УДК 620.179.17
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-62-81 EDN: PGTEGQ

ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.И. САГАЙДАК, канд. техн. наук

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Метод акустической эмиссии (АЭ) с успехом применяется для диагностики и мониторинга в различных отраслях: нефтегазовой, атомной, аэрокосмической промышленности, контроле процесса сварки, коррозии конструкций. При контроле железобетонных конструкций метод АЭ используется не так часто. Основная причина – отсутствие нормативных документов и конкретных методик контроля.

В 2021 году был выпущен ГОСТ Р 59938-2021 «Бетоны. Метод акустико-эмиссионного контроля». За последние несколько лет получены новые данные по эффективному применению метода акустической эмиссии по неразрушающему контролю и технической диагностики состояния строительных конструкций. В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева проведены исследования на опытных образцах и фрагментах конструкций (железобетонных балках, бетонных образцах в виде плит, стеновых панелях и др.). Проводились исследования на конструкциях в условиях строительства Курской АЭС-2.

Цель работы: представить результаты разработанных в последнее время в АО «НИЦ «Строительство» методик технической диагностики и неразрушающего контроля бетонных и железобетонных конструкций методом АЭ.

Материалы и методы. Исследования проводились на бетонных и железобетонных образцах, изготовленных как из обычного (В15–В40), так и высокопрочного (В60–В100) бетонов. Ряд балок изготавливался из фибробетона. Конструкции испытывались в силовой установке. Исследования твердения бетонов методом АЭ проводились на бетонных смесях, изготовленных из тяжелого, мелкозернистого, цементного бетона с минеральными и химическими добавками. Твердение бетонов исследовалось дистанционно, с передачей данных по сети Wi-Fi.

Результаты. По результатам проведенного исследования разработаны технологии мониторинга и технической диагностики строящихся и эксплуатируемых конструкций методом акустической эмиссии.

Выводы. Приведенные акустико-эмиссионные технологии могут применяться для мониторинга и технической диагностики строящихся и эксплуатируемых конструкций. Эффект от реализации технологий в строительстве выразится в повышении безопасности и надежности строительных конструкций за счет внедрения технологий акустико-эмиссионного контроля.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, бетонные и железобетонные конструкции, неразрушающий контроль твердения бетона, техническая диагностика

Для цитирования: Сагайдак А.И. Технологии мониторинга бетонных и железобетонных конструкций методом акустической эмиссии. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):62–81. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-62-81

Вклад автора
Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование
Исследования частично финансировались ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.05.2023
Поступила после рецензирования 21.06.2023
Принята к публикации 27.06.2023

TECHNOLOGIES FOR ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

A.I. SAGAIDAK, Cand. Sci. (Engineering)

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The acoustic emission (AE) method is successfully used for diagnostics and monitoring in various industries including oil and gas, nuclear, aerospace as well as in welding processes and structural corrosion. However, inspection of reinforced concrete structures seldom involves the AE method. The main reason behind is the lack of regulatory documents and specific control procedures.

State Standard R 59938-2021 "Concretes. Acoustic emission testing method" was issued in 2021. Over the past few years, new data on effective application of the acoustic emission method for non-destructive testing and technical diagnostics of the building structures have been obtained. The studies were carried out on specimens and fragments of structures (reinforced concrete beams, concrete samples in the form of slabs, wall panels, etc.) in NIIZHB named after A.A. Gvozdev. The studies were conducted on the structures under construction at Kursk NPP-2.

Aim. To present the results of the recently developed methods of technical diagnostics and non-destructive AE testing of concrete and reinforced concrete structures.

Materials and methods. The investigations were carried out on concrete and reinforced concrete specimens made of both normal (B15–B40) and high-strength (B60–B100) concrete. A number of beams were made of fiber concrete. Structures were tested in the power unit. AE monitoring of concrete hardening involved concrete mixtures made of heavy, fine-grained, cement concrete with mineral and chemical additives. Concrete hardening was investigated remotely, with online data transmission.

Results. Based on the results of the conducted study, the technologies for acoustic emission monitoring and technical diagnostics of the structures under construction and in operation have been developed.

Conclusions. The given acoustic emission technologies can be used for monitoring and technical diagnostics of structures under construction and in operation. The implementation of technologies in construction will lead to the increase in safety and reliability of building structures due to the introduction of acoustic emission monitoring.

Keywords: acoustic emission, concrete and reinforced concrete structures, non-destructive testing of concrete hardening, technical diagnostics

For citation: Sagaidak A.I. Technologies for acoustic emission monitoring of concrete and reinforced concrete structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):62–81. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-62-81

Author contribution statement
The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding
A partial funding was provided by the FAU "FCC."
Conflict of interest
The author declares no conflict of interest

Received 15.05.2023
Revised 21.06.2023
Accepted 27.06.2023

Введение

Одним из методов мониторинга, технической диагностики и неразрушающего контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации звуковых импульсных волн, излучаемых материалом конструкции при формировании ее структуры, при разрушении или в процессе коррозии. Современная аппаратура для регистрации АЭ изготавливается на базе цифровых технологий, она компактна, позволяет получать множество характеристик процесса АЭ как в реальном масштабе времени, так и при пост-экспериментальной обработке записанных данных. Сотрудники НИИЖБ имени А.А. Гвоздева работают в области неразрушающего контроля и технической диагностики более 15 лет, было разработано несколько технологий АЭ-контроля для бетонных и железобетонных конструкций [1–3]. Некоторые из этих технологий утверждены как национальный стандарт [4]. Разработаны и прошли апробацию следующие технологии АЭ-контроля:

– классификация развивающихся трещин в бетонных и железобетонных конструкциях;
– контроль степени повреждения в конструкции при помощи *b*-параметра;
– определение наступления предельного состояния строительных конструкций;
– оценка трещинообразования конструкций при помощи инвариантных критериев;
– оценка степени повреждения конструкций, основанная на применении циклического приложения нагрузки;
– АЭ-технология дистанционного контроля конструкций из железобетона;
– контроль прочности твердеющего бетона.

Применение указанных технологий позволяет получить достоверные данные о состоянии конструкций. Применение АЭ-технологий обеспечит максимальную экономию средств владельцам при проведении мониторинга зданий и сооружений.

Технология контроля и оценки повреждений в конструкции при помощи инвариантных критериев

В основе технологии предложен подход [5–7], заключающийся в том, что существует связь регистрируемых сигналов АЭ с физическим процессом разрушения, который определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) в силу ряда предельных теорем статистических распределений параметров АЭ. Проведенные исследования в металлах, композиционных материалах, бетонных и железобетонных конструкциях показали, что на начальных

стадиях деформирования (до образования трещин) временной поток АЭ событий является стационарным и описывается пуассоновским законом распределения. Как только в бетоне конструкции образуются дефекты или трещины, временный инвариант и амплитудный инвариант меняются и принимают численное значение, отличное от единицы или 0,1 соответственно. Тогда появление отклонений регистрируемых значений этих соотношений от их инвариантных значений может служить критерием перехода на следующую стадию деформации или разрушения.

По численным значениям временного инвариантного критерия $I\Delta t$ и амплитудного инвариантного критерия I_A по ранее установленной зависимости определяют суммарную длину трещин L в зоне контроля (зона контроля – область вокруг преобразователя АЭ, в пределах которой сигнал от имитатора Су-Нильсена регистрируется аппаратурой при заданном уровне порога).

