

На правах рукописи



БАРДАКОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ

**АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА БЕТОННЫХ И
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ ТВЕРДЕНИЯ И
ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

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

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре диагностических информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Барат Вера Александровна**

доктор технических наук, доцент кафедры
Диагностических информационных технологий
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

**Официальные
оппоненты:**

Бехер Сергей Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедры
Электротехника, диагностика и сертификация,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет путей сообщения»

Казначеев Павел Александрович

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник ФГБУН Институт физики Земли им.
О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Ведущая организация:

АО "Всероссийский научно-исследовательский
институт по эксплуатации атомных
электростанций"

Защита диссертации состоится «28» сентября 2021 г. в 12 часов 00 мин. На заседании диссертационного совета МЭИ.001 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, в Зале Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета МЭИ.001,
д.т.н., доцент



Барат В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из важнейших задач современного строительства является обеспечение надежности и безопасности зданий и сооружений как на этапе строительства, так и на этапе последующей эксплуатации. Так как бетон и железобетон (ЖБ) являются ключевыми материалами, используемыми при строительстве зданий и сооружений, актуальной является задача оценки их технического состояния.

Традиционно оценка технического состояния бетонных и ЖБ конструкций осуществляется с помощью периодического контроля. Однако периодический контроль не позволяет фиксировать резкие изменения в состоянии конструкции между осмотрами и является крайне трудоемким. В связи с этим актуальной задачей является проведение мониторинга бетонных и ЖБ конструкций. Перспективным методом неразрушающего контроля, используемым в составе систем комплексного диагностического мониторинга, является метод акустической эмиссии (АЭ), который хорошо зарекомендовал себя при мониторинге опасных производственных объектов благодаря своей высокой чувствительности к развивающимся дефектам, интегральности и возможности дистанционного контроля.

Бетон является уникальным строительным материалом, прочность которого не является фиксированной, а возрастает с течением времени. В течение 28 суток после бетонирования, бетон должен набрать не менее 100 процентов от своей марочной прочности. В результате влияния негативных погодных условий, технических отклонений при приготовлении состава или нарушения технологии бетонирования, прочность бетона может оказаться ниже нормативной, а комплексное техническое состояние конструкции неудовлетворительным еще на стадии строительства. Исходя из всего вышесказанного, для строящихся бетонных и ЖБ конструкций актуальной является задача проведения мониторинга как на этапе твердения, с целью определения прочностных характеристик, так и на этапе последующей эксплуатации, с целью оценки комплексного технического состояния конструкции. В качестве объектов исследования на стадии твердения в данной работе будут рассматриваться как бетонные, так и ЖБ конструкции, а на стадии эксплуатации ЖБ конструкции на примере ЖБ балок прямоугольного сечения, подверженных изгибным нагрузкам, которые широко используются при строительстве мостов, путепроводов, эстакад и тоннелей.

Цель работы и задачи исследования

Целью данной работы является повышение достоверности результатов диагностики бетонных и ЖБ балочных конструкций за счет разработки новых методов АЭ контроля на стадии твердения и последующей эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования АЭ, излучаемой в процессе твердения бетонов в виде бетонных образцов и ЖБ конструкций из составов наиболее часто используемых в строительстве.
2. Разработать модель структурообразования бетона, позволяющую выделять методом АЭ различные периоды: растворения, ускоренный (схватывания), кристаллизации (твердения).
3. Разработать метод и автоматизированный алгоритм прогнозирования прочности бетона к сроку 28 суток с использованием АЭ параметров, зарегистрированных на начальных периодах структурообразования.
4. Провести экспериментальные исследования АЭ при разрушении натуральных моделей ЖБ балок.
5. Разработать АЭ модель разрушения ЖБ балок, позволяющую выделять стадийность их разрушения.
6. Разработать методы оценки технического состояния ЖБ балок с применением АЭ.

Научная новизна и теоретическая ценность работы

1. Разработана универсальная АЭ модель структурообразования бетонов, позволяющая по динамике накопления импульсов АЭ выделять основные периоды структурообразования: растворения, ускоренный (схватывание), твердение (кристаллизации) для бетонов различной прочности и состава.
2. Прочность бетона для бетонных и ЖБ конструкций в возрасте 28 суток коррелирует с длительностью акустического затишья, а также активностью АЭ на стадии кристаллизации. Минимальное значение коэффициента корреляции составляет 0,97.
3. Разработана АЭ модель разрушения ЖБ балок, позволяющая по изменению вида функциональной зависимости числа импульсов АЭ (N_{Σ}) от нагружающего параметра (P) выделять стадийность разрушения ЖБ балки.

Практическая ценность работы

1. Разработаны методика и автоматизированный алгоритм прогнозирования прочности бетона, позволяющие с использованием АЭ параметров, измеренных в течение не более чем первых двух суток после бетонирования, оценивать прочность бетона к сроку 28

суток. Относительная погрешность прогнозирования с использованием автоматизированного алгоритма для ЖБ балок не более 11 %.

2. Разработан метод визуализации зон локальных повреждений ЖБ балок в виде нормальных сечений, который осуществляется на основании параметра *b-value*, соответствующего тангенсу угла наклона амплитудного распределения импульсов АЭ.

3. Предложен метод диагностики ЖБ балок, основанный на расчете отношения кумулятивных энергий импульсов АЭ, позволяющий фиксировать переход конструкции из стадии допустимой эксплуатации к стадии разрушения. Установлено, что значение нормированного отношения кумулятивных энергий менее 0,1 соответствует остаточной прочности ЖБ балки 20 % и менее.

Методология и методы исследования

С целью построения модели по прогнозированию прочности бетона проводились экспериментальные исследования по твердению бетонных кубических образцов и ЖБ балок, отличающихся друг от друга проектным классом бетона и прочностью. Для анализа АЭ данных, построения прогностических моделей и разработки алгоритмов использовались методы цифровой обработки сигналов, методы обнаружения разладки случайных процессов, методы проверки статистических гипотез, корреляционного и регрессионного анализа. Для оценки точности полученных моделей и алгоритмов использовались методы оценки погрешностей косвенных измерений.

С целью исследования и разработки методов диагностики ЖБ конструкций проводились испытания ЖБ балок на трехточечный изгиб циклически увеличивающейся нагрузкой вплоть до разрушения на сервогидравлической нагружающей установке Instron 8802 с параллельной регистрацией АЭ данных. В процессе анализа АЭ данных и разработки диагностических критериев использовались методы статистического анализа амплитудных распределений, а также анализ функциональных зависимостей $N_{\Sigma}(P)$.

Положения, выносимые на защиту

1. АЭ модель структурообразования бетона, позволяющая по динамике накопления импульсов АЭ выделять основные периоды структурообразования: растворения, ускоренный (схватывание), твердение (кристаллизации).

