

А.И. САГАЙДАК^{1,✉}, В.В. БАРДАКОВ², Е.С. БОРОВКОВА³

¹ 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

² ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Энтузиастов шоссе, д. 20Б, г. Москва, 111024, Российская Федерация

³ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, ул. Блохина, д. 29, г. Новополоцк, 212440, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аннотация

Введение. Приведено описание основных результатов выполненной в АО «НИЦ «Строительство» научно-исследовательской работы по теме: «Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии».

Целью выполнения работы являлось получение экспериментальных данных для разработки методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии.

Материалы и методы. Исследования проводились на бетонных смесях, изготовленных из тяжелого и мелкозернистого бетонов с минеральными и химическими добавками. Процесс твердения бетонов сопровождался регистрацией данных акустической эмиссии. Акустико-эмиссионный мониторинг проводился непрерывно в течение нескольких суток после бетонирования составов.

Результаты. По результатам проведенного исследования выявлены наиболее информативные параметры акустико-эмиссионных данных, которые коррелируют с прочностью бетона, разработаны автоматизированные алгоритмы контроля его прочности. На основании результатов измерения скорости распространения акустических волн и уменьшения коэффициента затухания акустических сигналов, а также выходу этих значений на плато, определены периоды завершения схватывания бетонных смесей. В ходе экспериментов определены оптимальные частотные характеристики преобразователей акустической эмиссии.

Выводы. Результаты исследований позволяют внедрить в практику строительства новый подход контроля прочностных свойств бетонов в раннем возрасте с использованием метода акустической эмиссии.

Предложенный подход позволяет проводить контроль дистанционно, без присутствия оператора. К преимуществам предложенного подхода также относится его использование в труднодоступных местах, где применение других методов контроля затруднительно.

Ключевые слова: бетонная смесь, твердение бетона, акустическая эмиссия, контроль и прогноз прочности бетонной смеси, акустико-эмиссионный мониторинг

Для цитирования: Сагайдак А.И., Бардаков В.В., Боровкова Е.С. Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии // *Бетон и железобетон*. 2023. № 1 (615). С. 33–42. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1\(615\)-33-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42)

Вклад авторов

Сагайдак А.И. – разработка программы исследований, обзор литературных данных, проведение эксперимента, обработка результатов экспериментальной работы, выводы по работе.

Бардаков В.В. – проведение эксперимента, обработка результатов экспериментальной работы.

Боровкова Е.С. – обзор литературных данных и нормативных документов, обработка результатов эксперимента, оформление статьи.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств госбюджета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.12.2022

Поступила после рецензирования 31.01.2023

Принята к публикации 02.02.2023

A.I. SAGAIK^{1,✉}, V.V. BARDAKOV², E.S. BOROVKOVA³

¹ 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

² LLC "INTERUNIS-IT", Entusiasts highway, 20B, Moscow, 111024, Russian Federation

³ Euphrosyne Polotskaya state university of Polotsk, Blokhin Street, 29, Novopolotsk, 212440, Republic of Belarus

DEVELOPMENT OF METHODS FOR MONITORING AND PREDICTING THE STRENGTH OF CONCRETE AT AN EARLY AGE BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

Abstract

Introduction. The description of the main results of the research work carried out in JSC Research Center of Construction on the topic "Development of methods for monitoring and predicting the strength of concrete at an early age by acoustic emission method" is given.

Aim. The aim of the work is to obtain experimental data for the development of methods for monitoring and predicting the strength of concrete at an early age by acoustic emission.

Materials and methods. The research was carried out on concrete mixtures made of heavy and fine-grained concrete with mineral and chemical additives. In the process of concrete hardening the acoustic emission method was used. Acoustic emission monitoring was carried out continuously for several days.

Results. According to the results of the study, the most informative parameters of acoustic emission data that correlate with the strength of concrete have been identified. Automated algorithms for concrete strength monitoring have been developed. Based on the results of measuring the propagation velocity of acoustic waves and the decrease in the attenuation coefficient of acoustic signals, as well as the output of these values to the plateau, the periods of completion of setting of concrete mixtures are determined. During the experiments optimal frequency characteristics of acoustic emission sensors were determined.

Conclusions. The results of the research allow us to introduce into the practice of construction a new approach for monitoring the strength properties of concrete during its hardening using the acoustic emission method. Proposed approach can be carried out remotely, without the pres-

ence of an operator. The advantages of this approach also include its use in hard-to-reach places where the use of other testing methods is difficult.

