

УДК 620.179.17

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ТВЕРДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Е. С. Боровкова**

Старший преподаватель кафедры физики, УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: e.borovkova@psu.by

### Реферат

Контроль за структурообразованием бетона на стадии твердения важен, так как эта стадия в значительной степени определяет его конечные свойства. В этой области исследований все более широко используют метод акустической эмиссии, который позволяет регистрировать внутреннюю структурную активность бетона в процессе его твердения [1]. В материале данной статьи приведены экспериментально выявленные закономерности взаимосвязи кинетики структурообразования и роста прочности твердеющего бетона с изменениями сигналов акустической эмиссии: числа импульсов акустической эмиссии, а также длительности периода формирования коагуляционной структуры цементного теста в бетоне и производной величины – тангенса угла наклона числа импульсов в начальный период интенсивного упрочнения структуры твердеющего бетона.

Экспериментальные исследования проводились с использованием бетонных смесей, традиционного тяжелого и мелкозернистого бетона, а также содержащего минеральные и химические добавки, и стальную фибру. В процессе твердения бетона непрерывно регистрировали изменения сигналов акустической эмиссии. По результатам проведенного исследования были выявлены информативные параметры импульсов акустико-эмиссионных данных, которые коррелируют с прочностью бетона. С практических позиций применения результатов этих исследований обеспечивается возможность прогнозной оценки прочности твердеющего бетона в произвольном промежуточном возрасте, например, для распалубки сборных изделий или съема опалубки монолитных конструкций.

По результатам исследований, приведенных в материале статьи, предложена методика контроля прочности на сжатие бетона в раннем возрасте с использованием метода акустической эмиссии. Это дает возможность использовать в практике строительства неразрушающий метод контроля, который позволяет проводить мониторинг permanently, дистанционно, без присутствия оператора, включая применение в труднодоступных местах разнообразных строительных конструкций.

**Ключевые слова:** бетон, твердение, акустическая эмиссия, контроль, структурообразование, структура, прочность.

## ASSESSMENT OF CONCRETE STRENGTH DURING ITS HARDENING USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

**E. S. Borovkova**

### Abstract

Control over the structure formation of concrete in the hardening stage is important, since this stage largely determines its final properties. In this area of research, the method of acoustic emission is increasingly used, which makes it possible to record the internal structural activity of concrete during its hardening [1]. In the material of this article, experimentally identified patterns of the relationship between the kinetics of structure formation and the growth of the hardening concrete strength with changes in the acoustic emission signals: acoustic emission burst count, as well as the duration of the period of formation of the coagulation structure of the cement dough in concrete and the derivative value - the tangent of the angle of inclination of the number of pulses in the initial period of intensive strengthening of the hardening concrete structure.

Experimental studies were carried out using concrete mixtures, traditional heavy and fine-grained concrete, as well as containing mineral and chemical additives, and steel fiber. Changes in acoustic emission signals were continuously recorded during concrete hardening. The results of the study revealed informative parameters of acoustic emission data pulses that correlate with concrete strength. From the practical point of view of applying the results of these studies, it is possible to predict the strength of hardening concrete at an arbitrary intermediate age, for example, for stripping prefabricated products or removing the formwork of monolithic structures.

Based on the results of the studies presented in the article, a method for monitoring the compressive strength of concrete at an early age using the acoustic emission method was proposed. This makes it possible to use a non-destructive control method in construction practice, which allows monitoring permanently, remotely, without the presence of an operator, including the use of various building structures in hard-to-reach places.

**Keywords:** concrete, hardening, acoustic emission, control, structure formation, structure, strength.

### Введение

Одной из важнейших задач строительной отрасли является обеспечение эксплуатационной надежности строительных конструкций, в том числе за счет постоянного совершенствования технологии бетона и его использования в строительном производстве. Бетон, являясь базовым строительным материалом, характеризуется тем, что претерпевает структурные изменения на протяжении всего «срока службы». В этой связи мониторинг ранней стадии его твердения очень важен, так как этот период в значительной степени предопределяет конечные свойства бетона [2]. В области мониторинга стадии твердения бетона все шире используется метод акустической эмиссии, который позволяет регистрировать при этом его внутреннюю структурную активность.

Кроме этого, данный метод позволяет фиксировать различные виды акустической эмиссии, с учетом внешних воздействий [3]:

– вызванных приложенными механическими нагрузками к материалу;

- вызванных протеканием химических реакций и разнообразных коррозионных процессов;
- вызванных движением звуковых волн при перемагничивании материалов;
- вызванных утечкой при протекании газа и жидкости через отверстие в объекте испытаний;
- возникающих из-за трения поверхностей различных тел;
- связанных с фазовыми превращениями в различных материалах и веществах;
- возникающих в результате нелинейного взаимодействия излучения с веществами и материалами.

Особый интерес исследователей вызывает то, что метод акустической эмиссии позволяет регистрировать акустические сигналы, излучаемые самим твердеющим бетоном при формировании его структуры [4–7]. Считается, что данный метод является «пассивным

методом» неразрушающего контроля и позволяет контролировать прочность бетона в любом месте конструкции, на любой глубине и в труднодоступных местах [8].

В материале настоящей статьи приведены результаты авторских экспериментальных исследований, отражающие изменения сигналов акустической эмиссии, которые возникают и фиксируются при структурировании твердеющего цементного бетона. Каждый эксперимент включал испытания образцов двух – трех серий (серия из 3–4 образцов). Регистрация сигналов акустической эмиссии для каждого эксперимента проводилась непрерывно в течение от двух до семи суток.