2. Прочность бетона и ЖБ в возрасте 28 суток коррелирует с длительностью акустического затишья, а также активностью АЭ на стадии кристаллизации. Минимальное значение коэффициента корреляции составляет 0,97.

3. Автоматизированный алгоритм прогнозирования прочности бетона к сроку 28 суток с использованием параметров АЭ, зарегистрированных в течение не более чем первых двух суток после бетонирования.

4. Метод диагностики ЖБ балок, позволяющий с использованием АЭ данных определять: момент образования первой трещины, момент нарушения совместной работы арматуры с бетоном, а также фиксировать переход конструкции из стадии допустимой эксплуатации к стадии разрушения.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных в работе данных обеспечивалась проведением испытаний при помощи поверенного оборудования, использованием методик, соответствующих ГОСТ, репрезентативным набором образцов, отобранных для экспериментальных исследований.

Верификация полученных моделей прогнозирования прочности была проведена путем сопоставления с экспериментальными данными прямого измерения прочности, а достоверность автоматизированных алгоритмов обработки данных была подтверждена по сопоставлению с экспертной оценкой.

Разработанные методы диагностики базируются на фундаментальных положениях теории разрушения бетона и ЖБ и не противоречат существующей теоретической и практической базе метода АЭ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

8-ой международной конференции по акустической эмиссии «ШАЕ2016», Япония, Киото, 2016 год; XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Россия, Москва, 2017 год; Мировой конференции по акустической эмиссии «WCAE 2017», Китай, Сиань, 2017; Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода АЭ» (АПМАЭ), Россия, Тольятти, 2018 год; XXIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Россия, Москва, 2018 год; Круглом столе «Территория NDT2018. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика», Россия, Москва, 2018; XXV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Россия, Москва, 2019 год.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 3 – в журналах из перечня ВАК, 3 – в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus и 8 тезисов докладов научно-технических конференций.

Личный вклад автора

Организация и проведение измерительной части экспериментов с применением метода АЭ. Обработка результатов зарегистрированных АЭ данных твердения бетонных образцов и ЖБ балок, разработка модели, методики и автоматизированного алгоритма

прогнозирования прочности бетона к сроку 28 суток, обработка АЭ данных разрушающих испытаний, разработка методов диагностики ЖБ балок, подверженных изгибным нагрузкам.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 116 страницах, содержит 55 рисунков, 12 таблиц и состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка литературы из 110 наименований, исключая публикации автора и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен литературный обзор, посвященный анализу существующих методов и подходов к решению задач, сформулированных в диссертационном исследовании. Проведен сравнительный обзор традиционных методов НК применительно к задаче диагностики бетонных и ЖБ конструкций на стадии твердения и эксплуатации, отмечены их возможности, достоинства и недостатки. Обоснована актуальность применения метода АЭ для достижения поставленных целей и задач. Рассмотрены физические основы метода АЭ. Представлен подробный обзор литературных источников, посвященных применению метода АЭ для исследования структурообразования и последующего твердения бетонов, а также обзор существующих методик, регламентированных стандартов, критериев и подходов, предназначенных для диагностики ЖБ конструкций в процессе эксплуатации методом АЭ.

Во **второй главе** представлено описание материалов и объектов исследования, измерительной аппаратуры и экспериментальных методов, используемых в диссертационной работе. Для достижения целей и задач, сформулированных в диссертационной работе, было изготовлено два типа образцов: в виде бетонных кубов малого размера, а также в виде натуральных ЖБ балок, имитирующих реальные строительные конструкции. Образцы изготавливались из составов, наиболее часто используемых при строительстве зданий и сооружений, и отличались друг от друга проектным классом бетона и, как следствие, прочностью. Исследование АЭ на стадии формирования структуры проводилось как для кубических бетонных образцов, так и для ЖБ балок. По окончании срока твердения 28 суток проводилось исследование АЭ для ЖБ балок в процессе разрушения.

Бетонные кубические образцы изготавливались из тяжелого, мелкозернистого бетона и керамзитобетона. Проектный класс бетона для изготовления кубических образцов находился в диапазоне от В7.5 до В80. В общей сложности было изготовлено 23 кубических бетонных образца. При изготовлении образцов только что замешанный бетон заливался в

кубические опалубки из ламинированной фанеры со стороной 200 мм, после чего образцы твердели в нормальных условиях в течение 28 суток. Диапазон значений прочности на сжатие на 28 сутки для всех образцов находился в интервале от 4,9 до 57,9 МПа.

ЖБ балки изготавливались из тяжелого бетона проектного класса В30, В60 и В90 с добавлением пластификаторов твердения. В общей сложности было изготовлено 6 ЖБ балок (по две балки каждого класса). ЖБ балки армировались арматурными каркасами, идентичными используемым при строительстве. В качестве арматуры использовалась стальная арматура класса А500С различного диаметра (10, 12, 14, 16, 18 мм). Бетонирование осуществлялось в металлические формы размерами 1500x200x150 мм. После бетонирования образцы твердели в нормальных условиях в течение 28 суток. Диапазон значений прочности бетона на сжатие на 28 сутки для всех образцов находился в интервале от 52,5 до 101,3 МПа.

Регистрация АЭ начиналась непосредственно после бетонирования исследуемых составов в опалубки и осуществлялась в течение 28 суток (рисунок 1).



Рисунок 1 – Пример проведения эксперимента по твердению (а) бетонных кубических образцов, (б) ЖБ балок

Акустический контакт между ПАЭ и свежеприготовленной бетонной смесью осуществлялся с помощью волновода. Для бетонных кубических образцов на каждый образец устанавливалось по 1 ПАЭ, а для ЖБ балок по 3 ПАЭ с шагом 400 мм для оценки повторяемости зарегистрированных данных.

По истечению срока твердения 28 суток и снятия опалубки ЖБ балки испытывались на трехточечный изгиб с параллельной регистрацией АЭ (рисунок 2). Схема нагружения для всех образцов была одинаковой и представляла собой циклически увеличивающуюся нагрузку, состоящую из следующих стадий: увеличение нагрузки, выдержка на нагрузке, сброс нагрузки, выдержка на сбросе нагрузки. Нагружение проводилось поэтапно до одной и той же величины нагрузки в течение двух циклов, после чего величина нагрузки увеличивалась. Величины разрушающих нагрузок для ЖБ балок находились в диапазоне от 100 до 154 кН.

