

ДАНН ДЕНИС ДМИТРИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ И
ПРОЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ПАРАМЕТРАМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НА ИМПУЛЬСНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ
ВОЗДЕЙСТВИЕ**

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ТПУ)

Научный руководитель

доктор технических наук
Фурса Татьяна Викторовна

Официальные оппоненты: Люкшин Борис Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой механики и графики

Гордеев Василий Федорович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится « 2 » декабря 2014 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Композиционные строительные материалы широко используются в силовых инженерных сооружениях, надежность и безопасность эксплуатации которых очень важна. Строительные сооружения из бетона эксплуатируются в условиях воздействия статических и динамических нагрузок и значительных сезонных колебаний температуры и влажности. В результате механических и температурно-влажностных воздействий в конструкциях происходят процессы трещинообразования, что в конечном итоге приводит к их разрушению. Для снижения риска и уменьшения последствий непредвиденного разрушения инженерных сооружений необходимо осуществлять мониторинг технического состояния с целью обеспечения своевременного текущего ремонта и реконструкции, повышающих надежность и безопасность их эксплуатации. Чтобы оценить техническое состояние конструкции необходимо определять текущую прочность бетона; оценивать концентрацию трещин и их размеры; определять место локализации в изделии дефектных зон. Существующие механические и ультразвуковые методы неразрушающего контроля обладают рядом недостатков и имеют невысокую точность. Поэтому в последние годы ведутся активные исследования по созданию новых высокоточных методов неразрушающего контроля бетона.

Степень разработанности темы.

Усовершенствованием существующих и разработкой новых методов неразрушающего контроля строительных материалов занимаются научные группы из университетов США, Европы и Азии. В частности Kim J. H., Aggelis D.G. и др. разрабатывают подходы и способы определения размера трещин с использованием поверхностных волн; Algernon D., Chekroun M., Abraham O. и др. разрабатывают бесконтактные методы контроля бетонов с помощью сканирующих виброметров и внедрения пьезоэлементов в изделия. Шевалдыкин В.Г. и Самокрутов А.А. занимаются усовершенствованием ультразвуковых методов и разработкой ультразвукового дефектоскопа для строительных материалов; Sansalone M. J., Mohammad T.G. и др. ведут исследования по разработке импакт эхолокационного метода неразрушающего контроля изделий из бетона, позволяющего исключить влияние структурных шумов. Carpinteri A., Ohno K., Koktavu P., Беспалько А. А. др. для определения начала процессов трещинообразования в материалах и изделиях разрабатывают методы, которые основаны на регистрации и анализе акустической и электромагнитной эмиссии. Однако все эти исследования еще находятся в стадии разработки и далеки от практического использования.

На протяжении ряда лет в Томском политехническом университете изучается явление генерирования переменных электромагнитных полей при импульсном механическом возбуждении гетерогенных неметаллических материалов, и на его основе разрабатываются методы неразрушающего контроля. В данной работе на основе амплитудно-частотного, корреляционного и частотно-временного анализа электрических откликов на ударное возбуждение разработаны критерии и алгоритмы определения глубины

и концентрации трещин и прочности бетона. Разработан переносной программно-аппаратный комплекс, позволяющий производить обследование протяженных изделий из строительных материалов и осуществлять измерения параметров электрического отклика при одностороннем доступе к изделию в условиях воздействия внешних электромагнитных полей.

Цель диссертационной работы: разработать и усовершенствовать алгоритмы и методики неразрушающего контроля дефектности и прочности строительных материалов по параметрам электрического отклика на упругое ударное возбуждение.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать закономерности механоэлектрических преобразований в гетерогенных материалах, содержащих пьезоэлектрические включения и обосновать необходимость поиска амплитудно-независимых критериев определения дефектности и прочности бетона;
2. Изучить реализацию механоэлектрических преобразований на моделях строительных материалов с искусственными и естественными дефектами различного размера и концентрации, выявить информативные параметры электрического сигнала и разработать критерии определения дефектности бетона;
3. Разработать алгоритм текущего контроля прочности строительных материалов в процессе дефектообразования, вызванного циклическим замораживанием-оттаиванием;
4. Исследовать природу влияния влажности строительных материалов на параметры электрического отклика и разработать рекомендации по ее учету при неразрушающем контроле;
5. Разработать и создать программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять измерения параметров электрического отклика на импульсное механическое воздействие при одностороннем доступе к изделию и производить обследование протяженных объектов.

Объект исследования – электрический отклик, возникающий в результате механоэлектрических преобразований в гетерогенных неметаллических материалах.

Предмет исследования - разработка неразрушающего метода контроля дефектности и прочности строительных материалов по параметрам электрического отклика на упругое ударное воздействие изделия.

Научная новизна работы.

1. Установлено, что различия в спектральной амплитуде электрических сигналов, регистрируемых из различных областей пьезосодержащего материала, связаны со случайной ориентацией пьезоэлектрических осей пьезокварца относительно электрического приемника.
2. Изменение величины электрического сигнала в процессе увлажнения материала, является результатом двух конкурирующих процессов: шунтирование источников акустоэлектрических преобразований окружающим их влажным слоем и уменьшение

электрического сопротивления между источником и электрическим приемником; а трансформация спектрального состава электрических откликов связана с изменением упругих характеристик материала в процессе его увлажнения.

3. Показано, что увеличение глубины трещины в бетоне приводит к экспоненциальному уменьшению коэффициента взаимной корреляции спектров электрических откликов из исследуемого и бездефектного образцов.

4. Установлено, что увеличение концентрации трещин приводит к линейному возрастанию коэффициента затухания спектральной энергии электрических сигналов при любой ориентации трещин относительно друг друга и приемного датчика.

5. Разработан алгоритм определения прочности образцов бетона, основанный на использовании обобщенного амплитудно-независимого параметра, представляющего собой, отношение величины смещения по частоте спектра электрического сигнала из исследуемого образца относительно спектра эталона, при котором наблюдается максимальный коэффициент их взаимной корреляции, к величине этого коэффициента (защищен патентом РФ № 2453824, 2012 г.).

Теоретическая значимость работы:

Предложен и теоретически описан механизм механоэлектрических преобразований в пористых неметаллических материалах в процессе изменения влажности.

