

04,14

Выделение энергии при накоплении микротрещин при комбинации нагрева и ударного повреждения 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 °С, 200 °С и 400 °С. 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 цемента на прочность учитывают только статические характеристики, которые не изменяются быстро 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 °С 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 последнее 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 °С, 200 °С и 400 °С.

2. Образцы и оборудование

Образцы ЦК М400 размером 10 × 10 × 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 см 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 ~ 1 mm 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

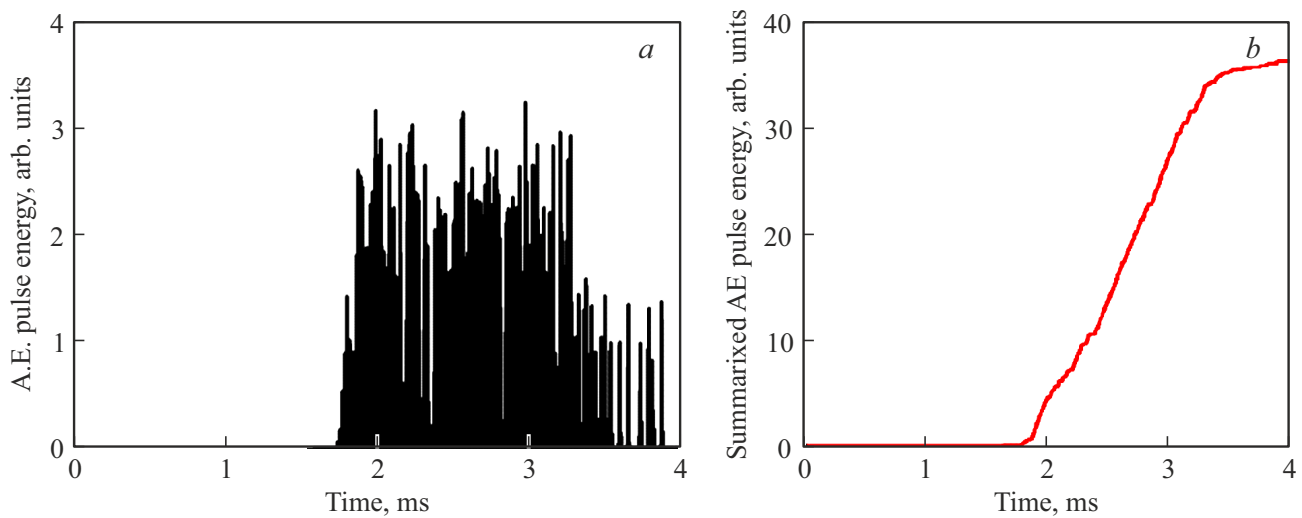


Рис. 1. Развертка серии импульсов АЭ (*a*) и кривая накопления энергий импульсов (*b*) при температуре образца 20 °С.

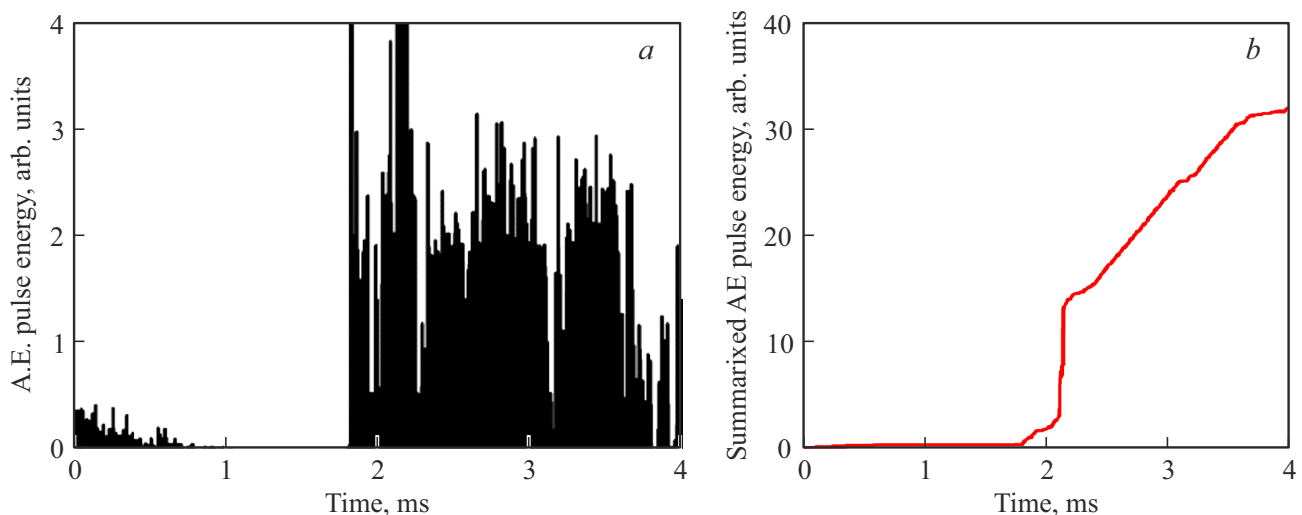


Рис. 2. Развертка серии импульсов АЭ (*a*) и кривая накопления энергий импульсов (*b*) при температуре образца 200 °С.

