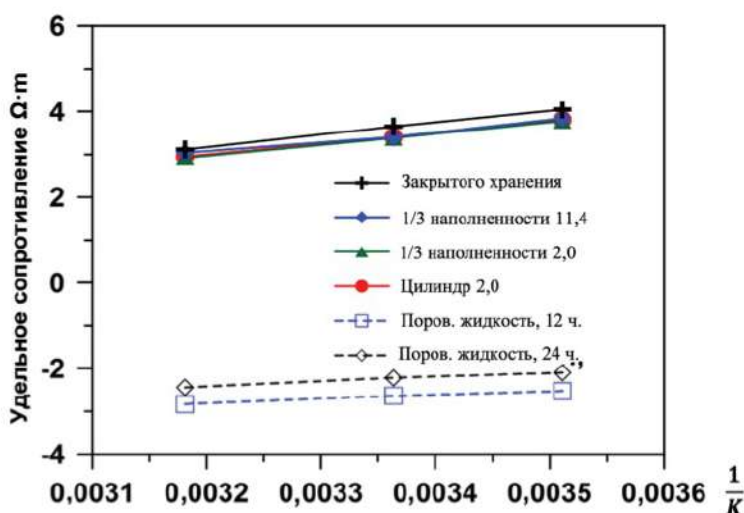
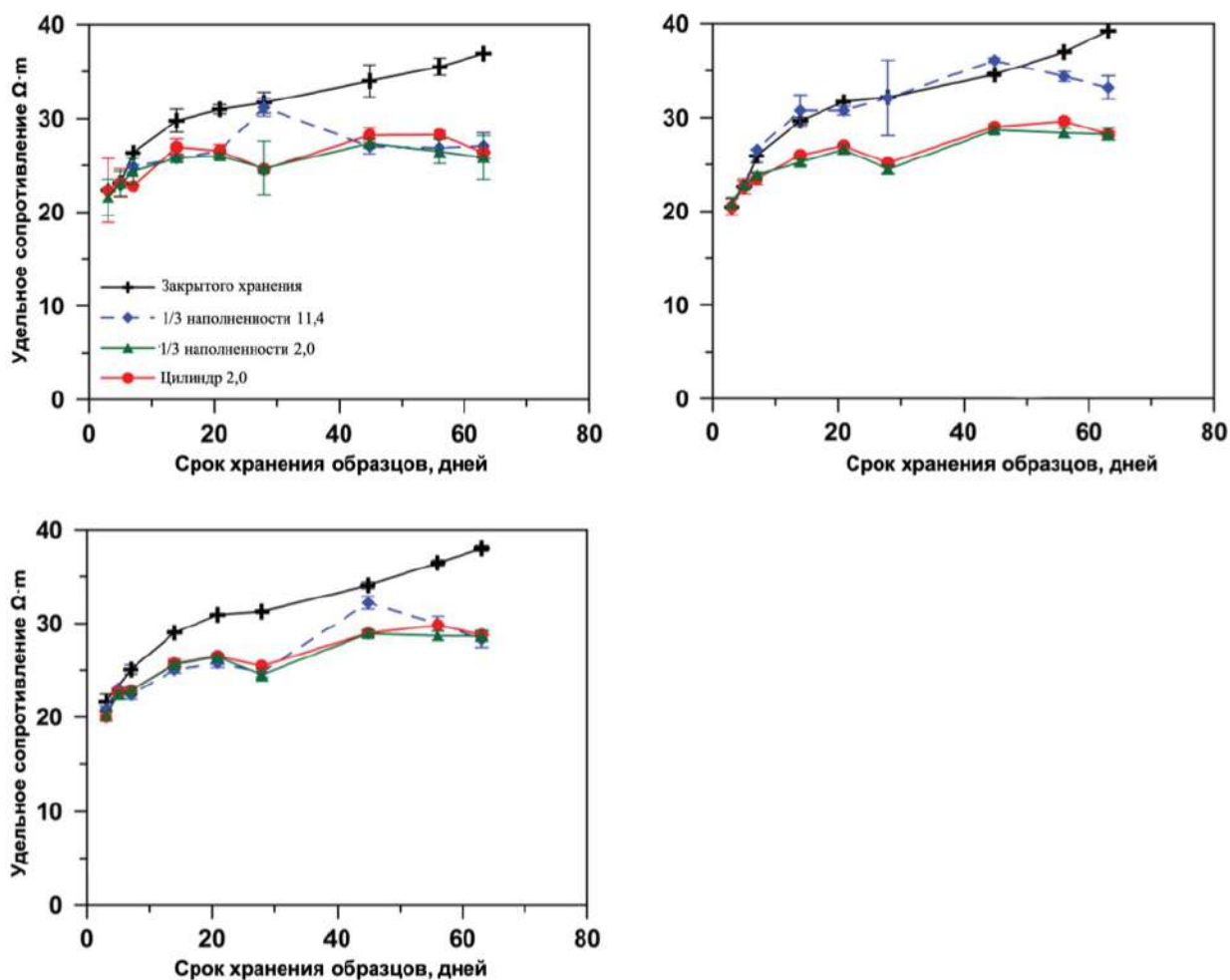


Рисунок 26 – Энергия активации проводимости, измеренной на одноосных образцах (закрытые точки) и извлеченном поровом растворе (полые точки) с помощью электроимпедансной спектроскопии (линейные совпадения показывают среднее значение $R^2 0,996$)

Хотя состав жидкости пор изменяется во время гидратации, он также может меняться, если ионы выщелачиваются из образца в окружающий раствор. Была проведена серия испытаний, в которых соотношение объемов насыщенного известью раствора к образцу (Sol/Sam) варьировалось (2,0 и 11,4). Sol/Sam 2,0 можно получить при использовании стандартного образца для испытаний размером 100×200 мм, используя один образец в стандартной форме размером 150×300 мм или три образца в ведре на 5 галлонов. Sol/Sam 11,4 можно получить, используя один образец в 5-галлонном ведре. Образцы хранили в насыщенном известью растворе, как описано выше, и контролировали на удельное электрическое сопротивление. Номинальное удельное сопротивление насыщенного известью раствора составляло 12,6 Ом м. Измеренное удельное сопротивление раствора в системе, в которой Sol/Sam составлял 11,4, увеличилось до значения 16 Ом м приблизительно через 2 недели; затем оно начало уменьшаться, достигая 13,8 Ом-м через 2 месяца. Измеренное удельное сопротивление раствора в системе, в которой Sol/Sam составляло 2,0, уменьшилось до значения 2 Ом-м примерно через 1 неделю, а затем медленно уменьшилось до 1,3 Ом-м через 2 месяца. Исходные данные предполагают, что это уменьшение было результатом эффектов выщелачивания и разбавления ионов, но в будущих исследованиях это изменение будет изучено более детально. Помимо контроля удельного сопротивления раствора, удельное сопротивление измерялось на образце с поверхностной и одноосной геометрией при частоте 40 Гц, и одноосное сопротивление измерялось в диапазоне частот. На рисунке 6 показано удельное сопротивление для образцов, измеренных с использованием различных условий хранения. Удельное сопротивление запечатанного образца было выше, чем образцы, хранящиеся в растворе с Sol/Sam 2,0. Эта разница может быть объяснена тем фактом, что образцы в растворе имеют более высокую степень насыщения. Измерения на образцах, хранимых с Sol/Sam 11,4, в которых удельное сопротивление измерялось на низкой частоте, более напоминают измерения, проводимые на герметичные образцы, чем на образцах, отвержденных известковой водой (рисунок 26б). Испытания с переменной частотой (рисунок 26в) дали аналогичные результаты для образцов, хранящихся в обеих системах Sol/Sam с разницей менее 1%. В возрасте до 7 дней измерения поверхностного удельного сопротивления имели большую изменчивость, чем одноосные измерения, как показано стандартом отклонения, которые в 2,7 раза выше для измерений поверхности восьми образцов (рисунок 26а и 26б). В более поздние времена эффект объема хранилища, похоже, уменьшается. Эта пониженная изменчивость, вероятно, может быть связана с эффектами выщелачивания поверхностных щелочей в обоих объемах раствора. Полученные к настоящему времени результаты свидетельствуют о том, что в более позднем возрасте влияние объема накопительного раствора на измерения поверхности и одноосные измерения на переменных частотах (рисунок 27а и 27б) как правило, в пределах изменчивости измерения, но одноосные измерения на фиксированных частотах

показывают различия от 10 до 30% между решениями для хранения (рисунок 276).



а – поверхностное подключение; б – одноосное подключение на частоте 40 кГц; в – одноосное подключение на разных частотах

Рисунок 27 – Измерения удельного сопротивления при разных значениях S_{ol}/S_{am} (погрешности представлены как стандартное отклонение минимум трех образцов)

7.7 Влияние частоты измерения на значение полного сопротивления

Насыщенные цементные системы ведут себя как цепи резистор-конденсатор, что приводит к разности фаз между приложенным током и измеренным напряжением (импедансом), и существует большое расхождение в полученных результатах измерений полного электрического сопротивления, исследуемых в диапазоне высоких частот. В случае если значение фазового угла принимается как нулевое, то полученное действительное значение полного электрического сопротивления будет равным истинному значению, с учетом составляющих ошибок, однонаправленную сопротивлению.

Учитывая, что в практическом приложении, значение фазового угла практически не равно нулю, средства измерений показывают значение общего импеданса Z_0 : включая действительные и мнимые компоненты. Для сравнения откликов разных счетчиков была использована электрическая цепь. Результаты показаны на рисунке 27а; Proseq был настроен на однонаправленное измерение сопротивления. Измеритель Solatron обеспечивал отклик в широком диапазоне частот; значения показаны с использованием круглых символов (показан каждый десятый символ). Измерители Miller и Proseq были протестированы на одной частоте и обозначены треугольными и ромбовидными символами соответственно. Фазовый угол, показанный полыми точками и пунктирными линиями, используется для выделения частотной зависимости. Хотя измеренный отклик измерителей, показанный на рисунке 27а, достаточно хорошо сравнивается друг с другом, данные демонстрируют, почему результаты измерения сопротивления, получаемые от каждого устройства, не будут одинаковыми, так как они измеряются на разных частотах. Также существовала частотная зависимость электрического отклика в образцах одноосных растворов, как показано для образца, хранящегося в Sol/Sam 2,0 в возрасте 45 дней (рисунок 27б). Хотя не было существенной разницы между измерениями одночастотных измерителей и спектрами импеданса, различие наблюдается в удельном сопротивлении, которое будет сообщаться среди этих разных измерителей. Эта разница может быть объяснена влиянием частоты. Хотя два фиксированных измерителя работают в диапазоне частот от 80 до 100 Гц, измерения, используемые Solatron, имеют самый низкий мнимый импеданс при 794 Гц, который будет измерением, при котором будет сообщаться одноосное сопротивление. Обратите внимание, что устройства Proseq и Miller сообщают значения примерно на 5% ниже истинного одноосного значения, определенного с помощью Solatron. Переменная частота также использовалась для интерпретации измерений одноосного удельного сопротивления для образцов, хранящихся с использованием разных объемов образца к раствору. Частотные характеристики менялись по мере старения образцов, как показано на рисунке 8 для 5- и 65-дневных образцов. Образцы с большим Sol/Sam проявляли большую вариабельность между образцами, которая была еще более выраженной в более позднем возрасте. Эта повышенная изменчивость может быть объяснена импедансной характеристикой в диапазоне частот. Изменчивость особенно очевидна в измерениях фазового угла, в которых больший объем хранения имеет два локальных минимума (в отличие от других условий образца), которые были в значительной степени выражены в более позднем возрасте, но их можно увидеть уже через 5 дней.

Выводы по разделу

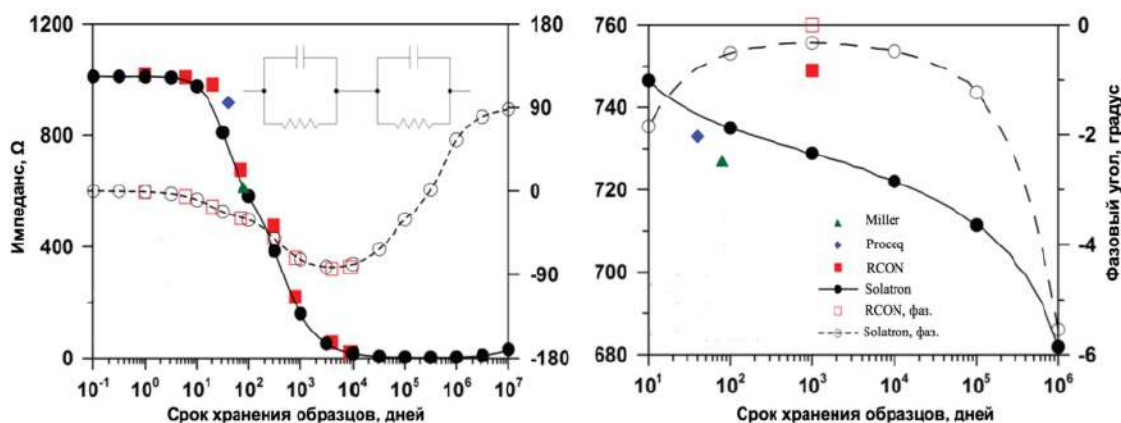
Результаты исследования влияющих факторов показанные в данном разделе, демонстрируют то, что необходимо учитывать определенные факторы

при стандартизированных испытаниях на удельное электрическое сопротивление материалов на основе цемента.

Во-первых, могут использоваться разные геометрические параметры образцов, при этом измеренное сопротивление следует преобразовать в удельное сопротивление с использованием соответствующего геометрического поправочного коэффициента.