Технология приведена в первой редакции разрабатываемого ГОСТ Р «Конструкции бетонные и железобетонные. Акустико-эмиссионный мониторинг». Контроль возможен одним преобразователем АЭ.

Технология контроля степени повреждения в конструкции при помощи *b*-параметра

Впервые метод анализа повреждений при помощи *b*-параметра (*b*-value) был предложен в сейсмологии в первой половине двадцатого века на основании формулы Гутенберга – Рихтера. В конце XX века формула была адаптирована для АЭ-метода и записана как:

$$log_{10}N = a - bA_{dB},$$

где A – амплитуда импульсов АЭ в дБ;

N – кумулятивное число импульсов АЭ с амплитудами больше A_{dB}.

Для анализа используется значение показателя *b,* который показывает угол наклона амплитудного распределения. Значения *b*-параметра для оценки степени повреждения задаются из предварительных испытаний на основании значения параметра и фактического состояния конструкции. Меньшим значениям *b*-параметра соответствует большая степень повреждения. В технологии приводится взаимосвязь между локальным изменением *b*-параметра и значениями АЭ-параметров, по которой устанавливается критерий разрушения конструкций при мониторинге конструкций.

Технология определения близости наступления предельного состояния строительных конструкций

Под предельным состоянием конструкции по АЭ-показаниям принимается состояние конструкции, при котором ее дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно. В основу технологии взят патент № 2417369 «Способ определения предельного состояния строительных конструкций» [8]. В статье приводятся алгоритм вычисления статистического параметра и методика определения близости наступления предельного состояния при помощи диагностической диаграммы.

Технология классификации развивающихся трещин в бетонных и железобетонных конструкциях

Впервые классификация развивающихся трещин методом АЭ была приведена в стандарте [9]. Результаты исследований показали, что при испытании балок вначале образуются микротрещины отрыва с коротким временем зарождения. При приближении к разрушению образуются преимущественно сдвиговые трещины с длительным временем зарождения по сравнению с трещинами отрыва.

Установлено, что параметры сигнала АЭ зависят от типа трещины. Сигналы от трещин отрыва являются более высокочастотными, тогда как сигналы от трещин сдвига – более низкочастотными.

В технологии приводится классификация трещин по двум параметрам:

– *RA*-значение – отношение времени нарастания сигнала АЭ к его амплитуде;

– средняя частота F_a – отношение числа выбросов в импульсе к его длительности.

Технология оценки степени повреждения конструкций, основанная на применении циклического приложения нагрузки

Предложен критерий оценки степени повреждения железобетонных конструкций, основанный на применении двух коэффициентов, связанных с эффектом Кайзера [3, 10].

Для оценки степени повреждений определены новые параметры АЭ – коэффициент нагрузки и коэффициент разгрузки. Обнаружено, что степень повреждения, оцененная на основе этих двух коэффициентов, хорошо согласуется с действительной степенью повреждения балок. Предложен метод количественной оценки степени повреждения находящихся в эксплуатации железобетонных сооружений [4], например мостов, эстакад и зданий, требующий лишь приложения циклической нагрузки и мониторинга активности АЭ.

Выбор преобразователей АЭ и их зона контроля

Расстояние, на котором возможно контролировать разрушение в конструкции методом АЭ, зависит от следующих факторов:

– армирование конструкции;

– прочность бетона и его возраст;

– тип бетона;

– фоновый шум, электромагнитные наводки;

– тип применяемого преобразователя АЭ.

При контроле строительных конструкций рекомендуется использовать преимущественно резонансные преобразователи, имеющие более высокую чувствительность по сравнению с широкополосными.

В ГОСТ Р 59938-21 «Бетоны. Акустико-эмиссионный метод контроля» [4] приводятся рекомендации по выбору преобразователей АЭ для контроля бетонных и железобетонных конструкций. Для бетонных и железобетонных конструкций рекомендуется применять:

– преобразователи АЭ с резонансной частотой 150 кГц для лабораторных измерений образцов небольших размеров, например 100 × 200 мм;

– преобразователи АЭ с резонансной частотой 60 кГц для АЭ измерений крупных образцов, например размерами 1000 × 1000 × 1000 мм;

– для сильно поврежденных конструкций допускается использовать акселерометры с резонансной частотой менее 20 кГц.

Ориентировочная зона контроля в бетоне конструкции одного преобразователя составляет 1,5–2,5 метра.

Технология контроля и прогноза прочности бетонов при твердении

При твердении бетона методом АЭ [11] регистрируются акустические сигналы, излучаемые структурой бетона при ее формировании. Метод АЭ является пассивным и позволяет контролировать прочность бетона в любом месте конструкции, на любой глубине, в труднодоступных местах, при этом геометрия конструкции не оказывает влияния.

Исследования показали, что контролировать прочность твердеющего бетона будет возможно в сильно армированных конструкциях не снимая опалубку, что расширяет область применения метода.

Установлено, что по изменению АЭ-параметров с течением времени можно выделить три временных интервала, характеризующихся различной степенью интенсивности АЭ, что отражается как в количестве регистрируемых импульсов, так и в значении их энергетических параметров [11].

Разработан алгоритм по прогнозированию прочности бетона методом АЭ. Время, необходимое для прогнозирования, не является фиксированным и для большинства составов не превышает 48 часов с момента бетонирования.

В качестве информативных параметров АЭ, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток, анализировались численные значения АЭ-параметров в пределах различных стадий и параметры их распределений:

– ΣE_{I} – суммарная энергия в течение периода I;
– ΣE_{III} – суммарная энергия в течение периода III;
– $E_{ср(I)}$ – средняя энергия в течение периода I;
– $E_{ср(III)}$ – средняя энергия в течение периода III;
– $q1_{E}$ – первый квартиль выборки энергий;
– $q3_{E}$ – третий квартиль выборки энергий;
– S_{E} – дисперсия выборки энергий;
– ΣA_{I} – суммарная амплитуда в течение периода I;
– ΣA_{III} – суммарная амплитуда в течение периода III;
– $A_{ср(I)}$ – средняя амплитуда в течение периода I;
– $A_{ср(III)}$ – средняя амплитуда в течение периода III;
– $q1_{A}$ – первый квартиль выборки амплитуд;
– $q3_{A}$ – третий квартиль выборки амплитуд;
– S_{A} – дисперсия выборки амплитуд.

Наиболее информативными параметрами оказались:

– Δt – длительность второго периода;

– $tg(\alpha_{I})$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для первого периода;

– $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для третьего периода.

Наблюдается хорошая корреляция между прочностными характеристиками и информативными параметрами АЭ-данных.

Коэффициент корреляции был не ниже 0,86; 0,84 и 0,81 для зависимостей (Δt), $tg(\alpha_{III})$ и $tg(\alpha_{I})$ от прочности бетона в возрасте 28 суток соответственно. Данные параметры могут быть использованы для построения множественной регрессионной модели. В этом случае точность прогноза возрастает.

Технология дистанционного контроля АЭ-методом строительных конструкций

Компания MISTRAS разработала беспроводной мультиканальный АЭ-узел (электронный блок), который связан с базовой станцией по стандартному радиоканалу. АЭ-узел – объединение 11 различных датчиков, включая один тензометр, 4 датчика АЭ, имеет 6 входов для датчиков внешних параметров (например, давление, температура, смещение и др.). АЭ-узел имеет встроенную память в виде SD-карты, передает по беспроводному каналу записанные данные через базовую станцию в анализирующий компьютер.