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 °С (рис. 2, *a*) удар по поверхности вызывал незначительный всплеск эмиссии, связанный с разрушением перегородок между порами из-за повышенного давления пара. В этом случае, от-

мечено 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 °С, картина эмиссии АЭ также воспроизводилась.

Наконец, при температуре 400 °С (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 °С. Каждый последующий удар ослаблял сопротивление деформированию структуры ЦК в области, ближайшей к локализации очага разрушения.

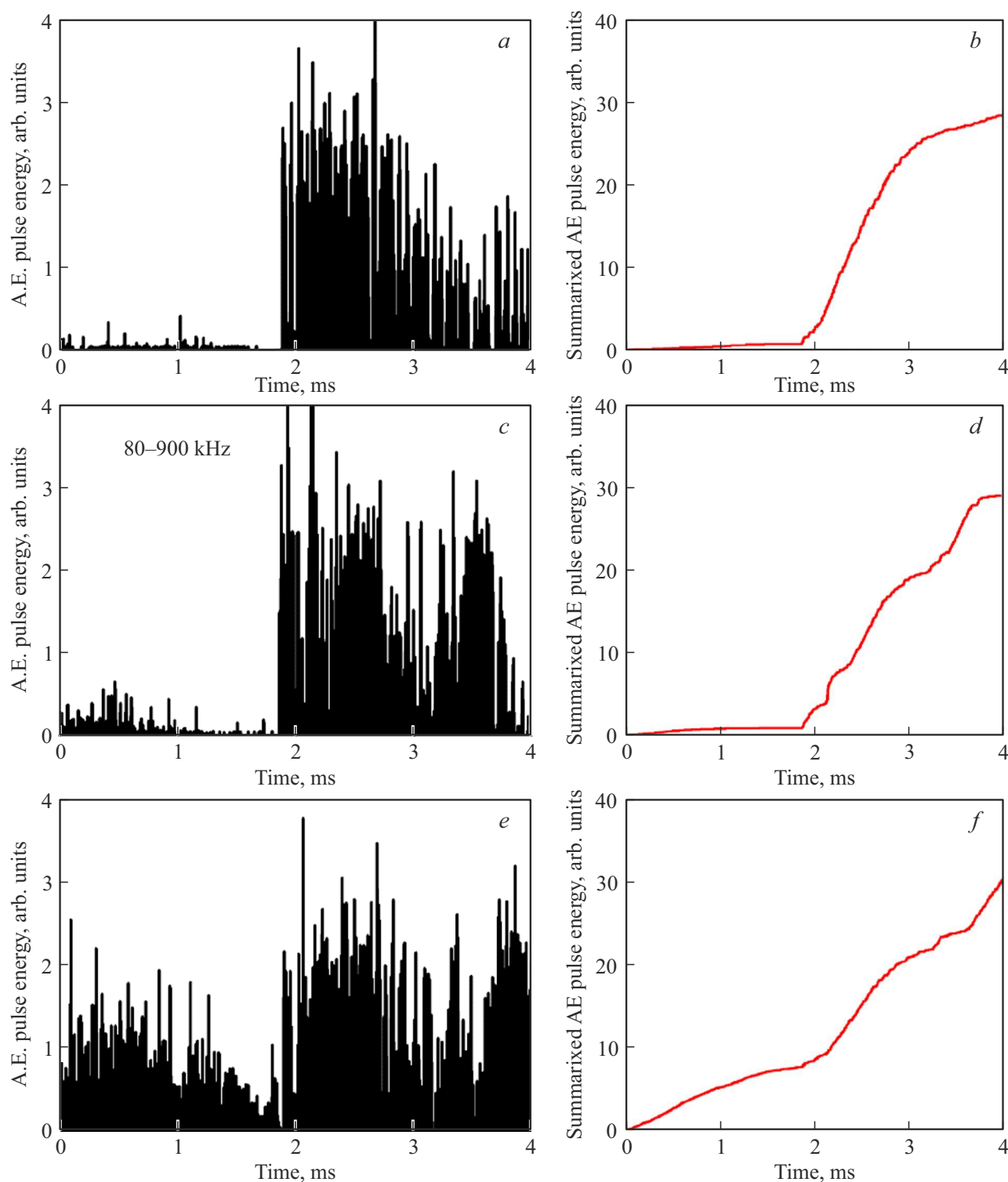


Рис. 3. Развертки серии импульсов АЭ при температуре образца 20 °С после первого (а), второго (б) и третьего (с) ударов и кривые накопления энергий импульсов первого (д), второго (е) и третьего (ф) ударов.

4. Заключение

Применение метода акустической эмиссии для анализа структурной деградации ЦК при сочетании ударной нагрузки и нагрева до „критической“ температуры

400 °С 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 °С 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