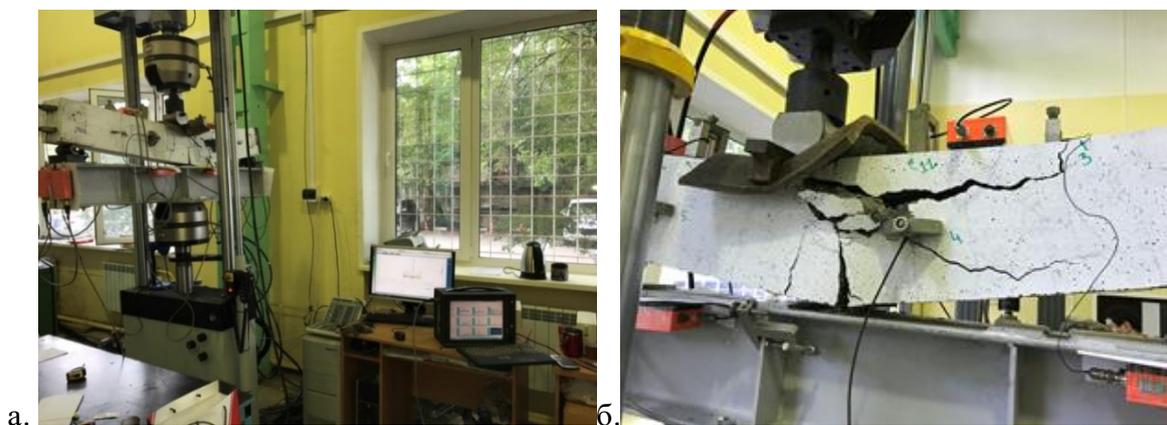


Рисунок 2 – (а, б) Пример проведения разрушающих испытаний

Для сбора АЭ данных на каждую ЖБ балку в процессе испытаний устанавливали по 10 ПАЭ. Расстановка ПАЭ осуществлялась таким образом, чтобы обеспечить локацию источников АЭ при помощи алгоритмов линейной и объемной локаций. В качестве системы регистрации и сбора АЭ данных, в каждом из экспериментов, как по твердению, так и по разрушению, использовалась многоканальная модульная система A-Line 32D DDM и преобразователи АЭ (ПАЭ) DIS30-300, с рабочим частотным диапазоном от 30 до 300 кГц. Величина порога дискриминации составляла 40 дБ.

В **третьей** главе представлены результаты исследования АЭ в процессе структурообразования и последующего твердения бетонных кубических образцов и ЖБ балок. В ходе анализа АЭ данных, зарегистрированных в процессе твердения за временной интервал 28 суток, было установлено, что метод АЭ позволяет в режиме реального времени наблюдать набор прочности бетона (рисунок 3).

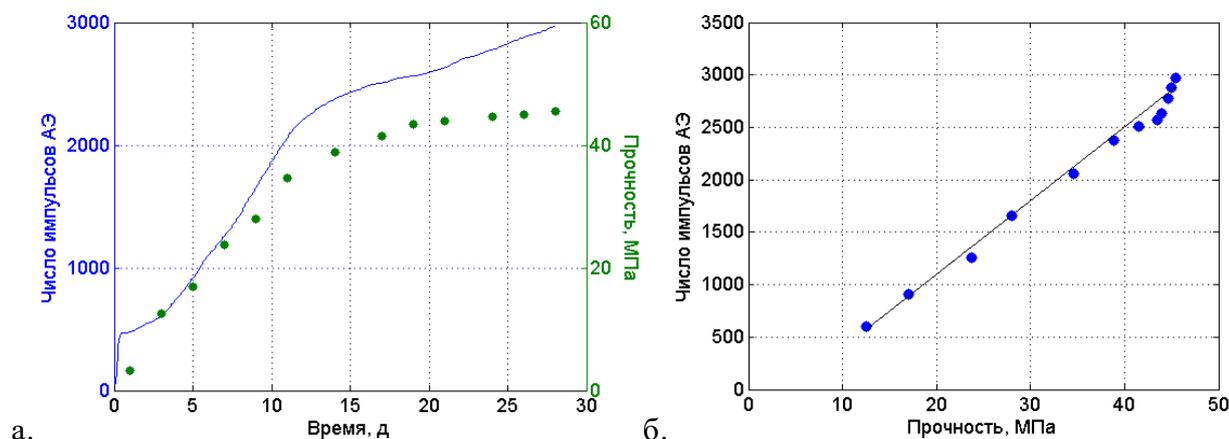


Рисунок 3 – Зависимость (а) числа импульсов АЭ и прочности бетона от времени, (б) числа импульсов АЭ от прочности

Зависимость числа импульсов АЭ от времени и прочности от времени имеют схожий вид (рисунок 3а). Данный факт объясняется тем, что метод АЭ регистрирует активность, которая непосредственно связана с физическими процессами, протекающими при структурообразовании и твердении бетона и, как следствие, отвечающими за увеличение его

прочности. Установленная зависимость может быть использована для определения прочности бетона в процессе мониторинга с 3 суток твердения, когда между прочностью и характеристиками АЭ наблюдается линейная взаимосвязь (рисунок 3б). Было установлено, что коэффициент корреляции при определении прочности бетона в интервале с 3 по 28 сутки имеет значение не менее 0,95.

В ходе анализа АЭ данных, полученных для бетонных кубических образцов, было установлено, что на временном интервале, включающем в себя первые трое суток после бетонирования, возможно выделение стадийности структурообразования бетона, которая, согласно современным представлениям, состоит из трех основных периодов: растворения, ускоренный (схватывания) и кристаллизации (твердения). В качестве примера на рисунке 4 представлены зависимости числа импульсов АЭ и амплитуд, зарегистрированные в течение первых 3 суток твердения мелкозернистых бетонов с прочностью на сжатие в возрасте 28 суток 6,9 и 45,5 МПа соответственно, с выделенными периодами структурообразования.