Практическая значимость работы:

На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны алгоритмы контроля дефектности, прочности и влажности бетона, подтвержденные патентами. Разработан и изготовлен макет программно-аппаратного комплекса, позволяющий производить обследование протяженных объектов путем их сканирования выносным измерительным зондом. Комплекс позволяет производить ударное возбуждение с различной силой, осуществлять регистрацию электрического отклика с регулируемой частотой оцифровки, производить быстрое Фурье-преобразование, усреднение и обработку данных (защищен патентом на полезную модель № 100233, 2011 г.).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обоснование необходимости разработки амплитудно-независимых диагностических параметров электрического отклика для неразрушающего контроля строительных материалов, связанной со случайной ориентацией электрических осей источников механоэлектрических преобразований и влиянием влажности на электрические характеристики материалов.

2. Критерии определения глубины и концентрации трещин в бетоне на основе анализа спектральных характеристик и затухании энергии электрического отклика.

3. Алгоритм неразрушающего контроля прочности бетона на основе амплитудно-частотного и корреляционного анализа характеристик электрического отклика на упругое ударное возбуждение.

4. Разработанный программно-аппаратный комплекс для неразрушающего контроля дефектности и прочности бетона по параметрам электрического отклика на

ударное возбуждение, позволяющий производить испытание при одностороннем доступе к объекту и обследовать протяженные изделия из бетона путем их сканирования выносным измерительным зондом.

Реализация результатов работы. Работы выполнялись в рамках гранта РФФИ № 11-08-01103-а на 2011-2013 гг.; проекта (2.1.2/1697) по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009-2010 гг.»; проекта в рамках государственного задания «Наука» № 7.1826.2011 на 2011-2013 гг.

Разработан и введен в действие стандарт организации СТО ИНК 001-2012 «Методика регистрации электрического отклика на упругое ударное возбуждение гетерогенных неметаллических материалов». Результаты исследований и разработанный комплекс используется в учебном процессе при выполнении магистерских и кандидатских диссертаций в Национальном исследовательском Томском политехническом университете по специальности «Приборы и методы неразрушающего контроля».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, подтверждена теоретически и экспериментально, научные положения аргументированы, выводы подтверждены достаточным объемом экспериментальных исследований, выполненных с применением современной техники и обработкой данных с помощью стандартных и специальных программ в среде программирования LabView 9.0, удовлетворительным совпадением расчетных результатов с экспериментальными данными.

Методология и методы исследования

При выполнении работы применялись стандартные и специально разработанные приборы, в экспериментальных исследованиях и при обработке результатов использовались методы физического моделирования, амплитудно-частотного, корреляционного, частотно-временного и регрессионного анализа.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы представлялись на: международной научной конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьёва «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», (г.Томск, 2009г.); XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», (г.Томск, 2009г.); международной научно-практической конференции «Строительство - 2010» (г.Ростов-на-дону, 2010г.); XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г.Томск, 2011г.); VIII Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г.Томск, 2011г.); Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Методы и средства неразрушающего контроля» (г.Томск, 2011г.); XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г.Томск, 2012г.); VII Российской конференции «Механика микронеоднородных материалов и

разрушение» (г.Екатеринбург, 2012г.); IX Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (г.Томск, 2012г.); IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (г.Красноярск, 2012г.); 6-й Международной научной конференции «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (г. Санкт-Петербург, 2012г.); Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012» (г.Москва, 2012г.);

Личный вклад автора.

Совместно с руководителем автором сформулированы цель и задачи исследования. Автором разработаны способы определения дефектности и прочности гетерогенных строительных материалов, проведены лабораторные эксперименты, обработка и анализ полученных результатов. Автор принимал активное участие в разработке и изготовлении программно-аппаратного комплекса для неразрушающего контроля протяженных изделий из строительных материалов. Принимал участие в написании статей, оформлении патентов и представлял результаты исследований на всероссийских и международных конференциях.

Публикации. Соискатель является соавтором свыше 20 научных работ по теме диссертации, в том числе 10 - в изданиях, рекомендованных ВАК России, 1 монография, 1 учебное пособие, 2 патента на изобретение и 1 на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, приложения. Диссертация изложена на 131 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков, 2 таблицы. Список использованной литературы составляет 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна.

Первая глава посвящена современному состоянию проблемы неразрушающего контроля гетерогенных строительных материалов. В главе представлены существующие методы неразрушающего контроля такие как, механические и акустические, описаны их преимущества и недостатки. Описаны способы их усовершенствования и разработки новых высокоточных методов для контроля строительных материалов.

Данная работа является продолжением исследований в этом направлении и посвящена проблеме разработки критериев и алгоритмов определения прочности и дефектности гетерогенных строительных материалов.

Вторая глава посвящена изложению средств методического и аппаратного обеспечения исследований.

Основные исследования были выполнены на лабораторной установке, позволяющей производить импульсное механическое возбуждение материалов и регистрацию электрического отклика.

В главе описана методика измерения электрического отклика с помощью лабораторной установки, а также приведено описание специальных программ для обработки сигналов, написанных в среде программирования LabView 9.0. Описаны дополнительные методики, которые были использованы при проведении исследований.

Третья глава посвящена выбору и обоснованию основного подхода к решению задачи неразрушающего контроля строительных материалов методом, основанном на явлении механоэлектрических преобразований.

Суть метода заключается в возбуждении образца коротким механическим ударом, при котором возникает сферическая акустическая волна. Под действием механических напряжений, обусловленных акустическими волнами, происходит смещение двойных электрических слоев, расположенных на границах компонентов в гетерогенном материале, либо возникновение пьезоэлектрического эффекта в пьезосодержащих материалах, следствием чего, является возникновение внешнего электромагнитного поля, которое регистрируется приемниками сигнала, расположенными вблизи исследуемого объекта. Поэтому параметры регистрируемого сигнала определяются процессами рассеяния акустических волн на структурных неоднородностях и дефектах и могут быть использованы для их контроля.

В проведенных ранее исследованиях разрабатывались методы, основанные на анализе амплитудных характеристик электрического отклика. Однако в некоторых случаях при использовании такого подхода наблюдались значительные погрешности в определении дефектности и прочности материалов.