Беспроводной АЭ-узел представляет собой микрокомпьютер, который способен осуществлять мониторинг объекта контроля. Беспроводной АЭ-узел и антенна должны располагаться в местах, где имеется наименьшее количество объектов, закрывающих путь радиоволны до базовой станции. Базовая станция должна располагаться на достаточно близком расстоянии от всех датчиков, где она могла бы уверенно принимать их радиосигналы. Обычно это расстояние составляет 40–500 метров. Базовая станция соединяется с компьютером по каналу USB. Система имеет активную систему проверки датчиков (AST), основанную на излучении одним из датчиков импульсного сигнала, который принимается окружающими датчиками. Таким образом проверяется чувствительность датчиков в процессе работы, а также сравнивается чувствительность при установке системы в конце периода работы.

Беспроводной АЭ-узел был спроектирован с целью упростить и ускорить развертывание АЭ системы на небольших площадях, критичных с точки зрения потенциального разрушения.

В наших исследованиях при проведении мониторинга твердения бетонов использовался АЭ-комплекс с EthernetBox, в котором визуализация и обработка результатов производятся на удаленном рабочем месте оператора, подключенном к аппаратной части комплекса посредством сети Ethernet с помощью кабельного или беспроводного соединения. Данные о работе комплекса можно получать и обрабатывать на любом удалении от места установки датчиков. Программное обеспечение комплекса имеет возможность автоматической настройки порогового уровня отсечки шумов и других параметров сбора данных, что позволяет проводить АЭ-мониторинг без участия оператора. Сбор данных может быть организован также автоматически таким образом, чтобы комплекс формировал регулярные массивы данных за указанный промежуток времени. В начале каждой сессии сбора данных может быть включен специализированный режим самокалибровки комплекса для проверки его работоспособности и/или формирования картины «прозвучивания» области контроля с целью определения динамики параметра затухания и скорости звуковых волн заданного частотного диапазона в материале конструкции.

Дистанционный контроль применялся при проведении лабораторных исследований и в условиях строительной площадки [12].

Пример определения близости наступления аварийного состояния строительных конструкций

Рассматриваются результаты испытания шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Размер балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм.

Железобетонная балка армировалась двумя арматурными стержнями. Балка изготавливалась из напрягающего бетона класса по прочности на сжатие В45. Арматурные стержни располагались в нижней части балки. В качестве рабочей арматуры использовалась предварительно напряженная арматура класса A–V диаметром 16 мм. Усилие натяжения арматуры, с учетом всех потерь, составило 100 МПа. Акустический контакт между преобразователем АЭ и бетоном осуществлялся при помощи контактной смазки. Нагрузку к балкам прикладывали при помощи гидравлического домкрата и ручной насосной станции. Нагрузку от домкрата через жесткую распределительную траверсу прикладывали к балке сосредоточенно в двух точках. Режим приложения нагрузок был принят ступенчатым с малоцикловым повторным нагружением. Величина ступени нагружения составляла 10–15 % от разрушающей нагрузки P.

На каждой ступени нагружения регистрировались параметры импульсов АЭ.

Последовательность регистрируемых параметров импульсов АЭ дробилась на выборки. Длина выборки принималась 64 импульса.

На диаграмме (рис. 1), построенной по результатам испытания балки, численные значения импульсов АЭ располагались в зонах I, II и III. Зона I характерна для большинства

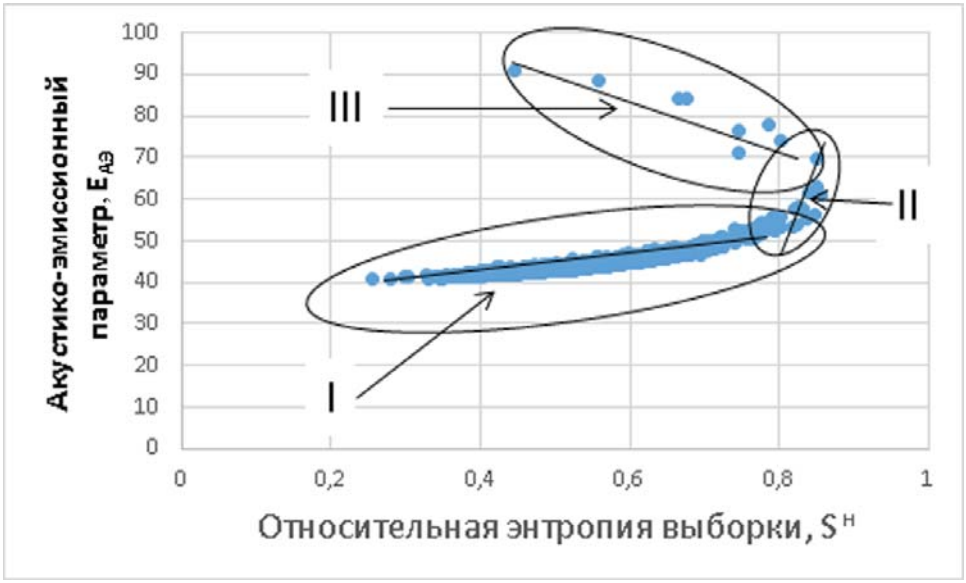


Рис. 1. Диагностическая диаграмма
Fig. 1. Diagnostic chart

этапов нагружения балки. Образование нормальных или наклонных силовых трещин с шириной раскрытия до 0,3–0,5 мм, увеличение прогиба балки существенно не видоизменяют характер расположения численных значений импульсов АЭ в зоне I. Перед разрушением (уровень напряжений в балке $s/R = 0{,}94$) появляется зона II. На этом этапе в конструкции появляются магистральные трещины, деформации балки нелинейно растут. Зона III соответствует предразрушающему состоянию, когда конструкция еще не разрушилась, но происходит дальнейший рост магистральных трещин, ширина раскрытия трещин превышает 0,5 мм, разрушается сжатая зона бетона, происходят дальнейшие деформации балки. Последовательный переход от зоны I к зоне II и затем к зоне III характеризуется изменением угла наклона прямой линейной зависимости, при помощи которой происходит аппроксимация численных значений импульсов АЭ в зоне I, зоне II, зоне III.

Коэффициент наклона прямой линейной зависимости меняет свои численные значения от положительных значений (зона I и зона II) на отрицательные (зона III), при этом угол наклона линейной зависимости меняется на 90° и более по сравнению с зоной I.

О наступлении предельного состояния конструкции судят по изменению угла наклона линейной зависимости на 90° и более. Дальнейшая эксплуатация конструкции при данном уровне нагружения приведет к ее разрушению.

Пример оценки состояния конструкций на основе *b*-параметра

Рассматриваются результаты контроля образования трещин при испытании шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Размер балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм. Балка изготовлена из бетона по прочности на сжатие В90. Балка армирована тремя арматурными стержнями диаметром 14 мм в нижнем сечении, двумя арматурными стержнями диаметром 10 мм в среднем сечении и двумя арматурными стержнями диаметром 14 мм в верхнем сечении. Режим приложения нагрузки к балке – ступенчатый. Балку доводили до разрушения.