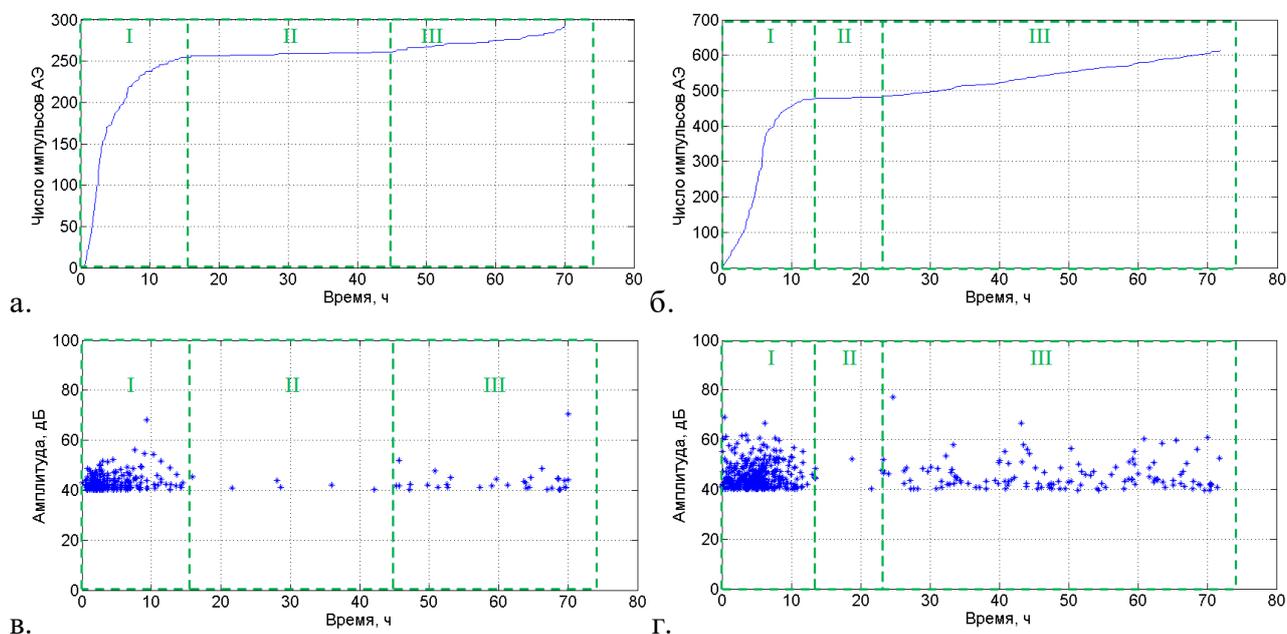


Рисунок 4 – Зависимости числа импульсов АЭ и амплитуд от времени для мелкозернистых бетонов с прочностью на 28 суток (а, в) 6,9 МПа и (б, г) 45,5 МПа

По изменению АЭ параметров с течением времени можно выделить три временных интервала, характеризующихся различным уровнем АЭ активности и численных значений АЭ параметров.

В процессе анализа были установлены основные источники АЭ в пределах каждого из периодов. Основным источником АЭ для первого периода является подвижность бетонного состава, которая характеризуется механическим перемещением смеси и ее отдельных компонент. Поскольку на начальном этапе первого периода количество свободной, химически несвязанной воды велико, то и подвижность является высокой. Со временем

происходит уменьшение свободной воды и, как следствие, уменьшение подвижности, что ведет к уменьшению АЭ активности. АЭ активность характеризуется высоким значением на начальном этапе первого периода с последующим ее уменьшением практически до нулевого значения (рисунок 4а,б период I). Также данный период характеризуется максимальным значением амплитуд импульсов АЭ. При этом чем выше прочность состава, тем выше численные значения амплитуд АЭ импульсов в пределах данного периода (рисунок 4в,г).

Второй период характеризуется началом кристаллизации гидроксидов малого размера на поверхности цементных зерен. Поскольку данный процесс является низкоэнергетическим, а коэффициент затухания несформированного бетонного состава является высоким, второй период характеризуется минимальным количеством зарегистрированных импульсов АЭ, либо их полным отсутствием (рисунок 4а,б период II). Акустическое затишье будет продолжаться до тех пор, пока в результате схватывания бетонный состав не приобретет первоначальную структуру. Было установлено, что чем выше проектная прочность бетонного образца, тем быстрее происходит формирование структуры и, тем меньше длительность акустического затишья.

Источником АЭ для третьего периода является рост кристаллитов. Поскольку состав на данном периоде характеризуется уже частично сформированной структурой, то затухание акустических волн значительно меньше, чем для предыдущего периода. В результате данный период характеризуется повторным увеличением АЭ активности (рисунок 4а,б, период III). При этом тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени, отражающий скорость накопления АЭ, соответствует скорости кристаллизации состава. Численные значения амплитуд импульсов АЭ в пределах данного периода тем выше, чем выше прочность бетона (рисунок 4в,г).

Также в рамках данной главы представлены результаты исследования АЭ в процессе структурообразования и последующего твердения ЖБ балок. В качестве примера на рисунке 5 представлены зависимости числа импульсов АЭ от времени для ЖБ балок из бетона и высокопрочного бетона с прочностью бетона на 28 сутки 63 и 101,3 МПа соответственно.

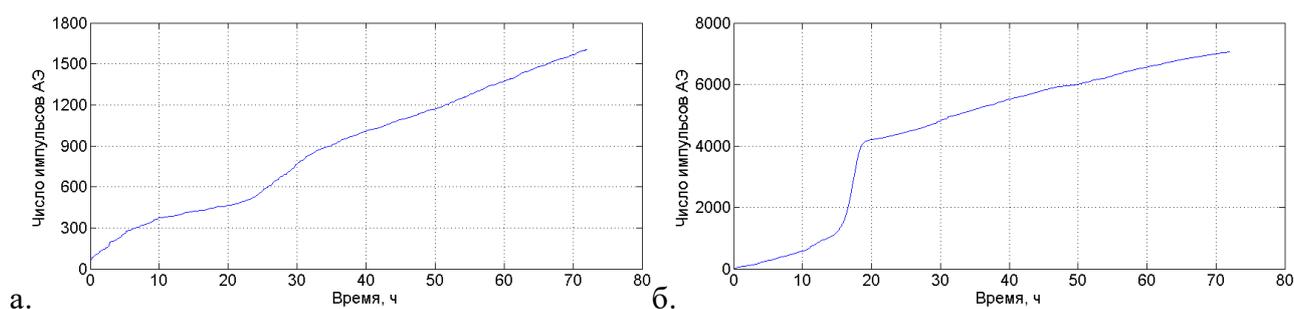


Рисунок 5 – Зависимость число импульсов АЭ(Время) для ЖБ балки из (а) обычного (прочность 63 МПа) и (б) высокопрочного (прочность 101,3 МПа) бетона

Зависимости были построены для первых трех суток после бетонирования. Было установлено различие в АЭ при структурообразовании бетона (рисунок 5а) и высокопрочного бетона (рисунок 5б), которое заключается в резком росте АЭ активности для высокопрочных бетонов и объясняется высокой интенсивностью экзотермических реакций. Зависимости, представленные на рисунке 5 имеют более сложный характер по сравнению с представленными ранее. Для данных зависимостей невозможно в явном виде выделить стадийность структурообразования бетона в связи с масштабом конструкции и наличием арматуры, которая расширяет область регистрации.

С целью выделения стадийности для ЖБ конструкций был разработан алгоритм частотной фильтрации АЭ сигналов с использованием полосового фильтра (в диапазоне от 85 до 115 кГц), настроенного на резонанс системы ПАЭ-волновод. Использование данного фильтра позволяет локализовать область регистрации за счет фильтрации низкочастотного диапазона и тем самым избавиться от негативных эффектов, связанных с эффектом масштаба и наличием арматуры. На рисунке 6, в качестве примера, показана зависимость суммарного счета, построенная для отфильтрованных данных.