Приведенными в данной главе исследованиями на физических моделях, содержащих пьезоэлектрические включения, показано, что амплитуда электрического сигнала определяется ориентацией электрических осей источников-диполей относительно электрического приемника и является результатом векторного сложения электрических полей от отдельных источников. В реальных образцах электрические оси источников механоэлектрических преобразований имеют случайное направление. Исследованиями на цементно-песчаных образцах установлено различие в амплитуде электрических сигналов, регистрируемых из идентичных по составу образцов и из различных областей одного и того же образца. Поэтому, использование амплитуды электрического отклика в качестве критерия неразрушающего контроля пьезосодержащих строительных материалов является нецелесообразным.

Строительные конструкции эксплуатируются в различных влажностных условиях. Для создания метода, позволяющего осуществлять контроль изделий любой влажности, были проведены исследования закономерностей механоэлектрических преобразований в строительных материалах в условиях изменения их влажности.

Предложена электрическая схема замещения электрического отклика при механоэлектрическом преобразовании в образце (рисунок 1), состоящая из двух контуров.

Согласно схеме замещения выражение для амплитуды сигнала (U) имеет следующий вид:

$$U = \frac{E \cdot Z_{sh} \cdot R}{Z_{sh} \cdot Z_0 + (Z_0 + Z_1 + Z_2 + R) \cdot (Z_{sh} + Z_0)}$$

, где $Z_2 = 1/j \cdot \omega \cdot C$, E – ЭДС источника, Z_{sh} – полное шунтирующее электрическое сопротивление, R – измерительное сопротивление, Z_0 – внутреннее сопротивление источника E , Z_1 – полное электрическое сопротивление между источником сигнала и поверхностью образца; C – емкость между поверхностью образца и пластиной приемника.

Таким образом, изменение величины электрического сигнала в процессе изменения влажности материалов, является результатом двух конкурирующих процессов. С одной стороны происходит шунтирование пьезоэлектрических источников окружающим их влажным слоем, которое приводит, согласно электрической схеме замещения, к уменьшению сигнала. С другой стороны уменьшение электрического сопротивления между источником механоэлектрических преобразований и электрическим приемником, приводит, согласно той же схеме замещения, к возрастанию сигнала. При определенных условиях увлажнения, геометрии расположения источников механоэлектрических преобразований и их эффективности электрический сигнал может, как уменьшаться, так и возрастать. Проведенными экспериментальными исследованиями на модели с единичным пьезоэлектрическим включением подробно рассмотрен процесс послойного увлажнения и показано хорошее соответствие предложенной модели с экспериментальными данными.

Следовательно, использование амплитуды в качестве информативного параметра для неразрушающего контроля пьезосодержащих строительных материалов, имеющих различную влажность, может давать значительные погрешности, поэтому необходима разработка амплитудно-независимых диагностических критериев.

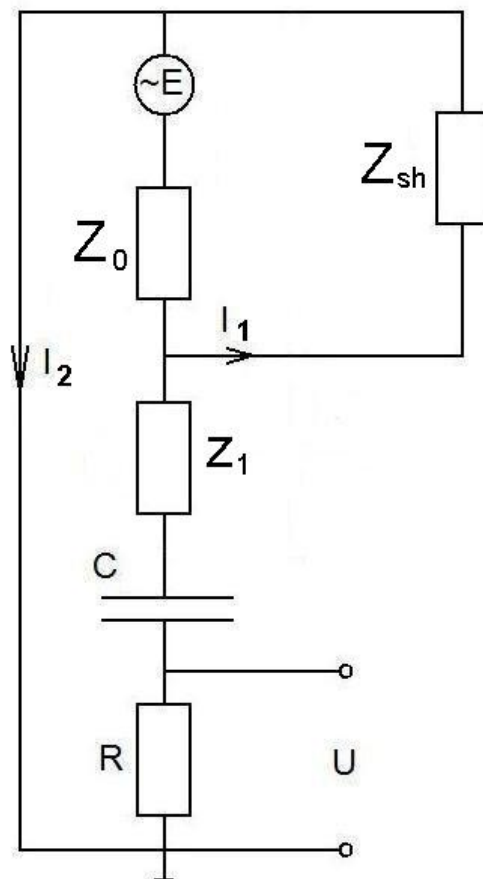


Рисунок 1. Электрическая схема замещения цепи сигнала при механоэлектрическом преобразовании в образце

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов определения дефектности и прочности гетерогенных строительных материалов.

Наиболее важной технической характеристикой силовых конструкций из строительных материалов является прочность. В процессе эксплуатации конструкций прочность может значительно снижаться в результате появления трещин, увеличения их размера и концентрации. Кроме того проблема определения глубины поверхностных трещин имеет важное самостоятельное значение. При достижении поверхностной трещиной глубины равной толщине защитного слоя из бетона в железобетоне влага начнет проникать к арматуре и вызовет ее коррозию, что приведет к ускорению процессов разрушения конструкции.

Проведенными многочисленными экспериментальными исследованиями было показано, что наличие в материале искусственных и естественных трещин, изменение их глубины и концентрации приводит к изменению характера затухания электрических откликов и соотношения спектральных пиков. Поэтому в качестве амплитудно-независимых критериев определения дефектности было предложено использовать максимальный коэффициент взаимной корреляции спектральной характеристики электрических откликов из дефектного образца со спектром сигнала из бездефектного образца и коэффициент затухания энергии электрических откликов на основе частотно-временного анализа электрических откликов.

Исследования влияния глубины трещины на параметры электрического отклика проводилось вначале на образцах бетона с искусственной трещиной, создаваемой путем последовательного пропила на отрезном станке, а затем в процессе прорастивания естественной трещины. Создание естественной трещины в моделях осуществлялось следующим образом. В образце по его центру делался пропил на глубину 5 мм. Затем в этот пропил вставлялся металлический клин, и производилось нагружение системы образец-клин на ручном прессе. Обычно процесс прорастания трещины в образце разделялся на 4-6 этапов. На каждом этапе нагружения глубина трещины увеличивалась на 1-2 см. Глубина трещины оценивалась визуально. Последовательно, на каждом этапе прорастивания трещин, производилась регистрация электрических откликов и их обработка.