В результате выполненных исследований обоснованы к применению информативные параметры акустико-эмиссионных данных, позволяющие прогнозировать прочность бетона как в процессе твердения, так и к проектному (28 суток) возрасту.

### Материалы и методы исследования

При контроле за процессом твердения бетона методом акустической эмиссии использовали образцы-кубы (с ребром 100 мм и с ребром 200 мм), изготовленные вибрированием на лабораторной

виброплощадке со стандартными характеристиками: амплитуда колебаний  $A \sim 0,5$  мм и частота  $f \sim 50$  Гц. Твердение первые 24 часа проходило в условиях гидроизоляции поверхности образцов, а после распалубки – в помещении лаборатории при температуре окружающей среды  $t \sim 20 \pm 5$  °С и влажности  $\phi \geq 70$  %.

Для определения акустических параметров при структурировании бетона, были исследованы различные опытные образцы, характеристики и состав которых представлены в таблице 1. В состав всех образцов входили пластифицирующие добавки 1-ой группы (по СТБ 1112 – 98) в количестве 0,4 % от массы цемента. С целью установления возможного влияния «наличия – отсутствия» крупного заполнителя в бетоне на уровень сигналов акустической эмиссии в процессе реакции цемента с водой затворения, становления структуры и твердения (роста прочности) бетона были выполнены эксперименты с мелкозернистым (цементнопесчаным) бетоном составом (номер серии 5). С этой же целью исследовали составы бетона, приготовленные с наличием в них в составе ~ 11 % по массе цемента минеральной добавки в виде доменного гранулированного шлака молотого до удельной поверхности  $S_{уд} \sim 450$  м<sup>2</sup>/кг (серии 3, 4) и стальной фибры (серия 6).

Таблица 1 – Характеристики и состав бетона опытных образцов

Номер серии	Количество испытываемых образцов	Номинальный состав бетона, кг/м <sup>3</sup>						Водоцементное отношение	Фактическая средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>
		Цемент	Песок	Щебень	Вода	Шлак	Фибра, кг		
1	8	350	770	1100	175			0,50	2399
2	8	500	530	1200	190			0,38	2458
3	6	315	770	1100	175	35		0,50	2407
4	6	450	530	1200	190	50		0,39	2446
5	12	500	1500	–	225	–		0,45	2124
6	12	350	840	950	172		40	0,49	2374

Примечание – Во всех случаях бетонная смесь характеризовалась подвижностью марки П4. Для состава № 6 – до введения стальной фибры.

Для проведения измерений по регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе твердения бетонных составов использовалась система A-Line DDM-1, производства компании ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Данная система представляет собой многоканальную модульную систему сбора и обработки акустико-эмиссионной информации распределенного типа с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных. Акустико-эмиссионные комплексы данной серии состоят из центрального компьютера (блок сбора и обработки данных) и нескольких измерительных линий, объединяющих последовательно соединенные модули сбора и обработки акустико-эмиссионной информации [8]. Используемая система позволяет измерять:

- амплитуду сигнала акустической эмиссии;
- энергию акустической эмиссии (акустическая энергия, выделяемая в месте локальной перестройки структуры материала, переносимая волнами, возникающими в объекте [9]);
- время нарастания сигнала акустической эмиссии (временной интервал между началом регистрации импульса акустической эмиссии и моментом, при котором импульс достигает максимальной величины [9]);
- длительность сигнала акустической эмиссии;
- число выбросов акустической эмиссии;
- активность импульсов акустической эмиссии (число зарегистрированных событий акустической эмиссии за единицу времени [9]);
- время регистрации.

Акустико-эмиссионная система обеспечивает обработку, и отображение информации в режиме реального времени и сохраняет информацию для последующего анализа в цифровой форме. Ввиду того, что акустико-эмиссионная аппаратура работает только с электрическими сигналами, для трансформации колебаний электрического напряжения в акустические колебания и обратно используют пьезоэлектрические преобразователи. В экспериментальных исследованиях использовались полосовые преобразователи DIS 30-300 с полосой пропускания 30–300 кГц, производства компании ООО «Донские Измерительные Системы».

В ходе проведения экспериментов для создания акустического контакта между пьезоэлектрическим преобразователем и свежепри-

готовленной бетонной смесью, преобразователи через слой контактной жидкости устанавливали на стальной волновод и фиксировали магнитным держателем. В качестве контактной жидкости использовался литол. Волновод, представляющий собой стальную пластинку размером 90 × 50 × 2 мм сваренную сплошным круговым сварным швом со стальным стержнем диаметром 12 мм и длиной 100 мм, погружался в бетон до момента касания пластинкой состава [10]. При проведении экспериментальных исследований процесса твердения бетона (кубических образцов) использовался один пьезоэлектрический преобразователь и, следовательно, один волновод, который устанавливался в центре образца.

Для корреляции акустико-эмиссионных данных и прочности бетонных образцов, а также для дальнейшего анализа и определения прочностных характеристик свежеприготовленного бетона параллельно испытывали образцы на прочность при сжатии в возрасте: 1, 3, 7, 14 и на 28 сутки твердения. В таблице 2 приведены результаты экспериментальных исследований кинетики роста прочности бетона исследуемых составов.

