

УДК 691.162

МОНИТОРИНГ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; канд. техн. наук А.Н. ЯГУБКИН;
Е.С. БОРОВКОВА; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Представлен комплекс работ по диагностике структурных изменений, происходящих в цементных системах. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния цементных образцов и явлений акустической эмиссии, возбуждаемых в образцах в режиме одноосного деформирования. Получены экспериментальные данные, связывающие характеристики акустической эмиссии с механизмом деформирования бетонного образца. Приведенные закономерности могут послужить основой для создания критерия оценки степени опасности бетонных повреждений на объектах различного назначения.

Ключевые слова: мониторинг, глубинный датчик, тензометрия, акустическая эмиссия, бетонные конструкции, динамика трещинообразования.

Введение. Одна из важнейших задач в строительстве – обеспечение безопасной эксплуатации объектов. При этом особое внимание представляют конструкции, изготовленные из бетона как наиболее распространенного и востребованного строительного материала. Без понимания физических процессов, вызывающих те или иные изменения свойств бетона во времени под воздействием силовых, а также иных факторов, трудно обеспечить заданный уровень надежности конструкций [1].

Для корректного определения остаточного ресурса конструкций исходные данные необходимо определять по результатам натурных испытаний и измерений, что не всегда возможно. Решением является создание и применение систем контроля и мониторинга за состоянием объектов [2].

В качестве первичных датчиков для получения информации, характеризующей параметры нагруженности и напряженного состояния конструкции, используются тензодатчики [3]. В данной работе авторами использованы ранее разработанные [4] так называемые «глубинные датчики» [5–8].

При исследовании напряженно-деформированного состояния бетона особое значение следует уделять его структуре, эволюции, а также развитию дефектов, которые могут привести к разрушению бетона. Поэтому, помимо тензометрического метода, было принято решение использовать акустико-эмиссионный (АЭ) метод [9]. Основная задача акустико-эмиссионного контроля состоит в выявлении показателей, характеризующих образование и рост трещин в бетонной конструкции, таких как место и время их образования, оценка размера трещины.

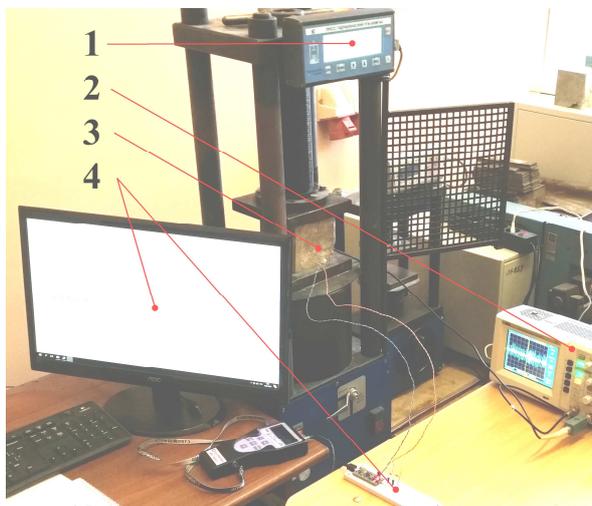
Согласно выдвигаемой гипотезе, параллельное использование сразу нескольких методов исследования (тензометрический, акустико-эмиссионный) позволит создать эффективный инструмент мониторинга состояния строительных бетонных конструкций, предоставляя при этом наиболее полную информацию об интересующем нас объекте.

Исследовательская часть. В качестве опытных образцов выбраны цементные кубы размерами 100×100×100 мм, с водоцементным отношением 0,4. Данный размер обусловлен удобством размещения сразу нескольких видов датчиков как снаружи, так и внутри испытываемых образцов. Нагружение образцов производилось прессом ПГМ-500МГ4А с шагом нагрузки 25 кН. Данные, полученные в ходе испытаний, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты испытаний цементных кубов на сжатие

№ нагружения	Нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Деформации, мм	№ нагружения	Нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Деформации, мм
0	0	0	0	8	202,7	20,27	1,09
1	22,9	2,29	0,35	9	229,5	22,95	1,22
2	52,3	5,23	0,47	10	249,3	24,93	1,32
3	78,5	7,85	0,56	11	280,2	28,02	1,45
4	102,3	10,23	0,68	12	303,7	30,37	1,56
5	128,5	12,85	0,78	13	332,2	33,22	1,79
6	154,3	15,43	0,89	14	349,0	34,9	1,89
7	178,1	17,81	1	15	–	Ресурс исчерпан	

При проведении испытаний использовались: установка для нагружения – пресс гидравлический ПГМ-500МГ4А; пьезодатчик для регистрации АЭ; осциллограф и компьютер. Измерительный комплекс представлен на рисунке 1.