На рисунке 2 приведены графики изменения коэффициента взаимной корреляции спектра сигнала из образца с трещиной со спектром сигнала из бездефектного образца и коэффициента затухания энергии электрических откликов в зависимости от глубины трещины.

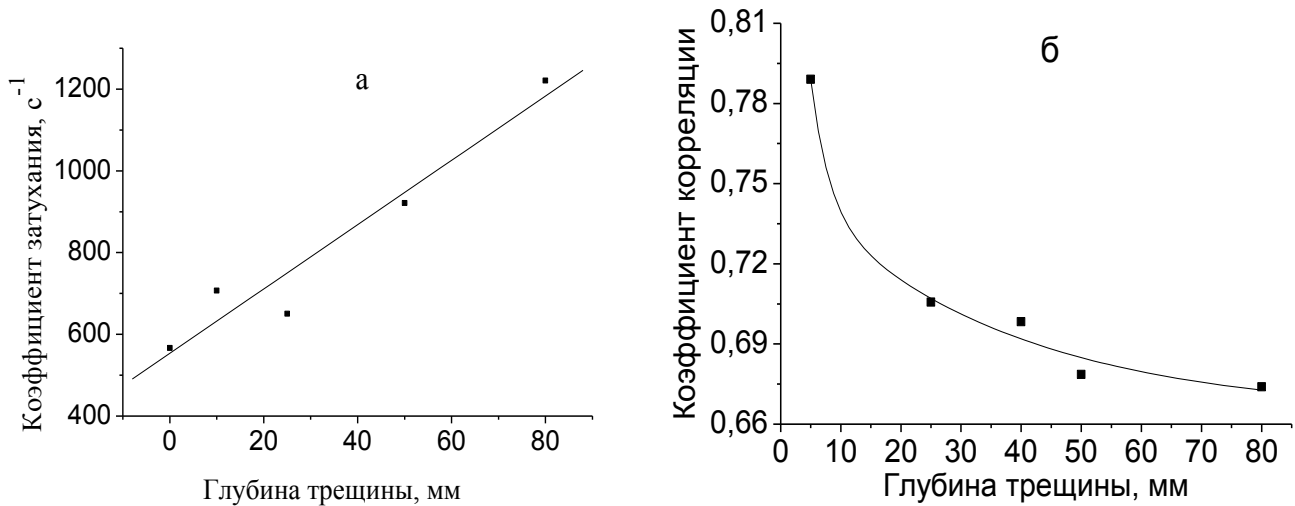


Рисунок 2. Зависимости коэффициента затухания энергии электрического отклика (а) и коэффициента взаимной корреляции спектров электрических откликов из исследуемого и бездефектного образцов (б) от глубины трещины

Из рисунка видно, что наилучшим образом глубину трещины (h) отслеживает максимальный коэффициент взаимной корреляции (r_{max}), он уменьшается при прорастании реальной трещины по экспоненциальной зависимости $r_{max} = 0,67 + 0,15 \cdot e^{-0,057h}$ с коэффициентом детерминации 0,98, в то время как зависимость коэффициента затухания от глубины трещины описывается уравнением вида $\beta = 554 + 7,9h$ с коэффициентом детерминации 0,94.

Исследования влияния концентрации трещин на параметры электрического отклика проводилось сначала на цементно-песчаных образцах с искусственными трещинами. Одинаково ориентированные трещины создавались путем пропилов на отрезном станке, а различно ориентированные путем введения в форму с жидким цементно-песчаным раствором полиэтиленовых пластин, которые через 3 часа после затвердевания удалялись и в образцах оставались полости моделирующие трещины соответствующего размера, локализованные с одной стороны образца. Создание в материалах естественных трещин и изменение их концентрации производилось путем циклического замораживания-оттаивания.

Было установлено, что во всех случаях наилучшим образом отслеживает концентрацию трещин коэффициент затухания спектральной энергии электрических сигналов.

На рисунке 3 приведены графики изменения коэффициента корреляции спектра сигнала из дефектного образца со спектром отклика из бездефектного образца и коэффициента затухания энергии электрических откликов в зависимости от концентрации трещин.

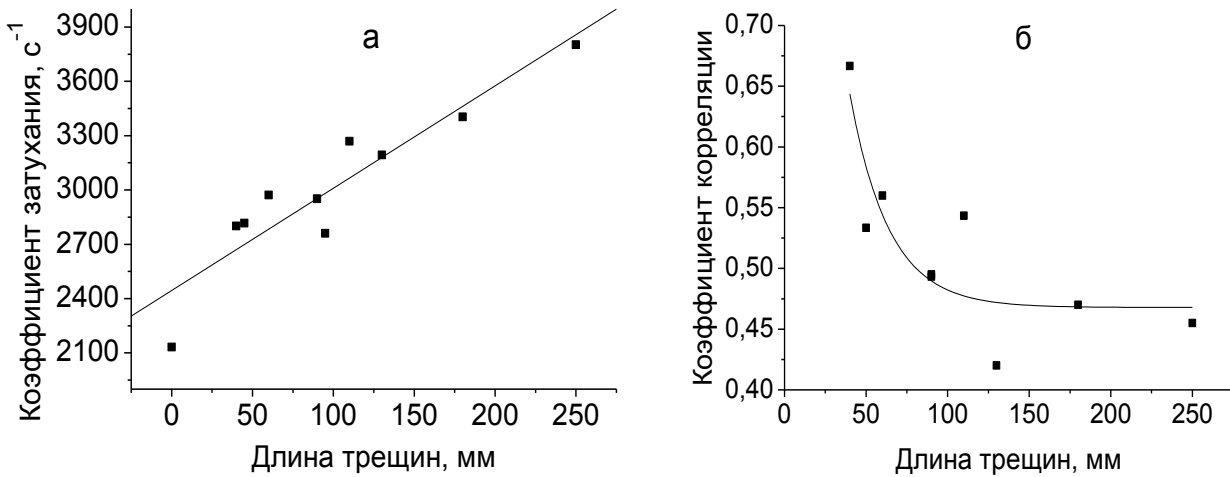


Рисунок 3. Зависимости коэффициента затухания энергии электрического отклика (а) и коэффициента взаимной корреляции спектров электрических откликов из исследуемого и бездефектного образцов (б) от длины трещин

Зависимость коэффициента затухания (β) энергии электрических откликов от суммарной длины естественных трещин (L) хорошо описывается линейной зависимостью $\beta = 2445 + 5,65L$, коэффициент детерминации составляет 0,86, а зависимость коэффициента взаимной корреляции спектров электрических откликов из исследуемого и бездефектного образцов от длины трещин описывается экспонентой вида $r_{\max} = 0,47 + 0,93 \cdot e^{-0,042L}$ с коэффициентом детерминации 0,75.