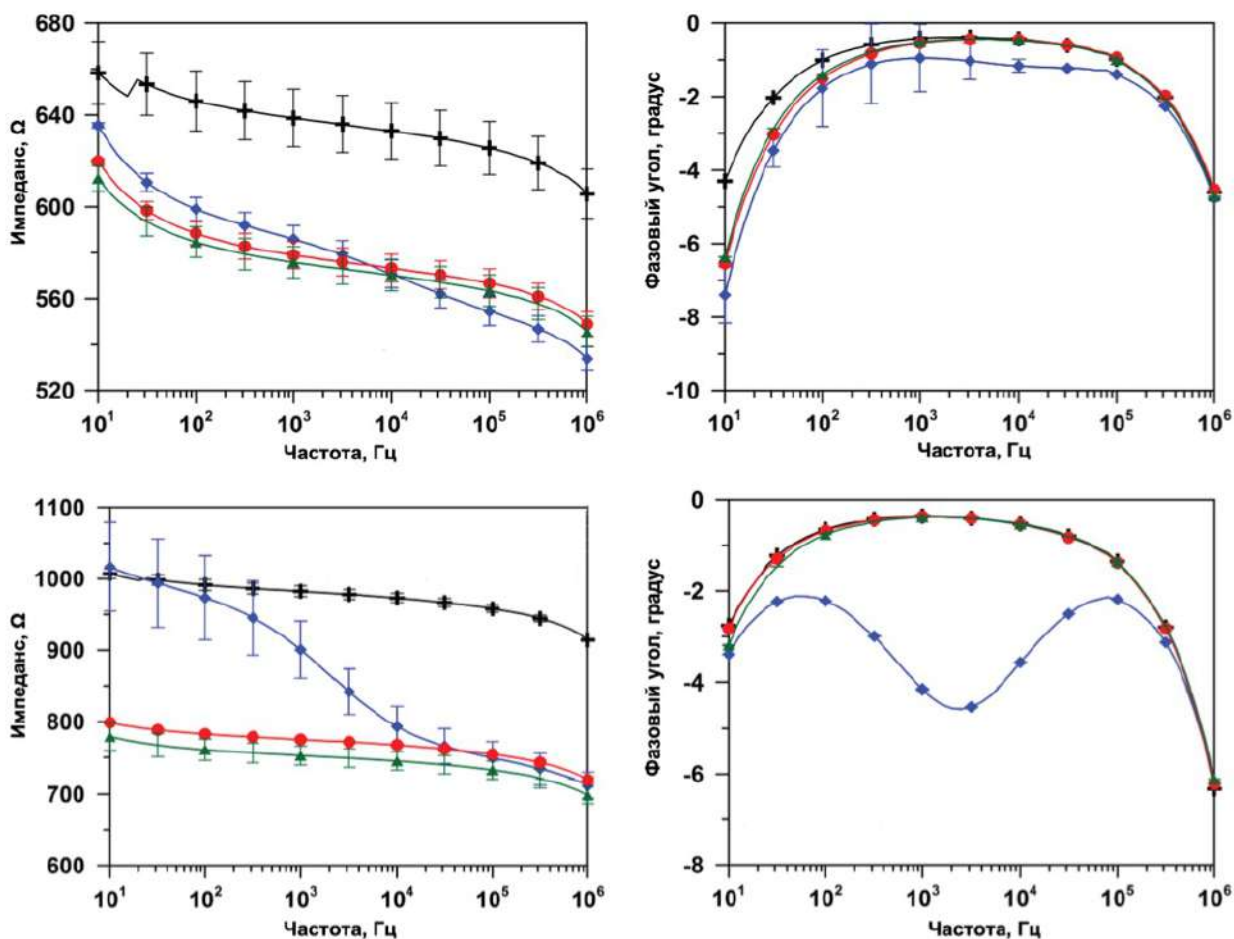
Во-вторых, поскольку температура образца во время испытания оказывает влияние на измерения удельного сопротивления, в стандартных методах испытаний должен быть указан относительно узкий температурный диапазон отклонений температурного режима (например, $\pm 2^\circ\text{C}$) испытаний образцов. Температурная зависимость может быть частично объяснена повышенной подвижностью ионных частиц порового раствора. Было показано, что измерения удельного сопротивления порового раствора и удельного сопротивления образца соответствуют соотношению Аррениуса с различными энергиями активации проводимости.

В-третьих, условия хранения и выдержки образцов также в немалой степени оказывают влияние на уровни насыщения образцов и их гидратации, а также на размеры и количество образованных пор и состава поровой жидкости образцов. Имеются большие отличия в результатах измерений электрического сопротивления в зависимости от условий и способов хранения образцов при наборе прочности (герметичное и сатурированное). Было отмечено, что при хранении отвержденных образцов в разных растворах разных объемов были получены противоречивые результаты. Это несоответствие, по-видимому, связано с разбавлением порового раствора, которое, в свою очередь, изменяет измеренные частотные спектры (рисунки 28, 29).



а – эквивалентная схема; б – одноосное измерение цилиндрического образца в возрасте 45 дней

Рисунок 28 – Влияние частоты на полное сопротивление



а и б – образцы выдержкой 5 дней; в и г – образцы выдержкой 65 дней

Рисунок 29 – Частотный и фазовый угловые отклики образцов (погрешности представлены как стандартное отклонение трех образцов)

Проведение испытаний на разных частотах переменного тока может уменьшить, эффекты, связанные с сатурацией образцов, но для тестирования на фиксированной частоте объем раствора, окружающего образец, должен строго контролироваться. Было установлено рекомендованное значение объема раствора к геометрическому объему образца как 2:1. При этом есть практическая значимость для проведения дальнейших исследований по изучению влияния степени насыщенности воды для сатурации образцов на градиенты потенциалов напряжений, которые образуются в материале, которые могут привести к неоднородности образца.

8 ЧИСЛЕННОЕ (КОМПЬЮТЕРНОЕ) МОДЕЛИРОВАНИЕ

8.1 Разработка микроструктуры

Практика применения методов неразрушающего контроля получает большое развитие, тем не менее, современные критерии к подобным системам усложняются и требуют уже наличие постоянного мониторинга состояния конструкции. Такие продвинутое методы структурного анализа, как ультразвуковое и рентгенографическое исследования позволяют оценивать механизмы образования и увеличения микронапряжений и микроповреждений, но при этом являются непрактичными и очень дорогими для их применения для больших конструкций. В этой связи, возникает потребность в других методах обнаружения дефектов в режиме реального времени. Для промышленных и гражданских конструкций возможно применение исследуемых в данной работе интеллектуальных композитов для измерения деформации в строительных элементах.

Промышленное производство таких интеллектуальных материалов требует разработки надежного численного метода, который может предсказать электромеханическую обратную связь с учетом различных масштабов конструкции. В этом разделе представлены расчет для моделирования электромеханического отклика класса интеллектуальных гетерогенных материалов на возникающие микронапряжения на основе микроструктуры с использованием метода конечных элементов. В частности, числовая структура применяется для прогнозирования эффективности определения деформации в «умных» цементных композитах для строительства инфраструктурных объектов.

Описанная в данном разделе структура численного моделирования разработана впервые и включает вычисления диапазона приложенной деформации, который охватывает определяющее поведение материала: как упругое, так и послепиковое, тем самым позволяя, как определять деформации, так и повреждения в цементной матрице путем электрических измерений.

Схема моделирования включает:

- 1) создание репрезентативной микроструктуры гетерогенного композита с использованием стохастического алгоритма упаковки составных элементов;
- 2) применение периодических граничных условий в репрезентативной элементарной ячейке для моделирования сценария механических испытаний с контролируемой деформацией;
- 3) включение повреждения интерфейса для имитации межфазного отслоения на границе раздела матрицы включения;
- 4) включение изотропной теории деформации для повреждения в матрице в послепиковом режиме;
- 5) определение эффективного определяющего поведения гетерогенного материала;
- 6) повторное создание сетки деформированной/поврежденной геометрии, соответствующей любой конкретной приложенной деформации;

7) определение электрической реакции поврежденной/деформированной микроструктуры.

Для получения результатов изменения электрических реакций для всех приложенных деформаций, шаги 6 и 7 выполняются для деформаций как в упругом, так и в постпиковом режиме. Универсальность этого подхода проверена на интеллектуальном цементном материале с нанотехнологическим интерфейсом матрица-включение [88, р. 309].

8.2 Числовое моделирование для определения микронапряжений

Численное моделирование для оценки электромеханической реакции самодетектирующих материалов проведено с использованием так называемого метода конечных элементов (МКЭ). Влияние повреждений и способность материала обнаруживать повреждения эффективно интегрированы в структуру модели. На рисунке 30 представлена блок-схема численного моделирования.

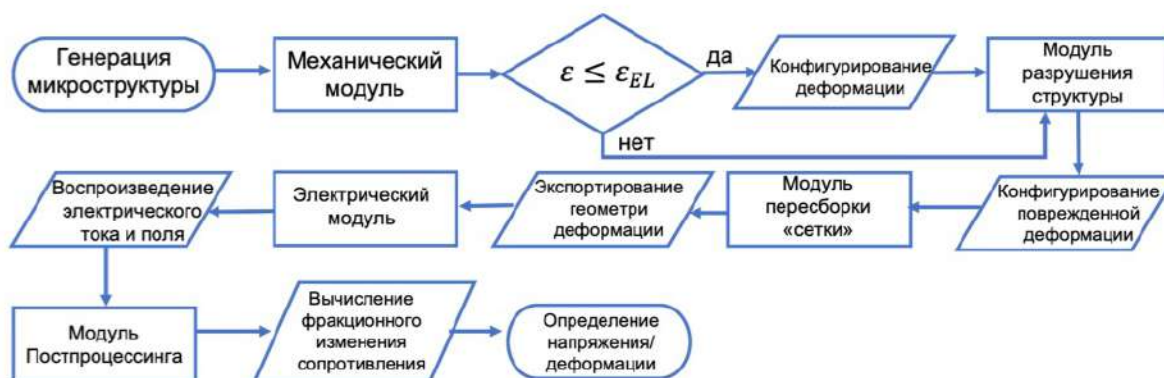


Рисунок 30 – Блок-схема программного обеспечения

Структура включает в себя создание репрезентативной элементарной ячейки и оценку электромеханических реакций, реализующих механические и электрические модули. Структура анализа реализована здесь с использованием скрипта Python для решателя ABAQUS™. Механический модуль моделирует механическую реакцию элементарной ячейки на одноосную деформацию, приложенную извне, и учитывает повреждение интерфейса на границе включения матрицы. Кроме того, механический модуль реализует определяющее поведение гетерогенных композитов за пределами напряжения растрескивания (постпиковый отклик) путем реализации модели изотропного повреждения в матрице с помощью, определяемой пользователем подпрограммы в ABAQUS™. Промежуточный модуль повторного создания сетки импортирует деформированную конфигурацию элементарной ячейки, полученную из механического модуля, и улучшает качество сетки перед экспортом повторно созданной элементарной ячейки в электрический модуль в качестве исходной геометрии для электрического анализа, чтобы достичь электро-механическую обратную связь элементарной ячейки на приложенную деформацию. Электрический модуль получает деформированную конфигурацию элементарной ячейки от модуля повторного создания сетки и

осуществляет распределение тока в деформированной элементарной ячейке под действием наложенного электрического потенциала. Постобработка соответствующих электрических обратных связей в программном обеспечении MATLAB дает однородное изменение удельного электрического сопротивления при различных приложенных деформациях.

8.3 Описание формул для репрезентативных ячеек

Генерация ячеек происходит по алгоритму Лобачевского- Стиллинджера, в котором используется модель жесткого контакта, поэтому наложение частиц не допускается. Во-первых, искомые включения распределяются случайным образом внутри периодического ограничивающего прямоугольника со случайными начальными скоростями частиц. Радиус каждой частицы сначала инициализируется равным нулю. Радиус i -й частицы (r_i) в следующем событии является функцией от скорости роста (g_i), которая адаптирована на достижение требуемого распределения частиц по размерам, показанного в уравнении:

$$\frac{dr_i}{dt} = g_i.$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ - номер частицы. Скорость приращения между временем t^n и t^{n+1} вычисляется с применением метода конечных разностей:

$$g_i = \frac{r_i^{n+1} - r_i^n}{\Delta t}$$

где r_i^{n+1} и r_i^n - радиусы во моменты времени t^{n+1} и t^n , соответственно, и $\Delta t = t^{n+1} - t^n$. Затем значения радиусов обновляются для времени t^{n+1} с использованием скорости роста и приращением по времени Δt : $r_i^{n+1} = r_i^n + g_i \Delta t$.

Кроме того, в момент времени t^{n+1} частица i имеет позицию x_i^{n+1} , которая определяется с учетом постоянной скорости v_i^n между промежутками времени, как: $x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^n \Delta t$. Вектор, соединяющий центры частиц i и j , вычисляется путем вычитания векторов положения двух частиц, как:

$$I_{ij}^{n+1} = x_j^{n+1} - x_i^{n+1}$$

Если сумма радиусов частиц i и j равна длине связующего вектора, то считается, что эти частицы соприкасаются. Величина шага по времени может быть рассчитана следующим образом: $\Delta t = \min \left[\frac{-v \pm \sqrt{v^2 - uw}}{u} \right]$, где: $\Delta t > 0$ и v, u и w выражаются как:

$$v = I_{ij}^n \cdot [v_j^n - v_i^n] - [r_j^n - r_i^n][g_j - g_i]$$

$$u = [v_j^n - v_i^n]^2 - [g_j - g_i]^2$$

$$w = I_{ij}^n - [r_j^n - r_i^n]^2$$

где v_i^n и v_j^n – скорости частиц i и j в момент времени t^n ;

r_i^n и r_j^n – радиусы частиц i и j в момент времени t^n ;

g_i и g_j – скорости роста частиц i и j соответственно. Вектор, соединяющий положение двух частиц в момент времени t^n , определяется как $I_{ij}^n = x_j^n - x_i^n$. Вычисление временного шага выполняется для каждой пары частиц, которые могут столкнуться, и, таким образом, принимается минимальный временной шаг для всех возможных столкновений, чтобы перейти к следующему событию. Все положения частиц x_i^{n+1} обновляются с использованием прямой схемы Эйлера и начинается новый поиск следующего(их) столкновения(ий). Постконтактные скорости рассчитываются следующим образом:

$$v_{n_i}^{n+1+} = \min \{v_{n_i}^{n+1-}, v_{n_j}^{n+1+}\} - g_i; \quad v_{n_j}^{n+1+} = \max \{v_{n_i}^{n+1-}, v_{n_j}^{n+1+}\} + g_i$$

где $v_{n_i}^{n+1+}$ – скорость после столкновения;

$v_{n_i}^{n+1-}$ – скорость до столкновения.

Все вышеперечисленные шаги повторяются, и в процессе итераций при выполнении программного кода частицы меняют положение в ограничительной рамке, сталкиваются и растут, для достижения требуемой объемной доли. Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет достигнута целевая объемная доля частиц всех компонент. Алгоритм завершается, как только объем включений достигает целевой объемной доли, что означает отсутствие дальнейшего обновления относительных положений или скоростей частиц. Для матрицы создается однородное твердое сечение, а сплошная срезанная матрица получается за счет разности геометрических площадей твердой матрицы и включений. Теперь сплошная вырезанная матрица и включения геометрически сшиты на границах, чтобы получить геометрию встроеной матрицы включений. Наконец, полученная микроструктурная информация реализуется с помощью скрипта на языке Python, что позволяет импортировать ее в коммерческое программное обеспечение для конечных элементов.