Keywords: concrete mix, concrete hardening, acoustic emission, testing and prediction, acoustic emission monitoring

For citation: Sagaidak A.I., Bardakov V.V., Borovkova E.S. Development of methods for monitoring and predicting the strength of concrete at an early age by acoustic emission method. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023. No. 1 (615), pp. 33–42. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1\(615\)-33-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42)

Author contribution statements

Sagaidak A.I. – development of a research program, review of the literature data, conducting an experiment, processing of the results of experimental work, conclusions on the work.

Bardakov V.V. – conducting an experiment, processing of the results of experimental work.

Borovkova E.S. – review of literature data and regulatory documents, processing of the experimental results, design of the article.

Funding

The work was carried out at the expense of the state budget.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 27.12.2022

Revised 31.01.2023

Accepted 02.02.2023

Введение

Проведенный авторами обзор научной литературы показал, что перспективным методом контроля незатвердевшей бетонной смеси является метод акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ позволяет регистрировать акустические сигналы, излучаемые самой структурой бетона при ее формировании [1–4]. Данный метод является пассивным методом неразрушающего контроля и позволяет контролировать прочность бетона в любом месте конструкции, на любой глубине, в труднодоступных местах, при этом геометрия конструкции не оказывает влияния [6]. Сильное затухание сигналов АЭ в бетонной смеси позволяет использовать данный метод в условиях строительной площадки, механические шумы не оказывают существенного влияния на процесс измерений. Возникает возможность контролировать прочность бетона в сильно армированных конструкциях, не снимая опалубку внутри тела бетона, что расширяет область применения.

По результатам проведенного исследования предложены информативные параметры акустико-эмиссионных данных, тесно связанные с прочностью бетона, разработаны автоматизированные алгоритмы контроля и прогнозирования прочности бетона.

В ходе проведения исследований оценивалось влияние масштабного фактора и наличия армирования на процессы выделения сигналов АЭ при твердении бетона. Исследовалось затухание акустических сигналов в бетонной смеси. Определены оптимальные частотные характеристики преобразователей АЭ (ПАЭ). Сформированы предложения по применению результатов работы при разработке ГОСТ Р «Бетоны. Акустико-эмиссионный метод контроля прочности». Результаты исследований позволяют внедрить в практику строительства новый подход по контролю прочностных свойств бетонов с использованием метода АЭ.

Методика проведения исследования.

Образцы, используемые приборы и оборудование

Для проведения измерений по регистрации сигналов АЭ в процессе твердения бетонных составов



Рис. 1. АЭ система A-Line DDM-1
Fig. 1. A-Line DDM-1 AE system

использовалась система A-Line DDM-1 (рис. 1), производства компании ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ».

Система A-Line DDM-1 – это многоканальная модульная система сбора и обработки АЭ информации распределенного типа с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных. АЭ комплексы данной серии состоят из центрального компьютера (блок сбора и обработки данных) и нескольких измерительных линий, объединяющих последовательно соединенные модули сбора и обработки АЭ информации, к которым, в свою очередь, подключаются используемые ПАЭ.

С целью создания акустического контакта между ПАЭ и свежеприготовленной бетонной смесью использовался металлический волновод с закрепленной на конце пластинкой. ПАЭ устанавливался на волновод через контактную смазку (литол) и фиксировался при помощи магнитного держателя. Волновод, в свою очередь, погружался в бетон до момента касания пластинкой состава.

Температуру твердеющего бетона измеряли регистратором ТС-32К с использованием термопар.

Контроль твердения бетонов методом АЭ исследовался на бетонных кубах размером 200 × 200 × 200 мм и двух железобетонных балках размером 1500 × 200 × 200 мм. Образцы изготавливались из тяжелого и мелкозернистого бетонов. Формы для образцов и конструкций изготавливались из ламинированной фанеры.

Регистрация сигналов АЭ для каждого состава проводится непрерывно не менее семи суток. Контроль прочностных характеристик бетона производят на кубах размером 100 × 100 × 100 мм. Прочность бетона контролировали в 1, 3, 7, 14 и 28 сутки твердения. Контроль изотермии бетонов при помощи термопар проводится параллельно с АЭ измерениями.

Образцы твердели в естественных условиях при температуре +20 °С.

Материалы для изготовления бетонной смеси

В табл. 1 приведены материалы для изготовления бетонов.

В табл. 2 и 3 приведены составы тяжелых и мелкозернистых бетонов.

Для каждого состава проведено бетонирование не менее четырех бетонных кубов. Также было проведено бетонирование двух железобетонных балок из состава АЭ2.