Следовательно, в качестве критерия определения глубины трещины может быть использован коэффициент взаимной корреляции спектра сигнала из дефектного образца со спектром сигнала из бездефектного образца, а для оценки концентрации различным образом ориентированных трещин может быть использован коэффициент затухания спектральной энергии электрических сигналов.

В рамках работы был осуществлен поиск диагностического параметра электрического отклика для определения текущей прочности строительных материалов, которая изменяется в условиях эксплуатации за счет протекания процессов трещинообразования. Для создания различной дефектности, которая приводит к изменению прочности, были использованы климатические испытания путем замораживания-оттаивания образцов. Из образцов прошедших разное количество циклов климатических испытаний, в ходе которых образцы получили поверхностные трещины, были измерены электрические отклики, после чего была определена реальная прочность образцов на сжатие с помощью компьютеризированного пресса и разработан алгоритм определения прочности образцов бетона, основанный на использовании обобщенного амплитудно-независимого параметра:

$$P = \frac{S}{r_{\max}},$$

где: $r_{\max}$ – максимальный коэффициент корреляции амплитудно-частотной харак-

теристики электрического сигнала из исследуемого изделия с амплитудно-частотной характеристикой математического эталона, S – величина смещения по частоте амплитудно-частотной характеристики электрического сигнала из исследуемого изделия относительно амплитудно-частотной характеристики эталона, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции, с^{-1} .

Определение прочности осуществляется по экспериментально полученной градуировочной зависимости, связывающей обобщенный параметр с механической прочностью строительных материалов.

Получены градуировочные зависимости обобщенного электрического параметра с прочностью образцов различных строительных материалов (рисунок 4).

Средняя погрешность определения прочности по предложенному методу составила: для цементно-песчаных образцов – 10 %; для тяжелого бетона – 9,5 %; для легкого бетона – 8,6 %; для армированного бетона – 13 %.

Показано, что точность определения прочности тяжелого бетона по предложенному методу превышает (на 10-15%) точность определения прочности стандартным механическим методом.

Проведенными исследованиями на партии цементно-песчаных образцов показано, что обобщенный параметр отслеживает изменение прочности не только в результате изменения дефектности (трещиноватости), но и в результате изменения влажности.

Следовательно, использование амплитудно-независимого диагностического параметра оценки прочности дает возможность испытывать образцы различной влажности без введения дополнительных коэффициентов и градуировочных зависимостей, учитывающих влияние влажности.

С использованием разработанных в работе диагностических параметров электрического отклика можно одновременно определять дефектность и прочность строительных материалов по алгоритму, приведенному на рисунке 5.

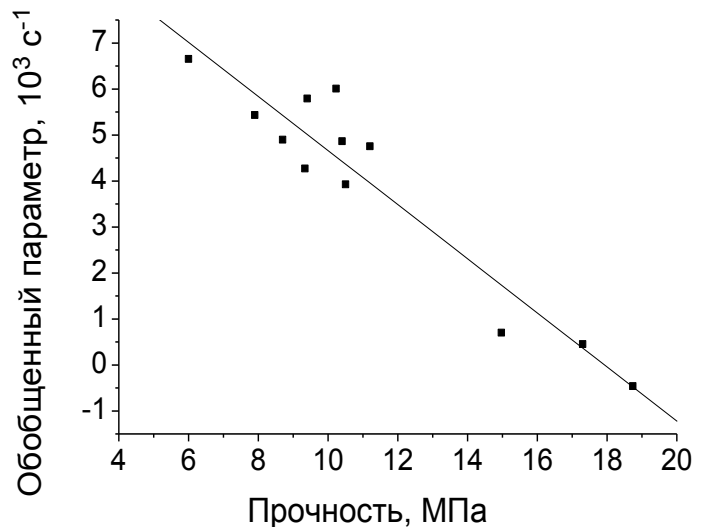


Рисунок 4. Зависимость обобщенного параметра электрического отклика от прочности тяжелого бетона

