04,14

Выделение энергии при накоплении микротрещин при комбинации нагрева и ударного повреждении цементного камня

© А.Г. Кадомцев, И.П. Щербаков, А.Е. Чмель ¶

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 14 октября 2025 г.
В окончательной редакции 14 октября 2025 г.
Принята к публикации 16 октября 2025 г.

Метод акустической эмиссии (АЭ) применен для исследования генерации и накопления энергии образования микротрещин при сочетании нагрева и локализованного удара по поверхности цементного камня ЦК М400 естественного твердения. Эксперименты проведены при температурах 20 °C, 200 °C и 400 °C. Последняя температура является предельной для восстановления ЦК механических свойств после цикла нагревания. Развертки АЭ после удара были проанализированы и сопоставлены с последовательно протекающими процессами трансформации материала: пластической деформации, разрушения межпоровых перегородок нагретым паром, накопления микротрещин при превышении ударной прочности материала.

Ключевые слова: цементный камень, ударное повреждение, акустическая эмиссия, температурное воздействие.

DOI: 10.61011/FTT.2025.10.61968.275-25

1. Введение

Современные исследования цементов на прочность учитывают только статические характеристики, которые не изменяются быстротечно во времени [1,2]. Однако вибрация и даже одиночные ударные нагрузки цементного камня (ЦК) могут привести к появлению трещин. Ударопрочность бетона значительно снижается при повышении температуры и при нагреве выше 400 °C бетон начинает резко терять прочность и возникает рост пластических деформаций [3] с отходом от номинальных технических характеристик [4].

При естественной климатической температуре механическое воздействие вызывает в ЦК упругую деформацию, которая при достижении предела упругости приводит к появлению микротрещин [5] и при некоторой достаточной нагрузке — макроскопическую деградацию структуры материала. В порах бетона, нагретого выше температуры кипения воды, имеет место дополнительный эффект: давление пара нарастает до критического предела и происходят разрывы стенок пор — формируются микротрещины.

Традиционным неразрушающим методом регистрации образования микротрещин в ЦК является метод акустической эмиссии (АЭ) [6–8], причем в самое последние время наблюдается появление новейших экспериментальных техник его реализации [9–12]. В настоящей работе метод АЭ применен для наблюдения генерации и накопления микротрещин при сочетании нагрева и локализованного удара по поверхности ЦК при температурах 20 °C, 200 °C и 400 °C.

2. Образцы и оборудование

Образцы ЦК М400 размером $10 \times 10 \times 40$ mm помещались на массивную металлическую подставку с нанесенным слоем консистентной смазки. Ударное воздействие проводилось заостренным бойком из закаленной стали, на который с высоты 70 cm падал груз весом 100 g. Ударный эксперимент производился по 3 раза (каждый раз по неповрежденной поверхности на дистанции 8–10 mm друг от друга) при каждой температуре образца. При ударе на поверхности образца возникало локализованное повреждение материала в пятне диаметром $\sim 1\,\mathrm{mm}^2$ с хорошо воспроизводимой морфологией.

Система регистрации сигнала АЭ запускалась в момент касания грузом бойка. Пьезодатчиком из высокочувствительной керамики PZT, установленном на боковой поверхности образца, в диапазоне 80–900 kHz регистрировались временные развертки АЭ, вызванной образованием микротрещин в материале ЦК. Генерация АЭ записывалась в течение 4 ms с временным разрешением 40 ns. Сигналы АЭ поступали на вход аналогоцифрового преобразователя АСК-3106 и в цифровой форме сохранялись в компьютере.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1–3 показаны временные развертки индуцированных ударом акустических сигналов. Приведены величины квадратов амплитуды A^2, пропорциональные выделенной энергии ($E \propto A^2$). Отсчет времени