Результаты исследований. АЭ мониторинг твердения бетонов

АЭ мониторинг твердения бетонов проводился непрерывно в течение нескольких суток в режиме On-line (рис. 2).

Как показали исследования, по изменению АЭ параметров с течением времени можно выделить три временных интервала, характеризующихся различной степенью интенсивности АЭ, что отражается как

Таблица 1
Table 1

**Материалы для изготовления бетонов
Materials for the manufacture of concrete**

Материал	Основные сведения
Вязущее	ПЦ ЦЕМ I 52,5н (ООО «Южно-Уральская ГПК»), с удельной поверхностью 3800 см ² /г, нормальной густотой НГ = 27,5 %
Песок	Песок строительный, производства ООО «Облнерудпром», карьер Подгоринский
Щебень	Щебень фракции 5–20 мм, Кашинское месторождение известняков, Свердловская область, ГО Богданович, ООО «ТехИнжиниринг»
Химические добавки Д1	СП-180М по ТУ 20.59.59-003-26025492-2018, производства «Оптим-Бетон» – суперпластификатор на основе смеси полиметиленафталинсульфонатов и модифицированных лигно-сульфонатов
Химические добавки Д2	CENTRIPOR TFM 411R, производства MC Bauchemie – воздухововлекающая на основе сульфозтоксилатов жирных спиртов
Минеральная добавка	Шлак доменный гранулированный молотый ООО «Мечел-Материалы»

Таблица 2
Table 2

**Номинальные составы тяжелого бетона
Nominal compositions of heavy concrete**

Серия	Номинальный состав бетонной смеси, кг/м ³						Ориенти- ровочное В/Ц В/(Вяз)	Ориентировочная средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	Марка по осадке стандартного конуса
	Цемент	Минеральная добавка	Песок	Щебень	Вода	Химические добавки			
АЭ 1	200		970	1000	190	Д1	0,95	2360	П4
АЭ 2	350		770	1100	190	Д1	0,54	2410	П4
АЭ 3	500		530	1200	190	Д1	0,38	2420	П4
АЭ 4	500		610	1200	140	Д1	0,28	2450	П4
АЭ 5	180	20	970	1000	190	Д1	0,95	2360	П4
АЭ 6	315	35	770	1100	190	Д1	0,54	2410	П4
АЭ 7	450	50	530	1200	190	Д1	0,38	2420	П4

Таблица 3
Table 3

**Номинальные составы мелкозернистого бетона
Nominal compositions of fine-grained concrete**

Серия	Номинальный состав бетонной смеси, кг/м ³				Ориентировочное В/Ц В/(Вяз)	Ориентировочная средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	Марка по осадке стандартного конуса
	Цемент	Песок	Вода	Химические добавки			
АЭ 9	200	1610	190	Д1 + Д2	0,95	2000	П4
АЭ 10	500	1500	225	Д1	0,45	2250	П4
АЭ 11	800	1300	250	Д1	0,31	2350	П4

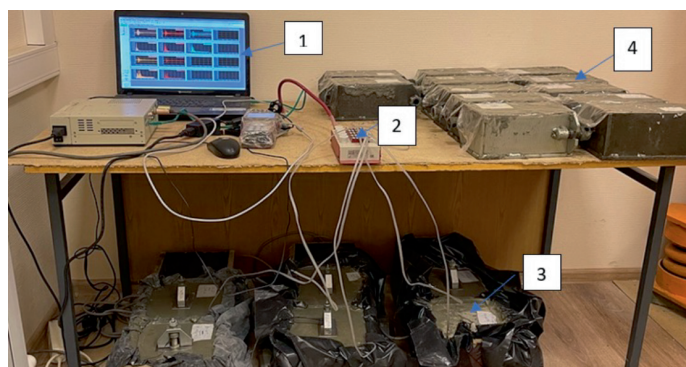


Рис. 2. Проведение эксперимента по мониторингу твердения бетонов методом АЭ в лабораторных условиях. На переднем плане АЭ система (1), регистратор температуры ТС–32К (2), кубы 200 × 200 × 200 мм (3), кубы 100 × 100 × 100 мм (4)

Fig. 2. Conducting an experiment to monitor the hardening of concrete by the AE method in laboratory conditions. In the foreground is the AE system (1), the temperature recorder TS–32K (2), cubes 200 × 200 × 200 mm (3), cubes 100 × 100 × 100 mm (4)

в количестве регистрируемых импульсов, так и в значении их энергетических параметров. 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 табл. 4 приведены результаты АЭ мониторинга твердения бетонов шести составов: АЭ 1, АЭ 3, АЭ 4, АЭ 5, АЭ 7 (составы тяжелого бетона с химической и комбинацией химической и минеральной добавок) и мелкозернистого бетона АЭ 11 с химической добавкой. Из приведенных данных видно, что периоды структурообразования (выделены пунктирными линиями) можно наблюдать в течение первых двух суток после бетонирования.