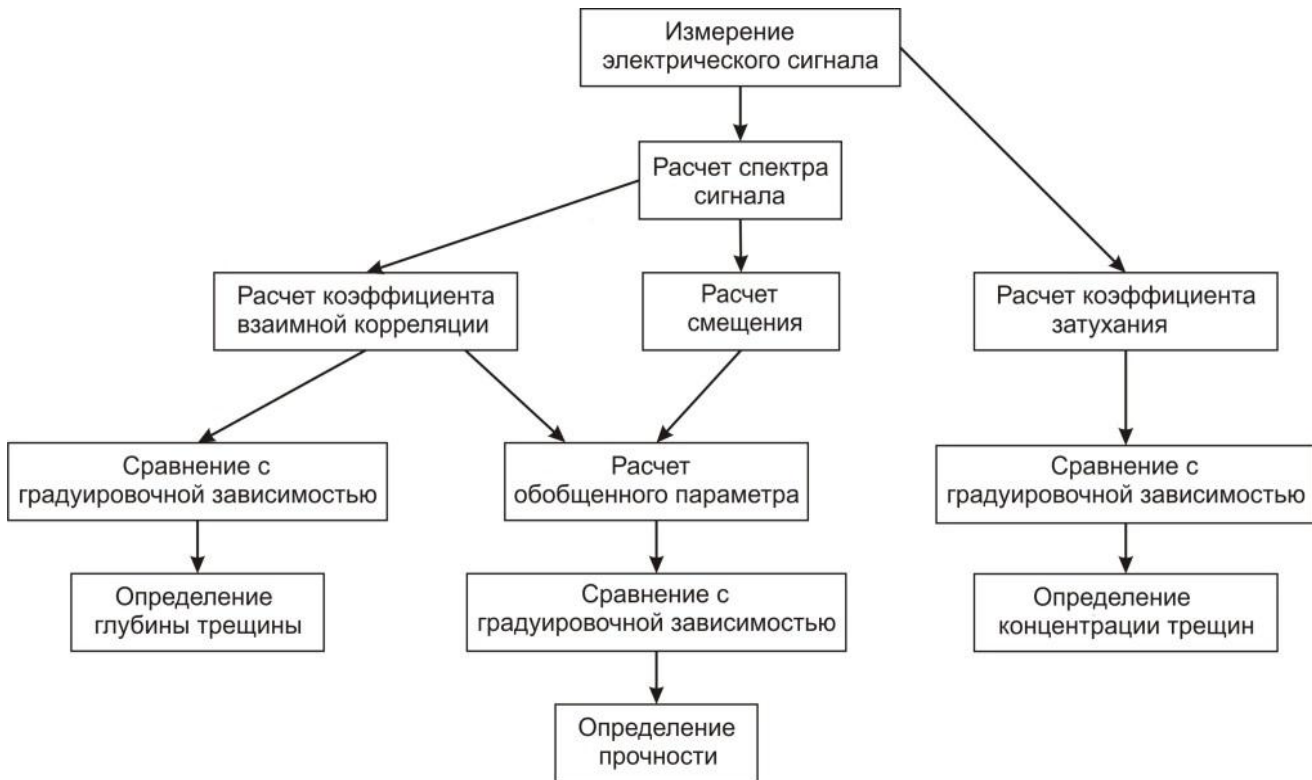


Рисунок 5. Алгоритм неразрушающего контроля дефектности и прочности гетерогенных материалов по параметрам электрического отклика на импульсное механическое воздействие

Пятая глава посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для измерения электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении протяженных гетерогенных строительных материалов.

В рамках данной работы разработан и создан лабораторный макет переносного программно-аппаратного комплекса, позволяющий проводить измерения параметров электрического отклика на упругое ударное воздействие при одностороннем доступе к изделию; проводить измерения в условиях воздействия внешних электромагнитных полей; производить обследование протяженных объектов. Фотография внешнего вида программно-аппаратного комплекса приведена на рисунке 6.

Выносной измерительный зонд представляет собой металлический заземленный стакан, внутри которого, в отдельном металлическом корпусе цилиндрической формы расположен электромагнит, который надежно закреплен во избежание лишних вибраций, которые могут возникать при движении бойка и электрического приемника, а также в непосредственной близости с датчиками для снижения потерь сигналов в проводах, на корпусе ударника закреплен дифференциальный усилитель (рисунок 7).



Рисунок 6. Программно-аппаратный комплекс: 1 – лабораторная модель изделия из тяжелого бетона размером 250×500×100 мм; 2 – выносной измерительный зонд; 3 – блок, содержащий портативные источники питания и плату ввода-вывода.

Для измерения использован дифференциальный электрический датчик, содержащий два приемных электрода измерительный и компенсационный. Использование такого приемника позволяет производить измерение электрического отклика при одностороннем доступе и в условиях воздействия внешних электромагнитных помех. Необходимая сила удара обеспечивается путем подачи напряжения на обмотку электромагнита с импульсного источника питания. Металлический сердечник электромагнита со сферическим наконечником позволяет создавать в материале упругую сферическую волну (находится внутри корпуса ударного устройства и не показан на фотографии). Удар производится по металлической подложке, закрепленной на основании ударного устройства, в результате чего всегда расстояние от точки удара до электрического приемника одинаково. Под-

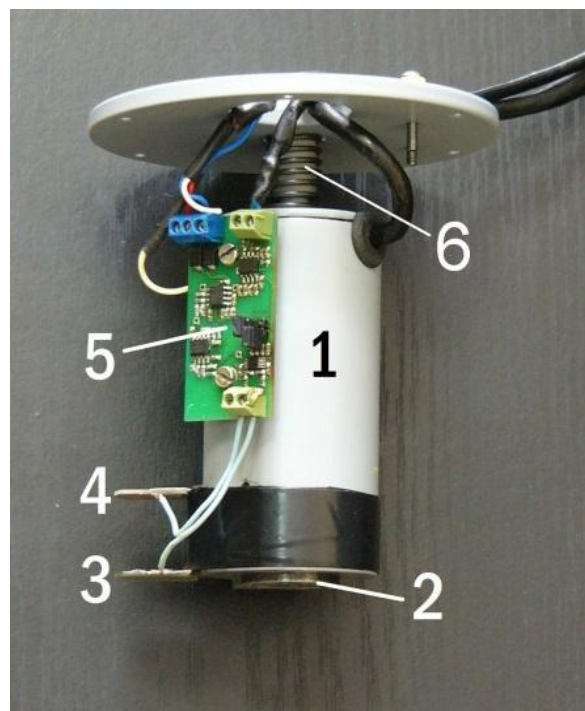


Рисунок 7. Фотография измерительной системы ударник-приемник: 1 – электромеханическое ударное устройство; 2 – металлическая подложка; 3 – измерительный электрод; 4 – компенсационный электрод; 5 – электронная плата дифференциального усилителя, 6 – прижимная пружина.

ложка и наконечник ударного элемента изготовлены из закаленной стали одинаковой твердости для создания упругого удара.

В главе показано, что использование металлической пластины, по которой производится удар, позволяет уменьшить длительность импульса возбуждения по сравнению с ударом по поверхности образца, нормализовать и повысить силу удара, а также практически исключить влияние шероховатости поверхности на параметры электрического отклика. Использование в конструкции прижимной пружины позволяет осуществлять хороший контакт подложки с поверхностью объекта испытания и осуществлять измерения без использования иммерсионных смазок и жидкостей (сухой контакт). Использование выносного измерительного зонда, снабженного длинными проводами, позволяет осуществлять сканирование поверхности протяженных объектов.