Для измерения АЭ использовались преобразователями АЭ с рабочей полосой частот от 30 до 300 кГц. Порог был установлен 40 дБ. Этот порог позволил устранить фоновый шум и зафиксировать АЭ при трещинообразовании. Преобразователи АЭ крепились с двух сторон на боковые поверхности балки. На каждой ступени нагружения проводили измерения прогиба балки, длины и ширины раскрытия трещин, фиксировали положение трещины.

На рис. 2 представлена зависимость значения *b*-параметра от времени при нагружении балки нагрузкой с 1700 до 3000 кгс.

На этапе нагружения можно выделить два временных интервала, в которых наблюдается падение *b*-параметра: 2500-я секунда (интервал времени t_1) – значение *b*-параметра 0,7 и 2530-я секунда (интервал времени t_2) – значение *b*-параметра 0,5. Момент t_1 соответствует образованию и росту трещин нормального отрыва, а момент t_2 соответствует образованию сдвиговых трещин, а также слиянию нескольких микротрещин между собой, что характеризует два различных состояния.

Численные значения *b*-параметра характеризуют степень повреждения, которая может быть определена на основании предварительно установленных границ классификации.

Наблюдается взаимосвязь между локальным изменением *b*-параметра и численными значениями АЭ-параметров (рис. 3).

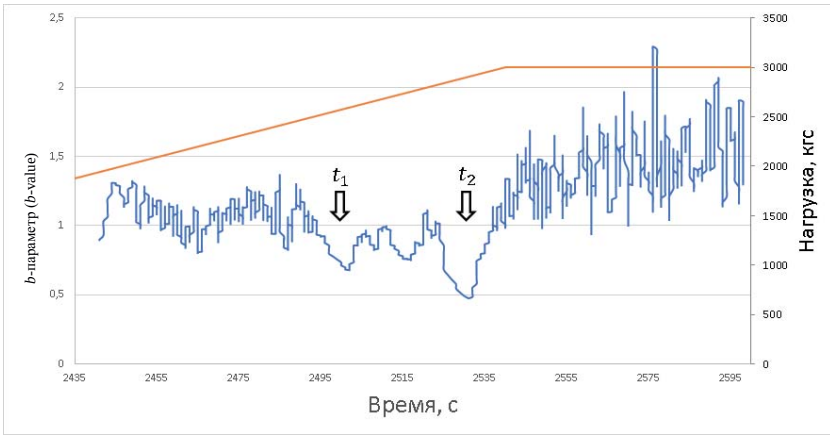
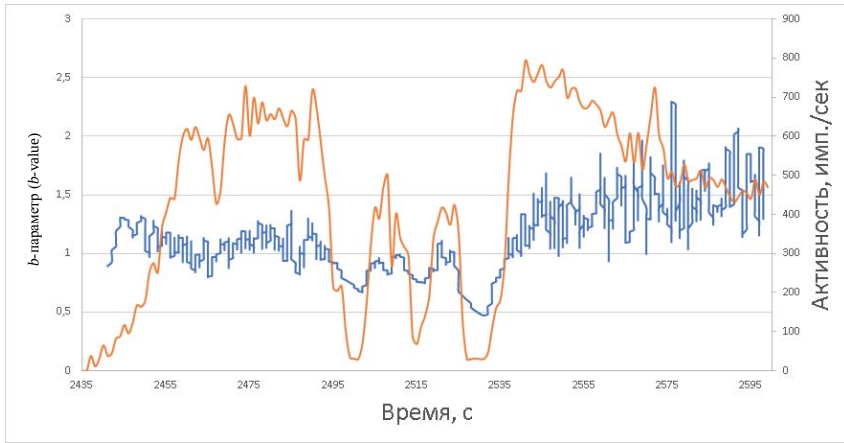
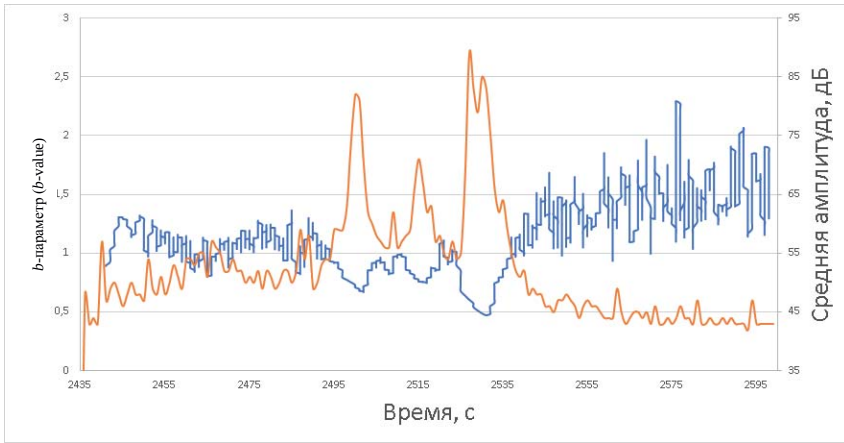


Рис. 2. Зависимость *b*-параметра и нагрузки от времени
Fig. 2. Time dependence of *b*-parameter and load



а



б

Рис. 3. Временные зависимости амплитуды сигналов АЭ и *b*-параметра (*а*); временные зависимости активности АЭ и *b*-параметра (*б*)
Fig. 3. Time dependences of AE signal amplitude and *b*-parameter (*a*); time dependences of AE activity and *b*-parameter (*б*)

Пример оценки трещинообразования конструкций на основе метода инвариантов

Рассматриваются результаты контроля образования трещин при испытании четырех железобетонных балок. Балка № 1 изготавливалась из бетона В60 с фиброй, балка № 2 – из бетона В60, балка № 3 – из бетона В30 с фиброй, балка № 4 – из бетона В90. Размеры балок: длина – 2200 мм, высота – 290 мм, ширина – 160 мм. Железобетонные балки армировались арматурными каркасами.

АЭ измерения выполняли с использованием цифровой АЭ-системы. Преобразователи АЭ крепились на две боковые и верхнюю поверхности балки. Для регистрации сигналов использовались преобразователи АЭ частотным диапазоном от 30 до 300 кГц.

Нагрузку к балкам прикладывали ступенчато. На этапе приложения нагрузки и выдержки под нагрузкой регистрировались импульсы АЭ, фиксировался прогиб балки, на этапах выдержки измерялись длина и ширина раскрытия трещин. В том случае если существующая трещина на последующем этапе приложения нагрузки «прорастала», фиксировалась и измерялась и эта величина. Для каждого этапа испытания длины всех трещин суммировались. Для анализа использовался самый активный канал АЭ-прибора, который позволял регистрировать импульсы АЭ из растянутой и сжатой зон бетона балок.

Связь регистрируемых импульсов АЭ с конкретным физическим процессом разрушения определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) статистических распределений параметров АЭ. Появление инвариантных отклонений регистрируемых значений этих соотношений от их инвариантных значений может служить критерием перехода на следующую стадию деформации или разрушения. Образование трещин приводит к тому, что временной инвариантный критерий принимает численные значения, не равные единице, условие $I_{1t} = \frac{S_{\Delta t}}{\Delta t} \neq 1$ соответствуют стадии образования видимой трещины в бетоне конструкции. Численные значения амплитудного инвариантного критерия, не равного 0,1, и условие $I_{1A} = S_A / A \neq 0{,}1$ соответствуют стадии образования трещины в бетоне железобетонной конструкции.