Таблица 4
Table 4

АЭ мониторинг твердения бетонов с химической и минеральной добавкой
AE monitoring of concrete with chemical and mineral additives hardening

Скорость гидратации	Вид АЭ зависимости			Вязущие/ образец
	dA/dt (Производная кумулятивной амплитуды)	$A = f(t)$ (Кумулятивная амплитуда)	A (Амплитуда АЭ)	
Ускорение твердения				Цементы Химические добавки АЭ 1 В/Ц 0,95
Ускорение твердения				Цементы Минеральные добавки АЭ 5 В/Ц 0,95
Замедленное с ускорением				Цементы Химические добавки АЭ 4 В/Ц 0,28
Замедленное с ускорением				Цементы Химические добавки АЭ 11 В/Ц 0,31
Нейтральное действие				Цементы Химические добавки АЭ 7 В/Ц 0,38
Нейтральное действие				Цементы Химические добавки АЭ 3 В/Ц 0,38

На диаграммах, приведенных в табл. 4, возможно оценить влияние составов и добавок на скорость гидратации, времени схватывания, а также оценить фактическую прочность бетона в проектном возрасте, по изменению кумулятивной кривой амплитуд импульсов АЭ и ее производной бетона.

Сигналы АЭ в пределах первого периода (I) в основном связаны с развитием капиллярного давления и деформаций в твердеющей цементной пасте, включая развитие аутогенной усадки [8, 11, 13]. Эта зона характеризуется значительным количеством химически несвязанной воды, которая придает смеси механическую подвижность. Чем выше активность АЭ в пределах первого периода и чем выше амплитуда сигналов АЭ, тем выше механическое перемещение смеси и ее отдельных компонентов.

Высокий коэффициент затухания акустических волн приводит к снижению количества зарегистрированных импульсов АЭ либо к их полному отсутствию в пределах второго (II) периода. При этом, чем меньше длительность второго периода, тем более интенсивно протекает процесс структурообразования бетона и тем выше его проектная прочность.

Переход от второго периода к третьему (III) характеризуется увеличением активности АЭ. Чем больше число импульсов АЭ и выше их энергетические параметры в этот период, тем выше конечная прочность бетона.

Скорость гидратации возможно описать тремя основными схемами: ускорение, замедление и нейтральное действие, а также несколькими комбинированными схемами: замедление с ускорением, ускоре-

ние с замедлением, и т. д. (рисунки табл. 4). АЭ мониторинг твердения бетонов позволяет определить влияние состава и добавок по показателям интенсивности и длительности периодов гидратации. Временная зависимости параметров импульсов АЭ позволяет проследить длительность индукционного периода гидратации, а энергетические характеристики импульсов АЭ (энергия АЭ, амплитуда АЭ) – интенсивность процессов гидратации.

Прогноз прочности бетона

Реализация методики прогнозирования прочности бетона осуществляется в соответствии с блок-схемой, представленной на рис. 3.

Реализация методики выполняется в два этапа: предварительные эксперименты по построению градуировочных зависимостей и проведение измерений на конструкции. Время, необходимое на сбор данных для прогноза прочности, не является фиксированным и для большинства составов не превышает 48 часов. Для прогноза прочности бетонов наиболее информативными параметрами являются:

- Δt – длительность второго периода;
- $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона кумулятивной зависимости параметров импульсов АЭ от времени для третьего периода.

Данные параметры Δt , $tg(\alpha_{III})$ могут быть использованы для построения множественной регрессионной модели по формуле:

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

где b_1 , b_2 и b_0 – коэффициенты регрессионного уравнения;

R_{28} – прочность бетона в возрасте 28 суток.

На основании уравнения (1), построенного по результатам предварительных экспериментов, возможно осуществлять прогноз прочности бетона.



Рис. 3. Блок-схема методики прогнозирования прочности бетона
 Fig. 3. Block diagram of the method of predicting the strength of concrete

Акустико–эмиссионный контроль набора прочности бетона в процессе твердения

Метод АЭ может быть использован также для контроля процесса нарастания прочности, который может осуществляться в режиме реального времени. В качестве примера на рис. 4 представлена зависимость суммарной энергии импульсов АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени для бетонного куба из состава АЭ 4 за временной интервал 28 суток. Суммарный счет импульсов АЭ был выбран в качестве наиболее информативного параметра в ходе предварительно проведенного анализа.