1 – пресс гидравлический; 2 – осциллограф;
3 – пьезодатчик (датчик АЭ);
4 – тензометрическая схема с программным обеспечением «PhyZModule» [10]

Рисунок 1. – Общий вид созданной системы

Главная особенность данной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния бетона и цементных систем состоит в том, что параллельно друг другу осуществляется контроль механических напряжений с помощью глубинных датчиков (активный метод) и прослушивание явлений акустической эмиссии микрофоном (пассивный метод).

Дальнейшая фиксация и классификация явлений акустической эмиссии в образце производились согласно таблице 2.

Таблица 2. – Классификация параметров АЭ в зависимости от целостности структуры бетонного образца

Характеристики деформирования и разрушения	Характеристики АЭ
<i>стадия уплотнения</i> ($0 \div (0,3-0,5)R_{пр}$): - сдвиги начальных дефектов материала; - разрыв отдельных структурных связей	- единичная эмиссия со слабыми амплитудами сигналов высокой частоты
<i>стадия появления микротрещин</i> ($0,3R_{пр} \div 0,8R_{пр}$): - возникновение микротрещин и микродефектов в локальных зонах микроразрушения; - образуется развивающаяся сеть микротрещин	- высокая частота импульсов и увеличение их амплитуд
<i>стадия появления макротрещин</i> ($> 0,8 R_{пр}$): - образование магистральных трещин, выходящих на поверхность; - стремительное развитие разрушения	- сильная эмиссия с большими амплитудами пониженной частоты
<i>стадия активного разрушения</i> ($> 0,96R_{пр}$): - полное разрушение материала	- кратковременное затухание эмиссии с ее стремительным возрастанием перед разрушением образца

В ходе исследования важно выделить и обработать полученную информацию из общего массива данных [9]. Зависимость максимальной амплитуды АЭ от механической нагрузки представлена на рисунке 2. При нагружении образца поэтапно в сторону увеличения его суммарная деформация складывалась из упругой и неупругой составляющих, соотношение между которыми на разных стадиях нагружения различалось. На начальной стадии нагружения происходит разрушение слабых связей между отдельными структурными элементами. При этом возникают преимущественно неупругие деформации.

Указанное разрушение сопровождается значительной активностью акустической эмиссии, что видно из графика Фурье (F1–F14), отображенного на рисунке 2. На этапе (F1–F6) максимальная деформация образца составляет 0,89 мм.