В главе проведены исследования по выбору и обоснованию основных технических характеристик регистрирующей системы для неразрушающего контроля дефектности и прочности бетона по параметрам электрического отклика. Измерительная система должна иметь следующие технические характеристики: чувствительность по входу приемного электромагнитного тракта не хуже 100 мкВ; рабочую полосу частот от 1 до 120 кГц; частоту оцифровки 500 кГц; система должна быть оснащена устройством, позволяющим производить быстрое Фурье-преобразование; длительность ударного возбуждения должна быть порядка 60 мкс; для регистрации электрического отклика должен использоваться дифференциальный электрический датчик, позволяющий производить измерения в условиях воздействия внешних электромагнитных помех.

В главе продемонстрированы возможности использования разработанного программно-аппаратного комплекса для определения в протяженном изделии местоположения дефекта.

Исследования были проведены на двух моделях из тяжелого бетона размером 110×200×300 мм. Одна модель не содержала дефектов. Вторая модель содержала искусственный дефект в виде воздушной полости размером 30×20×10 мм, расположенный на глубине 30 мм и на расстоянии 75 мм от края образца. Было проведено пространственное сканирование моделей с помощью выносного измерительного зонда. Сканирование проводилось вдоль длины модели с шагом 25 мм. На рисунке 8 приведены зависимости коэффициента взаимной корреляции спектров электрических откликов, зарегистрированных из различных областей моделей с усредненным спектром сигнала из бездефектной модели.

Из рисунка видно, что в месте нахождения дефекта коэффициент корреляции резко уменьшается, в то время как при сканировании бездефектного образца он находится в одном диапазоне. Приведенные результаты показывают, что использование разработанного комплекса с выносным измерительным зондом позволяет определять местоположение дефекта в изделии из бетона.

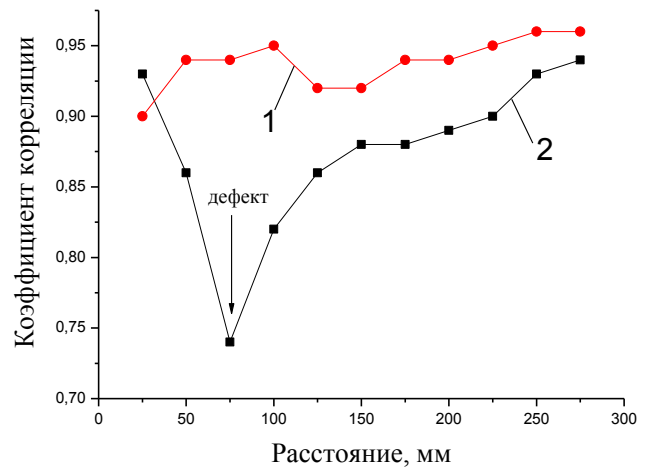


Рисунок 8. Изменение коэффициента взаимной корреляции при сканировании бездефектного образца – (1) и образца с дефектом – (2).

Основные научные результаты и выводы

1. Предложен и экспериментально обоснован выбор амплитудно-независимых диагностических параметров электрического отклика для неразрушающего контроля пьезосодержащих строительных материалов различной влажности.
2. Предложена и теоретически описана модель механоэлектрических преобразований во влажном гетерогенном материале, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.
3. Предложены критерии определения глубины и концентрации трещин в бетоне. В качестве критерия определения глубины трещины предложено использовать коэффициент взаимной корреляции спектральной характеристики электрического отклика дефектного образца со спектром сигнала из бездефектного образца, а для определения концентрации трещин - коэффициент затухания спектральной энергии электрического отклика.
4. Разработан алгоритм определения прочности образцов бетона, основанный на использовании обобщенного амплитудно-независимого параметра электрического отклика на импульсное механическое воздействие. Получены градуировочные зависимости обобщенного электрического параметра с прочностью образцов, которые могут быть использованы для неразрушающего контроля их прочности. Показано, что точность определения прочности тяжелого бетона по предложенному методу превышает (на 10-15%) точность определения прочности стандартным механическим методом.
5. Разработан алгоритм неразрушающего контроля, позволяющий одновременно определять прочность и дефектность строительных материалов.
6. Разработан и изготовлен макет программно-аппаратного комплекса, позволяющий производить ударное возбуждение с различной силой, осуществлять регистра-

цию электрического отклика с регулируемой частотой оцифровки, производить быстрое Фурье-преобразование, усреднение и обработку данных и производить обследование протяженных объектов путем их сканирования выносным измерительным зондом.

7. Предложенный новый метод неразрушающего контроля дефектности и прочности строительных материалов обладает рядом достоинств;

- позволяет производить измерение электрического отклика при одностороннем доступе и в условиях воздействия внешних электромагнитных помех;
- позволяет осуществлять контроль изделий с высокой шероховатостью без использования иммерсионных смазок и жидкостей (сухой контакт);
- обладает высокой чувствительностью к объемным дефектам и неоднородностям при любой их ориентации относительно приемника;
- позволяет определять прочность строительных материалов, имеющих различную влажность, без введения дополнительных коэффициентов и градуировочных зависимостей;
- позволяет осуществлять сканирование протяженных объектов и определение места локализации дефектной области;
- экспрессностью и малогабаритностью.

Основные результаты диссертации изложены в публикациях:

Монография

1. Данн, Д.Д. Неразрушающий контроль строительных материалов по параметрам электрического сигнала при акустическом воздействии: монография [Текст] / Т. В. Фурса, К. Ю. Осипов, Д. Д. Данн. – Томск: ТПУ, 2013 – 176 с. ISBN 978-5-4387-0306-8.

Учебное пособие

2. Данн, Д.Д. Современные методы неразрушающего контроля строительных материалов [Текст] / Т.В.Фурса, А.П.Суржилов, Д.Д.Данн. – Томск: ТПУ, 2014 – 37с.

В изданиях, рекомендованных ВАК России

3. Данн, Д.Д. Разработка метода дефектоскопии гетерогенных диэлектрических материалов, основанного на использовании явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, А.П. Суржилов, Д.Д. Данн // Дефектоскопия – 2010. – № 1. – С. 8-13.

4. Данн, Д.Д. Исследование влияния влажности на параметры механоэлектрических преобразований в бетонах [Текст] / Т.В. Фурса, А.П. Суржилов, Н.Н. Хорсов, Д.Д. Данн Журнал технической физики. – 2010. – т.80 – №9. – С. 63-67.