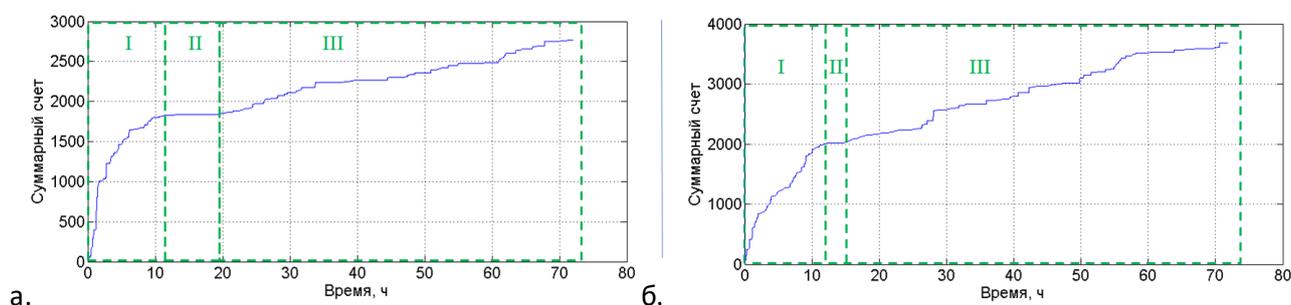


Рисунок 6 – Зависимость суммарного счета после фильтрации для ЖБ балки из (а) обычного (прочность 63 МПа) и (б) высокопрочного (прочность 101,3 МПа) бетона

На рисунке 6а и рисунке 6б можно выделить 3 интервала с различной АЭ активностью, соответствующие трем периодам структурообразования. Эффективность предложенного алгоритма была подтверждена для данных, полученных для каждой из шести ЖБ балок, по всем измерительным каналам.

Было установлено, что для исследуемых составов все три периода структурообразования можно наблюдать в течение первых двух суток после бетонирования. В связи с этим данный интервал может быть использован для разработки методики по прогнозированию прочности бетона к сроку 28 суток. При разработке метода прогнозирования прочности был проведен анализ параметров, определенных с использованием АЭ данных для всех исследуемых образцов. В таблице 1 представлен список параметров, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток с коэффициентом корреляции (r) не менее 0,45. В таблице приводятся значения коэффициента корреляции (r) и

относительной погрешности (δ) оценки прочности бетона в возрасте 28 суток по каждому из параметров.

Таблица 1 – Значение коэффициента корреляции и относительной погрешности

Параметр	$E_{cp(III)}$	$E_{\Sigma III}$	$q3_E$	$A_{cp(III)}$	$A_{\Sigma III}$	$q3_A$	Δt	$tg(\alpha_{III})$	$tg(\alpha_I)$
r	0,62	0,78	0,55	0,53	0,63	0,49	0,95	0,69	0,45
$\delta, \%$	34,2	19,3	42,3	44,7	28,2	45,6	8,9	29,4	32,1

$E_{cp(III)}$, $A_{cp(III)}$ – средние значения энергии и амплитуды в течение третьего периода; $E_{\Sigma III}$, $A_{\Sigma III}$ – суммарные значения энергии и амплитуды в течение третьего периода; $q3_E$, $q3_A$ – третий квартиль энергий и амплитуд; Δt – длительность второго периода; $tg(\alpha_I)$, $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона зависимости число импульсов АЭ от времени для первого и третьего периодов

В результате проведения пошагового регрессионного анализа среди параметров, представленных в таблице 1, были выбраны два основных: Δt – длительность акустического затишья и $tg(\alpha_{III})$ – АЭ активность на стадии кристаллизации. С использованием данных параметров были построены прогностические зависимости, которые могут быть описаны регрессионным уравнением вида:

$$R_{28} = b_1 \cdot \Delta t + b_2 \cdot tg(\alpha_{III}) + b_0, \quad (1)$$

где b_1 , b_2 и b_0 – коэффициенты регрессионного уравнения

Значения коэффициентов регрессионного уравнения для прогнозирования прочности различных бетонов к сроку 28 суток представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионного уравнения

		b_1	b_2	b_0
Бетонные образцы	Тяжелый бетон	-4,05	11,85	53,81
	Мелкозернистый бетон	2,50	-16,74	80,23
ЖБ балки	Тяжелый бетон	-8,27	262,83	128,75

На рисунке 7 представлены зависимости фактического значения прочности бетона от прогнозируемого для бетонных кубических образцов и ЖБ балок, позволяющие оценить погрешность и достоверность полученной модели.

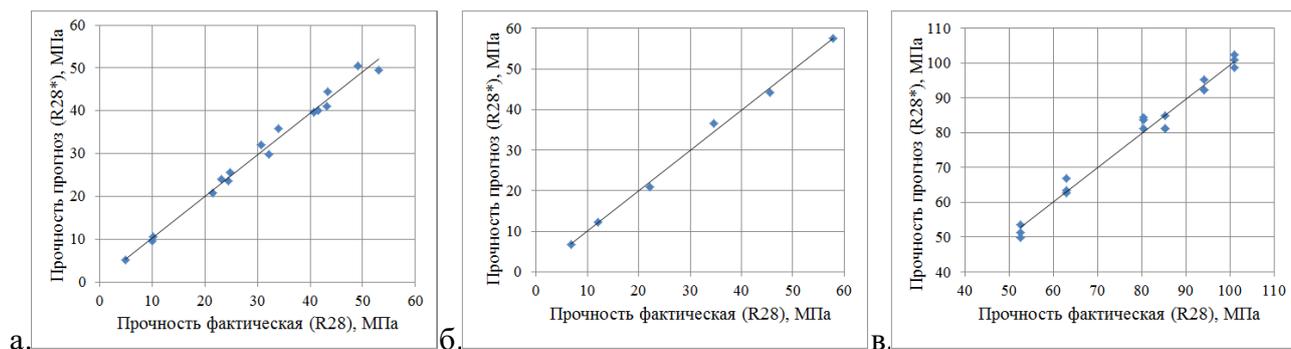


Рисунок 7 – Зависимость фактического значения прочности от прогнозируемого для бетонных образцов из (а) тяжелого бетона, (б) мелкозернистого бетона, (в) ЖБ балок

Множественный коэффициент корреляции (R) и относительная погрешность (δ) для полученных зависимостей, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Множественный коэффициент корреляции и относительная погрешность

		R	$\delta, \%$
Бетонные образцы	Тяжелый бетон	0,97	7
	Мелкозернистый бетон	0,99	5
ЖБ балки	Тяжелый бетон	0,98	6