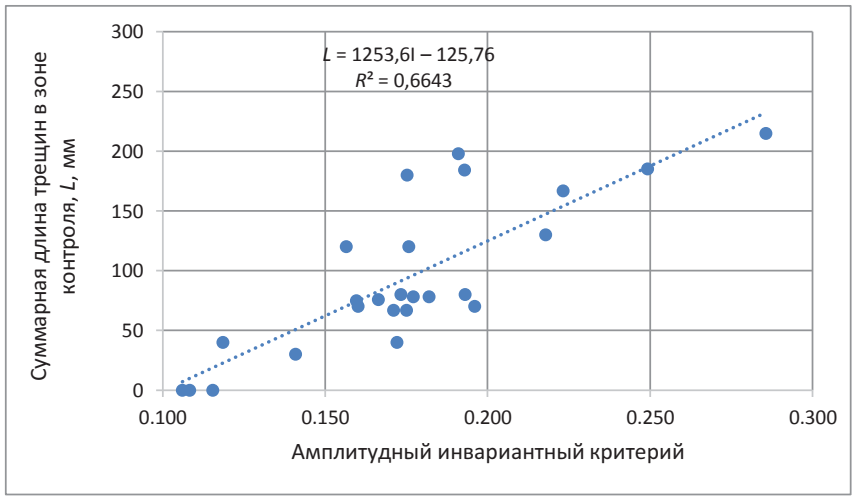


Рис. 4. Градировочная зависимость между длиной трещин и амплитудным инвариантным критерием
Fig. 4. Calibration dependence between crack length and invariant amplitude

На рис. 4 приведена градировочная зависимость, построенная по результатам расчета амплитудного инвариантного критерия и суммарной длины трещины для четырех балок. Предлагается использовать инвариантные критерии для экспертной оценки наличия и размеров трещин в зоне контроля.

Пример обработки результатов классификации трещин в железобетонных балках

В примере приведены результаты испытания шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Сечение балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм. Балка изготавливалась из бетона по прочности на сжатие В90. Балка армировалась тремя арматурными стержнями диаметром 14 мм в нижнем сечении, двумя арматурными стержня диаметром 10 мм в среднем сечении и двумя арматурными стержнями диаметром 14 мм в верхнем сечении. Режим приложения нагрузки к балке – ступенчатый. Балку доводили до разрушения.

Для измерения АЭ использовалась многоканальная АЭ-система в комплектации с 12 каналами с преобразователями с рабочей полосой частот 3–60 кГц. Порог был установлен 40 дБ. Данный порог позволил устранить фоновый шум и зафиксировать АЭ при трещинообразовании. Преобразователи АЭ крепились с двух сторон на боковые поверхности балки.

Нагрузка прикладывалась ступенчато. На каждой ступени нагружения проводились измерения прогиба балки, измерялись длина и ширина раскрытия трещин, фиксировалось положение трещины. АЭ-аппаратурой производилась регистрация параметров сигналов АЭ.

Классификацию развивающихся трещин выполняют при ступенчатом нагружении конструкции. В ходе испытания наряду со стандартными параметрами сигналов АЭ регистрируют *RA*-значения и среднюю частоту импульса АЭ – *AF*.

RA-значение вычисляют по формуле

$$RA\text{-значение} = \frac{RT}{A_{\max}}, \qquad (1)$$

где RT – время нарастания сигнала АЭ, мкс;

$A_{\max}$ – амплитуда сигнала АЭ, В.

Среднюю частоту импульса АЭ – AF, кГц, вычисляют по формуле

$$AF = \frac{C}{T_d}, \qquad (2)$$

где C – число выбросов сигнала АЭ;

T_d – длительность сигнала АЭ, мкс.

По (1) и (2) вычисляют AF и RA-значение путем усреднения данных параметров для выборки из 50 или более импульсов. Каждое значение наносят на диаграмму для классификации.

На рис. 5 приведена классификация активных трещин для данной балки. Из рис. 5*а* следует, что активные трещины относятся к трещинам растяжения. Для данной нагрузки в балке были зафиксированы две видимые трещины в середине пролета балки с шириной раскрытия 0,1 мм в растянутой зоне бетона.

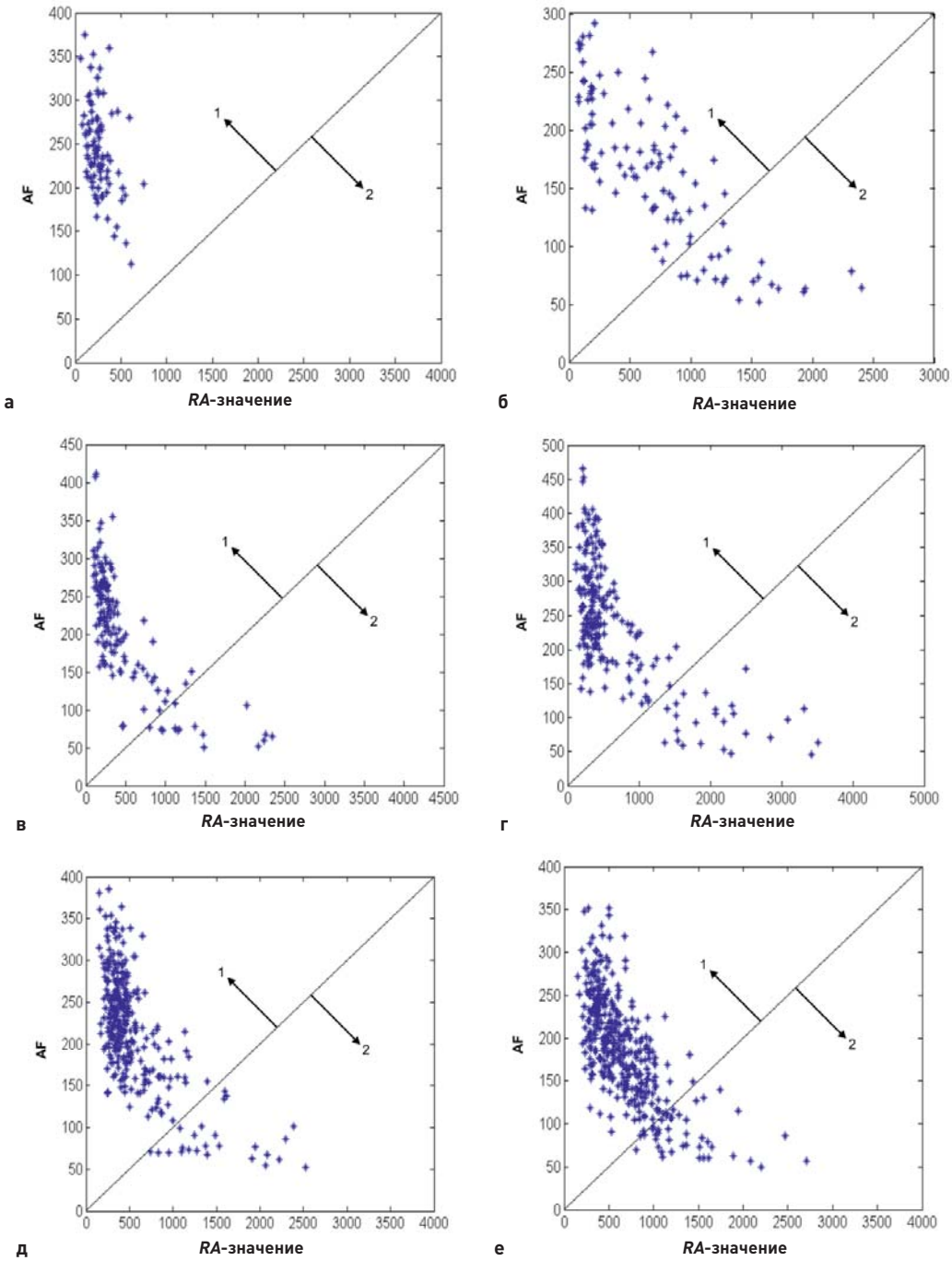


Рис. 5. Пример классификации активных трещин: *1* – область, соответствующая трещинам растяжения; *2* – область, соответствующая трещинам сдвига и иным типам трещин; *а* – нагрузка 15 кН; *б* – нагрузка 30 кН; *в* – нагрузка 45 кН; *г* – нагрузка 60 кН; *д* – нагрузка 75 кН; *е* – нагрузка 85 кН