После создания элементарной ячейки она импортируется в механический модуль. Работа механического модуля схематично представлена на рисунке 31. Сначала создается сетка элементарной ячейки с использованием скрипта Python и применяются периодические граничные условия (ПГУ), применимые для анализа случайных гетерогенных материалов и эффективные в вычислительном отношении даже при меньшем размере элементарных ячеек, что обеспечивает более быструю сходимость. ПГУ обеспечивает непрерывность перемещений и тяги через границы соседних элементарных ячеек.

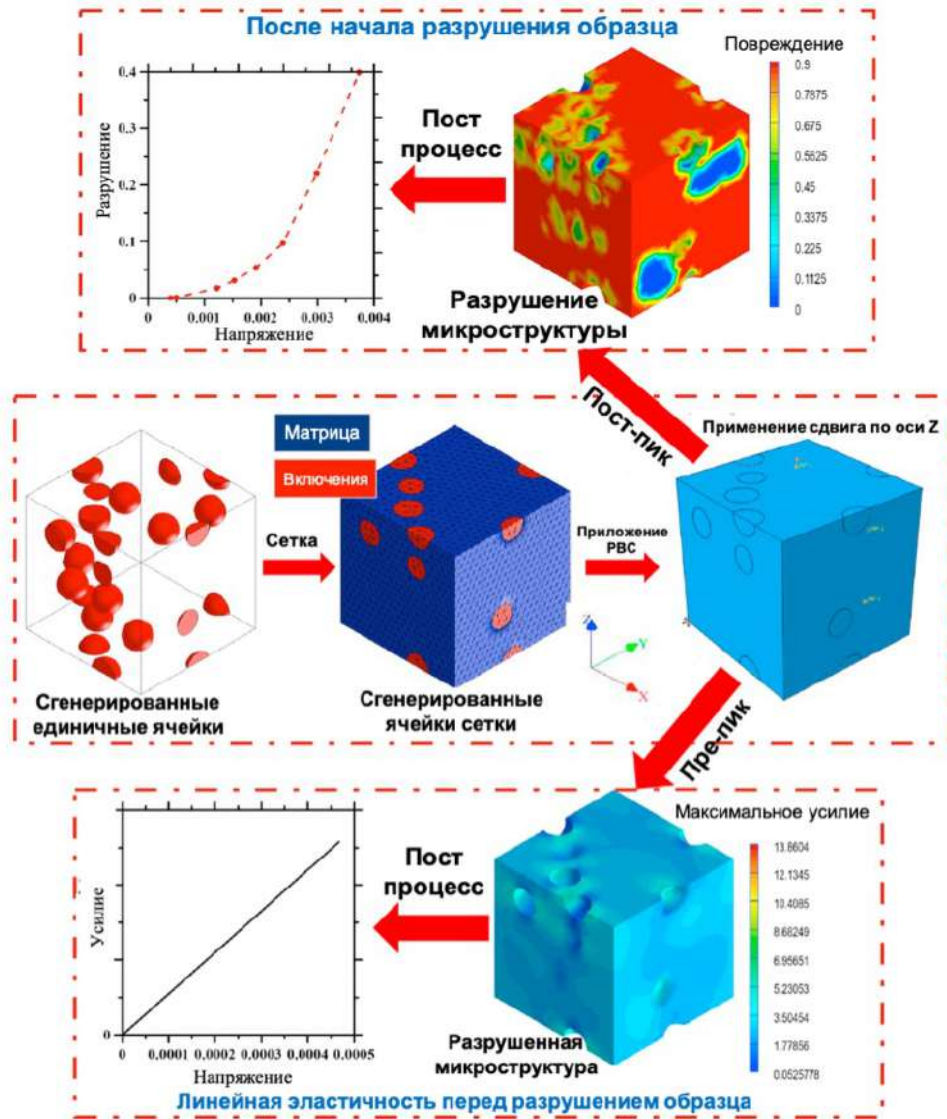


Рисунок 31 – Визуальные данные работы модуля

В двумерной периодической микроструктуре поле смещения задается следующим образом:

$$v_i(x_1, x_2) = \varepsilon_{ij}^0 x_j + v_i^*(x_1, x_2)$$

где ε_{ij}^0 – тензор приложенной деформации;

v_i^* – периодическая функция, представляющая модификацию поля линейных перемещений из-за неоднородной микроструктуры. Пары параллельных противоположных граничных ребер перемещения задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} v_i^{S+} &= \varepsilon_{ij}^0 x_j^{S+} + v_i^* \\ v_i^{S-} &= \varepsilon_{ij}^0 x_j^{S-} + v_i^* \end{aligned}$$

где s^+ и s^- – s-я пара двух противоположных параллельных граничных поверхностей элементарной ячейки. Периодическая функция v^* одинакова на обоих параллельных противоположных ребрах из-за периодичности. Вычитая 10b из 10a, разница перемещений на двух параллельных ребрах получается следующим образом: $v_i^{s^+} - v_i^{s^-} = \varepsilon_{ij}^0(x_j^{s^+} - x_j^{s^-}) = \varepsilon_{ij}^0 \Delta x_j^s$, при этом Δx_j^s постоянна для применяемого ε_{ij}^0 .

Деформация прикладывается к единице обращения с помощью системы уравнений через референтную точку. Общий вид уравнений системы можно записать следующим образом $v_i^{s^+} - v_i^{s^-} + v_i^{dummy} = 0$.

Такие линейные уравнения реализуются для всех пар параллельных граней в элементарных трехмерных ячейках. Деформация применяется к элементарной ячейке через уравнения ограничений для моделирования сценария испытаний с контролируемой деформацией.

Механический модуль включает межфазное разделение на границе включения-матрицы. Межфазное разделение реализуется здесь с использованием модели непрерывного повреждения в сочетании с моделью когезионной зоны (CZM). Непрерывность перемещения обеспечивается за счет использования элементов сопряжения нулевой толщины. Такие интерфейсные элементы нулевой толщины были успешно реализованы для моделирования относительного скольжения или разделения на заданной поверхности. Теоретическая основа CZM включает феноменологическую модель разрушения, в которой предполагаемые фиктивные микротрещины в когезионной зоне могут проявлять интерактивные напряжения, что позволяет применять закон растяжения-разделения изложенный в [100, p. 195; 101, p. 997; 102, p. 2487; 103, p. 715; 104, p. 275]. Разделение в законе натяжение-разделение характеризуется здесь с использованием эквивалентного отверстия интерфейса (λ), которая состоит из положительного скачка нормального смещения $\langle\langle u_n \rangle\rangle$ и скачка тангенциального смещения через элементы интерфейса нулевой толщины, как показано в уравнении. $\lambda = \sqrt{\langle\langle u_t \rangle\rangle^2 + \langle\langle u_t \rangle\rangle^2}$

Характеристическое значение эквивалентного открытия интерфейса, λ_0 обозначает предел, за которым натяжение на любом элементе интерфейса уменьшается с увеличением λ . Когда $\lambda < \lambda_0$, эквивалентное тяговое усилие с выражается с использованием так называемой штрафной жесткости (рассчитываемой методом штрафных функций) K_p следующим образом: $\sigma_c = K_p \lambda$, когда $\lambda \geq \lambda_0$, применяется следующее отношение:

$$\sigma_c = f_t \exp \frac{-f_t(\lambda - \lambda_0)}{G_F},$$

где f_t – предел прочности при растяжении;
 G_F – полная энергия разрушения.

$$\lambda_0 = \frac{2G_F}{f_t} = \frac{f_t}{K_p}$$

где начальная энергия разрушения, $G_F = \frac{K_{IC}^2}{E}$, K_{IC} – это вязкость разрушения в режиме I, а E – модуль Юнга.

Эквивалентная тяга интегрируется по объему, чтобы получить потенциал ϕ , частные производные которого по нормальной и тангенциальной компонентам скачка смещения дают нормальную тягу t_{cn} и тангенциальную

тягу t_{ct} соответственно, как показано в уравнении $t_c = \begin{pmatrix} t_{cn} \\ t_{ct} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial [u_n]} \\ \frac{\partial \phi}{\partial [u_t]} \end{pmatrix}$

Матрица механического касательного материала C_c^u и может быть выражена как частные производные результирующей силы тяги по отношению

$$C_c^u = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{cn}}{\partial [u_n]} & \frac{\partial t_{cn}}{\partial [u_t]} \\ \frac{\partial t_{ct}}{\partial [u_n]} & \frac{\partial t_{ct}}{\partial [u_t]} \end{bmatrix}$$

к скачку смещения, как показано в уравнении

Следует отметить, что приведенные выше формулировки применяются для растяжения, когда раскрытие границы раздела в нормальном направлении положительно. В случае сжатия нормальное давление сжатия на границе раздела определяется следующим образом: $t_{cn} = K_p \llbracket u_n \rrbracket$.

Таким образом, механическая касательная матрица материала может быть выражена следующим образом:

$$C_c^u = \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & \frac{\partial t_{ct}}{\partial [u_t]} \end{bmatrix}$$

Матрица касательного материала C_c^u преобразуется в локальную систему координат для получения матрицы жесткости каждого связующего элемента. Если штрафная жесткость регулирует закон отрыва тяги с увеличением λ при $\lambda < \lambda_0$, то матрица механической жесткости модифицируется на каждой итерации с увеличением λ на основе феноменологической модели повреждения при $\lambda \geq \lambda_0$. Полученная матрица механической жесткости поврежденных элементов интерфейса используется в качестве исходной жесткости связных элементов на следующем шаге с приращением λ . Прогрессирующее отслоение характеризуется увеличением λ с использованием скалярного параметра повреждения поверхности раздела D_c , который определяется следующим образом:

$$D_c = \frac{\lambda}{\lambda_{cr}}$$

где λ_{cr} соответствует эквивалентному открытию границы раздела сред при очень низких значениях тяги в постпиковом режиме поведения тяги-

разделения, обычно вычисляемом на расстоянии $0,1f_t$ в постпиковом режиме. Численное моделирование расширенной модели повреждения CZM, как описано выше, реализовано с использованием определяемой пользователем подпрограммы в ABAQUS™ и требует в качестве входящих величин следующие значения: начальной энергии разрушения G_f , полной энергии разрушения G_F и прочности на растяжение матрицы f_t .

Для включения повреждений в матрицу в постпиковом режиме внутри механического модуля встроен модуль повреждений. Здесь в матрице реализована континуальная модель повреждения после того, как приложенная деформация превысит предел упругости (ϵ_{tL}). Предполагая изотропную деградацию жесткости, переменная повреждения D определяется следующим образом:

$$\sigma = (1-D)\mathbb{C} : \epsilon$$

где: σ, \mathbb{C} - тензор эффективных напряжений, обозначает тензор упругости четвертого порядка и ϵ является тензором деформации. Величина повреждения D варьируется от 0 (не повреждена) до 1 (полностью повреждена). Скорость повреждения, обозначаемая буквой D , принимает только нулевые или положительные значения, что можно объяснить ее пропорциональностью скорости выделения энергии повреждения [124, р. 675]. Общее повреждение D представляет собой взвешенную сумму его частей при растяжении и сжатии (D_t и D_c), которая учитывает разницу в поведении разнородных материалов при растяжении и сжатии, как показано в уравнении $D = \alpha_t D_t + \alpha_c D_c$

Для значения одноосного растяжения параметр α_t становится равным 1, а параметр α_c становится равным нулю, тогда как значения параметров α_t и α_c принимаются равными нулю и 1 соответственно для одноосного сжатия [124, р. 676]. Нелокальная эквивалентная деформация $\tilde{\epsilon}$ используется для получения повреждений при растяжении и сжатии, D_t и D_c соответственно, которые определяются следующим образом:

$$\tilde{\epsilon} = \sqrt{\sum_i \langle \epsilon_i \rangle_+^2}$$

где $\tilde{\epsilon}$ – положительная часть основной деформации. Повреждения D_t и D_c вычисляются как функция согласно уравнениям;

ϵ_i – порог инициации разрушения (отношение предела прочности при растяжении к модулю Юнга для квазихрупких материалов). Модель может быть адаптирована к экспериментально полученным характеристикам одноосного растяжения и сжатия различных матриц для получения соответствующих значений параметров u . Повреждение материального континуума реализовано здесь с помощью определяемой пользователем подпрограммы в ABAQUS™. Полученная таким образом механически деформированная/поврежденная геометрия экспортируется в модуль

повторного создания сетки для улучшения качества сетки, как описано в следующем разделе.

Деформированная или поврежденная геометрия элементарной ячейки, полученная из механического модуля, перестраивается с помощью этого промежуточного модуля. Этот модуль реализует повторное построение сетки с помощью подпрограммы MATLAB. Подпрограмма работает с деформированной геометрией и выполняет повторное построение сетки/уточнение сетки везде, где соотношение сторон элементов превышает 3. Таким образом, модуль повторного создания сетки улучшает качество сетки в деформированной/поврежденной элементарной ячейке. Затем деформированная или поврежденная элементарная ячейка с измененной сеткой экспортируется в электрический модуль для электрического анализа.

8.4 Модуль формирования электрических сигналов

Модуль формирования электрических сигналов импортирует деформированную и перестроенную элементарную ячейку и назначает электрические свойства фазам компонента. Чтобы охарактеризовать электрический отклик поврежденной элементарной ячейки, поврежденные элементы в матрице моделируются с электропроводностью, которая уменьшается пропорционально переменной механического повреждения D . Электропроводность поврежденных элементов может быть выражена через исходную проводимость следующим образом

Подобные отношения были успешно реализованы для термического анализа в сочетании с механическими повреждениями в других местах [43, р. 523; 50, р. 27]. В каждом состоянии прогрессирующего повреждения проводимость уменьшается пропорционально переменной повреждения D . Поскольку материал полностью повреждается, модель моделирования теоретически предполагает бесконечное сопротивление. Чтобы охарактеризовать электрическое поведение механического повреждения на границе раздела матриц включения, элементы интерфейса, где переменная повреждения интерфейса достигает 1, считаются идеальным резистором с бесконечно высоким электрическим сопротивлением. После задания свойств материала включаются граничные условия. Все остальные поверхности, кроме тех, которые перпендикулярны оси Y , изолированы, как показано на рисунке 32. Единичный потенциал приложен к микроструктуре в направлении Y , как показано на рисунке 32. Электрический модуль вычисляет плотность тока из входная электрическая проводимость компонентных фаз и приложенное электрическое поле с использованием закона Ома. Моделирование дает распределение электрического поля и плотности тока в элементарной ячейке, которое при объемном усреднении модулем постобработки дает среднюю электрическую проводимость согласно соотношению.