Таблица 2 – Прочность исследуемого бетона

Номер серии по таблице 1	Прочность бетона (МПа) в возрасте, сут.:				
	1	3	7	14	28
1	12,5	23,0	30,6	34,2	41,9
2	21,2	43,6	48,8	52,7	61,5
3	11,6	21,0	29,1	32,2	40,9
4	17,1	31,3	40,5	44,9	56,9
5	11,6	34,1	38,0	40,6	47,4
6	15,9	40,1	46,2	47,5	52,5

### Результаты экспериментов и их обобщение

Как показали исследования процесса твердения бетона приведенных составов, можно выделить временные интервалы, характеризующиеся изменениями параметров акустической эмиссии в соответствии с различными периодами структурообразования бетона [8]. Выделяют [11] три периода структурообразования: I-й период – индукционный период, т. е. начальный период гидролизно-гидратационного

взаимодействия цемента с водой затворения; II-й период – период схватывания, т. е. формирования коагуляционной структуры цементного теста; III-й период – период твердения, т. е. формирования кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне.

Сигналы акустической эмиссии в пределах первого периода (I) в основном связаны с активным развитием процесса массопереноса воды и составляющих деформаций в реагирующем цементном тесте, включая развитие конструкционной усадки [6, 12, 13]. Этому периоду характерно наличие значительного количества химически несвязанной воды.

Высокий коэффициент затухания, низкая скорость акустического импульса приводят к снижению количества зарегистрированных импульсов либо к их полному отсутствию во втором (II) периоде [8], что отражает развитие процесса гидратации и полное отсутствие свободной воды к окончанию второго периода [11].

Переход от второго периода к третьему (III) характеризуется увеличением числа импульсов акустической эмиссии, и чем больше было зарегистрированных импульсов в этот период, тем выше конечная прочность бетона [2], т. к. это явление отражает процесс формирования кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне и, собственно, структуры бетона.

В таблице 3 приведены экспериментально установленные зависимости изменений параметров импульсов акустической эмиссии от времени твердения.

Из экспериментальных данных таблицы 3 следует, что общие закономерности изменений сигналов акустической эмиссии, характерные для бетона с крупным заполнителем, сохраняются и применительно к мелкозернистому бетону, а также с содержанием в составах минеральной добавки и стальной фибры.

Из графического отображения данных таблицы 3 видно, что для первой, третьей и шестой серии образцов характерно увеличение временных интервалов для первого индукционного периода и второго периода схватывания, что связано с большим водоцементным соотношением по сравнению с другими составами. Также для шестой серии образцов из фибробетона на третьем этапе (периоде твердения) активность импульсов акустической эмиссии выше, чем в образцах с отсутствием дисперсного армирования.

При анализе представленных в таблице 3 данных прослеживается общность тенденций взаимосвязи изменений сигналов акустической эмиссии твердеющего бетона всех исследуемых составов и уровнем прочности бетона. Также выявлена общая закономерность, заключающаяся в том, что чем короче время формирования коагуляционной структуры цементного теста в бетоне (второй этап на графических зависимостях), т. е. чем интенсивнее развивается процесс схватыва-

ния и чем плотнее коагуляционная структура к окончанию II-го периода твердения, тем выше прочность бетона к проектному возрасту.

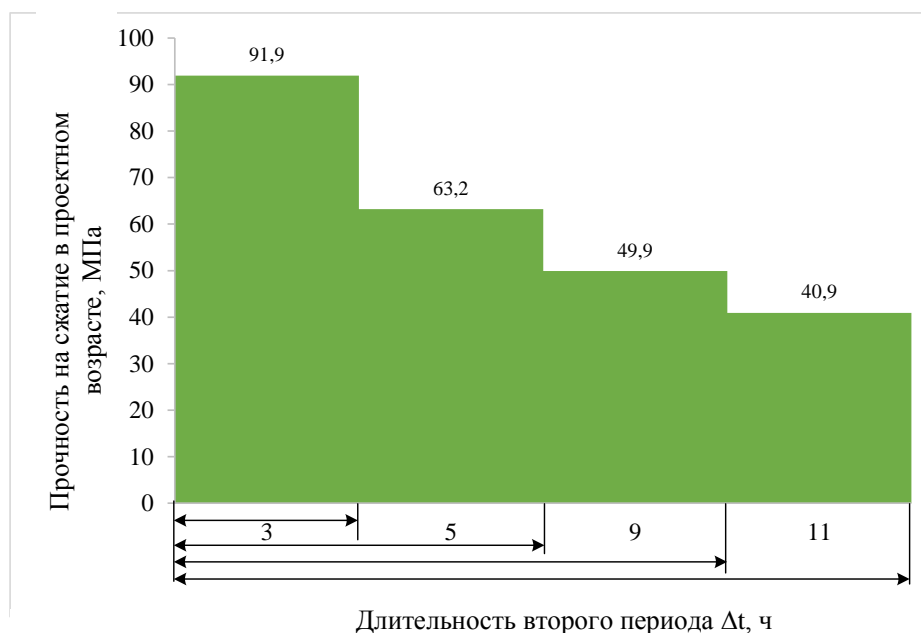
На гистограммном рисунке 1 отражена выявленная тенденция взаимосвязи прочности на сжатие бетонных образцов в возрасте 28 суток от длительности второго периода структурообразования, установленной в процессе исследований.

Обработка всей совокупности результатов экспериментов позволила выявить непосредственную взаимосвязимость между накоплением импульсов сигналов акустической эмиссии и ростом прочности бетона в процессе твердения, так как метод акустической эмиссии регистрирует активность, которая непосредственно связана с химико-физическими процессами, протекающими при взаимодействии цемента с водой затворения, структурообразовании и твердении бетона. По экспериментально полученным данным, приведенным, в таблице 3 в графической интерпретации, выявлена закономерная связь между числом импульсов акустической эмиссии и прочностью бетона, которой достигли образцы указанных составов за время наблюдения до испытаний. На вторые сутки зависимость числа импульсов акустической эмиссии от времени стала иметь «стабильный характер» и коррелировать с прочностью.

