

04,14

## Акустическая эмиссия при ударном повреждении цементного камня, статически сжатого ортогонально ударному воздействию

© А.Г. Кадомцев, И.П. Щербаков, А.Е. Чмель<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup> E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 18 октября 2024 г.

В окончательной редакции 18 октября 2024 г.

Принята к публикации 19 октября 2024 г.

Одноосно сжатые образцы цементного камня М-400 подвергались точечному ударному повреждению при ортогонально направленном сжатии. Индуцированная ударом генерация акустической эмиссии регистрировалась в диапазоне 400–600 kHz. Предварительно был определен порог ударного разрушения (фрагментации образца) без приложения сжимающей нагрузки. Обнаружено, что распределения энергии во временных развертках акустической эмиссии без сжатия образца следовали степенному закону, характерному для процесса кооперативного образования микротрещин. Распределения энергии в импульсах акустической эмиссии при постоянной сжимающей нагрузке показали экспоненциальную функцию, типичную для случайных, невзаимодействующих источников акустической эмиссии, возникающих при увеличении плотности цементного камня. При компрессии, близкой к пределу прочности материала, ударное воздействие вызывало „допороговое“ макроскопическое разрушение образцов (триггерный эффект).

**Ключевые слова:** цементный камень, статическая нагрузка, ударное разрушение, триггерный эффект, акустическая эмиссия.

DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59321.267

### 1. Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из базовых методов для выявления стабильных структурных дефектов и мониторинга накопления микроскопических повреждений в различных гетерогенных материалах — в первую очередь, бетонов [1–3] и горных пород [4–6], испытывающих как статические, так и динамические нагрузки. В АЭ анализе строительных материалов большое внимание уделяется неразрушающему контролю состояния объектов [7,8] (выявление стабильных или медленно прогрессирующих пустот, трещин и посторонних включений), тогда как в экспериментальной сейсмологии основным направлением акустоэмиссионных исследований является анализ процессов активного разрушения. Тем не менее, в последнее десятилетие появились работы по определению динамических свойств сжатого цементного камня (ЦК) лабораторными методами, пришедшими из опыта испытаний горных пород [9–14]. Именно это направление было реализовано при проведении настоящей работы по анализу акустических сигналов из образцов ЦК, к которым прилагалась комплексная механическая нагрузка.

Образцы под варьруемой статической сжимающей нагрузкой подвергались ортогонально направленным ударам заостренного бойка, создававшим на боковой поверхности объекта локальное повреждение. Такая геометрия нагружения выбрана как близкая реальному распределению механического воздействия в строительных сооружениях, нижние элементы которых сжаты в

вертикальном направлении, а на боковые поверхности действуют распространяющиеся сейсмические волны, приливы, волны вулканической активности и т. д.

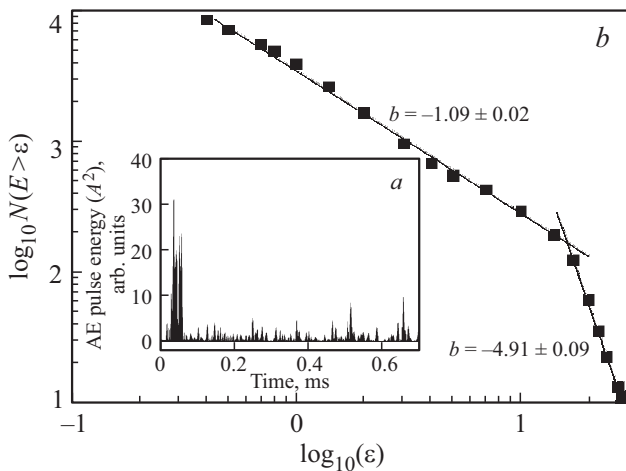
### 2. Образцы и оборудование

В работе использованы пластины из цементного камня естественного твердения в течение 28 суток; размер пластин  $10 \times 10 \times 40$  mm. Фотография установки для нагружения образцов показана на рис. 1. Сжимающее давление прилагалось вдоль наибольшего размера пластины. Ударная волна в одноосно-сжатом образце возбуждалась ортогонально статической нагрузке. Повреждение поверхности образца создавалось заостренным бойком, закрепленном на маятниковом копре. Позади образца помещалась опорная пластина для исключения его горизонтально смещения при ударе.