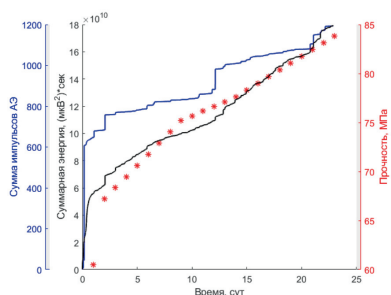


Рис. 4. Зависимость суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени
Fig. 4. Dependence of the total AE energy, the number of AE hits and strength on time

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, что 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. В качестве примера на рис. 5 представлены зависимости суммарной энергии и числа импульсов АЭ от прочности.

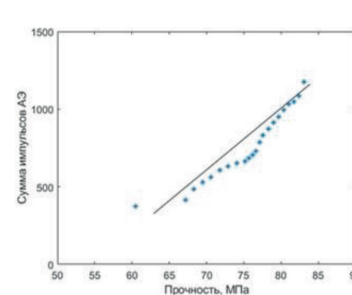
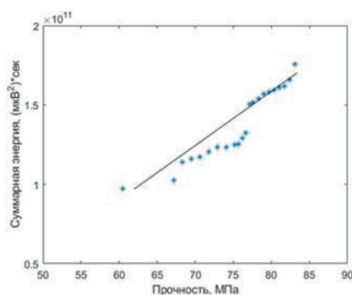


Рис. 5. Зависимость (а) суммарной энергии АЭ от прочности и (б) числа импульсов АЭ от прочности
Fig. 5. Dependence of (a) the total AE energy on strength and (b) the number of AE hits on strength

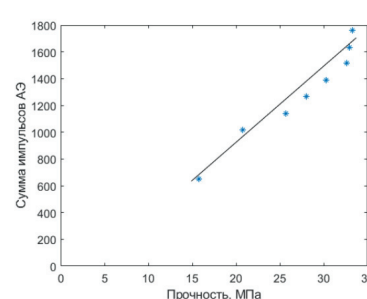
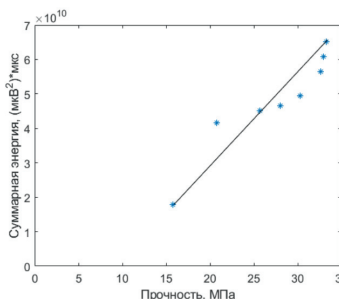
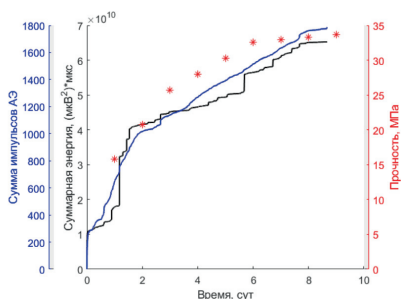


Рис. 6. Зависимости (а) суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени, (б) суммарной энергии АЭ от прочности и (в) числа импульсов АЭ от прочности (тяжелый бетон с минеральными добавками, состав АЭ 6)
Fig. 6. Dependences of (a) the total AE energy, the number of AE hits and strength on time, (b) the total AE energy on strength and (v) the number of AE hits on strength (heavy concrete with mineral additives, co-becoming AE 6)

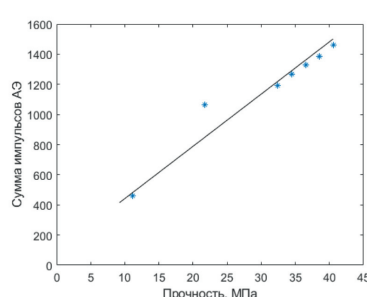
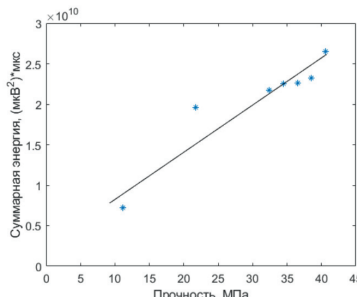
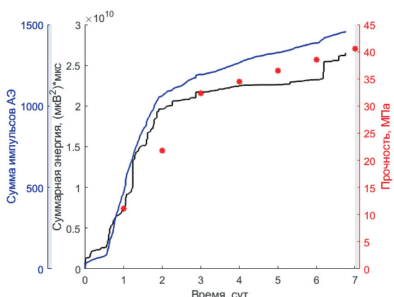


Рис. 7. Зависимости (а) суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени, (б) суммарной энергии АЭ от прочности и (в) числа импульсов АЭ от прочности (мелкозернистый бетон, состав АЭ 10)
Fig. 7. Dependences of (a) the total AE energy, the number of AE hits and strength on time, (б) the total AE energy on strength and (v) the number of AE hits on strength (fine-grained concrete, composition of AE 10)

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 могут быть построены и для тяжелых бетонов с минеральными добавками (рис. 6), а также мелкозернистых бетонов (рис. 7).