5. Данн, Д.Д. Механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах содержащих пьезоэлектрические включения [Текст] / Т.В. Фурса, Д.Д. Данн // Журнал технической физики. – 2011. – №. 8. – С. 53-58.

6. Данн, Д.Д. Влияние влажности на параметры электрического сигнала при импульсном механическом возбуждении гетерогенных материалов содержащих пьезоэлектрические включения [Текст] / Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов, Д.А. Нестерук // Дефектоскопия. – 2011. – №. 6. – С. 57-66.

7. Данн, Д.Д. Разработка метода контроля динамики изменения дефектности бетона под действием циклического замораживания-оттаивания на основе явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Письма в журнал технической физики. – 2011. – Т. 37. Вып. 7. – С. 1-7.

8. Данн, Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Дефектоскопия. – 2011. – Т.47. – №. 5. – С. 39-47.

9. Данн, Д.Д. Разработка метода определения дефектности бетона на основе явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Контроль. Диагностика. – 2011. – №. 11. – С. 21-24.

10. Данн, Д.Д. Разработка механоэлектрического метода определения места локализации дефекта в изделии из бетона [текст] / Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов // Контроль. Диагностика. – 2012. – №. 11(173). – С. 66-69.

11. Данн, Д.Д. Связь параметров механоэлектрических преобразований с глубиной трещины в бетоне [Текст] / Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов // Контроль. Диагностика. – 2012. – №. 13. – С. 33-36.

12. Данн, Д.Д. Исследование параметров электрического отклика на упругое ударное возбуждение бетона при его одноосном сжатии [Текст] / Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, А.А. Демихова, П.И. Федотов // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 9. – С. 33-37.

Патенты

13. Пат. № 2408880 Рос. Федерация: МПК G01N 27/60. Способ определения влажности из твердых материалов / Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». № 2009147559/28, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.01.2011. Бюл. № 1.

14. Пат. № 2453824 Рос. Федерация: МПК G01N 3/32. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн. заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». № 2011106692/28, заявл. 22.02.2011; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17.

15. Пат. № 100233 Рос. Федерация: МПК G01D 1/00. Устройство для регистрации электрических и акустических сигналов при механическом возбуждении материалов / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». № 2010114640/28, заявл. 12.04.2010; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 34.

В других изданиях

16. Данн, Д.Д. Разработка импакт электрического метода определения места локализации дефекта в изделии из бетона [Электронный ресурс] / Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов, С.И. Чеховских // Вестник науки Сибири. – 2013. – №. 1(7). – С. 111-116.
17. Данн, Д.Д. Разработка нового неразрушающего метода контроля процесса трещинообразования в бетоне под воздействием климатических факторов [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Технологии бетонов. – 2013. – №. 2. – С. 34-36.
18. Данн, Д.Д. Разработка метода определения концентрации и местоположения трещин в бетонах на основе явления механоэлектрических преобразований [Электронный ресурс] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Вестник науки Сибири. – 2012. – №. 4(5). – С. 89-94.
19. Данн, Д.Д. Разработка неразрушающих методов контроля дефектности и прочности композиционных материалов, основанных на использовании явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов международной научной конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьёва. Томск: ТПУ, 2009. – С. 126-130.
20. Данн, Д.Д. Исследование связи параметров электрического отклика на импульсное механическое возбуждение композиционных диэлектрических материалов с их дефектностью [Текст] / К.Ю. Осипов, И.В. Буканев, Д.Д. Данн // Современные техника и технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск: ТПУ, 2009. – С. 90-91.
21. Данн, Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности наружных железобетонных сооружений, основанного на явлении механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Строительство - 2010: Материалы международной научно-практической конференции. Ростов-на-дону: РГСУ, 2010. – С. 96-97.
22. Данн, Д.Д. Разработка способа определения местоположения и концентрации трещин в строительных материалах на основе явления механоэлектрических преобразований [Электронный ресурс] / Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2011 – Т. 3 – С. 113-114.
23. Данн, Д.Д. Разработка метода определения трещиноватости бетона на основе явления механоэлектрических преобразований [Электронный ресурс] / Д.Д. Данн, К.Ю. Осипов, Т.В. Фурса // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов VIII Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2011 – С. 532-534.
24. Данн, Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля дефектности и прочности бетона по параметрам электрического отклика на упругое ударное возбуждение [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Инновации в неразрушающем контроле

SibTest: сборник научных трудов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле, Томск: ТПУ, 2011 – С. 211-214.

25. Данн, Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля дефектности и прочности бетона по параметрам электрического отклика на упругое ударное возбуждение [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Методы и средства неразрушающего контроля". Томск: ТПУ, 2011 – С. 150-158.

26. Данн, Д.Д. Разработка способа определения прочности бетона на основе явления механоэлектрических преобразований [Электронный ресурс] / К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Современная техника и технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2012 – Т. 3 – С. 87-88.

27. Данн, Д.Д. Разработка способа определения трещиноватости строительных материалов на основе явления механоэлектрических преобразований [Текст] / К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Механика микронеоднородных материалов и разрушение: тезисы докладов VII Российской конференции. Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2012 – С. 26.

28. Данн, Д.Д. Неразрушающий метод контроля прочности бетона по параметрам электрического отклика на ударное возбуждение [Электронный ресурс] / К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн, Т.В. Фурса // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов IX Международной конференции студентов и молодых учёных. Томск: ТПУ, 2012 – С. 758-760.

29. Данн, Д.Д. Неразрушающий метод контроля прочности строительных материалов на основе явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Д.Д. Данн // Безопасность и живучесть технических систем: труды IV Всероссийской конференции. Красноярск: СКТБ "Наука" КНЦ СО РАН, 2012 – Т. 2 – С. 67-72.

30. Данн, Д.Д. Разработка нового неразрушающего метода контроля процесса трещинообразования в бетоне под воздействием климатических факторов [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: сборник докладов 6-й Международной научной конференции. Санкт-Петербург: СПб ГАСУ, 2012 – С. 61-64.

31. Данн, Д.Д. Разработка способа определения местоположения и концентрации трещин в строительных материалах на основе явления механоэлектрических преобразований [Текст] / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012». Москва: МГТУ, 2012 – С. 156-159.