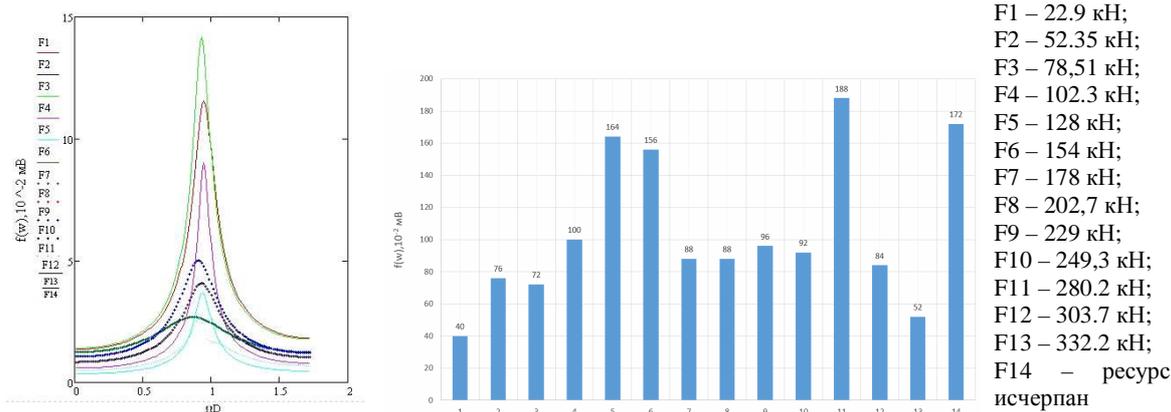


Рисунок 2. – Зависимость максимальной амплитуды АЭ от механической нагрузки

По мере дальнейшего монотонного увеличения нагрузки соотношение менее и более прочных связей между отдельными структурными элементами постоянно меняется в пользу последних. При этом ААЭ уменьшается. При достижении некоторых значений напряжений в образце достигается состояние максимального уплотнения. Это состояние характеризуется минимумом действующих и возникающих дефектов, а значит и минимумом ААЭ, возникающей под влиянием нагружения. На графике это можно проследить на участках F7–F10.

При превышении нагрузкой некоторого порогового значения происходит образование новых дефектов и, как следствие, рост ААЭ, что видно на рисунке 2 (F11). Таким образом, именно на участке нагружения, где имеет место состояние максимального уплотнения образца, преобладают упругие деформации, а ААЭ минимальна.

Согласно данному графику также можно выделить две зоны, которые соответствуют неупругой и упругой деформациям. При превышении 178 кН в образце преобладают упругие деформации, что подтверждается анализом, приведенным выше.

Одновременно с прослушиванием АЭ велась запись данных, получаемых с пресса ПГМ-500МГ4А и глубинных датчиков, с использованием программного обеспечения «PhyZModule» [10]. Полученные в ходе исследования данные позволили построить графики напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) бетонного образца, а также график зависимости изменения напряжения тензометрической системы во времени (рисунок 3).

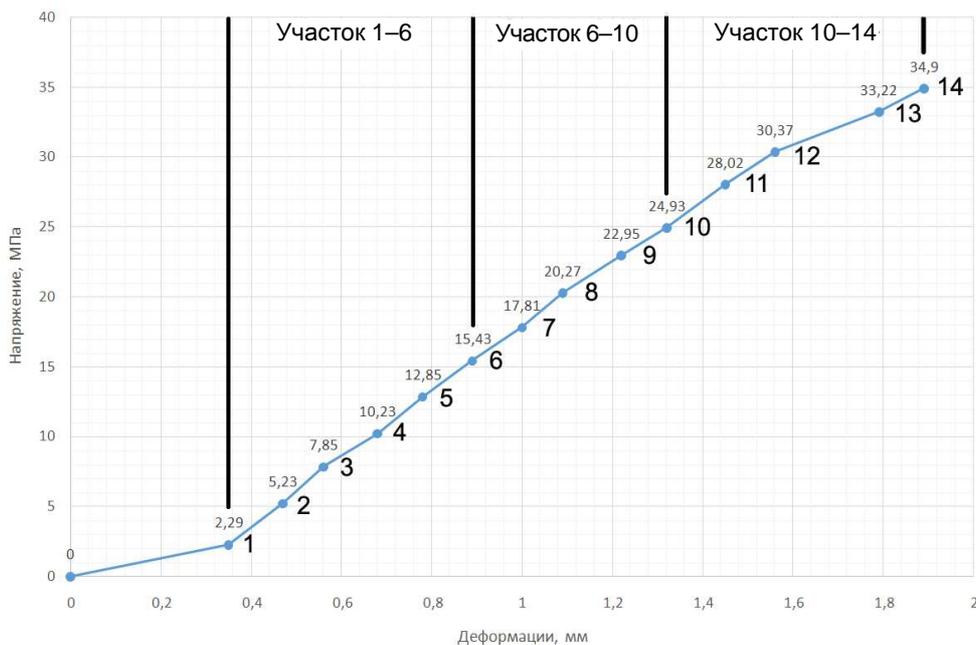


Рисунок 3. – Изменение напряженно-деформированного состояния цементного образца по показаниям гидравлического пресса ПГМ-500МГ4А

Графики, представленные на рисунке 3, для наглядности были разделены на 15 участков.