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 составляет 0.93, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности – 0.96.

Акустико-эмиссионные измерения в процессе твердения железобетонных балок

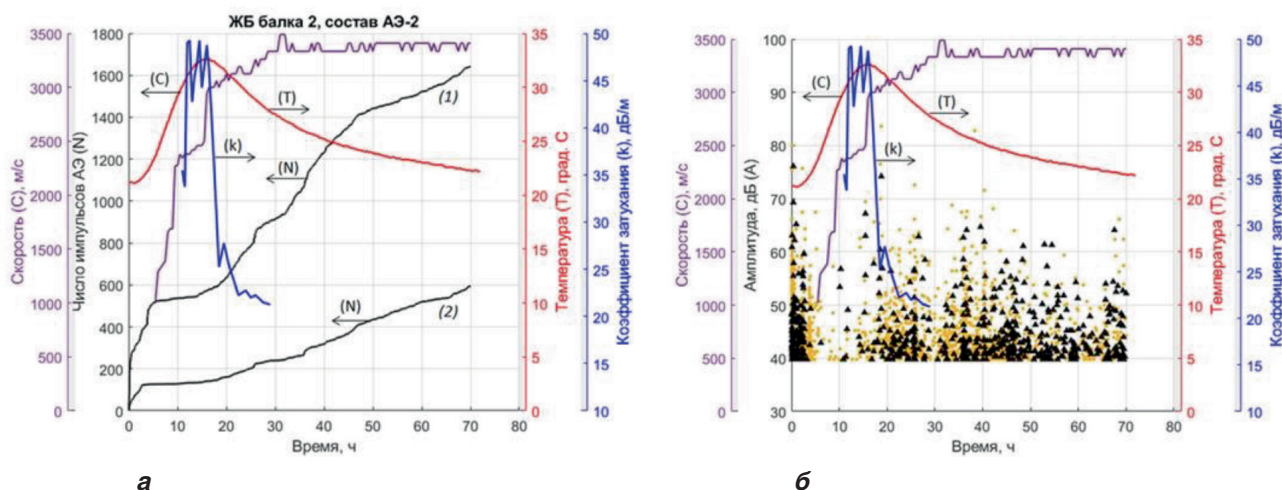
Измерения АЭ данных для железобетонных балок проводились с целью оценки влияния армирования на результаты регистрации АЭ данных, а также оценки частотного диапазона используемых ПАЭ. Для определения коэффициента затухания и скорости распространения акустических волн в процессе твердения бетона использовалась антенная решетка из ПАЭ, установленных на волновод и расположенных на расстоянии 15 см друг от друга вдоль балки. Измерения проводились в автоматическом режиме каждые пол часа путем поочередного излучения и приема акустических сигналов всеми ПАЭ антенной решетки. Было исследовано два типа ПАЭ: DIS30-300 (низкочастотный) и GT200 (среднечастотный).

На рис. 8 для сравнения представлены зависимости числа импульсов АЭ и амплитуд для двух типов преобразователей.

Для рассматриваемых зависимостей наблюдается общая тенденция изменения представленных

параметров с течением времени. На начальном этапе происходит рост АЭ активности с последующим ее уменьшением практически до нулевого значения. В этот же момент наблюдается непродолжительный интервал времени, когда температура является практически постоянной, после чего начинается ее повышение. Измерение коэффициента затухания и скорости распространения акустических волн на начальном этапе является невозможным в связи с высоким значением коэффициента затухания и тем фактом, что излучаемый сигнал затухает прежде, чем пройдет расстояние между ПАЭ. Для амплитуды импульсов АЭ также наблюдается плавное снижение численных значений.