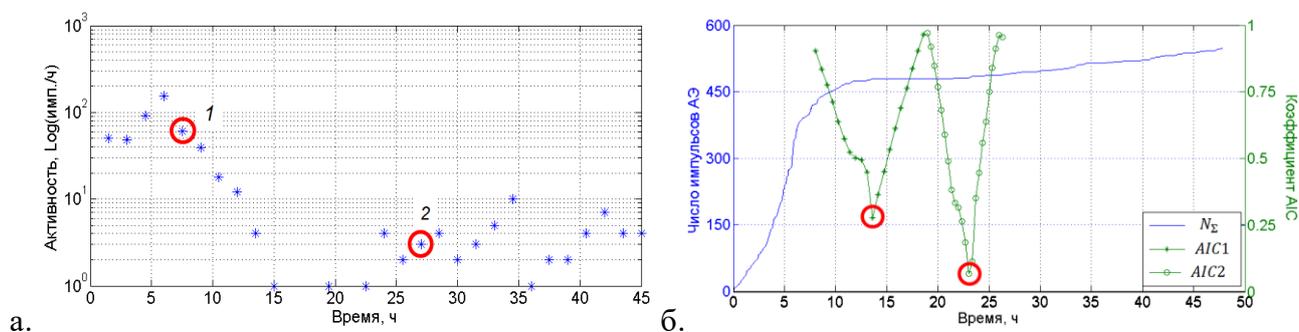
С использованием предложенной модели был разработан автоматизированный алгоритм, позволяющий осуществлять прогноз прочности бетона к сроку 28 суток в режиме реального времени. Исходными данными является зависимость числа импульсов АЭ от времени или суммарного счета. Реализация алгоритма предусматривает 3 этапа: выделение стадийности структурообразования, расчет параметров Δt и $tg(\alpha_{III})$, прогнозирование прочности к сроку 28 суток.

Выделение стадийности проводится по предварительному выделению времени начала и конца второго периода, с последующим уточнением временных границ. Предварительное выделение осуществляется при помощи анализа АЭ активности во временном окне, длительность которого зависит от проектного класса бетона, по началу спада АЭ активности (рисунок 8а, точка 1), которому предшествует максимум и по последующему возрастанию АЭ активности (рисунок 8а, точка 2) после достижения минимума. Уточнение времени начала и конца второго периода осуществляется при помощи критерия Акаике, с использованием формулы Маеда:

$$AIC(k) = k \cdot \log(\text{var}(N_{\Sigma}[1, k])) + (N - k - 1) \cdot \log(\text{var}(N_{\Sigma}[k + 1, N])), \quad (2)$$

где AIC – значение коэффициента критерия Акаике; N_{Σ} – зависимость числа импульсов АЭ от времени; N – длительность интервала наблюдения; k – номер отсчета

Переходы между стадиями определяется по минимуму функции Акаике (рисунок 8б).



N_{Σ} – зависимость числа импульсов АЭ от времени; $AIC1$ – критерий Акаике начало второго периода; $AIC2$ – критерий Акаике конец второго периода

Рисунок 8 – Автоматизированный алгоритм выделения стадийности (а) предварительное выделение интервалов, (б) уточнение времени начала и конца второго периода

По результатам выделенных границ стадий структурообразования параметр Δt определяется как разность между полученными значениями времени начала и конца второго периода. Параметр $tg(\alpha_{III})$ определяется методом наименьших квадратов во временном окне, начало которого совпадает с началом третьей стадии, а длительность составляет 4 часа. С использованием параметров Δt и $tg(\alpha_{III})$ осуществляется прогнозирование прочности бетона к сроку 28 суток в соответствии с регрессионным уравнением, составленным по формуле (1). Относительная погрешность прогнозирования прочности бетона к сроку 28 суток с использованием предложенного автоматизированного алгоритма для бетонных кубов и ЖБ балок не превышает 11 %.

По результатам исследований, представленных в третьей главе, была разработана методика по прогнозированию прочности бетона к сроку 28 суток методом АЭ (рисунок 9).

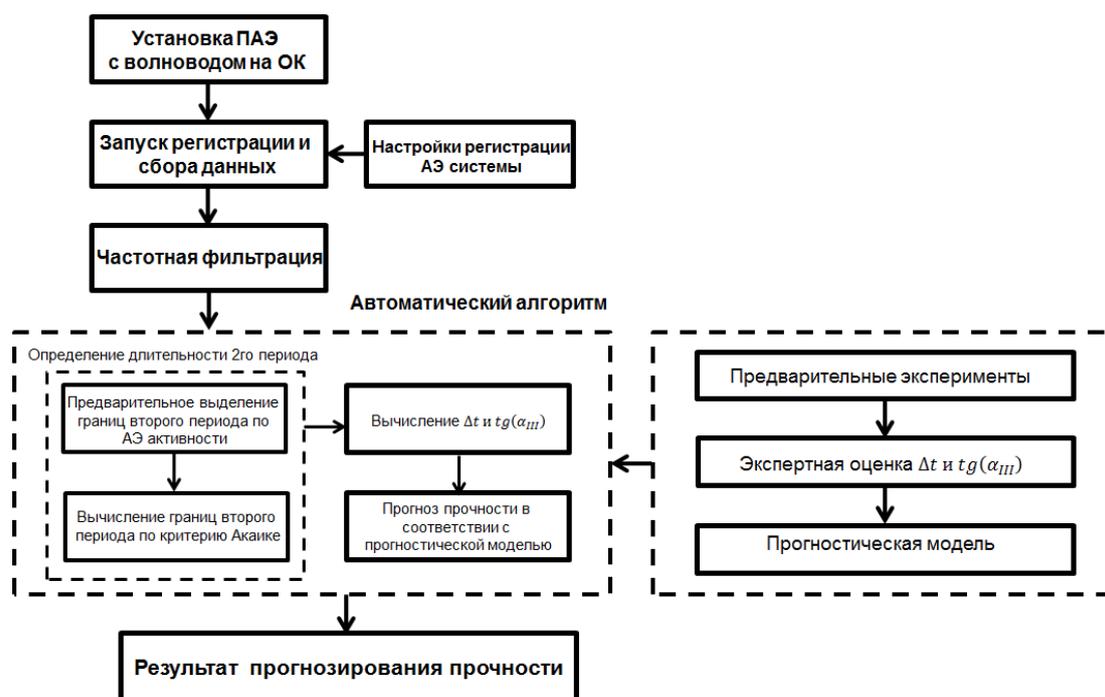


Рисунок 9 – Блок схема методики прогнозирования прочности бетона к сроку 28 суток

Методика предназначена для оперативного прогнозирования прочности бетона для бетонных и ЖБ конструкций к сроку 28 суток. При этом время, необходимое на прогнозирование не является фиксированным, но не превышает двое суток после бетонирования. Предложенная методика включает в себя требования к аппаратуре и ПАЭ, а также описание и порядок действий по проведению предварительных испытаний и измерений на объекте.