На участке 1–6 прослеживается уплотнение структуры и формирование микротрещин в исследуемом цементном образце. Состоянием максимального уплотнения принимаем точку 6, что соответствует 15,43 МПа ($\sigma_c = 0,44f_{cm}$).

Участок 6–10 принимаем за стадию формирования макротрещин, постепенно выходящих на поверхность образца. Точка 10, соответствует напряжению 24,93 МПа ($\sigma_c = 0,71f_{cm}$).

Участок 10–14 является стадией активного разрушения цементного образца. В точке 14 наблюдается напряжение, равное 34,9 МПа, что свидетельствует о достижении образцом предела прочности.

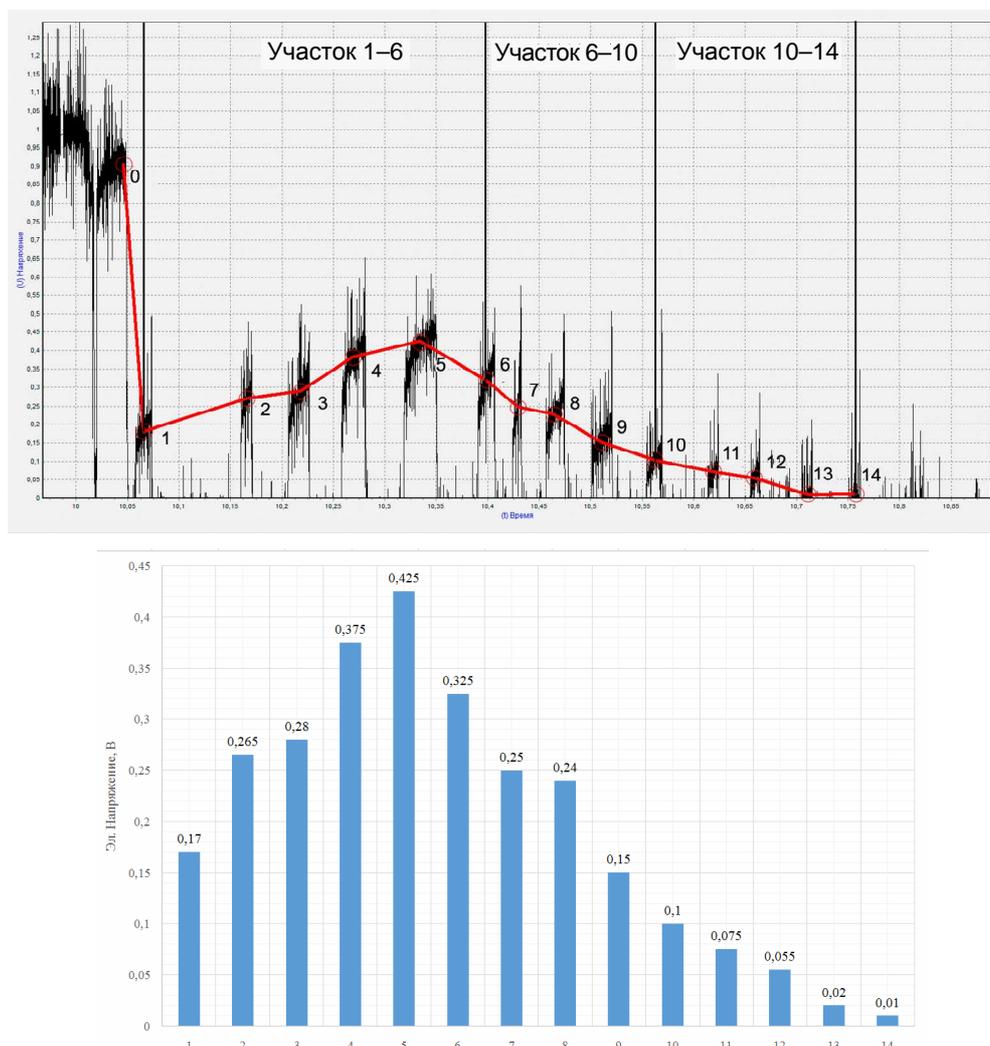


Рисунок 4. – Изменение электрического напряжения тензометрической системы и глубинного датчика во времени, записанное с помощью ПО “PhyZModule” [10]

Таким образом, применение двух методов позволяет с более высокой достоверностью получать области упругих деформаций и избежать накопления пластических. Совершенствуя датчики и установку для контроля за напряженно-деформированным состоянием цементных систем возможно добиться предупреждения и предотвращения возможных обрушений бетонных и железобетонных конструкций.