Fig. 5. A classification of active cracks: *1* – area corresponding to tensile cracks; *2* – area corresponding to shear cracks and other types of cracks; *а* – 15 kN load; *б* – 30 kN load; *в* – 45 kN load; *г* – 60 kN load; *д* – 75 kN load; *е* – 85 kN load

На следующем этапе нагружения (рис. 5*б*) активные трещины классифицируются как трещины растяжения и трещины сдвига. На этом этапе в растянутой зоне бетона появилась новая трещина, длина существующих трещин увеличилась. Появление на диаграмме трещин сдвига визуальным контролем подтверждено не было. Только на следующем этапе нагрузки вблизи опоры образовалась небольшой длины видимая трещина. Наклонная трещина визуально была зафиксирована только при нагрузке 60 кН (рис. 5*г*). Это указывает на то, что метод АЭ позволяет обнаружить дефект задолго до видимого его проявления.

На рис. 5*д, е* показана классификация активных трещин при дальнейшем увеличении нагрузки.

Пример обработки результатов оценки повреждений в железобетонных балках

В примере приведены результаты испытания шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Сечение балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм. Балка изготавливалась из бетона по прочности на сжатие В60. Балка армировалась двумя арматурными стержнями диаметром 14 мм в нижнем сечении, двумя арматурными стержнями диаметром 10 мм в среднем и верхнем сечениях.

Для измерения АЭ использовалась 12-канальная АЭ-система. Использовались преобразователи с рабочей полосой частот 3–60 кГц. Порог был выбран 40 дБ. Данный порог позволил устранить фоновый шум и зафиксировать АЭ при трещинообразовании. Преобразователи АЭ крепились с двух сторон на боковые поверхности балки. Для создания акустического контакта преобразователя с конструкцией применялся литол.

Режим приложения нагрузки к балке был ступенчатый, с разгрузкой и повторным нагружением на каждой ступени. Выдержка под нагрузкой проводилась 10–15 минут. Балку доводили до разрушения.

В процессе нагружения и выдержки под нагрузкой проводилось измерение прогиба образца, измерялись длина и ширина раскрытия трещин, а также регистрировали параметры сигналов АЭ.

Повреждения балок оценивают с помощью коэффициента нагрузки L и коэффициента разгрузки CR.

Коэффициент нагрузки L вычисляют по формуле

$$L = \frac{L_0}{L_p}, \tag{3}$$

где L_0 – величина нагрузки при появлении АЭ в последующем цикле нагружения;

L_p – предыдущая максимальная нагрузка.

Коэффициент разгрузки CR вычисляют по формуле

$$CR = \frac{A_u}{A_t}, \tag{4}$$

где A_u – суммарная АЭ при снятии нагрузки;

A_t – суммарная АЭ цикла нагружения, выдержки под нагрузкой и снятия нагрузки.

По (3) и (4) проводят расчет коэффициента нагрузки и коэффициента разгрузки для каждого цикла. В случае использования многоканальной системы расчет проводится для самого активного канала. Полученные значения наносят на диаграмму. Границы классификации принимались в соответствии с [4]. Диаграмма классификации повреждений представлена на рис. 6.

На рис. 6 показана классификация степени повреждения в балке. Повреждения характеризуются как слабые, средние, сильные. Степень повреждения балки устанавливалась по ширине раскрытия трещин, суммарной длине трещин на этапе нагружения, наличию наклонных трещин, разрушению сжатого бетона, появлению сквозных трещин.

Принималось, что слабые повреждения соответствуют трещине с шириной раскрытия 0,1–0,2 мм, средние повреждения соответствуют трещине с шириной раскрытия 0,15–0,3 мм и (или) появлению горизонтальных и (или) наклонных трещин, сильные повреждения соответствуют трещине с шириной раскрытия более 0,3 мм. Сильные повреждения характеризуются также разрушением сжатой зоны бетона и появлением сквозной трещины.

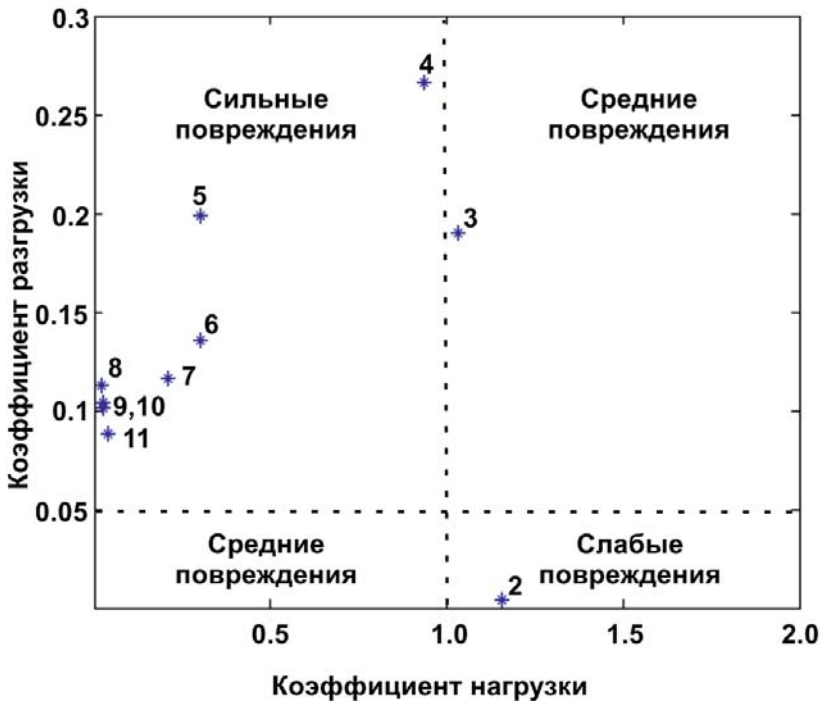
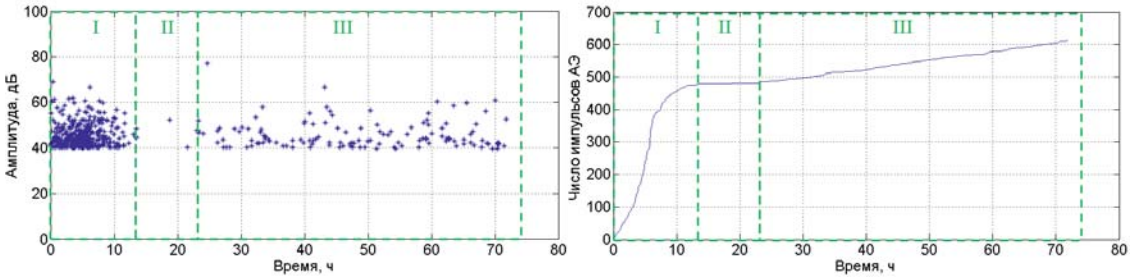