Для метода сравнительных измерений применяются средние значения электропроводности, которые выражаются через относительное изменение сопротивления (FCR), которое представляет собой отношение изменения

сопротивления (R) к объемному сопротивлению механически недеформированной микроструктуры (R_0), где R_0 – значение проводимости механически недеформированной микроструктуры. Чтобы охарактеризовать электрический отклик поврежденной микроструктуры, поврежденные элементы моделируются как изоляторы, как схематично показано на рисунке 32. Дополнительное удельное сопротивление, придаваемое, таким образом, общей микроструктуре, приводит к другому тренду FCR, отображаемому с деформацией, превышающей предел упругости. Электромеханическое моделирование, управляемое микроструктурой, может быть выполнено в различных масштабах длины, чтобы получить макромасштабный электромеханический отклик гетерогенных интеллектуальных материалов. Структура численного моделирования, представленная здесь, может быть использована для прогнозирования макроскопического электромеханического отклика нескольких случайных разнородных интеллектуальных материалов, облегчая проектирование материалов с учетом микроструктуры. В данном разделе схема численного прогнозирования применяется к цементосодержащему вяжущему материалу с наноинженерным интерфейсом матричных включений для оценки эффективности моделирующей структуры.

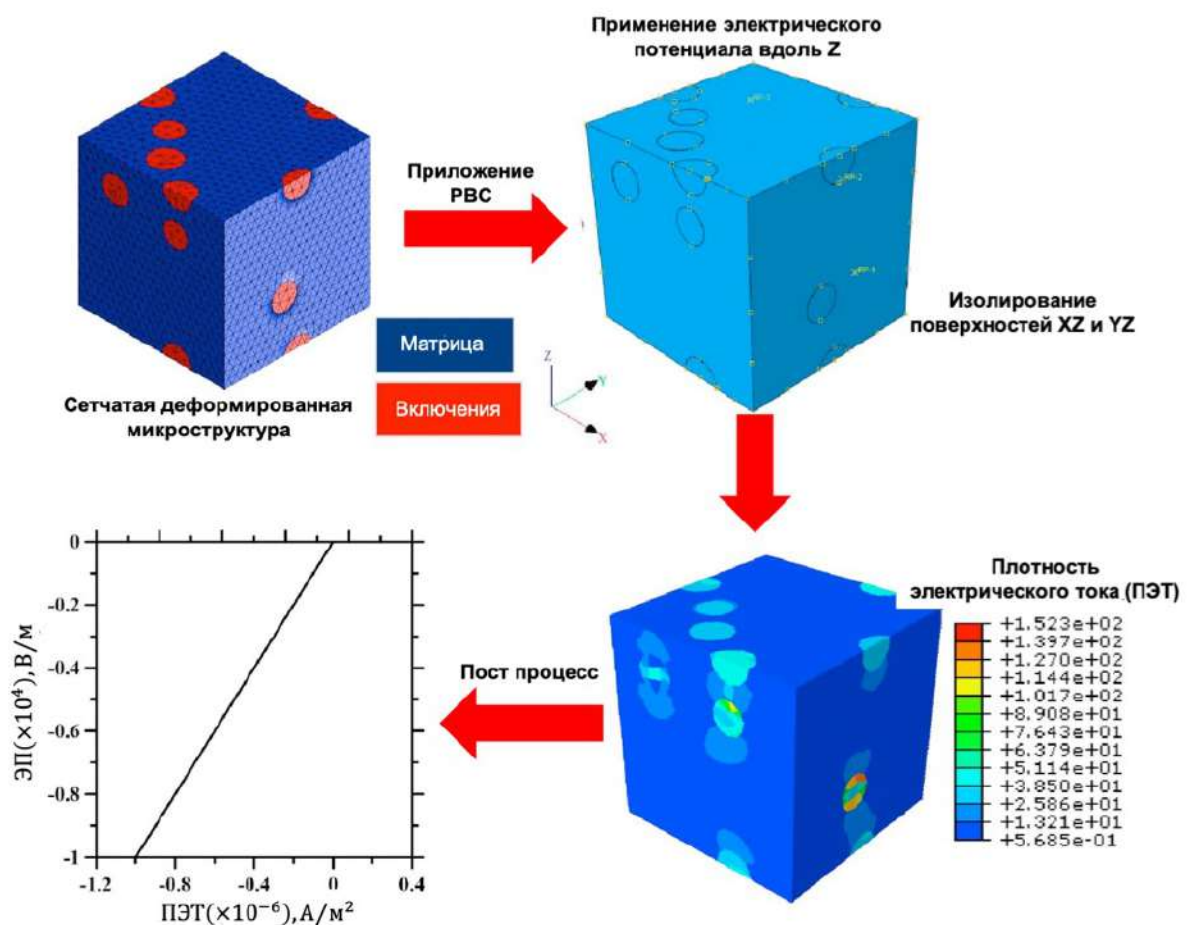


Рисунок 32 – Данные работы электрического модуля

Результаты работы системы численного моделирования для прогнозирования деформационного поведения интеллектуального цементного материала, содержащего нанотехнологическую границу раздела цемент-заполнитель при сжатии и сравниваются с экспериментальными результатами представленных в разделах 3 и 6. Состав растворов указан в разделе 3. Электропроводность матрицы снижается на 20% благодаря присутствию от 0 до 25% бокситового шлама по массе, тогда как значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона связующей матрицы считаются такими же. Межфазное отслоение осуществляется с использованием закона растяжения-разделения, определяемого параметрами начальной энергии разрушения (G_f), полной энергии разрушения (G_{fr}) и прочности матрицы на растяжение (f_t). Значения этих параметров, принятые в этом моделировании, считаются такими же, как матрица, о которой сообщалось ранее в разделе 3.1.1. Здесь в случае сжатия используется касательная матрица материала, показанная в уравнении (18), и скалярный параметр повреждения интерфейса D_c получается в матрице, а также в ITZ. Изотропное повреждение при сжатии учитывается с использованием параметров ϵ_{D_0} , A_c and B_c . Значения этих параметров, используемых в этом моделировании, составляют 0,0001, 1 и 10 000 соответственно [43, p. 501]. Деформированная/поврежденная элементарная ячейка перестраивается и импортируется в электрический модуль, который вычисляет электрические отклики для различных деформаций, как объяснялось ранее в этой статье. На рисунке 29 показаны значения модели напряжения, полученные в рамках моделирования, со значениями

На рисунке 33 представлены результаты моделирования с учетом только межфазного отслоения без учета повреждений в матрице. Смоделированные значения FCR хорошо соответствуют экспериментальным измерениям, когда приложенная деформация сжатия ниже примерно 0,16%, тогда как смоделированные значения расходятся с экспериментальными наблюдениями при более высоких деформациях сжатия. Это может быть связано с повреждением матрицы, которая не улавливается моделью. На рисунке 30 показаны смоделированные значения FCR, когда модель изотропного повреждения в матрице включена в дополнение к повреждению интерфейса. При внедрении непрерывного повреждения в матрицу FCR высокой деформации также близко совпадают с экспериментальными измерениями, как видно на рисунках 33 и 34. Включение изотропного повреждения позволяет значительно улучшить прогнозирование FCR в постпиковом режиме, тем самым подтверждая применимость текущей модели моделирования для прогнозирования возможностей определения деформации и повреждения интеллектуальных цементных материалов.

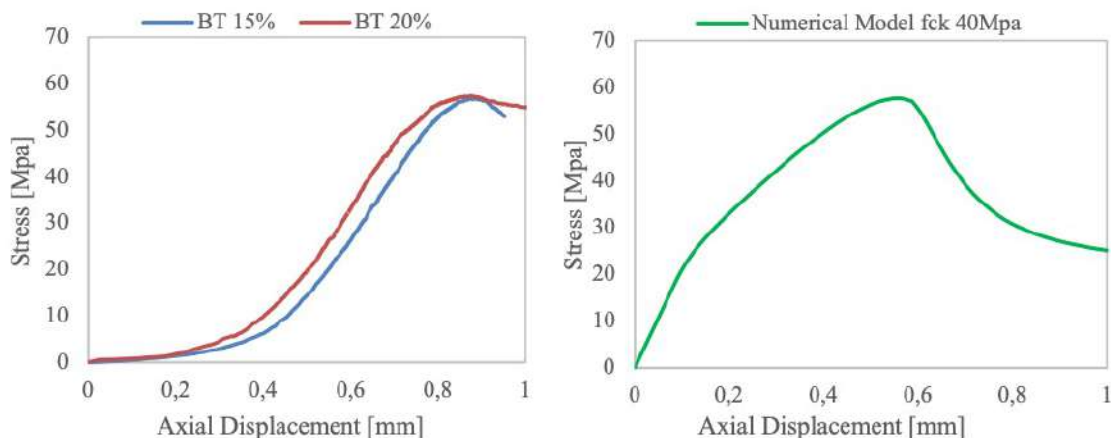


Рисунок 33 – Сравнение работы модуля и экспериментальных данных по механическим параметрам

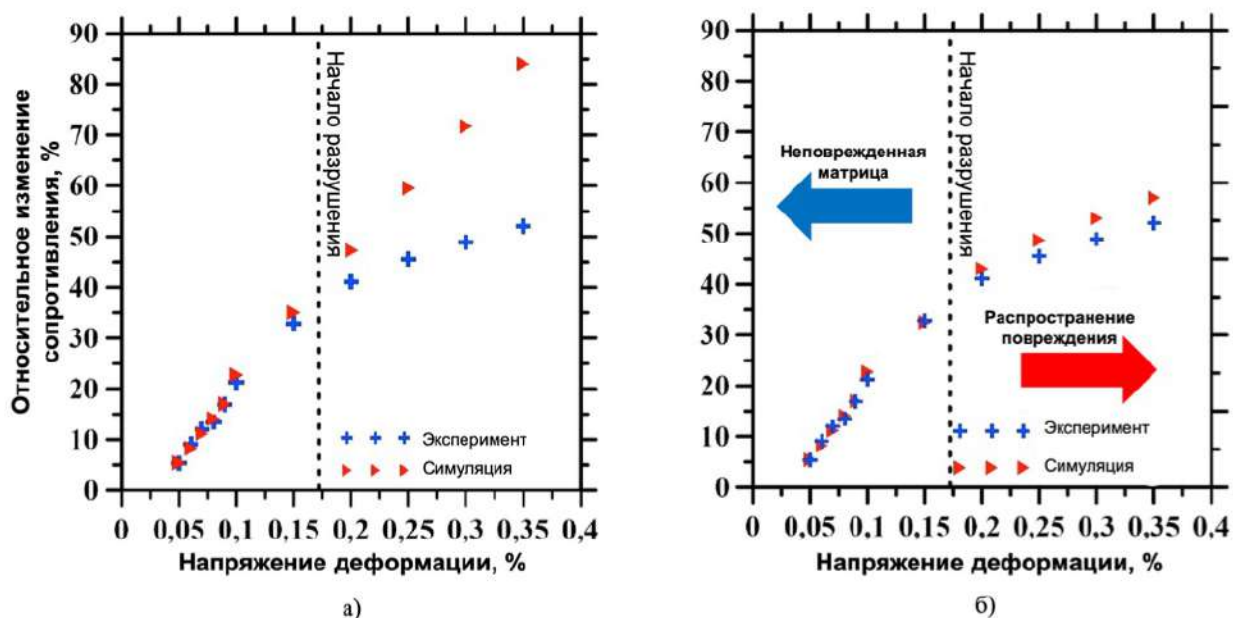


Рисунок 34 – Сравнение работы модуля и экспериментальных данных по электромеханическим параметрам

Выводы по разделу

В данной главе представлен численный подход к прогнозированию электромеханического отклика и способности считывания деформации интеллектуальных случайных гетерогенных материалов. Приложение сначала генерирует репрезентативную элементарную ячейку с использованием алгоритма Любачевского-Стиллинджера, и сгенерированная элементарная ячейка импортируется в механический модуль. Механический модуль используя периодические граничные условия, создает сетку элементарной ячейки, реализует межфазное повреждение на границе включения-матрицы и включает изотропное повреждение в матрице в постпиковом режиме для получения деформированной/поврежденной микроструктуры для любого

приложенного растяжения или сжатия. Деформированная/поврежденная микроструктура, полученная из механического модуля, импортируется в подпрограмму пересоздания сетки, которая создает сетку деформированной/поврежденной элементарной ячейки и улучшает качество сетки для лучшего решения. Элементарная ячейка с перестроенной сеткой импортируется в электрический модуль для получения электрических откликов на приложенную деформацию.

Применимость модели подтверждается ее успешной реализацией на примере цементного композита, содержащем электропроводящие проводящие частицы на границе раздела цемент-заполнитель. Сначала были созданы репрезентативные микроструктуры интеллектуального цементного материала, а электромеханические реакции были смоделированы с использованием комбинированного использования механического модуля, модуля повторного создания сетки и электрического модуля. В предпиковом режиме постепенное межфазное отслоение с увеличением деформации растяжения приводило к значительному постепенному увеличению FCR, что свидетельствует об эффективной способности материала воспринимать деформацию. При прогрессирующем межфазном отслоении напряжение в матрице продолжало увеличиваться, и повреждение в матрице начиналось в матрице, когда напряжение в матрице превышало предел прочности при растяжении. Начало повреждения в матрице отразилось в виде значительного скачка FCR, подтверждающего способность интеллектуального миномета обнаруживать повреждения. Параметрическое исследование с изменением толщины и проводимости покрытия показало, что ограничения достижения более высокой проводимости покрытия при увеличении загрузки могут быть компенсированы изменением толщины таких покрытий для получения более чувствительной системы в целом. Проверка подхода к моделированию, представленного в данной главе, показывает его возможность в реализации для различных интеллектуальных гетерогенных композитов и может оказать помощь в снижении трудозатрат, оптимизации исследовательских работ и исключении ошибок при начальном проектировании микроструктуры смарт-композитов.

9 ТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Одной из целью проведенной исследовательской работы является разработка нормативно-технической документации для контроля микронапряжения. В данной диссертационной работе предлагается контроль микронапряжений путем их измерения косвенным методом посредством специальных самодетектирующих интеллектуальных цементных композитов. Их применение, как было, описано в разделах с 2 и 3 не требует дополнительной установки специализирующих первичных детекторов и других неоднородных, по отношению к основному конструкционному материалу, включений. Тем не менее, отсутствуют единые требования по проведению измерений с помощью указанных цементных композитов.

В этой связи, разработка нормативно-технической документации в настоящем исследовании представлена в виде проекта национального стандарта методики выполнения измерений микронапряжений. Проект национального стандарта проходит рассмотрение и последующего утверждения в виде национального стандарта Республики Казахстан. При этом методика выполнения измерений содержит подробное описание применяемого оборудования, требования к уровню точности оборудования, описание проводимых операций работы по проведению измерений, указания к проведению расчетов и оценке неопределенности измерений. Подана заявка на получение международного патента.