Экспериментами также выявлена закономерность взаимосвязи интенсивности изменений сигналов акустической эмиссии с переходом от II-го к III-му периоду взаимодействия цемента с водой, т. е. к переходу от сформировавшейся коагуляционной структуры цементного теста к формированию на ее фоне кристаллогидратной структуры твердеющего цементного камня. Этот период времени и развивающийся процесс твердения цемента адекватно характеризуются изменением угла наклона графической зависимости фиксируемых изменений сигналов акустической эмиссии. Установлена закономерность прямой взаимосвязи тангенса угла наклона данных графической зависимости и последующего роста прочности бетона: чем больше тангенс угла наклона, тем выше его прочность. Выявленная закономерность позволяет использовать ее для прогнозной оценки прочности бетона к проектному возрасту.

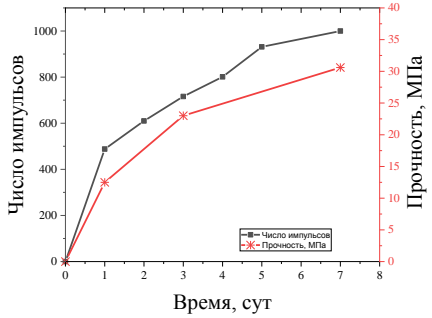
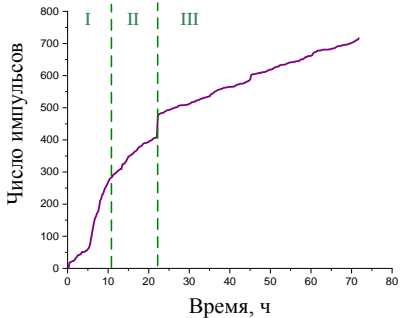
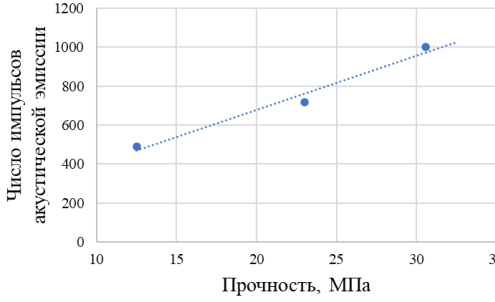
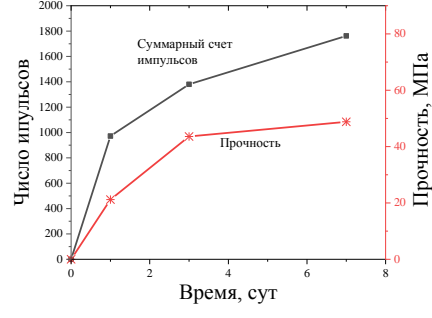
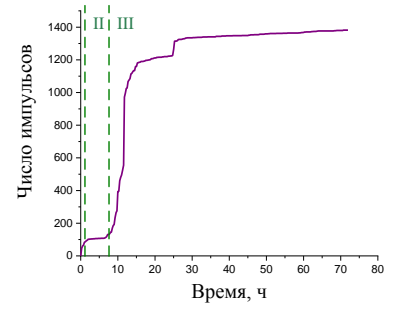
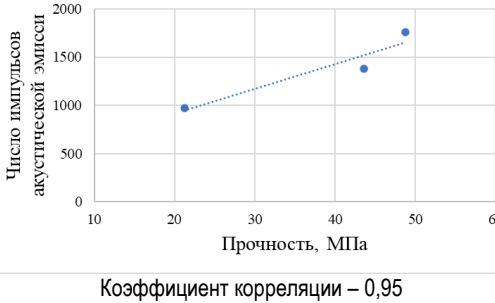
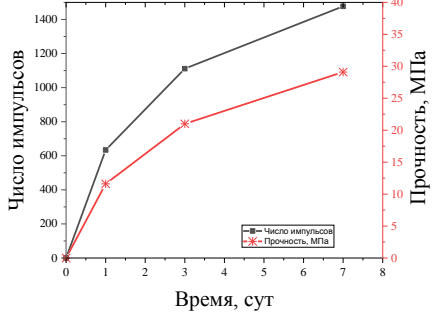
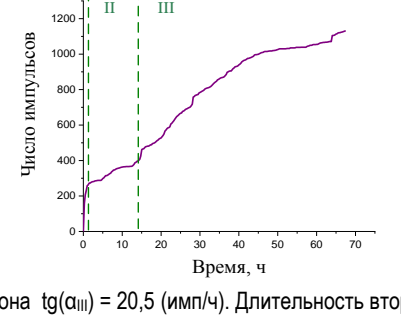
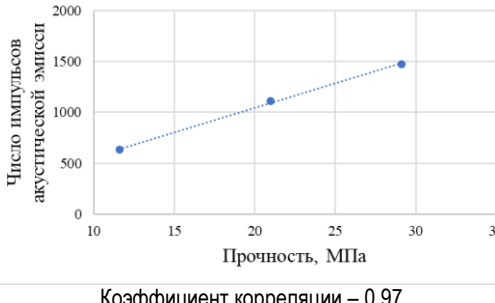
На основании вышеизложенного в качестве информативных параметров, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток выделены [8]:

- $\Delta t$  – длительность второго периода;
- $\text{tg}(\alpha_{\text{III}})$  – тангенс угла наклона зависимости число импульсов акустической эмиссии в начальной стадии перехода от процесса схватывания к процессу твердения цементного теста, т. е. для третьего периода, отражающего процесс формирования кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне.