Энергия бояка была постоянной, равной 0.1 J. Предварительно была измерена предельная (пороговая) нагрузка на сжатие (без ударной нагрузки)  $P_{ul}$ . Текущая нагрузка  $P$  изменялась ступенчато от 0 до критической величины, при которой при ударе происходило глобальное разрушение образца. После каждого удара временные развертки АЭ регистрировались широкополосным пьезодатчиком из высокочувствительной керамики PZT, установленном на боковой поверхности образца. Генерация акустической эмиссии регистрировалась в диапазоне 400–600 kHz в течение 3 ms с временным разрешением 40 ns.



**Рис. 1.** Фотография установки для генерации АЭ при ударном повреждении одноосно сжатого образца ЦК.



**Рис. 2.** Временная развертка амплитуд в квадрате после воздействия удара на образец при  $P = 0$  (a) и распределение энергии во временных сериях  $A^2$  при ударном воздействии (b).

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Ударное воздействие при $P = 0$

На рис. 2, a показана развертка сигнала АЭ при ударе по образцу без приложения статического напряжения. Интенсивность (квадрат амплитуды сигнала,  $A^2$ ) АЭ пропорциональна энергии  $E$ , выделенной при формировании точечного повреждения:  $E \propto A^2$ .

На рис. 2, b в двойных логарифмических координатах представлено распределение энергии в показанной на рис. 2, a серии импульсов. Распределение приведены

в форме зависимости  $N(E > \epsilon)$  versus  $\epsilon$ , в которых по ординате отложено число импульсов  $N$ , энергия которых  $E$  превышает показанный на абсциссе некоторый „порог“  $\epsilon$ , на которой нанесены величины энергии импульсов. Можно видеть, что распределения энергии имеют лог-линейные участки, отвечающие соотношению типа Гутенберга–Рихтера:

$$\log_{10} N(E > \epsilon) \propto -b \log_{10} \epsilon \quad (1)$$

или в степенной форме:

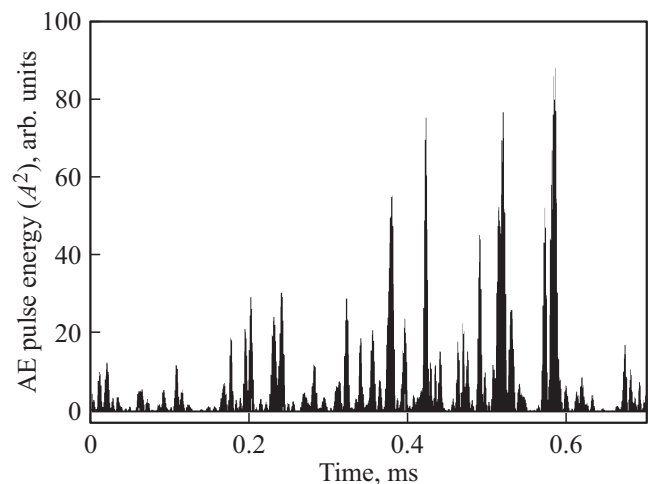
$$N(E > \epsilon) \propto \epsilon^{-b}. \quad (1a)$$

Параметр  $b$  в (1) определяет наклон прямых отрезков. Чем меньше значение  $b$ , тем больше АЭ-импульсов с более высокой энергией в процессе деградации материала. „Излом“ лог-линейной зависимости свидетельствует о наличии двух масштабов накопления слабых мест в структуре ЦК.