Требуемые общие вложения, связанные с внедрением разработок, вычисляются по формуле (1):

$$OK_{НИР} = ПЗ + КЗ \quad (1)$$

где ПЗ – сумма всех производственных и предварительных вложений, тг.;

КЗ – сумма капитальных затрат, обусловленных материально-техническим, трудовыми и другими ресурсами, тг.

$$ПЗ = З_{\text{мат}} + З_{\text{фот}} + З_{\text{ос}} + З_{\text{экс}}$$

где $Z_{\text{мат}}$ – затраты на расходные материалы и сырье, тг.;

$Z_{\text{фот}}$ – фонд оплаты труда для научно-технических работников, включая социальные и пенсионные отчисления, тг. (таблица 24, 25);

$Z_{\text{ос}}$ – затраты, связанные с основными средствами, их приобретением, амортизацией и ремонтом, тг. (таблица 26);

$Z_{\text{экс}}$ – затраты, обусловленные эксплуатационными расходами на электроэнергию, водоснабжение и водоотведение и прочее, тг. (таблица 27).

Таблица 24 – Фонд оплаты труда

Должность	Заработная плата в месяц	ФОТ, год
Консультант (PhD)	350000	4 200 000
Инженер по внедрению (магистр)	280000	3 360 000
Инженер по внедрению (магистр)	280000	3 360 000

Таблица 25 – Расчет налогов и платежей в бюджет

Наименование затрат	Сумма
Оплата труда	10 920 000
Соцналог	568 932
Соцотчисления	343 980
Мед.страхование	327 600
Итого налоги и обязательные платежи в бюджет	1 240 512

Таблица 26 – Расчет амортизации оборудования

Наименование	Стоимость, тг.	Амортизация, %	Время работы, факт., год	Сумма, тг.
Шаровая мельница	1 800 000	14	0,1	25 200
Персональный компьютер	500 000	25	0,3	37 500
<i>Итого:</i>	<i>2 300 000</i>			<i>62 700</i>

Таблица 27 – Затраты на электроэнергию

Наименование	Мощность, кВт·час	Ежемесячное время работы, час	Стоимость, кВт·час	Сумма, тг.
Шаровая мельница	19	17,3	23,5	7739,3
Пресс испытательный	0,3	2,9	23,5	20,6
Персональный компьютер	0,5	52	23,5	611
Итого:				8370,9

Таблица 28 – Расход сырья и материалов на производство 1 м³ бетона

Материалы	Затраты сырья, кг/м ³	Стоимость, тг.
Цемент	460	7130
Песок строительный	680	2244
Щебень фракционный	1180	8260
Вода	180 (л/м ³)	41
Пластификатор	4,5	2250
<i>Итого:</i>		<i>19 925</i>
Датчик (1 ед.)	-	250 000
Блок управления (1 ед.)	-	310 000
Итого с комплектом мониторинга:	-	579 925

Установка датчиков мониторинга проводится на 20-50 погонных метров элемента конструкции. Исходя из типоразмеров существующих бетонных конструкций, принято, что 1 м³ достаточно для изготовления конструкций таких размеров, поэтому для усреднения расчетов принимается, что один датчик мониторинга устанавливается на кубический метр конструкции. При этом следует учитывать ежемесячные затраты на обслуживание и сопровождение датчиков и блока управления (таблица 29).

Таблица 29 – Расход сырья и материалов на производство 1 м³ бетона с смарт-функциями

Материалы	Затраты сырья, кг/м ³	Стоимость, тг.
Цемент	368	5704
Песок строительный	680	2244
Щебень фракционный	1180	8260
Вода	180 (л/м ³)	41
Пластификатор	4,5	2250
Красный шлам (10-20%)	92	920
Волокна из поливинилового спирта	13,8	18630
Суперпластификатор	4,5	2250
Итого:	-	40 299
Блок сбора и передачи информации	-	75 000
Итого с блоком сбора и передачи информации	-	115 299

В соответствии с таблицей 29, сравнение расходов материалов показывает, что изготовление обычного бетона и встраивание в него измерительных датчиков является более затратным, чем изготовление бетона со смарт-функциями. Что говорит о прямой эффективности разрабатываемых композитов. Отношение затрат показывает, эффективность в 5 раз (рисунок 30).

Таблица 30 – Сравнение расходов

Виды затрат	Обычный бетон (1 м ³), тыс. тг	Смарт-функции (1 м ³), тыс. тг.
Капитальные затраты	0,00	2300
ФОТ+ налоги и обязательные платежи в бюджет	500,00 (аутсорсинг)	1013,38 (собственный персонал)
Затраты на материал	579,93	115,30
Доп затраты на эл. энергию	-	8,37

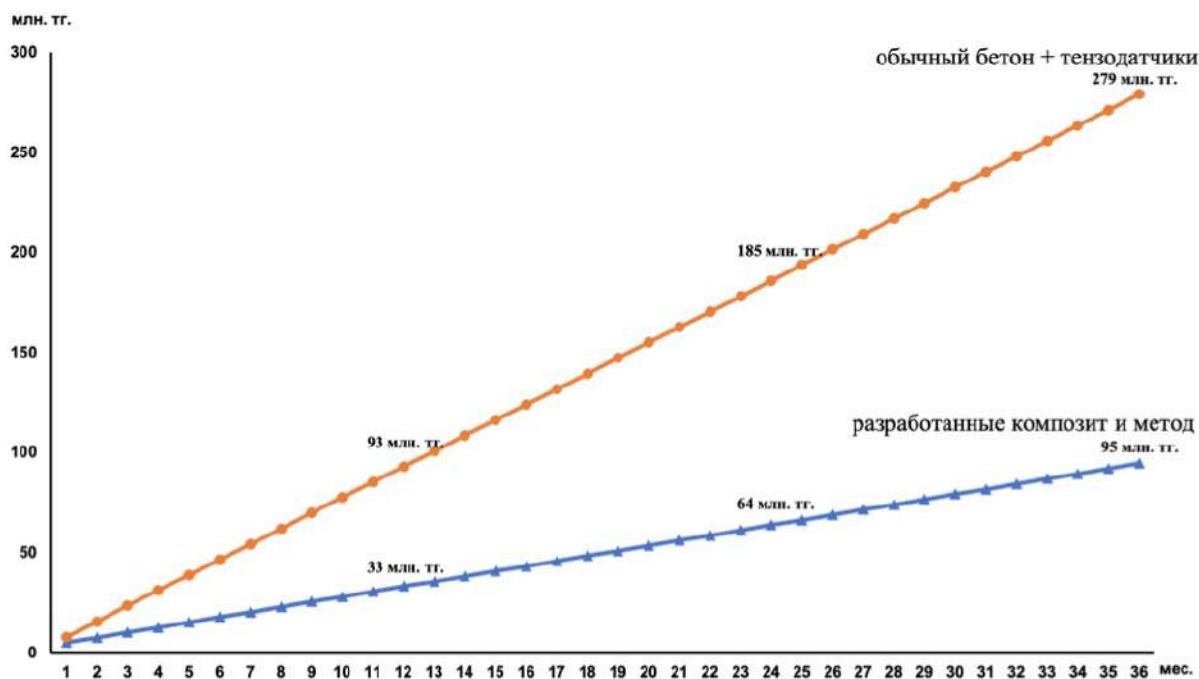


Рисунок 35 – Сравнение затраты на при контроле состояния конструкции на интервале трех лет

Выводы по разделу

Распространенный на практике метод мониторинга состояния конструкции предполагает крепление к элементу конструкции из обычного бетона специальных датчиков и блока управления.

При этом предлагаемый способ мониторинга микронапряжений предполагает установку на контролируемой конструкции только беспроводного блока сбора и передачи информации.

При этом предлагаемое решение требует капитальных вложений 2,3 млн. тг. на этапе запуска производства и дополнительных ежемесячных затрат 1,014 млн. тг. которые требуются на оплату труда и обязательных отчислений для трех научно-технических работников, занятых на контроле производства и дальнейшего мониторинга состояния конструкции.

При этом затраты на производство предлагаемого решения в 5 раз меньше по сравнению с производством обычного бетона.

Учитывая экономию в производстве 1 м³ продукции окупаемость вложений наступает после первого месяца модернизации производства, даже при минимальных объемах производства 12,5 м³ ежемесячно. Данный объем производства технологически осуществим с учетом современного оснащения мини-заводов и уровнем сбыта продукции.

Таким образом, предлагаемое решение имеет экономическую эффективность. Акт внедрения на базе Республиканского государственного предприятия «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» приведен в Приложении Б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением длительности эксплуатации гидротехнических сооружений, возрастают требования к контролю и мониторинга их состояния. При этом очень важно своевременно определить образование микро- и макротрещин в структуре конструкционного материала. Мониторинг конструкции на месте эксплуатации позволяет подтвердить, выдвинутые при проектировании теории, на основе практических наблюдений. Ставшим классическим инструментом контроля, являются тензодатчики, тем не менее существенным недостатком следует выделить измерение реакции материала только в месте их расположения или закрепления. Точечные измерения не позволяют правильно оценить процессы разрушения, и структурные повреждения определяются через гипотезы о распространении микротрещин на основе физических моделей. ГТС являются уникальными сооружениями, т.к. часть конструкции подвержена постоянному воздействию воды или повышенной влажности, образование в них микронапряжений и микродефектов, соответственно, по сравнению с обычными конструкциями быстрее приводит к распространению и увеличению дефектов. Поэтому для ГТС необходимы более эффективные методы контроля, а именно необходимы методы, позволяющие определить возникновение, местоположение и размеры трещин. В настоящей диссертационной работе предлагается метод измерения микронапряжений, оформленный в виде стандартизованного нормативно-технического документа, в частности, методики выполнения измерений. Для этой цели были выполнены следующие мероприятия:

1. С применением базы Scopus и Web of science проведен анализ существующих методов контроля. Также были изучены нормативные базы зарубежных стран и СНГ. Проведенный анализ показал отсутствие нормативно-технических документов, определяющие требования по мониторингу состояния ГТС и контролю микронапряжений.

2. Предложено решение по контролю микронапряжений путем разработки самосенсорного цементного композита, с уменьшением доли цемента путем замены на шлам, образующийся после переработки боксита (красный шлам). Полученные результаты показали эффективность по проектируемым электромеханическим показателям разработанных составов. Промежуточные результаты исследований были рассмотрены Комитетом науки был выделен грант Всемирного банка на проведение исследований.

3. Полученный состав был улучшен в ходе проведения исследовательской стажировки на базе Michigan State University (Университета штата Мичиган), путем добавления волокон, что позволило улучшить как механические, так и электропроводящие свойства композита. Проведены исследования на готовом элементе конструкции (бетонная балка) в долговременном промежутке. В главах 3 и 4 приводится описание способа получения цементного композита.

4. Проведена валидация разработанной методики выполнения измерений с разработкой модели оценкой неопределенности полученных результатов. Для

разработки модели оценки неопределенности проведены исследования для определения влияющих параметров на результат измерения.

5. В разделах с 3 по 5 был подробно описан разрабатываемый подход к обнаружению микронапряжений, основанный на электромеханических свойствах материалов цементный и фибро-цементных композитных материалов. В разделе 4 было исследована удельное элетрическое сопротивление (обратное значение проводимости) материалов для установления прямой зависимости между механической реакции и электрическим преобразованием материала. Основой целью главы было создание точного экспериментального метода измерения удельного сопротивления. Цель главы 5 заключается в том, чтобы определить точность метода и влияющие на эксперимент параметры с применением в том числе полномасштабных образцов, нагруженных одноосной растягивающей нагрузкой.

6. Одним из значительным результатом проведенного исследования можно отметить апробацию использования улучшенных электромеханических свойств разработанного состава в качестве инструмента для количественного определения соотношения электрической реакции на механическую нагрузку.

7. В диссертационной работе описаны результаты измерения удельного электрического сопротивление разрабатываемых составов материалов. Результаты двухконтактного метод измерения показали отклонение из-за контактного импедансу, при этом измерения на постоянном токе, показали большую зависимость от поляризации материала. Таким образом, в качестве наиболее точного метода измерения объемного удельного сопротивления был выбран четырехпроводный способ подключения электродов с использованием переменного тока. Определяя скорость поляризации цементного композита, эмпирическим путем установлено, что частота переменного тока выше 10 кГц сводит к минимуму ошибки измерения удельного сопротивления, обусловленные эффектом поляризации материала.

8. Другим основным параметром, влияющим на изменение электрического сопротивления, являются эффекты, связанные с гидратацией цементного композита. Результаты исследований показывают значительные изменения электрического сопротивления на интервале более 28 дней после заливки конструкции более, чем в 5-10 раз. При этом следует отметить стабильность и сходимость результатов измерений, также подтверждена линейная зависимость пьезорезистивного свойства под воздействием механического нагружения. Данное заключение согласуется, с полученными эффектами обнаруженных в однооснонагруженных фиброармированных материалах [91, 96], в которых были использованы более дорогостоящие компоненты по сравнению с разработанным материалом.

9. Показатели электрической проводимости, полученные для предлагаемых статично и динамично нагруженных материалов, позволяют определить расположение микроразрушений. Уменьшение показателя проводимости, связанное с микродефектами, имеет линейную корреляцию с

логарифмом ширины трещины. При окончании деформационного нагружения также наблюдались трещины макромасштаба, которые затем локализовались, что вызывало резкое увеличение электрического сопротивления. При этом также, уменьшение проводимости композита коррелировало с шириной более крупных трещин. Например, для трещин шириной 1,5 мм наблюдались падения проводимости до 300 нСм/см. Процесс измерения образования микронапряжений наблюдался во множестве испытаний образцов, включая балки, нагруженные при монотонном и циклическом сжати-растяжении, и нагружаемые при трехточечном изгибе.

10. Предлагаемый метод измерения проводимости прошел практическую апробацию для распределенного измерения, который соответствует локальному характеру растрескивания вяжущих материалов. Данный метод предлагается в виде методики измерений в соответствии с требованиями, изложенными в Законе «Об обеспечении единства измерений». Проект национального стандарта (Приложение В).

11. При этом возможности применения разработанной нормативно-технической документации по контролю микронапряжений в виде апробированной методики выполнения измерений не ограничиваются только лишь цементными материалами. Данную методику можно применять для других материалов, в которых существует линейная и квазипостоянная зависимость изменения удельного электрического сопротивления от величины внешней механической нагрузки.

12. Отличительной особенностью разработанного в данной диссертационной работе метода, по сравнению с другими методами, является то, что электромеханический эффект достигнут с применением промышленных отходов, при этом применяется простой способ смешивания и получения состава композита с применением шаровой мельницы.