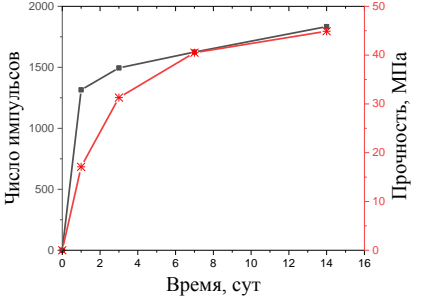
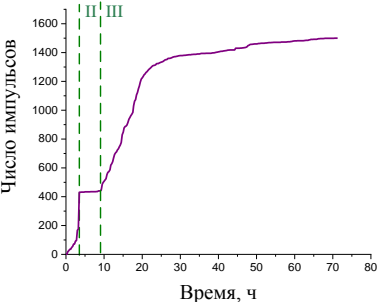
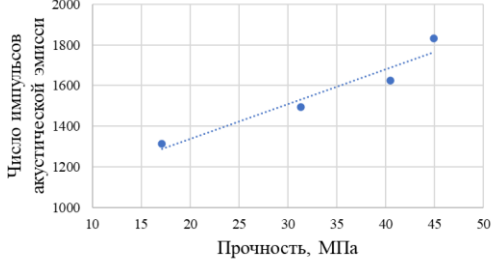
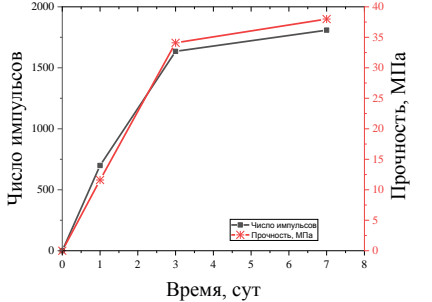
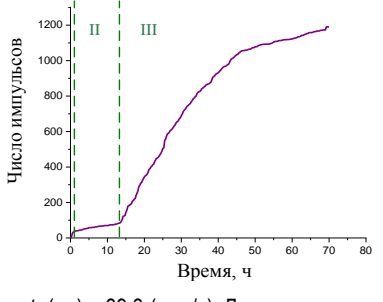
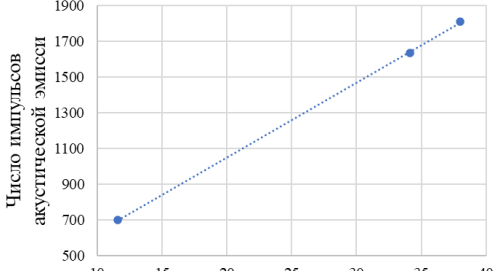
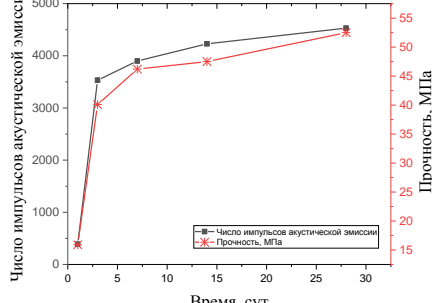
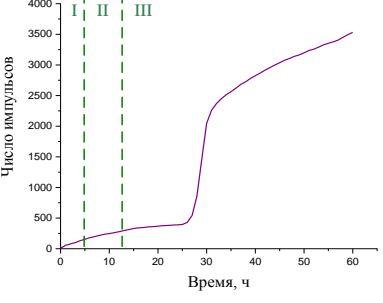
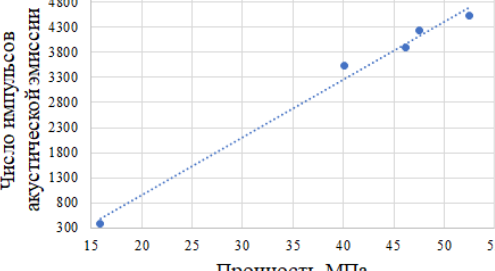


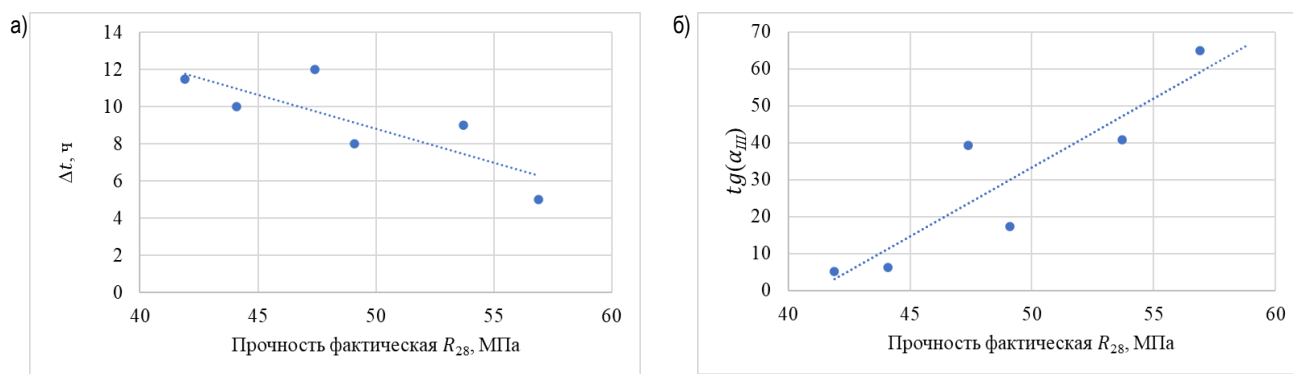
**Рисунок 1** – Экспериментально выявленная тенденция взаимосвязи прочности бетона от длительности второго периода структурообразования в процессе твердения