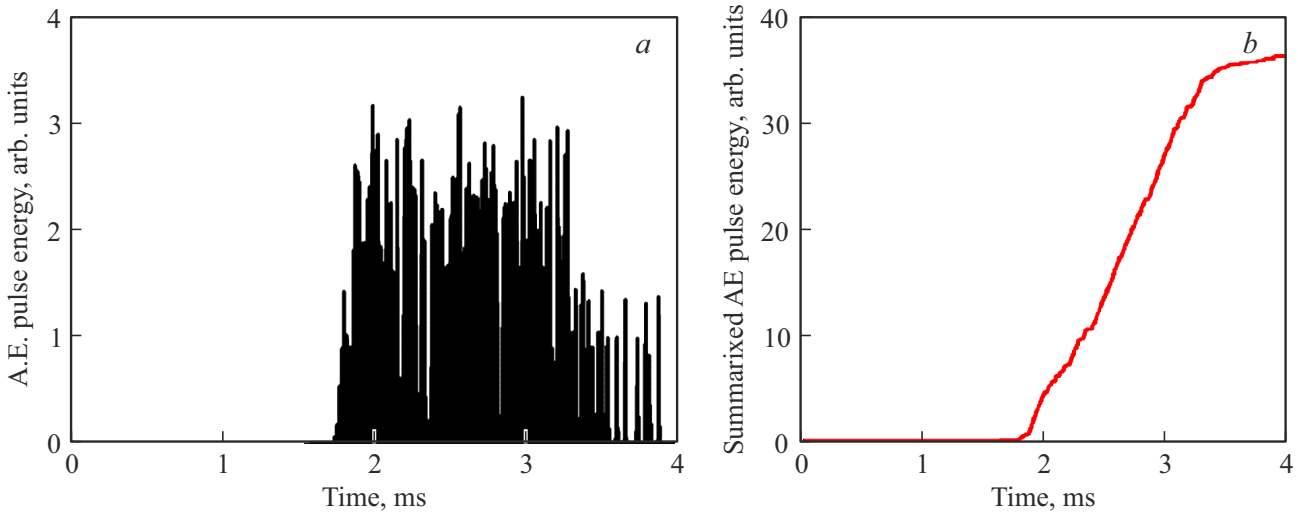

Рис. 1. Развертка серии импульсов АЭ (a) и кривая накопления энергий импульсов (b) при температуре образца 20 °C.

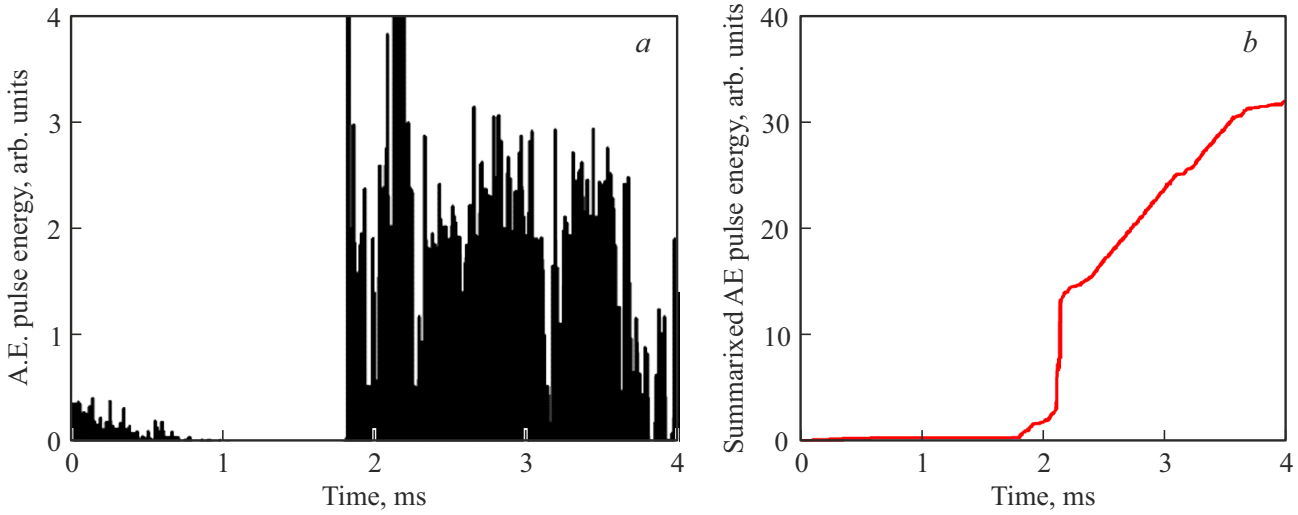

Рис. 2. Развертка серии импульсов АЭ (a) и кривая накопления энергий импульсов (b) при температуре образца 200 °C.