13. В качестве рекомендации по дальнейшему исследованию следует отметить возможность изучения влияния эффекта коррозии на интервалах наблюдения более одного года в связи с тем, что коррозия металлических элементов, применяемой для армирования конструкции, значительно меняет проводимость композита в месте взаимодействия металл-цемент-волокно, что может вызывать большие отклонения и расцениваться как наличие дефектов, и наоборот, создавать помехи в обнаружении микронапряжений. Дальнейшие исследования могут помочь в обнаружении таких ошибок.

14. Кроме того, возможно проводить исследования в направлении увеличения количества внешних подключаемых электродов для измерений граничных напряжений приложенных электрических токов, что позволит проводить картирование элемента конструкции с построением объемных моделей измерений микронапряжений.

15. При этом возможно проведение работ по изучению алгоритма сбора и обработки результатов измерений для более точного построения объемных моделей и повышения скорости обработки результатов. Возможно, что при построении карт и объемных моделей будет проходить усложнение алгоритмов,

таким образом, необходимо проводить исследования в области распределенных вычислений и параллельной обработки результатов измерений в целях улучшения производительности проектируемых информационно-измерительных систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ибраев Т., Ли М. Безопасность гидротехнических сооружений Казахстана // Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения: матер. междунар. науч. конф. – М.: Изд. ВНИИА, 2016. – С. 82-86.
- 2 Azarsa P., Gupta R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 2017. – P. 845-875.
- 3 Кузнецова Т.В., Френкель Д.Я., Кривобородов Ю.Р. Модифицирование портландцемента для устранения усадки бетона // Цемент и его применение. – 2007. – №4. – С. 54-55.
- 4 Сидорова С. Цели и задачи формирования регистра гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса // Мелиорация земель-неотъемлемая часть восстановления и развития АПК Нечерноземной зоны Российской Федерации: матер. междунар. науч.-практ. конф. – М., 2019. – С. 409-414.
- 5 Сибгатулина Д., Хабибуллина А. Методика определения защищенности гидротехнических сооружений // Инновационные подходы к решению проблем "Сендайской рамочной программы по снижению риска бедствий на 2015-2030 годы": сб. матер. междунар. науч.-практ. конф. – Казань, 2018. – С. 139-142.
- 6 Воробьев Ю., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. – 308 с.
- 7 Chen S.-H. Operation and Maintenance of Hydraulic Structures // In book: Hydraulic Structures. – Berlin: Springer, 2015. – P. 967-1029.
- 8 Кулешов Г. Рекомендации по оценке и обеспечению безопасности гидротехнических сооружений. – Ташкент, 2009. – 225 с.
- 9 Lynch J.P., Loh K.J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring // Shock and Vibration Digest. – 2006. – Vol. 38, №2. – P. 91-130.
- 10 Mufti A.A. Guidelines for Structural Health Monitoring. – Winnipeg: ISIS Canada, 2001. – 189 p.
- 11 Liu M., Frangopol D.M. Probability-based bridge network performance evaluation // Journal of Bridge Engineering. – 2006. – Vol. 11, №5. – P. 633-641.
- 12 Liu M., Frangopol D.M. Optimizing bridge network maintenance management under uncertainty with conflicting criteria: Life-cycle maintenance, failure, and user costs // Journal of structural Engineering. – 2006. – Vol. 132, №11. – P. 1835-1845.
- 13 Moreu F., Li J., Jo H. et al. Reference-free displacements for condition assessment of timber railroad bridges // Journal of Bridge Engineering. – 2016. – Vol. 21, №2. – P. 5052-5064.
- 14 Lynch J.P. An overview of wireless structural health monitoring for civil structures // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2007. – Vol. 365, №1851. – P. 345-372.
- 15 Dave B., Koskela L. Collaborative knowledge management-A construction case study // Automation in construction. – 2009. – Vol. 18, №7. – P. 894-902.

- 16 Moreu F., Li X., Li S. et al. Technical specifications of structural health monitoring for highway bridges: New Chinese structural health monitoring code // *Frontiers in built environment*. – 2018. – Vol. 4. – P. 2-12.
- 17 Mufti A.A. Structural health monitoring of innovative Canadian civil engineering structures // *Structural health monitoring*. – 2002. – Vol. 1, №1. – P. 89-103.
- 18 Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M. et al. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001 // Los Alamos National Laboratory, USA. – 2003. – Vol. 1. – P. 2095-2102.
- 19 Abdel-Jaber H., Glisic B. Structural health monitoring methods for the evaluation of prestressing forces and prerule cracks // *Frontiers in built environment*. – 2016. – Vol. 2. – P. 20-29.
- 20 Hobbs D. Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk // *International Materials Reviews*. – 2001. – Vol. 46, №3. – P. 117-144.
- 21 Sun M., Staszewski W., Swamy R. Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures // *Advances in civil engineering*. – 2010. – Vol. 2010. – P. 724-739.
- 22 Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 204. – P. 492-509.
- 23 Brownjohn J.M. Structural health monitoring of civil infrastructure // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2007. – Vol. 365, №1851. – P. 589-622.
- 24 Ohno K., Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24, №12. – P. 2339-2346.
- 25 СТ РК EN 12504-1-2011. Испытание бетона в конструкциях. Часть 1. Образец бетона, вырезаемый из толщи конструкции. Отбор образцов, исследование и испытание при сжатии. – Введ. 2011-08-02. – Астана: РГП «Казахстанский институт стандартизации и сертификации» 2012. – 28 с.
- 26 Malek J., Kaouther M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures // *Jordan Journal of civil engineering*. – 2014. – Vol. 8, №4. – P. 432-441.
- 27 López-Higuera J. M., Cobo L. R., Incera A. Q., Cobo A. Fiber optic sensors in structural health monitoring // *Journal of lightwave technology*. – 2011. – Vol. 29, №4. – P. 587-608.
- 28 Farhey D.N. Bridge instrumentation and monitoring for structural diagnostics // *Structural Health Monitoring*. – 2005. – Vol. 4, №4. – P. 301-318.
- 29 Noel A.B., Abdaoui A., Elfouly T. et al. Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2017. – Vol. 19, №3. – P. 1403-1423.
- 30 French C.E., Shield C.K., Hedegaard B.D. Modeling and monitoring the long-term behavior of post-tensioned concrete bridges. – Minnesota, 2014. – 309 p.
- 31 Cawley P. Structural health monitoring: Closing the gap between research and industrial deployment // *Structural Health Monitoring*. – 2018. – Vol. 17, №5. – P. 1225-1244.

- 32 Seth S., Lynch J.P., Tilbury D.M. Wirelessly networked distributed controllers for real-time control of civil structures // Proceed. of the 2005, American Control conf. (IEEE-2005). – Portland, 2005. – P. 2946-2952.
- 33 Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems // Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences. – 1957. – Vol. 241, №1226. – P. 376-396.
- 34 Laws N. The determination of stress and strain concentrations at an ellipsoidal inclusion in an anisotropic material // Journal of Elasticity. – 1977. – Vol. 7, №1. – P. 91-97.
- 35 Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1965. – Vol. 13, №4. – P. 213-222.
- 36 Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions // Acta metallurgica. – 1973. – Vol. 21, №5. – P. 571-574.
- 37 Zaoui A. Continuum micromechanics: Survey // Journal of Engineering Mechanics (ASCE). – 2002. – Vol. 128, Issue 8. – P. 808-816.
- 38 Bernard O., Ulm F.-J., Lemarchand E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials // Cement and concrete research. – 2003. – Vol. 33, №9. – P. 1293-1309.
- 39 Constantinides G., Ulm F.-J. The effect of two types of CSH on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling // Cement and concrete research. – 2004. – Vol. 34, №1. – P. 67-80.
- 40 Hellmich C., Mang H. Shotcrete elasticity revisited in the framework of continuum micromechanics: From submicron to meter level // Journal of materials in civil engineering. – 2005. – Vol. 17, №3. – P. 246-256.
- 41 Hellmich C., Vass V., Königsberger M. et al. Poro-Micromechanics of Materials with Complex Morphologies-A Review, and Recent Results for Concrete, Bone, and Paper // Proceed. of the Sixth Biot Conference on Poromechanics. – Paris, 2017. – P. 28-35.
- 42 Wang H., Mang H., Yuan Y. et al. Multiscale thermoelastic analysis of the thermal expansion coefficient and of microscopic thermal stresses of mature concrete // Materials. – 2019. – Vol. 12, №17. – P. 2689-2705.
- 43 Drugan W.J., Willis J.R. A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1996. – Vol. 44, №4. – P. 497-524.
- 44 Pichler B., Hellmich C. Upscaling quasi-brittle strength of cement paste and mortar: A multi-scale engineering mechanics model // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41, №5. – P. 467-476.
- 45 Königsberger M., Hlobil M., Delsaute B. et al. Hydrate failure in ITZ governs concrete strength: A micro-to-macro validated engineering mechanics model // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 103. – P. 77-94.

- 46 Han B., Wang Y., Dong S. et al. Smart concretes and structures: A review // *Journal of intelligent material systems and structures*. – 2015. – Vol. 26, №11. – P. 1303-1345.
- 47 Muto N., Arai Y., Shin S. et al. Hybrid composites with self-diagnosing function for preventing fatal fracture // *Composites Science and Technology*. – 2001. – Vol. 61, №6. – P. 875-883.
- 48 Cabezas J., Sánchez-Rodríguez T., Gómez-Galán J.A. et al. Compact embedded wireless sensor-based monitoring of concrete curing // *Sensors*. – 2018. – Vol 18, №3. – P. 876-891.
- 49 Jin Y., Granville A. Polymer fiber optic sensors-a mini review of their synthesis and applications // *J. Biosens. Bioelectron.* – 2016. – Vol. 7, №1. – P. 1-11.
- 50 Maaskant R., Alavie T., Measures R. et al. Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring // *Cement and Concrete Composites*. – 1997. – Vol. 19, №1. – P. 21-33.
- 51 Ansari F. State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites // *Cement and Concrete Composites*. – 1997. – Vol. 19, №1. – P. 3-19.
- 52 Morey W.W., Meltz G., Glenn W.H. Fiber optic Bragg grating sensors // *Proceed. of the Fiber optic and laser sensors VII*. – Boston, 1990. – P. 98-107.
- 53 Curie J., Curie P. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées // *Bulletin de minéralogie*. – 1880. – Vol. 3, №4. – P. 90-93.
- 54 Grosse C.U., Ohtsu M. *Acoustic emission testing*. – Cham: Springer Science & Business Media, 2008. – 751 p.
- 55 Dumoulin C., Karaiskos G., Sener J.-Y. et al. Online monitoring of cracking in concrete structures using embedded piezoelectric transducers // *Smart materials and structures*. – 2014. – Vol. 23, №11. – P. 115016-115031.
- 56 Duan W.H., Wang Q., Quek S.T. Applications of piezoelectric materials in structural health monitoring and repair: Selected research examples // *Materials*. – 2010. – Vol. 3, №12. – P. 5169-5194.
- 57 Aksel E., Jones J.L. Advances in lead-free piezoelectric materials for sensors and actuators // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10, №3. – P. 1935-1954.
- 58 Figueira R.B. Electrochemical sensors for monitoring the corrosion conditions of reinforced concrete structures: A review // *Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 7, №11. – P. 1157-1172.
- 59 Pargar F., Koleva D.A., Van Breugel K. Determination of chloride content in cementitious materials: from fundamental aspects to application of Ag/AgCl chloride sensors // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, №11. – P. 2482-2497.
- 60 Li H., Ou J.P. Smart concrete, sensors and self-sensing concrete structures // *Key Engineering Materials*. – 2009. – Vol. 400. – P. 69-80.
- 61 Ubertini F., D'Alessandro A., Downey A. et al. Recent advances on SHM of reinforced concrete and masonry structures enabled by self-sensing structural materials // *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. – 2017. – Vol. 2. – P. 119-134.

- 62 Neild S., Williams M., McFadden P. Development of a vibrating wire strain gauge for measuring small strains in concrete beams // *Strain*. – 2005. – Vol. 41, №1. – P. 3-9.
- 63 Butler L.J., Gibbons N., He P. et al. Evaluating the early-age behaviour of full-scale prestressed concrete beams using distributed and discrete fibre optic sensors // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 126. – P. 894-912.
- 64 Mu T., Liu L., Lan X. et al. Shape memory polymers for composites // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 160. – P. 169-198.
- 65 Suzuki T., Shiotani T., Ohtsu M. Evaluation of cracking damage in freeze-thawed concrete using acoustic emission and X-ray CT image // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 136. – P. 619-626.
- 66 Aghlara R., Tahir M.M. Measurement of strain on concrete using an ordinary digital camera // *Measurement*. – 2018. – Vol. 126. – P. 398-404.
- 67 Banthia N., Djeridane S., Pigeon M. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements // *Cement and Concrete research*. – 1992. – Vol. 22, №5. – P. 804-814.
- 68 Chen P.-W., Chung D. Concrete as a new strain/stress sensor // *Composites Part B: Engineering*. – 1996. – Vol. 27, №1. – P. 11-23.
- 69 Ниязбекова Р.К., Конканов М.Д. Применение умных композитных бетонов для аграрно-промышленного комплекса // *Матер. республ. науч.-теорет. конф. «Сейфуллинские чтения-14: Молодежь, наука, инновации: цифровизация – новый этап развития»*. – Астана, 2018. – С. 6-10.
- 70 Han B., Ou J. Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2007. – Vol. 138, №2. – P. 294-298.
- 71 Han B., Han B., Ou J. Experimental study on use of nickel powder-filled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2009. – Vol. 149, №1. – P. 51-55.
- 72 Nawy E.G. *Concrete construction engineering handbook*. – Boca Raton: CRC press, 2008. – 1434 p.
- 73 Han B., Yu X., Kwon E. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring // *Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 20, №44. – P. 445501-445516.
- 74 Chen P.-W., Chung D.D. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection // *Smart Materials and Structures*. – 1993. – Vol. 2, №1. – P. 22-31.
- 75 Han B., Wang Y., Sun S. et al. Nanotip-induced ultrahigh pressure-sensitive composites: principles, properties and applications // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2014. – Vol. 59. – P. 105-114.
- 76 Salvado R., Lopes C., Szojda L. et al. Carbon fiber epoxy composites for both strengthening and health monitoring of structures // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, №5. – P. 10753-10770.
- 77 Han B., Ding S., Yu X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review // *Measurement*. – 2015. – Vol. 59. – P. 110-128.