Таблица 3 – Акустико-эмиссионный мониторинг твердения бетона

Номер серии	Число импульсов, прочность	Число импульсов в первые трое суток твердения	Взаимозависимость числа импульсов акустической эмиссии от прочности
1		 <p>Тангенс угла наклона <math>tg(\alpha_{III}) = 5,17</math> (имп/ч). Длительность второго периода <math>\Delta t = 11,5</math> ч</p>	 <p>Коэффициент корреляции – 0,99</p>
2		 <p>Тангенс угла наклона <math>tg(\alpha_{III}) = 81</math> (имп/ч). Длительность второго периода <math>\Delta t = 5</math> ч</p>	 <p>Коэффициент корреляции – 0,95</p>
3		 <p>Тангенс угла наклона <math>tg(\alpha_{III}) = 20,5</math> (имп/ч). Длительность второго периода <math>\Delta t = 11</math> ч</p>	 <p>Коэффициент корреляции – 0,97</p>

Продолжение таблицы 3

Номер серии	Число импульсов, прочность	Число импульсов в первые трое суток твердения	Взаимозависимость числа импульсов акустической эмиссии от прочности
4		 <p>Тангенс угла наклона <math>tg(\alpha_{III}) = 65</math> (имп/ч). Длительность второго периода <math>\Delta t = 5</math> ч</p>	 <p>Коэффициент корреляции – 0,96</p>
5		 <p>Тангенс угла наклона <math>tg(\alpha_{III}) = 39,3</math> (имп/ч). Длительность второго периода <math>\Delta t = 12</math> ч</p>	 <p>Коэффициент корреляции – 0,99</p>
6		 <p>Тангенс угла наклона <math>tg(\alpha_{III}) = 16,3</math> (имп/ч). Длительность второго периода <math>\Delta t = 7,5</math> ч</p>	 <p>Коэффициент корреляции – 0,99</p>



(а) длительности второго периода и (б) тангенса угла наклона для третьего периода его твердения  
**Рисунок 2** – Зависимость прочности бетона в возрасте 28 суток

На рисунке 2 приведена графическая интерпретация зависимости прочности бетона от величин параметров ( $\Delta t$ ,  $tg(\alpha_{III})$ ) для бетона исследуемых составов.

Анализ всей совокупности экспериментальных данных свидетельствует о возможности достоверной оценки методом акустической эмиссии прочности на сжатие бетона различных составов в процессе его твердения и ее уровня к проектному возрасту. Начиная с третьих суток, представленные зависимости имеют однозначную взаимосвязь. Этот вывод подтверждают высокие значения коэффициента корреляции между соотношением «число импульсов – прочность бетона» в достаточно широком диапазоне составов бетона и его прочности как в процессе твердения, так и к проектному (28 суток) возрасту. Коэффициент корреляции для зависимости числа импульсов акустической эмиссии от прочности варьируется от 0,96 до 0,99. Подобного рода зависимости, могут быть использованы в качестве градуировочных в процессе мониторинга бетонных и железобетонных конструкций с целью определения прочности бетона.

Установленная закономерность взаимосвязи между развитием процесса взаимодействия цемента с водой затворения и интенсивностью изменений импульсов акустической эмиссии позволяет выделить период времени, характеризующий становление коагуляционной структуры цементного теста, т. е. период его схватывания или продолжительность «II-го периода». При этом чем интенсивнее (что отражается в росте количества импульсов акустической эмиссии) развивается этот процесс, тем короче данный период времени.

Чем более упорядочена первичная (коагуляционная) структура цементного теста на стадии активного развития процесса гидратации цемента, тем плотнее (а в итоге – прочнее) будет структура затвердевшего цементного камня и бетона, что подтверждают результаты выполненных экспериментов. В частности, очевидна установленная закономерность: сокращение времени II-го периода при росте количества импульсов акустической эмиссии закономерно отражается в росте прочности бетона, что является одним из факторов, позволяющих оперативно прогнозировать ее величину к проектному возрасту бетона.

### Заключение

В структурно неоднородных материалах, таких как бетон, при распространении акустических волн возникают сложные процессы дисперсии, дифракции, отражения и преломления. Поэтому любые изменения в структуре, а, как следствие, энергетических и силовых характеристик, повлекут за собой изменения акустического сигнала [2]. На всех трех периодах структурирования цементного камня в бетоне и собственно бетона (гидролизно-индукционного, схватывания, твердения) наблюдаются изменения акустических характеристик (амплитуд, числа импульсов акустической эмиссии), по которым, как установлено экспериментально, можно проследить поэтапный переход в развитии процесса твердения цементного бетона. А на этом основании контролировать как кинетику роста прочности, так и прочность бетона в проектном (28 суток) возрасте.

При этом акустико-эмиссионный метод контроля позволяет прогнозировать и наблюдать за приращением прочности бетона в монолитных, включая массивные и густоармированные конструкции. В результате исследований установлено, что метод акустической эмиссии позволяет в режиме реального времени наблюдать за процессом набора прочности бетона, что обеспечивается за счет присущей ему высокой чувстви-

тельности. Поэтому его можно использовать в условиях строительных площадок, включая труднодоступные места, где контроль традиционными методами затруднителен или невозможен.