В четвертой главе представлены результаты применения метода АЭ для диагностики ЖБ конструкций на стадии эксплуатации на примере ЖБ балок, подверженных изгибным нагрузкам. В главе представлен анализ применения существующих методов оценки степени

повреждения ЖБ балок, подверженных циклическим нагрузкам. Показано, что существующие критерии не позволяют оценивать стадийность разрушения, в том числе определять момент предаварийного состояния, кроме того, принятая система шкалирования оценки степени повреждения является достаточно грубой. В качестве альтернативы существующим критериям и подходам к анализу данных было предложено два метода диагностики ЖБ балок. Первый метод основан на интегральном анализе АЭ данных, который позволяет по изменению зависимости числа импульсов АЭ (N_{Σ}) от нагружающего параметра (P) выделять стадии разрушения ЖБ балок. В работе были выделены характерные параметры изменения зависимости числа импульсов АЭ для различных стадий разрушения ЖБ балки: до появления первой трещины, момент образования первой трещины, нарушение совместной работы арматуры с бетоном рисунок 10). Показано, что стадия I (до появления первой трещины) соответствует низкой АЭ активности, изменяющейся скачкообразно (рисунок 10а). Энергетические параметры АЭ импульсов (E) являются низкими. Переход из стадии I в стадию IIа, которая характеризуется образованием первой трещины в растянутой зоне, определяется по смене линейного характера зависимости числа импульсов АЭ на нелинейный при линейно увеличивающейся нагрузке (рисунок 10б). Наблюдается монотонный рост средних значений энергетических параметров импульсов АЭ. Переход из стадии IIа в стадию IIб, которая соответствует началу нарушения совместной работы арматуры и бетона и деформации первой, определяется по резкому уменьшению скорости накопления импульсов АЭ (рисунок 10в, стадия IIб). Начало стадии IIб также сопровождается скачкообразным ростом длительностей, амплитуд и энергий АЭ параметров,

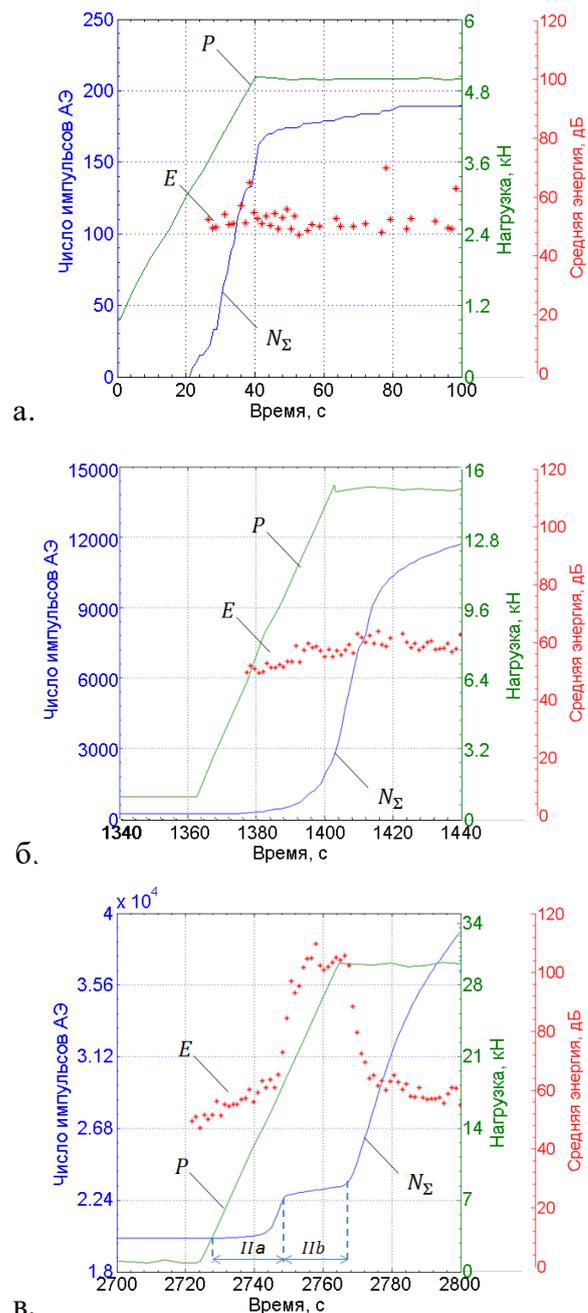


Рисунок 10 – Зависимости числа импульсов АЭ и нагрузки от времени (а) стадия I, (б) стадия II, (в) стадии IIа, IIб

что подтверждает опасность происходящих процессов с точки зрения целостности конструкции. При дальнейшем увеличении нагрузки подобный вид зависимостей (рисунок 10в), будет сохраняться, вплоть до разрушения. При этом установлено, что участок Пв зависимости, представленной на рисунке 10в, соответствует накоплению и развитию повреждений, а момент смены нелинейного характера на линейный – переходу элемента в новое напряженно-деформированное состояние. С использованием выявленных закономерностей изменения АЭ данных был разработан критерий оценки степени повреждения ЖБ балок.

В качестве критериального параметра было использовано отношение суммарной энергии на участке Пв (рисунок 10в) к суммарной энергии на участке Па (рисунок 10в):

$$ERatio = \frac{Esum1}{Esum2} \quad (3)$$

где $Esum1$ – суммарная энергия АЭ на линейном участке N_{Σ} , Дж; $Esum2$ – суммарная энергия АЭ на нелинейном участке N_{Σ} , Дж

Установлено, что повторный резкий рост критериального параметра, не менее чем в 4 раза, определяемого по формуле (3), соответствует переходу ЖБ балки из стадии II (допустимой эксплуатации) в стадию III (разрушения), а значение нормированного критериального параметра 0,1 и ниже соответствует остаточной прочности ЖБ балки не более 20 %.

Второй метод основан на визуализации данных, полученных с использованием алгоритма объемной локации в виде нормальных сечений с последующей оценкой степени повреждения в пределах локальных секторов сечения. Визуализация осуществляется с использованием критериального параметра $b-value$ (рисунок 11).

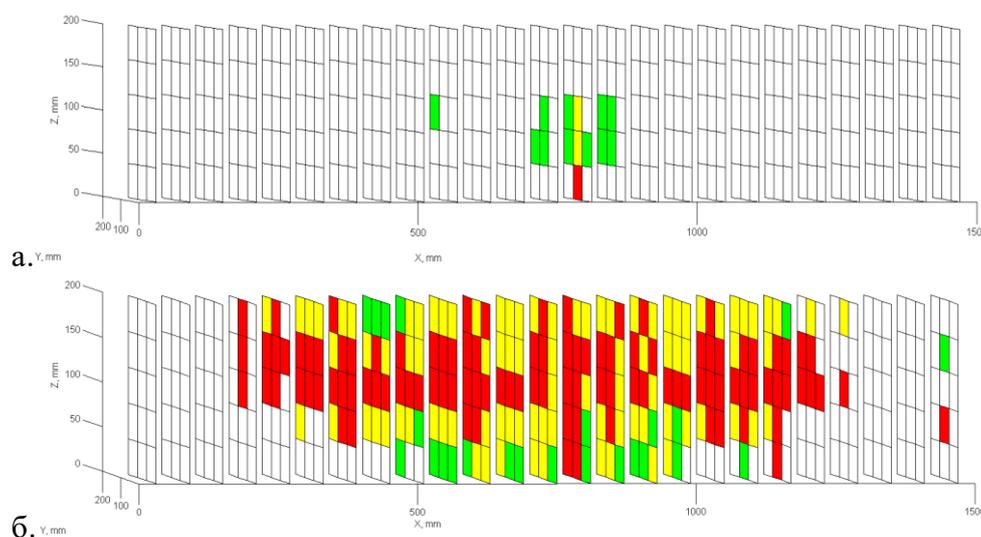


Рисунок 11 – Метод визуализации степени повреждения (а) 14% (момент образования первой трещины) и (б) 90 % (предразрушающее состояние) от разрушающей нагрузки