78 Mehta P., Monteiro P. Concrete: microstructure, properties, and materials. – NY.: McGraw-Hill, 2006. – 657 p.

79 Tian Z., Li Y., Zheng J. et al. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 177. – P. 107437-107452.

80 Chen J., Hou Z.F., Yu H.C. et al. Research on the Double Yellow Lines Monitoring System Based on Pressure-Sensitivity of Carbon Fiber Reinforced Concrete // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 209. – P. 779-785.

81 Bontea D.-M., Chung D., Lee G. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30, №4. – P. 651-659.

82 Chu H.-y., Chen J.-k. The experimental study on the correlation of resistivity and damage for conductive concrete // Cement and Concrete Composites. – 2016. – Vol. 67. – P. 12-19.

83 Baeza F.J., Galao O., Zornoza E. et al. Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements // Materials. – 2013. – Vol. 6, №3. – P. 841-855.

84 D'Alessandro A., Ubertini F., Laflamme S. et al. Towards smart concrete for smart cities: Recent results and future application of strain-sensing nanocomposites // Journal of Smart Cities. – 2015. – Vol. 1, №1. – P. 3-18.

85 Adresi M., Hassani A., Tulliani J.-M. et al. A study of the main factors affecting the performance of self-sensing concrete // Advances in Cement Research. – 2017. – Vol. 29, №5. – P. 216-226.

86 Ding S., Ruan Y., Yu X. et al. Self-monitoring of smart concrete column incorporating CNT/NCB composite fillers modified cementitious sensors // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 201. – P. 127-137.

87 D'Alessandro A., Rallini M., Ubertini F. et al. Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications // Cement and Concrete Composites. – 2016. – Vol. 65. – P. 200-213.

88 Gupta S., Gonzalez J.G., Loh K.J. Self-sensing concrete enabled by nano-engineered cement-aggregate interfaces // Structural Health Monitoring. – 2017. – Vol. 16, №3. – P. 309-323.

89 Rehman S.K.U., Ibrahim Z., Memon S.A. et al. A sustainable graphene based cement composite // Sustainability. – 2017. – Vol. 9, №7. – P. 1229-1245.

90 Han B., Han B., Yu X. Effects of the content level and particle size of nickel powder on the piezoresistivity of cement-based composites/sensors // Smart Materials and Structures. – 2010. – Vol. 19, №6. – P. 065012-065027.

91 Ferdiansyah T., Turatsinze A., Balayssac J.-P. Design and characterization of self-sensing steel fiber reinforced concrete // Matec Web of Conferences. – 2018. – Vol. 199. – P. 11008-11025.

92 Monteiro A.O., Cachim P.B., Costa P.M. Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles // Cement and Concrete Composites. – 2017. – Vol. 81. – P. 59-65.

93 Reza F., Batson G.B., Yamamuro J.A. et al. Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2003. – Vol. 15, №5. – P. 476-483.

94 Chen B., Wu K., Yao W. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites // *Cement and Concrete Composites*. – 2004. – Vol. 26, №4. – P. 291-297.

95 Wen S., Chung D. Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials // *Carbon*. – 2007. – Vol. 45, №2. – P. 263-267.

96 Meehan D.G., Wang S., Chung D. Electrical-resistance-based sensing of impact damage in carbon fiber reinforced cement-based materials // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2010. – Vol. 21, №1. – P. 83-105.

97 Donnini J., Bellezze T., Corinaldesi V. Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers // *Journal of Building Engineering*. – 2018. – Vol. 20. – P. 8-14.

98 Hoheneder J., Flores-Vivian I., Lin Z. et al. The performance of stress-sensing smart fiber reinforced composites in moist and sodium chloride environments // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 73. – P. 89-95.

99 Han B., Yu X., Kwon E. et al. Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cement composites // *Journal of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 46, №1. – P. 19-25.

100 Wang H., Gao X., Liu J. Effects of salt freeze-thaw cycles and cyclic loading on the piezoresistive properties of carbon nanofibers mortar // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 177. – P. 192-201.

101 Parvaneh V., Khiabani S.H. Mechanical and piezoresistive properties of self-sensing smart concretes reinforced by carbon nanotubes // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 26, №11. – P. 993-1000.

102 You I., Yoo D.-Y., Kim S. et al. Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, №11. – P. 2481-2496.

103 Kim H., Park I., Lee H.-K. Improved piezoresistive sensitivity and stability of CNT/cement mortar composites with low water–binder ratio // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 116. – P. 713-719.

104 Liu C., Liu G., Ge Z. et al. Mechanical and self-sensing properties of multiwalled carbon nanotube-reinforced ECCs // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 2019. – P. 264-279.

105 Yıldırım G., Sarwary M.H., Al-Dahawi A. et al. Piezoresistive behavior of CF-and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: shear failure investigation // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 168. – P. 266-279.

106 Yoo D.-Y., You I., Lee S.-J. Electrical properties of cement-based composites with carbon nanotubes, graphene, and graphite nanofibers // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, №5. – P. 1064-1080.

107 Han B., Zhang K., Yu X. et al. Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites // *Cement and Concrete Composites*. – 2012. – Vol. 34, №6. – P. 794-800.

108 Rovnaník P., Kusák I., Bayer P. et al. Electrical and self-sensing properties of alkali-activated slag composite with graphite filler // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, №10. – P. 1616-1631.

109 Liu Q., Xu Q., Yu Q. et al. Experimental investigation on mechanical and piezoresistive properties of cementitious materials containing graphene and graphene oxide nanoplatelets // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 127. – P. 565-576.

110 Ozbulut O.E., Jiang Z., Harris D.K. Exploring scalable fabrication of self-sensing cementitious composites with graphene nanoplatelets // *Smart Materials and Structures*. – 2018. – Vol. 27, №11. – P. 115029-115035.

111 Yoo D.-Y., You I., Youn H. et al. Electrical and piezoresistive properties of cement composites with carbon nanomaterials // *Journal of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 52, №24. – P. 3325-3340.

112 Song J., Nguyen D.L., Manathamsombat C. et al. Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites // *Journal of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 49, №29. – P. 3621-3634.

113 Teomete E. The effect of temperature and moisture on electrical resistance, strain sensitivity and crack sensitivity of steel fiber reinforced smart cement composite // *Smart Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 25, №7. – P. 075024-075029.

114 Huang Y., Li H., Qian S. Self-sensing properties of engineered cementitious composites // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 174. – P. 253-262.

115 Deng H., Li H. Assessment of self-sensing capability of carbon black engineered cementitious composites // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 173. – P. 1-9.

116 Li H., Xiao H.-g., Ou J.-p. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites // *Cement and Concrete Composites*. – 2006. – Vol. 28, №9. – P. 824-828.

117 Wen S., Chung D. Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement // *Carbon*. – 2007. – Vol. 45, №4. – P. 710-716.

118 Catalá G., Ramos-Fernández E., Zornoza E. et al. Influence of the oxidation process of carbon material on the mechanical properties of cement mortars // *Journal of materials in civil engineering*. – 2011. – Vol. 23, №3. – P. 321-329.

119 Azhari F., Banthia N. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing // *Cement and Concrete Composites*. – 2012. – Vol. 34, №7. – P. 866-873.

120 Azhari F., Banthia N. Carbon Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Tensile Strain Sensing // *ACI Materials Journal*. – 2017. – Vol. 114, №1. – P. 129-136.

121 Mosavinejad S.G., Barandoust J., Ghanizadeh A. et al. Crack detection of a HPCFRCC thin plate using electrical resistivity method // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 193. – P. 255-267.

122 Chung D. Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material // *Composites Part B: Engineering*. – 2000. – Vol. 31, №6-7. – P. 511-526.

123 Wen S., Chung D. A comparative study of steel-and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors // *Advances in cement research*. – 2003. – Vol. 15, №3. – P. 119-128.

124 Wang H., Gao X., Wang R. The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 134. – P. 673-683.

125 D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A.L. et al. Electromechanical modelling of a new class of nanocomposite cement-based sensors for structural health monitoring // *Structural Health Monitoring*. – 2015. – Vol. 14, №2. – P. 137-147.

126 Yoo D.-Y., You I., Zi G. et al. Effects of carbon nanomaterial type and amount on self-sensing capacity of cement paste // *Measurement*. – 2019. – Vol. 134. – P. 750-761.

127 Sasmal S., Ravivarman N., Sindu B. et al. Electrical conductivity and piezo-resistive characteristics of CNT and CNF incorporated cementitious nanocomposites under static and dynamic loading // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2017. – Vol. 100. – P. 227-243.

128 Ruan Y., Han B., Wang D. et al. Electrical properties of carbon nanotubes filled cementitious composites // *Materials Research Express*. – 2018. – Vol. 5, №10. – P. 105704-105712.

129 Mendoza O., Sierra G., Tobón J.I. Influence of super plasticizer and Ca (OH) 2 on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 47. – P. 771-778.

130 Ubertini F., Materazzi A.L., D'Alessandro A. et al. Natural frequencies identification of a reinforced concrete beam using carbon nanotube cement-based sensors // *Engineering structures*. – 2014. – Vol. 60. – P. 265-275.

131 Li X., Wang L., Liu Y. et al. Dispersion of graphene oxide agglomerates in cement paste and its effects on electrical resistivity and flexural strength // *Cement and Concrete Composites*. – 2018. – Vol. 92. – P. 145-154.

132 Kashif Ur Rehman S., Ibrahim Z., Memon S.A. et al. Influence of graphene nanosheets on rheology, microstructure, strength development and self-sensing properties of cement based composites // *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10, №3. – P. 822-837.

133 Sun S., Han B., Jiang S. et al. Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 136. – P. 314-328.

134 Luo J., Zhang C., Li L. et al. Intrinsic sensing properties of chrysotile fiber reinforced piezoelectric cement-based composites // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, №9. – P. 2999-3009.

- 135 Dong W., Li W., Shen L. et al. Piezoresistive behaviours of carbon black cement-based sensors with layer-distributed conductive rubber fibres // *Materials & design*. – 2019. – Vol. 182. – P. 108012-108027.
- 136 Dong W., Li W., Long G. et al. Electrical resistivity and mechanical properties of cementitious composite incorporating conductive rubber fibres // *Smart materials and structures*. – 2019. – Vol. 28, №8. – P. 085013-085028.
- 137 Chiarello M., Zinno R. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC // *Cement and Concrete Composites*. – 2005. – Vol. 27, №4. – P. 463-469.
- 138 Saafi M., Tang L., Fung J. et al. Graphene/fly ash geopolymeric composites as self-sensing structural materials // *Smart materials and structures*. – 2014. – Vol. 23, №6. – P. 065006-0650021.
- 139 Konkanov M., Salem T., Jiao P. et al. Environment-friendly, self-sensing concrete blended with byproduct wastes // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, №7. – P. 1925-1941.
- 140 Jia X., Qian J., Tang Z. Research on compression sensitivity of steel slag concrete // *Materials Review*. – 2008. – Vol. 11. – P. 325-332.
- 141 McCarter W., Chrisp T., Starrs G. et al. Characterization and monitoring of cement-based systems using intrinsic electrical property measurements // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, №2. – P. 197-206.
- 142 Wang T., Xu J., Bai E. et al. Study on the effects of carbon fibers and carbon nanofibers on electrical conductivity of concrete // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 267. – P. 032011-032026.
- 143 Danoglidis P.A., Konsta-Gdoutos M.S., Gdoutos E.E. et al. Strength, energy absorption capability and self-sensing properties of multifunctional carbon nanotube reinforced mortars // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 120. – P. 265-274.
- 144 Hooton R.D., Bickley J.A. Design for durability: The key to improving concrete sustainability // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 67. – P. 422-430.
- 145 Andrade C. Model for prediction of reinforced concrete service life based on electrical resistivity // *Ibracon Structures and Materials Journal*. – 2005. – Vol. 1, №1. – P. 1809-1815.
- 146 Fu X., Ma E., Chung D. et al. Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement // *Cement and concrete research*. – 1997. – Vol. 27, №6. – P. 845-852.
- 147 Zheng L. Study on the Compression Sensibility of Smart Concrete and its Structure: dis. ... the mas. deg. in scien. – Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003. – 183 p.
- 148 Wen S., Chung D. Cement-based materials for stress sensing by dielectric measurement // *Cement and Concrete Research*. – 2002. – Vol. 32, №9. – P. 1429-1433.
- 149 Han B., Guan X., Ou J. Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2007. – Vol. 135, №2. – P. 360-369.

150 Zhenjun Z., Zhengfang Y. Study on the smart property of carbon coated nylon fiber-reinforced concrete composites // Journal-Chinese Ceramic Society. – 2001. – Vol. 29, №2. – P. 192-195.

151 Vilaplana J.L., Baeza F.J., Galao O. et al. Self-sensing properties of alkali activated blast furnace slag (BFS) composites reinforced with carbon fibers // Materials. – 2013. – Vol. 6, №10. – P. 4776-4786.

152 Long X. Research on pressure-sensitivity of compound material of carbon black filled cement: dis. ... for the mas. deg. in engin. – Wuhan: Wuhan University, 2007. – 192 p.

153 Moriche R., Jiménez-Suárez A., Sánchez M. et al. Sensitivity, influence of the strain rate and reversibility of GNPs based multiscale composite materials for high sensitive strain sensors // Composites Science and Technology. – 2018. – Vol. 155. – P. 100-107.

154 Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete—a review // Construction and building materials. – 2010. – Vol. 24, №11. – P. 2060-2071.

155 Tian X., Hu H. Test and study on electrical property of conductive concrete // Procedia Earth and Planetary Science. – 2012. – Vol. 5. – P. 83-87.

156 Wen S., Chung D. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement // Carbon. – 2006. – Vol. 44, №11. – P. 2130-2138.

157 Zhu S., Chung D. Numerical assessment of the methods of measurement of the electrical resistance in carbon fiber reinforced cement // Smart materials and structures. – 2007. – Vol. 16, №4. – P. 1164-1173.

158 Li G.Y., Wang P.M., Zhao X. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites // Cement and Concrete Composites. – 2007. – Vol. 29, №5. – P. 377-382.

159 Hou T.-C., Lynch J.P. Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components // Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. – 2005. – Vol. 5765. – P. 419-429.

160 Azhari F. Cement-based sensors for structural health monitoring. – Vancouver: University of British Columbia, 2008. – 184 p.

161 Zheng L., Song X., Li Z. Investigation on the method of AC measurement of compression sensibility of carbon fiber cement // Huzhong Univ. Sci. Technol.(Urban Sci. Ed.). – 2005. – Vol. 22, №2. – P. 27-29.

162 Konsta-Gdoutos M.S., Aza C.A. Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures // Cement and Concrete Composites. – 2014. – Vol. 53. – P. 162-169.