### Список цитированных источников

1. Continuous AE monitoring of fresh concrete / S. N. Iliopoulos, E. Dzaye, Y. El Khattabi [et al.] // Progress in Acoustic Emission XVIII: proc. of 8th International Conf. on Acoustic Emission – IIIAE 2016, Tokyo, Japan, 5-9 December 2016. – Tokyo, 2016. – P. 293–298.
2. Сагайдак, А. И. Определение прочностных характеристик бетона при его твердении с помощью метода акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, Е. С. Боровкова // Современные вопросы механики сплошных сред. – 2021. – С. 98–108.
3. Кузнецов, Н.С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии / Н. С. Кузнецов. – М. : Машиностроение, 1998. – 96 с.
4. Сагайдак, А. И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, В. В. Бардаков // Дефектоскопия. – 2017. – № 6. – С. 40–43.
5. Hoduláková, M. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes / M. Hoduláková, L. Topolář, V. Kucharčzyková // MATEC Web of Conferences. – 2019. – 4 p.
6. Wave-based sensor to monitor the setting of fresh concrete / P. Rizzo, J. M. Vandebossche, S. Nassiri, X. Ni A Solitary // Sensors. – 2014. – No. 14. – P. 12568–12584.
7. Shen, G. Advances in Acoustic Emission Technology / G. Shen, J. Zhang, Zh Wu // Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission. – 2019. – P. 41–53.
8. Сагайдак, А. И. Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, В. В. Бардаков, Е. С. Боровкова // Бетон и железобетон. Строительные материалы и изделия. – 2023. – № 1 (615). – С. 33–42. – DOI: 10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42.
9. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения : ГОСТ Р 55045—2012 ; переиздан 12.20218. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
10. Borovkova, E. Monitoring of fibroblast at an early age by the method of acoustic emission / E. Borovkova, D. Shabanov // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 1 (36). – С. 34–38. – DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-34-38.
11. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
12. Acoustic emission characterisation of calcium aluminate cement hydration at an early stage / T. Chotard, J. Smith, A. Rotureau [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2003. – No. 23. – P. 387–398.
13. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation / P. Lura, J. Couch, M. O. Jensen, J. Weiss // Cement and Concrete Research. – Vol. 39, № 10. – 2009. – P. 861–867.
14. Муравин, Г. Б. Исследование акустической эмиссии твердеющего бетона / Г. Б. Муравин, Г. С. Павловская, А. Ф. Щуров // Дефектоскопия. – 1984. – № 10. – С. 77–81.
15. Evin, D. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / D. D. Evin, Geert De Schutter, G. Dimitrios // Archives of civil and mechanical engineering. – 2018. – № 18. – P. 742–754.