Выводы. Проведенные исследования позволяют представить механизм развития структурных дефектов в цементных системах следующим образом: с помощью двух типов датчиков (глубинный и акустической эмиссии) ведется контроль за формированием и дальнейшим развитием микродефектов (трещин) в структуре цементных образцов. При этом созданная система предусматривает обработку сразу нескольких входящих сигналов, что подразумевает ее многоканальность.

В перспективе данный комплекс будет использоваться для определения переходного этапа трещинообразования бетонных и железобетонных конструкций, исходя из их энергетических уровней, по параметрам звуковой волны (которая, в свою очередь, характеризует встречающиеся препятствия) и глубинного датчика, характеризующего механические изменения, непосредственно изнутри конструкции.

Таким образом, с помощью регистрации данных акустической эмиссии определена связь между акустическими сигналами и деформационными изменениями в бетонных образцах.

Опираясь на результаты проведенных исследований, можно констатировать, что совокупность методов тензометрии и акустической эмиссии предоставляет *возможность сопровождения* бетонных объектов. Это выражается в получении сигналов, свидетельствующих о возникновении и развитии дефекта в режиме реального времени, а также в определении ресурса бетонной конструкции на любой стадии эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковшар, С.Н. Изменение структурно-механических характеристик цементного камня при циклическом воздействии внешней среды / С.Н. Ковшар // Строительная наука и техника: науч.-техн. журн. – 2010. – № 1-2. – С. 60–63.
2. Шешуков, А.Н. Применение телеметрических систем для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций / А.Н. Шешуков // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. трудов ; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск, 2001. – С. 402–404.
3. Измерения в промышленности : справ. изд.: в 3-х кн. – 2-е изд., перераб. и доп. Кн. 1. ; пер. с нем. / под ред. проф. П. Профоса. – М. : Металлургия, 1990. – 384 с.
4. Методика сопровождения развития структурных дефектов в цементных системах / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
5. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил / Р.О. Красновский // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций. – М. : Госстройиздат, 1962. – С. 160–173.
6. Безгодков, И.М. К вопросу о методике исследования бетона в условиях трехосного сжатия [Электронный ресурс] / И.М. Безгодков, И.А. Горбунов, П.Ю. Шульгин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – Режим доступа: <http://ramag.ru/src/pressa/076.pdf>.
7. Ватуля, Г.Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – к. 2. – С. 48–56.
8. Макаренко, С.Ю. Применение глубинных датчиков на основе тензорезисторов при исследовании деформаций ползучести тяжелого бетона / С.Ю. Макаренко // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : материалы науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения проф. Н.Н. Леонтьева и 110-летию проф. В.З. Власова / МГСУ, 2017. – С. 74–77.
9. Параметры сигналов акустической эмиссии и их применение при мониторинге структуры бетона / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
10. Змитрович, С.Ю. Обработка аналоговых сигналов датчиковой аппаратуры. Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) [Электронный ресурс] / С.Ю. Змитрович, С.А. Вабищевич // Электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. – С. 272–275.

Поступила 04.12.2019

MONITORING THE STRUCTURAL STATE OF CEMENT SYSTEMS BY ACOUSTIC EMISSION AND TENZOMETRY SIGNAL PARAMETERS

D. SHABANOV, A. YAGUBKIN, E. BOROVKOVA, E. TRAMBITSKY

A set of works on the diagnosis of structural changes occurring in cement-technical systems is presented. The results of experimental studies of the stress-strain state of cement samples and acoustic emission phenomena excited in the sample in the uniaxial deformation mode are presented. Experimental data have been obtained linking the characteristics of acoustic emission with the mechanism of deformation of a concrete sample. Corresponding patterns may lead to the emergence of a criterion for assessing the degree of danger.

Keywords: *monitoring, deep sensors, tensometry, acoustic emission, concrete structures, crack formation dynamics.*