В момент, когда происходит первое скачкообразное увеличение скорости распространения акустических волн, АЭ данные характеризуются периодом затишья. Значения коэффициента затухания являются практически неизменными в пределах данного периода. Начало данного периода может быть характеризовано как начало схватывания. В момент, когда по данным АЭ начинается повторный рост активности АЭ (также происходит повторный рост амплитуд импульсов АЭ), температура достигает своего максимума. В то же время начинается резкое снижение коэффициента затухания и выход на плато скорости, которому предшествует скачкообразное изменение. Совокупный анализ данных факторов позволяет говорить о завершении периода схватывания. Прочность бетона в это время составляет около 50 % проектной прочности. Для преобразователя DIS30-300 количество импульсов АЭ за аналогичный период превышает аналогичный показатель для GT200 более чем в 2 раза (рис. 8а), что связано с тем, что коэффициент затухания на высо-



* – преобразователь DIS30-300; Δ – преобразователь GT200; кривая (1) – преобразователь DIS30-300; кривая (2) – преобразователь GT200
 Рис. 8. Зависимости (а) числа импульсов АЭ, (б) амплитуд, скорости, коэффициента затухания и температуры для балки * – DIS30-300 converter; Δ – GT200; converter curve (1) – DIS30-300 converter; curve (2) – GT200 converter
 Fig. 8. Dependences of (a) the number of AE hits, (б) amplitudes, velocity, attenuation coefficient and temperature for beam

ких частотах является более высоким, чем на низких. Как следствие, зона контроля для преобразователя DIS30-300 больше, чем для GT200, что обеспечивает более интегральную оценку результатов контроля.

Основные выводы

1. Метод АЭ позволяет выделять стадийность структурообразования бетона. 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.

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

3. Акустико-эмиссионный метод контроля бетона в раннем возрасте позволяет определять расплывчатую прочность, контролировать нарастание прочности бетона в процессе твердения.

4. АЭ мониторинг твердения бетонных смесей рекомендуется проводить полосовыми преобразователями АЭ, имеющими частотный диапазон регистрируемых сигналов 30–300 кГц.

5. Для создания акустического контакта между ПАЭ и свежеприготовленной бетонной смесью должен использоваться глубинный волновод.

6. Контроль структурообразования в лабораторных условиях методом АЭ целесообразно выполнять на бетонных кубах размером 200 × 200 × 200 мм. Стенки контейнера рекомендуется изготавливать из ламинированной фанеры, что позволяет значительно снизить отражение акустических сигналов от поверхности контейнера.

7. Применен алгоритм дистанционного контроля затухания сигналов акустической эмиссии в процессе твердения бетонных и железобетонных конструкций без присутствия оператора. По измерениям скорости распространения акустических волн, уменьшению коэффициента затухания и выходу этих значений на плато можно говорить о завершении периода схватывания бетонной смеси.

8. АЭ метод позволяет прогнозировать и наблюдать за приращением прочности бетонов массивных и густоармированных конструкций.

9. В условиях строительной площадки контроль и прогноз прочности бетонов АЭ методом возможен дистанционно, без присутствия оператора, в труднодоступных местах, где контроль традиционными методами затруднителен или невозможен.

Список литературы

1. Сагайдак А.И., Бардаков В.В. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. № 6. 2017. С. 40–47.
2. Hoduláková M., Topolář L., Kucharczyková B. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes. *MATEC Web of Conferences*. 2019. 4 p.
3. Trąpczyński W., Goszczyńska B., Bacharz M. Acoustic emission for determining early age concrete damage as an important indicator of concrete quality. *Condition before Loading*. 2020, no. 13, 17 p.
4. Shawkey M.A., Abdelzاهر M.A., Mahmoud H.M., Rashad M.M. Monitoring of acoustic emission behaviour during early-age cement paste hydration. *Materials 5th International conference on advanced sciences ICAS5: Materials Science and Engineering*. 2020, 7 p.
5. Rizzo P., Vandebossche J.M., Nassiri S., X. Ni A Solitary. Wave-based sensor to monitor the setting of fresh concrete. *Sensors*. 2014, no. 14, pp. 12568–12584.
6. Grosse Christian U., Ohtsu M. Acoustic emission testing: basics for research – applications in civil engineering [pdf]. 2008, 400 p. <https://vdoc.pub/documents/acoustic-emission-testing-basics-for-research-applications-in-civil-engineering-4fm86es8ll10> (Date of access 10.09.2021).
7. Shen G., Zhang J., Wu Zh. Advances in Acoustic Emission Technology. *Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission*. Guangzhou, China, 2019, pp. 41–53.
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 III AE*. Kyoto, 2016, pp. 105–110.
9. Dzaye E.D., Schutter G.D., Aggelis D.G. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, no. 18, pp. 242–254.
10. Van Den Abeele, K. Desadeleer, W. De Schutter, G. & Wevers. Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics. *Cement and Concrete Research*. 2009, no. 39, pp. 426–432.
11. Chotard T., J. Smith, A. Rotureau, D. Fargeot, D. & C. Gault. Acoustic emission characterisation of calcium aluminate cement hydration at an early stage. *J. Eur. Ceram. Soc*. 2003, no. 23, pp. 387–398.
12. Di Bella C., Griffa M., Ulrich T.J., Lura P. Cement and concrete research early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content. *Cement and Concrete Research*. 2016, no. 89, pp. 87–96.