16. Ohtsu, M. Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening / M. Ohtsu // Final Report of RILEM TC 185-ATC / ed.: H. W. Reinhardt, C. U. Grosse. – Bagneux : RILEM Publications SARL, 2005. – 21 p.
17. Van Den Abeele, K. Non destructive online evaluation of concrete hardening using acoustic emission and harmonic wave spectroscopy / K. Van Den Abeele, G. De Schutter, M. Wevers // ECNDT: proc. of 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany), September 2006. – Berlin, 2006. – 9 p.
18. Aggelis, D. G. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / D. G. Aggelis, D. Polyzos, T. P. Philippidis // Journal of the Mechanics and Physics of solids. – 2005. – Vol. 53, № 4. – P. 857–883.
19. Dzaye, E. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / E. D. Dzaye, G. D. Schutter, D. G. Aggelis // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – No. 18 – P. 242–254. – DOI: 10.1016/j.acme.2017.12.004.
20. Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics / Van Den Abeele, K. Desadeleer, W. De Schutter, G. & Wevers // Cement and Concrete. Research. – 2009. – No. 39. – P. 426–432.
21. Cement and concrete research early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content / C. Di Bella, M. Griffa, T. J. Ulrich, P. Lura // Cement and Concrete Research. – 2016. – No. 89. – P. 87–96. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.001.
22. Slowik, V. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value / V. Slowik, M. Schmidt, R. Fritzsche // Cement and Concrete Composites. – 2008. – No. 30. – P. 557–565.
23. Advanced Analysis of Acoustic Emission Parameters during the Concrete Hardening for Long Time / L. Pazdera, L. Topolar, V. Bilek [et al.] // e-Journal of Nondestructive Testing: proc. of 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 6–10 Oct. 2014. – Prague, 2014. – Vol. 19 (12). – P. 3255–3263. – URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=16640> (дата обращения: 17.03.2026).
24. Мониторинг структурного состояния цементных систем по параметрам сигналов акустической эмиссии и тензометрии / Д. Н. Шабанов, А. Н. Ягубкин, Е. С. Боровкова, Е. А. Трамбицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. Строительные материалы. – 2019. – № 16. – С. 30–34.
25. Боровкова, Е. С. Физические свойства структурных изменений в бетоне / Е. С. Боровкова, Д. Н. Шабанов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. Строительство и архитектура. – 2021. – № 8. – С. 39–42.
9. Tekhnicheskaya diagnostika. Akustiko-emissionnaya diagnostika. Terminy, opredeleniya i oboznacheniya : GOST R 55045—2012 ; pereizdan 12.20218. – M. : Standartinform, 2019. – 12 s.
10. Borovkova, E. Monitoring of fibroblast at an early age by the method of acoustic emission / E. Borovkova, D. Shabanov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2024. – № 1 (36). – S. 34–38. – DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-34-38.
11. Ahverdov, I. N. Osnovy fiziki betona / I. N. Ahverdov. – M. : Strojizdat, 1981. – 464 s.
12. Acoustic emission characterisation of calcium aluminate cement hydration at an early stage / T. Chotard, J. Smith, A. Rotureau [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2003. – No. 23. – P. 387–398.
13. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation / P. Lura, J. Couch, M. O. Jensen, J. Weiss // Cement and Concrete Research. – Vol. 39, № 10. – 2009. – P. 861–867.
14. Muravin, G. B. Issledovanie akusticheskoy emissii tverdeyushchego betona / G. B. Muravin, G. S. Pavlovskaya, A. F. SHCHurov // Defektoskopiya. – 1984. – № 10. – С. 77–81.
15. Evin, D. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / D. D. Evin, Geert De Schutter, G. Dimitrios // Arhives of civiland mechanic alengineering. – 2018. – № 18. – P. 742–754.
16. Ohtsu, M. Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening / M. Ohtsu // Final Report of RILEM TC 185-ATC / ed.: H. W. Reinhardt, C. U. Grosse. – Bagneux : RILEM Publications SARL, 2005. – 21 p.
17. Van Den Abeele, K. Non destructive online evaluation of concrete hardening using acoustic emission and harmonic wave spectroscopy / K. Van Den Abeele, G. De Schutter, M. Wevers // ECNDT: proc. of 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany), September 2006. – Berlin, 2006. – 9 p.
18. Aggelis, D. G. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / D. G. Aggelis, D. Polyzos, T. P. Philippidis // Journal of the Mechanics and Physics of solids. – 2005. – Vol. 53, № 4. – P. 857–883.
19. Dzaye, E. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / E. D. Dzaye, G. D. Schutter, D. G. Aggelis // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – No. 18 – R. 242–254. – DOI: 10.1016/j.acme.2017.12.004.
20. Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics / Van Den Abeele, K. Desadeleer, W. De Schutter, G. & Wevers // Cement and Concrete. Research. – 2009. – No. 39. – P. 426–432.
21. Cement and concrete research early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content / C. Di Bella, M. Griffa, T. J. Ulrich, P. Lura // Cement and Concrete Research. – 2016. – No. 89. – P. 87–96. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.001.
22. Slowik, V. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value / V. Slowik, M. Schmidt, R. Fritzsche // Cement and Concrete Composites. – 2008. – No. 30. – P. 557–565.
23. Advanced Analysis of Acoustic Emission Parameters during the Concrete Hardening for Long Time / L. Pazdera, L. Topolar, V. Bilek [et al.] // e-Journal of Nondestructive Testing: proc. of 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 6–10 Oct. 2014. – Prague, 2014. – Vol. 19 (12). – P. 3255–3263. – URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=16640> (data obrashcheniya: 17.03.2026).
24. Monitoring struktornogo sostoyaniya cementnyh sistem po parametram signalov akusticheskoy emissii i tenzometrii / D. N. SHabanov, A. N. YAgubkin, E. S. Borovkova, E. A. Trambickij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Stroitel'nye materialy. – 2019. – № 16. – С. 30–34.
25. Borovkova, E. S. Fizicheskie svojstva strukturnyh izmenenij v betone / E. S. Borovkova, D. N. SHabanov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2021. – № 8. – S. 39–42.

#### References

1. Continuous AE monitoring of fresh concrete / S. N. Iliopoulos, E. Dzaye, Y. El Khattabi [et al.] // Progress in Acoustic Emission XVIII: proc. of 8th International Conf. on Acoustic Emission – IIIAE 2016, Tokyo, Japan, 5-9 December 2016. – Tokyo, 2016. – P. 293–298.
2. Sagajdak, A. I. Opredelenie prochnostnyh karakteristik betona pri ego tverdenii s pomoshch'yu metoda akusticheskoy emissii / A. I. Sagajdak, E. S. Borovkova // Sovremennye voprosy mekhaniki sploshnyh sred. – 2021. – S. 98–108.
3. Kuznecov, N.S. Teoriya i praktika nerazrushayushchego kontrolya izdelij s pomoshch'yu akusticheskoy emissii / N. S. Kuznecov. – M. : Mashinostroenie, 1998. – 96 s.
4. Sagajdak, A. I. Prognozirovaniye prochnosti betona v processe ego tverdeniya pri pomoshchi metoda akusticheskoy emissii / A. I. Sagajdak, V. V. Bardakov // Defektoskopiya. – 2017. – № 6. – S. 40–43.
5. Hoduláková, M. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes / M. Hoduláková, L. Topolář, B. Kucharczykova // MATEC Web of Conferences. – 2019. – 4 r.
6. Wave-based sensor to monitor the setting of fresh concrete / P. Rizzo, J. M. Vandenbossche, S. Nassiri, X. Ni A Solitary // Sensors. – 2014. – No. 14. – R. 12568–12584.
7. Shen, G. Advances in Acoustic Emission Technology / G. Shen, J. Zhang, Zh Wu // Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission. – 2019. – R. 41–53.
8. Sagajdak, A. I. Razrabotka metodiki kontrolya i prognoza prochnosti betona v rannem vozraste metodom akusticheskoy emissii / A. I. Sagajdak, V. V. Bardakov, E. S. Borovkova // Beton i zhelezobeton. Stroitel'nye materialy i izdeliya. – 2023. – № 1 (615). – S. 33–42. – DOI: 10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42.

Материал поступил 11.03.2026, одобрен 18.03.2026, принят к публикации 20.03.2026