Данный метод позволяет отслеживать динамику процесса разрушения в режиме реального времени и, в отличие от классического алгоритма объемной локации, является более достоверным применительно к АЭ контролю хрупких материалов, обладающих высокой эмиссивностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы получены следующие основные выводы и результаты:

1. Проведены исследования процесса структурообразования и последующего твердения бетона на примере бетонных кубических образцов и ЖБ балок, имитирующих реальные строительные конструкции с применением метода АЭ. В рамках исследования показана принципиальная возможность использования метода АЭ для диагностики процесса структурообразования тяжелых, мелкозернистых и керамзитобетонов, а также ЖБ конструкций.

2. Разработана универсальная модель структурообразования бетона при помощи метода АЭ, позволяющая выделять основные периоды: растворения, ускоренный (схватывание), твердения (кристаллизации) по изменению зависимости числа импульсов АЭ или суммарного счета от времени. Показано, что период растворения соответствует максимальной АЭ активности, которая уменьшается с течением времени. Ускоренный период соответствует минимальной АЭ активности (акустическое затишье), либо ее отсутствию. Период кристаллизации соответствует повторному увеличению АЭ активности.

3. Установлено, что прочность бетона, для бетонных и ЖБ конструкций, в возрасте 28 суток коррелирует с длительностью акустического затишья, а также АЭ активностью на стадии кристаллизации. Минимальное значение коэффициента корреляции составляет 0,97.

4. Разработан метод и автоматизированный алгоритм прогнозирования прочности бетона для бетонных и ЖБ конструкций к сроку 28 суток с использованием АЭ данных, зарегистрированных в течение не более чем первых двух суток после бетонирования. Максимальная относительная погрешность модели прогнозирования прочности к сроку 28 суток в проведенных экспериментах для ЖБ конструкций на примере ЖБ балок не превышает 6%. Максимальная относительная погрешность прогнозирования прочности бетона к сроку 28 суток с использованием автоматизированного алгоритма для ЖБ балок не превышает 11 %.

5. Разработана АЭ модель разрушения ЖБ балок, подверженных изгибным нагрузкам. Определен характерный образ изменения функциональной зависимости числа

импульсов АЭ от нагружающего параметра, позволяющий выделять стадийность разрушения ЖБ балок.

6. Разработан метод оценки технического состояния ЖБ балок, позволяющий фиксировать переход конструкции из стадии допустимой эксплуатации к стадии разрушения с использованием критерия, основанного на отношении кумулятивных энергий. Значение нормированного отношения кумулятивных энергий менее 0,1 соответствует остаточной прочности ЖБ балки 20 % и менее.

7. Разработан метод визуализации зон локальных повреждений ЖБ балок в виде нормальных сечений, который осуществляется на основании параметра *b-value*, соответствующего тангенсу угла наклона амплитудного распределения импульсов АЭ.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК и системы цитирования Web of Science и Scopus:

1. Бардаков В.В., Сагайдак А.И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии// Дефектоскопия, 2017, 6, С. 40-47.

2. Bardakov V.V., Barat V.A., Sagaidak A.I., Elizarov S.V. Acoustic Emission behavior of over-reinforced concrete beams// International Journal of Civil Engineering and Technology. Volume 9, Issue 8, August 2018, pp.1583-1594. (DOI: 10.14489/td.2019.09.pp.004-012).

3. Sagaidak A., Zimnukhov D., Krylov S., Shevlyakov K., Bardakov V. Adhesion testing between concrete and reinforcement by acoustic emission method// SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structure (DSCS-2018), August 2018, Volume 326, pp. 109.1-109.10.

4. S. Elizarov, V. Bardakov, A. Shimanskiy, A. Alyakritskiy, D. Terentyev, V. Barat, A. Gogin, V. Koltsov. UNISCOPE: Instrument Integrating NDT Methods // WCAE 2017: Advances in Acoustic Emission Technology, Part of the Springer Proceedings in Physics book series (SPPHY, volume 218), pp. 65-74. (DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-12111-2_7).

5. Бардаков В.В., Сагайдак А.И., Елизаров С.В. Акустическая эмиссия перearмированных железобетонных балок// Контроль. Диагностика. 9(255), 2019. С. 4-12.

6. Сагайдак А. И., Бардаков В. В., Елизаров С. В., Иванов В. И. Стандарты по контролю технического состояния железобетонных конструкций методом акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 6. С. 32 – 39.

Публикации в других изданиях:

7. Елизаров С.В., Алякритский А.Л., Барат В.А., Терентьев Д.А., Бардаков В.В., Шиманский А.Г., Гогин А.В., Кольцов В.Г. Портативный прибор UNISCOPE. Новые возможности: АЭ и не только // Территория NDT.с. 50-55. 2, 2017, апрель-июнь (22).
8. Bardakov V.V., Sagaidak A.I. Forecasting of concrete strength during the hardening process by means of Acoustic Emission method// Progress in Acoustic Emission. 8th International Conference on Acoustic Emission IIIAE 2016, December 5-8, Kyoto. p.p. 105-110.
9. Bardakov V.V., Sagaidak A.I., Elizarov S.V., Barat V.A. Test of bending reinforced concrete structures by means of Acoustic Emission method // 33rd European Conference on Acoustic Emission Testing 2018, September 12-14, 2018, Senlis, France, pp. 523-534.
10. Бардаков В.В., Сагайдак А.И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода Акустической Эмиссии//XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. Москва, 28 февраля – 2 марта 2017 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 364 с.:ил., с. 19-21.
11. Бардаков В.В., Барат В.А. Применение метода АЭ для контроля железобетонных конструкций//Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать четвертая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Москва. Издательский дом МЭИ, 2018, с.333.
12. Бардаков В.В., Барат В.А. Оценка технического состояния перearмированных ЖБ конструкций методом акустической эмиссии// Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать пятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Москва. Издательский дом МЭИ, 2019, с.311.
13. Бардаков В.В., Сагайдак А.И. Контроль изгибаемых железобетонных элементов методом акустической эмиссии//Актуальные проблемы метода акустической эмиссии. Сборник материалов. Тольятти. Издательство ТГУ. 2018. С. 146.
14. Бардаков В.В., Барат В.А. Двухстадийный мониторинг балочных железобетонных элементов методом АЭ. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать шестая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Москва. Издательский дом МЭИ, 2019, с.283.