велся от момента касания бойка поверхности образца. При комнатной температуре (рис. 1, a) активность АЭ в течение первых ~ 1.8 ms не зарегистрирована, поскольку в поверхностном слое бетона происходят микропластические деформации, которые предшествуют появлению трещин. При исчерпании пластического течения появляются микротрещины, возбуждающие генерацию АЭ в течение примерно 2 ms и затухающую к 4 ms. Соответственно, выход энергии импульсов АЭ (рис. 1, b) был зарегистрирован только после достижения критической деформации ЦК. При двух повторных ударах картина эмиссии воспроизводилась (не показана).

При температуре образца 200 °C (рис. 2, a) удар по поверхности вызывал незначительный всплеск эмиссии, связанный с разрушением перегородок между порами из-за повышенного давления пара. В этом случае, отмечено некоторое накопление энергии импульсов АЭ в течение ~ 1 ms, выделенной до достижения критической деформации с образованием трещин (рис. 2, b). При последовательных ударах по ЦК, нагретом до 200 °C, картина эмиссии АЭ также воспроизводилась.

Наконец, при температуре 400 °C (рис. 3, a) связанный с объединением пор в нагретом образце слабый сигнал АЭ после 1-го удара продолжался вплоть до массового выхода микротрещин, причем при 2-ом (рис. 3, c) и, в особенности, 3-ем (рис. 3, d) повторных ударах генерация АЭ на стадии деформирования заметно возросла. Это указывает на эффективное распространение ударных волн в объеме образца в масштабе нескольких миллиметров при температуре 400 °C. Каждый последующий удар ослаблял сопротивление деформированию структуры ЦК в области, ближайшей к локализации очага разрушения.