Рис. 6. Классификация повреждения в балке на этапах нагружения:
1 – нагрузка 15 кН; *2* – нагрузка 30 кН; *3* – нагрузка 45 кН; *4* – нагрузка 60 кН; *5* – нагрузка 75 кН; *6* – нагрузка 85 кН; *7* – нагрузка 95 кН; *8* – нагрузка 105 кН; *9* – нагрузка 115 кН; *10* – нагрузка 125 кН; *11* – нагрузка 135 кН

Fig. 6. Classification of beam damage at the stages of loading
1 – 15 kN load; *2* – 30 kN load; *3* – 45 kN load; *4* – 60 kN load; *5* – 75 kN load; *6* – 85 kN load; *7* – 95 kN load; *8* – 105 kN load; *9* – 115 kN load; *10* – 125 kN load; *11* – 135 kN load



а **б**

Рис. 7. Зависимости: *а* – число импульсов АЭ/время; *б* – амплитуда АЭ/время
Fig. 7. Dependences: *а* – number of AE pulses/time; *б* – AE amplitude/time

Пример обработки результатов акустико-эмиссионного мониторинга прогноза прочности бетона в процессе твердения

По изменению АЭ-параметров с течением времени можно выделить три временных интервала, характеризующихся различной степенью интенсивности АЭ, что отражается как в количестве регистрируемых импульсов (рис. 7*а*), так и в значении их энергетических параметров (рис. 7*б*). Каждый из трех временных интервалов соответствует различным периодам структурообразования бетона:

– I – период растворения (начальный и индукционный периоды);

– II – ускоренный (период схватывания);

– III – период кристаллизации (твердения).

В качестве параметров, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток, анализировались численные значения АЭ-параметров в пределах различных периодов и параметры их распределений. Наиболее информативными параметрами являются:

– Δt – длительность второго периода;

– $tg(\alpha_I)$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для первого периода;

– $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для третьего периода.

Получена высокая корреляция между прочностью бетона в возрасте 28 суток и информативными параметрами АЭ данных. Коэффициент корреляции составляет 0,86; 0,84 и 0,81 для зависимостей (Δt), $tg(\alpha_I)$ и $tg(\alpha_{III})$ соответственно.

Пример акустико-эмиссионного мониторинга набора прочности бетона в процессе твердения

АЭ-метод позволяет в режиме реального времени контролировать процесс набора прочности бетона. В качестве примера на рис. 8 представлена зависимость суммарной энергии импульсов АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени для бетонного куба, изготовленного из тяжелого бетона с химической добавкой. Прочность бетона измерялась путем сжатия под прессом контрольных образцов на 1, 2, 9, 14 и 28-е сутки. Промежуточные значения получались путем аппроксимации имеющейся кривой. Суммарная энергия импульсов

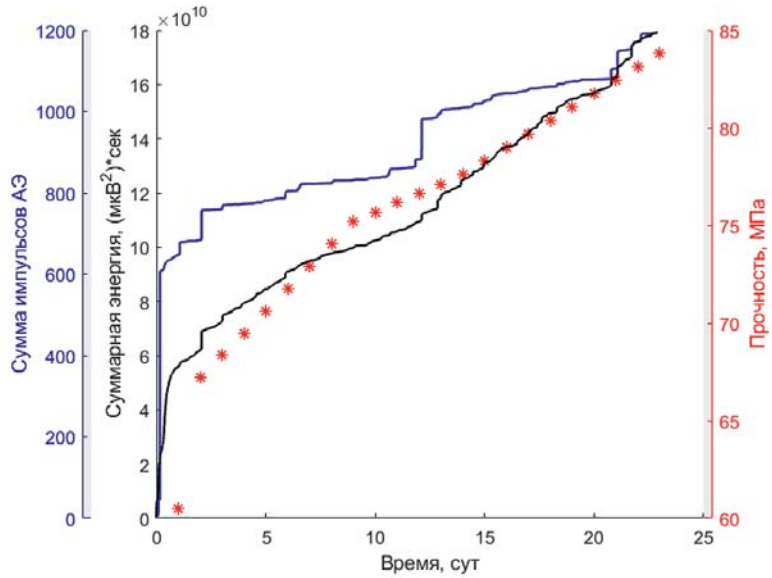


Рис. 8. Зависимости суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени (тяжелый бетон с химическими добавками)
Fig. 8. Time dependences of AE total energy, number of AE pulses, and strength (heavy concrete with chemical additives)

АЭ была выбрана в качестве наиболее информативного параметра в ходе предварительно проведенного анализа.

Зависимости суммарной энергии импульсов АЭ, числа импульсов АЭ, отражающие процесс накопления импульсов АЭ, а также их энергетический вклад и прочности от времени, имеют схожий внешний вид. Это связано с 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.

Начиная с третьих суток представленные зависимости имеют однозначную взаимосвязь. Коэффициент корреляции для зависимости суммарной энергии АЭ от прочности составляет 0,94, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности – 0,95.

Аналогичные зависимости были построены для тяжелых бетонов с минеральными добавками (рис. 9), а также для мелкозернистых бетонов (рис. 10).

Коэффициент корреляции для зависимости суммарной энергии АЭ от прочности составляет 0,94, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности – 0,97.

Коэффициент корреляции для зависимости суммарной энергии АЭ от прочности бетона составляет 0,93, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности бетона – 0,96. Подобного рода зависимости могут быть использованы в качестве градировочных в процессе мониторинга бетонных и железобетонных конструкций с целью определения прочности бетона.

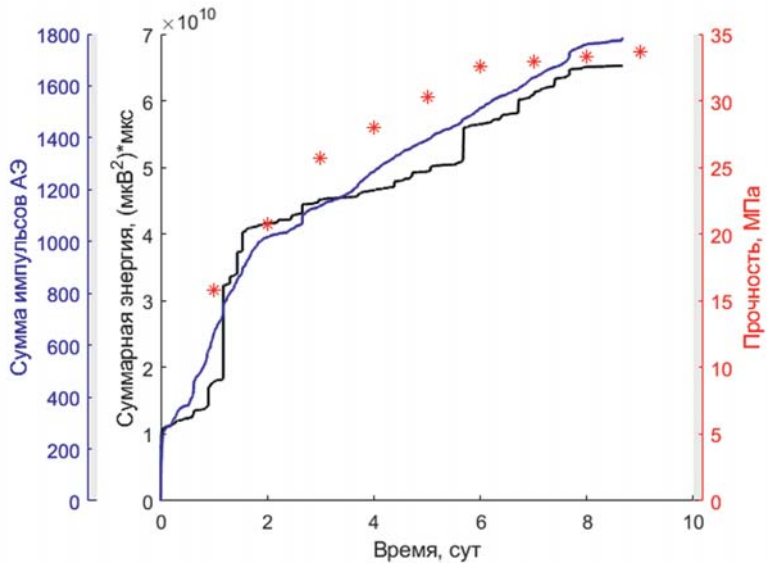


Рис. 9. Зависимости суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени, суммарной энергии АЭ от прочности и числа импульсов АЭ от прочности (тяжелый бетон с минеральными добавками)
Fig. 9. Dependences of AE total energy, number of AE pulses, and strength on time; AE total energy on strength; number of AE pulses on strength (heavy concrete with mineral additives)