163 Wang L., Aslani F. A review on material design, performance, and practical application of electrically conductive cementitious composites // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 229. – P. 116892-117307.

164 Downey A., D'Alessandro A., Ubertini F. et al. Biphasic DC measurement approach for enhanced measurement stability and multi-channel sampling of self-

sensing multi-functional structural materials doped with carbon-based additives // *Smart Materials and Structures*. – 2017. – Vol. 26, №6. – P. 065008-0650012.

165 Garcia-Macias E., D'Alessandro A. et al. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 108. – P. 451-469.

166 Deng F., Zheng Q.-S. An analytical model of effective electrical conductivity of carbon nanotube composites // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92, №7. – P. 071902-071912.

167 Li V.C. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications // *Journal of advanced concrete technology*. – 2003. – Vol. 1, №3. – P. 215-230.

168 Dong W., Li W., Tao Z. et al. Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 203. – P. 146-163.

169 Spragg R., Villani C., Snyder K. et al. Factors that influence electrical resistivity measurements in cementitious systems // *Transportation research record*. – 2013. – Vol. 2342, №1. – P. 90-98.

170 Weiss J., Snyder K., Bullard J. et al. Using a saturation function to interpret the electrical properties of partially saturated concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 25, №8. – P. 1097-1106.

171 Castro J. Moisture transport in cement based materials: Application to transport tests and internal curing. – West Lafayette: Purdue University, 2011. – 215 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Фотографии с процессов исследований и испытаний, образцов разрабатываемых композитов



Рисунок А.1 – Установка образца в испытательный пресс и подключение электродов



Рисунок А.2 – Образец с электродами после полного разрушения



а



б

а – в начале испытаний; б – в момент образования трещины

Рисунок А.3 – Общий вид образцов фибробетонов



Рисунок А.4 – Образцы с электродами на хранении



Рисунок А.5 – Исследование электромеханических свойств

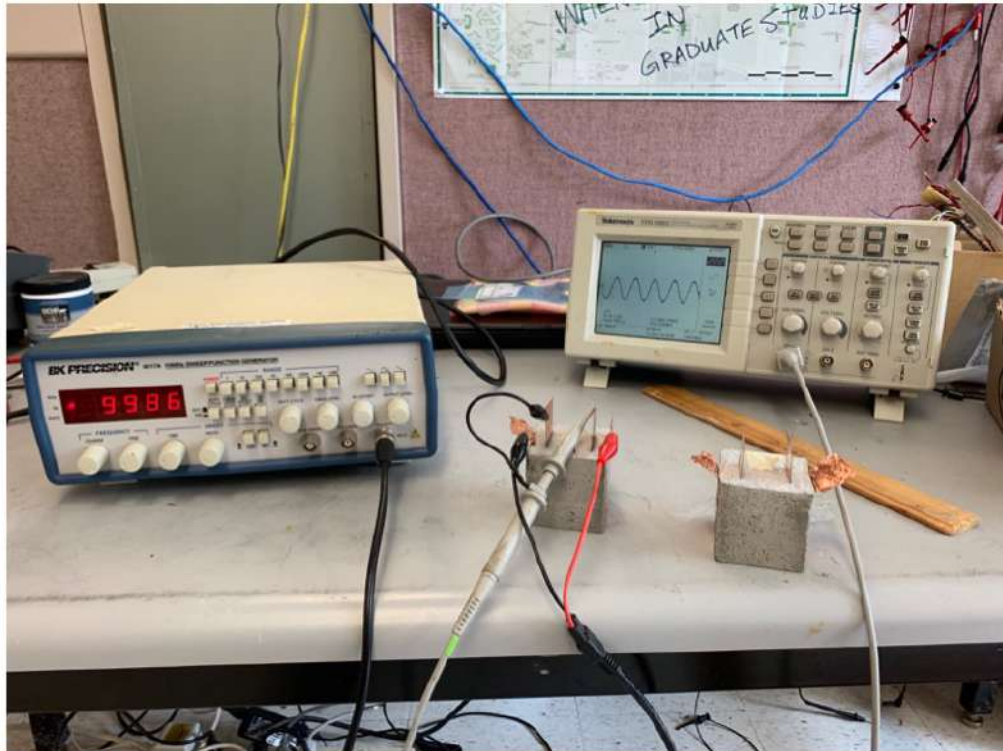


Рисунок А.6 – Измерение электропроводности при помощи генератора сигналов и осциллографа по четырехпроводной схеме подключения

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель генерального директора
РГП «КазСтандарт»



Бегайдаров Ж.А.

2021 г.

АКТ

внедрения нормативно-технической документации контроля микронапряжений для гидротехнических сооружений

Мы, нижеподписавшиеся представители РГП «КазСтандарт», в лице заместителя генерального директора Бегайдарова Ж.А. с одной стороны и представителя ВУЗа д.т.н. Ниязбековой Р. К. с другой стороны составили настоящий акт о внедрении нормативно-технической документации контроля микронапряжений для гидротехнических сооружений. При внедрении новой технологии достигнуты следующие результаты:

1. Фактический годовой эффект от внедрения новой технологии в лаборатории 58 млн. тг. в год;
2. Повышена точность измерений до 1,7 раз.
3. Полученные данные использовались для составления проектов;
4. Опубликованы статьи.

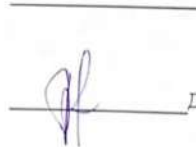
К акту прилагается краткий расчет экономического эффекта, подписанный представителями организации, скрепленный печатью.

Представитель организации
Заместитель
генерального директора
РГП «КазСтандарт»



Бегайдаров Ж.А.

Представитель ВУЗа



д.т.н. Ниязбекова Р.К.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Проект национального стандарта на методику измерений

СТ РК 2.XXX-20__

ПРОЕКТ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан

**ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ (ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ) КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Методика измерений

СТ РК 2.XXX-20__

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ

3 В настоящем стандарте реализованы нормы Закона Республики Казахстан «Об обеспечении единства измерений» № 53-ІІ от 7 июня 2000 года

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом каталоге «Документы по стандартизации», а текст изменений и поправок – в периодических информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в периодическом информационном указателе «Национальные стандарты»

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан

**ПРОЕКТ НАЦИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан

**ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ (ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ) КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Методика измерений

Дата введения

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на измерений электрического сопротивления постоянному и/или переменному току цементных композитных материалов.

При необходимости, для обеспечения потребностей заказчиков применения методики измерений в условиях конкретной лаборатории, на основе настоящего стандарта лаборатории разрабатывают самостоятельный документ на выполнение измерений в соответствии с СТ РК 2.430 - 2017 (пункты 4.3 и 4.4).

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходимы следующие документы по стандартизации:

СТ РК 2.1-2018 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Метрология. Термины и определения

СТ РК 2.430-2017 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Методика калибровки эталонов и средств измерений. Порядок разработки, утверждения и применения.

ГОСТ 23737-79 Меры электрического сопротивления. Общие технические условия.

ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

Примечание - При пользовании стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов по ежегодно издаваемому каталогу «Документы по стандартизации» по состоянию на текущий год и соответствующим периодически издаваемым информационным указателям «Национальные стандарты», опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененным (измененным) документом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение,

Издание официальное

1

СТ РК 2.XXX-20__

в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются термины и определения по [1] и СТ РК 2.1.

4 Операции и средства измерений

4.1 При проведении измерений должны быть выполнены операции в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 - Операции и средства измерений

Наименование операции	Номер пункта настоящего стандарта	Средства измерений и их метрологические характеристики
Внешний осмотр	8.1	Визуально
Опробование	8.2	В соответствии с руководством по эксплуатации
Определение действительного значения	8.3	Омметр/ мультиметр, погрешность измерения $\pm 2,5\%$ RLC-метр с погрешностью от $0,015 \text{ млн}^{-1}$

4.2 Применяемые эталоны и средства измерений должны быть метрологически прослеживаемы в соответствии с [2].

5 Требования безопасности

При проведении калибровки мер должны быть соблюдены требования безопасности, предусмотренные в технической документации.

6 Условия измерений

При проведении измерений должны быть соблюдены следующие условия:

- температура окружающей среды, °C: 20 ± 5 ;
- относительная влажность воздуха, %: от 40 до 80;
- атмосферное давление, кПа: от 84 до 106.

7 Подготовка к проведению измерений

4

7.1 Измеряемые образцы должны быть выдержаны при температуре, относительной влажности и атмосферном давлении, соответствующих условиям набор хранения и набора прочности, в течение времени, указанного в технической документации на композитные материалы, или 3, 7, 28 суток, если такое указание отсутствует.

7.2 Место проведение измерений должно быть защищена от прямого теплового излучения и потоков нагретого или холодного воздуха.

7.3 Действительное значение сопротивления определяют при устойчивом температурном режиме в рабочем объеме термостата, в котором помещены исследуемые материалы.

7.4 Средства измерений подготавливают к работе в соответствии с требованиями нормативных документов на них.

8 Проведение измерений

8.1 Внешний осмотр

При внешнем осмотре устанавливают соответствие образцов следующим требованиям.

8.1.1 Образцы не должны иметь перечисленных ниже неисправностей:

- механических повреждений и трещин наружных поверхностей;
- наличия внутри образца посторонних предметов или отслоений.

8.2 Опробование

При опробовании проверяют:

- исправность электрических соединителей для подключения внешних цепей к образцу;
- сопротивление потенциальных и токовых выводов образцов осуществляется с применением медных электродов.

8.3 Определение действительного значения сопротивления

Действительное значение сопротивления образца переменного тока R_i определяют с применением нижеперечисленных методов:

- Прямое измерение с помощью цифрового омметра на постоянном токе.

Образец подключают к цифровому омметру (далее - омметр) в соответствии с указаниями технической документации на омметр. Сопротивление соединительных проводов и кабелей должно быть менее 0,1 допускаемой погрешности измерений, в противном случае его следует учитывать при измерениях. За действительное значение сопротивления образца принимают показание омметра. Выполняют многократные

СТ РК 2.XXX-20__

измерения, не менее 10 измерений, каждые 5 минут, в соответствии с требованиями технической документации на омметр. Проводят измерения не менее 6 часов. При этом измерений первого часа при дальнейших расчетах исключаются. Для исключения влияния термоэлектрического эффекта, измерение проводят при двух направлениях тока питания. За результат измерения принимают среднеарифметическое значение результатов измерений при двухнаправлениях тока.

– Измерение с помощью RLC-метра.

Действительное значение сопротивления образца с помощью RLC-метра определяют прямым измерением при двухзажимном или четырехзажимном подключении в соответствии с указаниями технической документации на RLC-метр. За действительное значение сопротивления принимают показание RLC-метра. Измерение проводят не менее 10 раз в каждой точке, распределенных в диапазоне частоте от 1 кГц до 1 МГц.

9 Оценка неопределенности при калибровке

9.1 Модель измерения и оценка входных величин

9.1.1 Значение сопротивления образца R_x определяется по формуле (1):

$$R_x = \bar{R}_x + R_M + R_S + R_D + R_T, \quad (1)$$

где \bar{R}_x – среднее арифметическое измеренное значение;

R_M – поправка на погрешность измерительной системы;

R_S – поправка на погрешность номинального значения;

R_D – поправка на нестабильность значений измерителя с момента последней калибровки;

R_T – поправка на температурную зависимость изменений измерителя.

9.1.2 Стандартная неопределенность u_{Rx} вычисляется по формуле (6):

$$u_{Rx} = \sqrt{\sum \frac{(R_i - \bar{R}_x)^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

где R_i – измеренное значение образца;

\bar{R}_x – среднее арифметическое значение образца;

9.1.3 Суммарная стандартная неопределенность вычисляется по следующей формуле (7):

$$U(R_x) = \sqrt{u^2(R_x) + u(R_M)^2 + u(R_S)^2 + u(R_D)^2 + u(R_T)^2}, \quad (7)$$

где $u(R_x)$ – среднее квадратическое отклонение измерений, является стандартной неопределенностью по типу А;

$u(R_M)$ – поправка на погрешность измерительной системы;

$u(R_S)$ – поправка на погрешность номинального значения;

$u(R_D)$ – нестабильность значений измерителя с момента последней калибровки, оценивается на основании практики калибровки, рассчитывается из разницы значений предыдущих калибровок, с учетом количества прошедших лет с момента калибровок;

$u(R_T)$ – температурная зависимость изменений измерителя.

Температурная зависимость определяется как отклонение значения сопротивления меры от значения, установившегося при калибровке, при изменении температуры. Изменение рассчитывается по формуле (2) с учетом известных значений температурных коэффициентов измерителя сопротивления, приведенных в документации или сертификатах калибровки:

$$R_t = R_i + R_{ном} \cdot [\alpha_0 \cdot (t_i - t_0) + \beta \cdot (t_i - t_0)^2], \quad (2)$$

9.2 Анализ неопределенностей входных величин и корреляций

Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

9.3 Бюджет неопределенности

По результатам расчета составляется бюджет неопределенности в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

Величина	Значение	Стандартная неопр $u(x_i)$	Распреде- ление	Кэф. чувст. C_i	Вклад $u_i(y)$ $C_i \times u(x_i)$
1	2	3	4	5	6
\bar{R}_x	-	$u(R_x)$		1	
δR_M	-	$u(R_M)$		1	
δR_S	-	$u(R_S)$		1	
δR_D	-	$u(R_D)$		1	
δR_T	-	$u(R_T)$		1	

Примечания
 \bar{R}_x - среднее арифметическое значение калибруемой меры;
 δR_S - стандартная неопределенность эталонной меры;
 δR_D - нестабильность значений эталонной меры с момента последней калибровки, оценивается на основании практики калибровки, рассчитывается из разницы значений предыдущих калибровок, с учетом количества прошедших лет с момента калибровок;
 δR_T - температурная зависимость изменений эталонной меры.

9.4 Расчет расширенной неопределенности

Расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата $k=2$. Она соответствует для нормального распределения отклонению от среднего с вероятностью охвата приблизительно 95 %.

$$U = k \cdot U(R_x) \quad (9)$$

9.5 Представление результата измерений

Результат измерений представляют в виде (10):

$$R_x = \bar{R}_x \pm U \quad (10)$$

10 Оформление результатов калибровки

10.1 Результаты калибровки оформляют сертификатом о калибровке в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025, в котором указывается действительное значение электрического сопротивления меры расширенной неопределенности измерения с указанием коэффициента охвата.

Библиография

[1] Закон Республики Казахстан от 7 июня 2000 года «Об обеспечении единства измерений».

[2] Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 25 декабря 2018 года № 909 «Правил обеспечения метрологической прослеживаемости измерений для субъектов аккредитации и юридических лиц при аккредитации».