13. Lura P., Couch J., Jensen O.M., Weiss J. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation. *Cement and Concrete Research*. 2009, no. 39, pp. 861–867.

14. Slowik V., Schmidt M., Fritzsche R. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. *Cement and Concrete Composites*. 2008, no. 30, pp. 557–565.

15. Pazdera L., Topolar L., Korenska M., Smutny J., Bilek V. Advanced analysis of acoustic emission parameters during the concrete hardening for long time // *11th European Conference on Non-Destructive Testing*. 2014, pp. 1–8.

References

1. Sagaidak A.I., Bardakov V.V. Forecasting the strength of concrete during its hardening using the acoustic emission method. *Flaw detection*. 2017, no. 6, pp. 40–47 (In Russian).

2. Hoduláková M., Topolář L., Kucharčzyková B.B. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes. *MATEC Web of Conferences*. 2019, 4 p.

3. Trąpczyński W., Goszczyńska B., Bacharz M. Acoustic emission for determining early age concrete damage as an important indicator of concrete quality. *Condition before Loading*. 2020, no. 13, 17 p.

4. Shawkey M.A., Abdelzaher M.A., Mahmoud H.M., Rashad M.M. Monitoring of acoustic emission behaviour during early-age cement paste hydration. *Materials 5th International conference on advanced sciences ICAS5: Materials Science and Engineering*. 2020, 7 p.

5. Rizzo P., Vandenbossche J.M., Nassiri S., X. Ni A Solitary. Wave-based sensor to monitor the setting of fresh concrete. *Sensors*. 2014, no. 14, pp. 12568–12584.

6. Grosse Christian U., Ohtsu M. Acoustic emission testing: basics for research – applications in civil engineering [pdf]. 2008, 400 p. <https://vdoc.pub/documents/acoustic-emission-testing-basics-for-research-applications-in-civil-engineering-4fm86es8ll10> (Date of access 10.09.2021).

7. Shen G., Zhang J., Wu Zh. Advances in Acoustic Emission Technology. *Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission*. Guangzhou, China. 2019, pp. 41–53.

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 III AE*. Kyoto. 2016, pp. 105–110.

9. Dzayee E.D., Schutter G.D., Aggelis D.G. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, no. 18, pp. 242–254.

10. Van Den Abeele, K. Desadeleer, W. De Schutter, G. & Wevers. Active and passive monitoring of the early

hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics. *Cement and Concrete Research*. 2009, no. 39, pp. 426–432.

11. Chotard T., J. Smith, A. Rotureau, D. Fargeot, D. & C. Gault. Acoustic emission characterisation of calcium aluminate cement hydration at an early stage. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2003, no. 23, pp. 387–398.


12. Di Bella C., Griffa M., Ulrich T.J., Lura P. Cement and concrete research early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content. *Cement and Concrete Research*. 2016, no. 89, pp. 87–96.


13. Lura P., Couch J., Jensen O.M., Weiss J. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation. *Cement and Concrete Research*. 2009, no. 39, pp. 861–867.

14. Slowik V., Schmidt M., Fritzsche R. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. *Cement and Concrete Composites*. 2008, no. 30, pp. 557–565.

15. Pazdera L., Topolar L., Korenska M., Smutny J., Bilek V. Advanced analysis of acoustic emission parameters during the concrete hardening for long time. *11th European Conference on Non-Destructive Testing*. 2014, pp. 1–8.

Информация об авторах / Information about the authors

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

Владимир Васильевич Бардаков, канд. техн. наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела, ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва e-mail: bardakovv@interunis-it.ru

Vladimir V. Bardakov, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of the Research Department, LLC «INTERUNIS-IT», Moscow e-mail: bardakovv@interunis-it.ru

Евгения Сергеевна Боровкова, физик, старший преподаватель Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк e-mail: e.borovkova@psu.by

Evgeniya S. Borovkova, Physicist, Senior Lecturer at the Euphrosyne Polotsk State University, Novopolotsk e-mail: e.borovkova@psu.by

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author