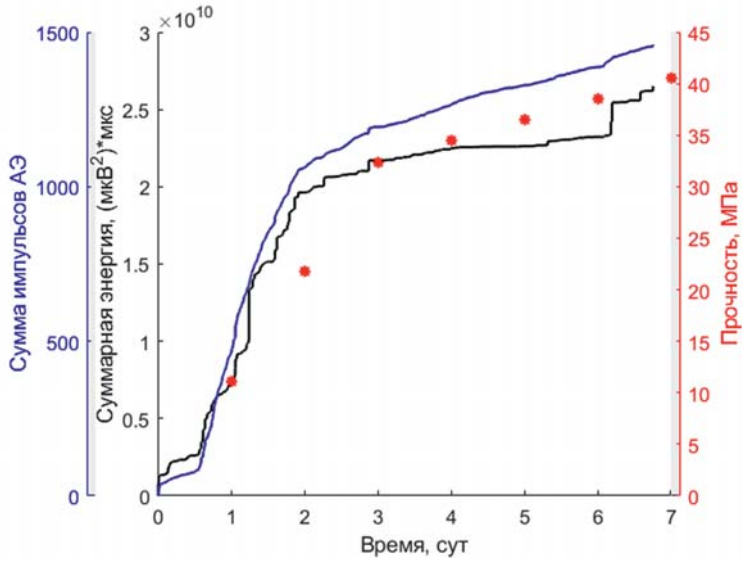


Рис. 10. Зависимости суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени, суммарной энергии АЭ от прочности и числа импульсов АЭ от прочности (мелкозернистый бетон)
Fig. 10. Dependences of AE total energy, number of AE pulses, and strength on time; AE total energy on strength; number of AE pulses on strength (fine-grained concrete)

Основные выводы

Приведенные технологии могут применяться для мониторинга и технической диагностики строящихся и эксплуатируемых конструкций из бетона и железобетона. Эффект от реализации технологий в строительстве выразится в повышении безопасности и надежности конструкций за счет внедрения технологий акустико-эмиссионного контроля.

Список литературы

1. *Сагайдак А.И.* Состояние и перспективы использована метода акустической эмиссии в современном строительстве. Взгляд в будущее. В : Бетон и железобетон - взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: Москва, 12–16 мая 2014 г. Т. 2. Москва: Московский государственный строительный университет; 2014, с. 427–438.
2. *Сагайдак А.И., Елизаров С.В.* Связь сигналов акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения строительных конструкций. Дефектоскопия. 2004;(11):32–39.
3. *Бардаков В.В., Сагайдак А.И., Елизаров С.В.* Акустическая эмиссия переармированных железобетонных балок. Контроль. Диагностика. 2019;(9):4–12. https://doi.org/10.14489/td.2019.09.pp.004-012
4. ГОСТ Р 59938-2021. Бетоны. Акустико-эмиссионный метод контроля. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
5. *Буйло С.И.* Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ; 2017.
6. *Буйло С.И.* Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов. Дефектоскопия. 2018;(4):18–23.
7. *Иванов В.И., Барат В.А.* Акустико-эмиссионная диагностика. Москва: Спектр; 2017.
8. *Сагайдак А.И.* Способ определения предельного состояния строительных конструкций. Пат. RU2417369C2. Опубл. 27.04.2011.
9. ISO 16838. Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Test method for classification of active cracks in concrete structures [internet]. International Organization of Standards; 2019. Available at: https://www.iso.org/standard/68781.html
10. *Сагайдак А.И.* Исследование эффекта Кайзера в сжатых железобетонных элементах. В: Экспериментальные и теоретические исследования строительных конструкций. Сб. научн. тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва; 1991, с. 127–129.
11. *Сагайдак А.И., Бардаков В.В., Боровкова Е.С.* Разработка методики и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии. Бетон и железобетон. 2023;(1):33–42. https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42
12. Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии. Эксперимент на Курской АЭС-2, сентябрь 2022 года. Отчет по НИОКР.
13. *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;23(6):32–39. https://doi.org/10.14489/td.2020.06.pp.032-039

References

1. *Sagaidak A.I.* Condition and prospects of using acoustic emission method in modern construction. Concrete and Reinforced concrete – a look into the future: Scientific papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete: Moscow, May 12–16, 2014. Vol. 2. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2014, pp. 427–438. (In Russian).
2. *Sagaidak A.I., Elizarov S.V.* The relationship of acoustic-emission signals with the processes of deformation and fracture of building structures. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004;(11):739–745. (In Russian).
3. *Bardakov V.V., Sagaydak A.I., Elizarov S.V.* Acoustic emission behaviour of over-reinforced concrete beams. Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics. 2019;(9):4–12. (In Russian). https://doi.org/10.14489/td.2019.09.pp.004-012

4. State Standard R 59938-2021. Concretes. Acoustic emission testing method. Moscow: Russian Institute for Standardization; 2022. (In Russian).
5. *Builo S.I.* Physico-mechanical, statistical and chemical aspects of acoustic emission diagnostics. Rostov-on-Don: SFU Publishing House; 2017. (In Russian).
6. *Builo S.I.* On the Information Value of the Method of Invariants of Acoustic-Emission Signals in the Diagnostics of Pre-Failure State in Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018;(4):237–242. (In Russian). https://doi.org/10.1134/s1061830918040034
7. *Ivanov V.I., Barat V.A.* Acoustic emission diagnostics. Moscow: Spectrum Publ.; 2017. (In Russian).
8. *Sagaydak A.I.* Method for determining the limit state of building structures. Patent No RU2417369C2. Publ. date 27 April 2011. (In Russian).
9. ISO 16838. Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Test method for classification of active cracks in concrete structures [internet]. International Organization of Standards; 2019. Available at: https://www.iso.org/standard/68781.html
10. *Sagaydak A.I.* And The study of the Kaiser effect in compressed reinforced concrete elements. In: Experimental and theoretical studies of building structures. Collection of scientific tr. TSNIISK named after V.A. Koucherenko. Moscow; 1991, pp. 127–129. (In Russian).
11. *Sagaydak A.I., Bardakov V.V., Borovkova E.S.* Development of methods and prediction of concrete strength at an early age by acoustic emission method. Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2023;615(1):33–42. (In Russian). https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42
12. Development of methods for monitoring and predicting the strength of concrete at an early age by acoustic emission method. Experiment at Kursk NPP-2, September 2022. R&D Report. (In Russian).
13. *Sagaydak A.I., Bardakov V.V., Elizarov S.V., Ivanov V.I.* Standards for the technical state testing of reinforced concrete structures by means of acoustic emission method. Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics. 2020;23(6):32–39. (In Russian). https://doi.org/10.14489/td.2020.06.pp.032-039

Информация об авторе / Information about the author

Александр Иванович Сагайдак, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник центра № 20 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: sagaidak-niizhb@mail.ru
Alexandr I. Sagaidak, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Center No. 20, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: sagaidak-niizhb@mail.ru