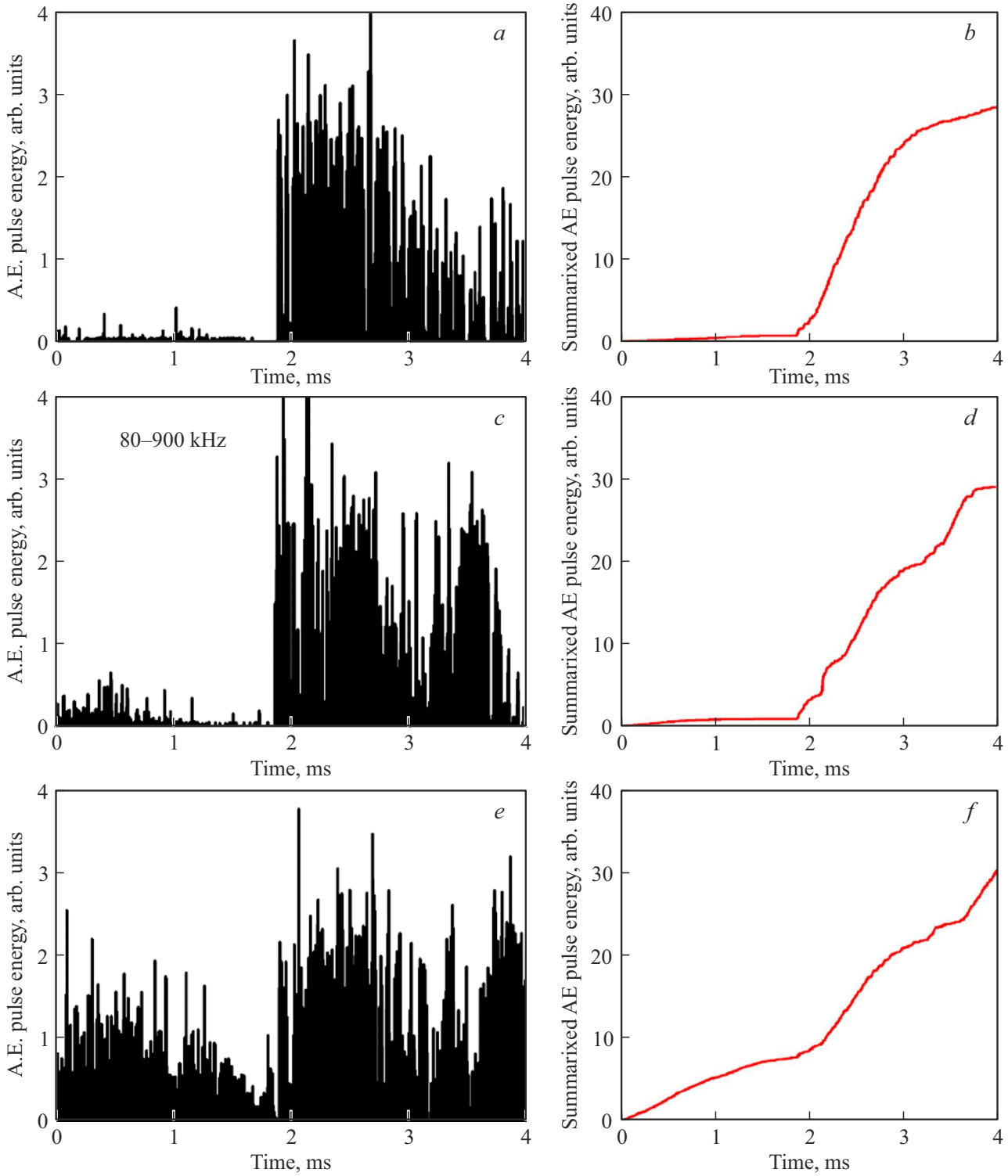

Рис. 3. Развертки серии импульсов АЭ при температуре образца 20 °C после первого (*a*), второго (*b*) и третьего (*c*) ударов и кривые накопления энергий импульсов первого (*d*), второго (*e*) и третьего (*f*) ударов.

4. Заключение

Применение метода акустической эмиссии для анализа структурной деградации ЦК при сочетании ударной нагрузки и нагрева до „критической“ температуры 400 °C позволило дифференцировать разделенные во времени процессы: упругую пластическую деформацию, разрушение межпоровых перегородок и накопление микротрещин при глобальном разрушении структуры при превышении ударной прочности материала. Для ЦК

при 400 °C показано увеличение суммарной энергии выделения микротрещин при разрушении межпоровых перегородок при повторном ударном воздействии на образцы, то есть наличие памяти о предшествующем снижении сплошности материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] П.А. Блинов, В.В. Никишин, В.Г. Гореликов, М.И. Садыков, К.С. Ручьев. Neftegaz. RU. **5**–**6**, 60 (2024).
[2] D.L. Bakirov. Oilfield Engineering. **3**, 31 (2020).
[3] А.А. Парфенов, О.А. Сивакова, О.А. Гусарь, В.В. Балакирева. Строительные материалы. **3**, 64 (2019). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66])
[4] M.W. Braestrup. Struct. Concr. **22**, *5*, 2502 (2021). https://doi.org/10.1002/suco.202100444
[5] M.R. Islam, A. Ali, J.B. Alam, T. Ahmad, S. Sakib. IJET, **10**, *1*, 28 (2021). doi: 10.14419/ijet.v10i1.30878
[6] S.C. Paul, G. Van Zijl. Cem. Concr. Res. **69**, 19 (2015).
[7] P.R. Prem, A.R. Constr. Build Mater. **123**, 481 (2016). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.033
[8] J.-W. Lee, H. Kim, T.-M. Oh. J. Civ. Eng. **24**, *9*, 2808−2823 (2020). https://doi.org/10.1007/s12205-020-5697-0
[9] X. Li, T. Miao, T. Liu, R. Chen, A. Case. Stud. Constr. Mat. **22**, e04281 (2025). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04281
[10] Q. Li, Sh. Zhang, Sh. Gu, H. Li, Z. Tan, S. Cai, W. Li, L. Zhang, Ch. Pan. Phys. Fluids **37**, *8*, 3337 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0275024
[11] A. Yu, X. Li, Z. Cheng, L. Liu, Shi, J. Fu. J. Perform. Constr. Facil., **4**, 39 (2025). doi: 10.1061/jpcfev.cfeng-4981
[12] А.Г. Кадомцев, И.П. Щербаков, А.Е. Чмель. ФТТ. **67**, *2*, 276 (2025). doi: 10.61011/FTT.2025.02.59981.17-25 [A.G. Kadomtsev, I.P. Shcherbakov, A.E. Chmel. Impact damage of cement rock subjected to short-time uniaxial compressing. Physics of the Solid State, 2025, Vol. 67, No 2. P. 273−275. doi: 10.61011/PSS.2025.02.60676.17-25]

Редактор В.В. Емцев