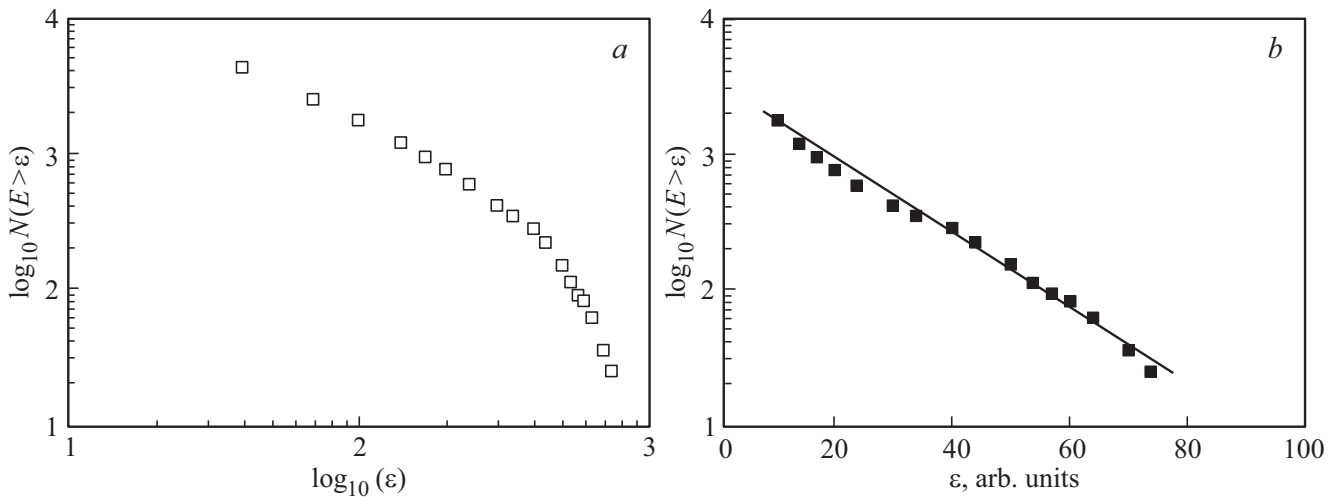
В работе [11] вариация этого параметра рассматривалась (в рамках принятой в идеологии сейсмической динамики) в качестве индикатора процесса структурной перестройки при разрушении нагруженных бетонных блоков. В аналогичном подходе к проблеме диагностики бетонных элементов сооружений оценка параметра  $b$  [12] использовалась для предсказания опасных состояний объектов.

#### 3.2. Ударное воздействие при $P_{ul} > 0$

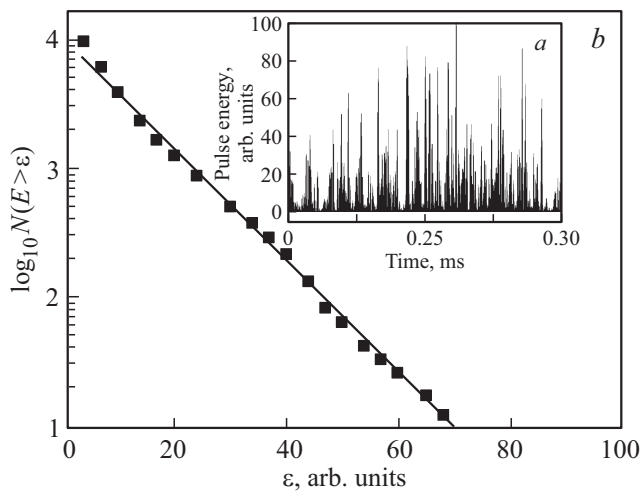
Развертка эмиссии приложении статической нагрузки  $P = 0.3P_{ul}$  при ударе образца показана на рис. 3. Распределение энергии в импульсах индуцированной АЭ (рис. 4) существенно изменилась. На рис. 4, a распределение энергии в этой серии импульсов построено в двойных логарифмических координатах. В отличие от распределения, рассчитанного для образца без статической нагрузки (рис. 2, b), лог-линейная зависимость не



**Рис. 3.** Временная развертка амплитуд  $A^2$  после воздействия удара на образец под давлением  $P = 0.3P_{ul}$ .



**Рис. 4.** Распределение энергии во временных сериях АЭ при ударном воздействии на образец, находящийся под статической нагрузкой  $P = 0.3P_{ul}$ , построенное в двойном логарифмическом (а) и полулогарифмическом (b) масштабах.



**Рис. 5.** Временная развертка амплитуд АЭ после воздействия удара на образец (а) и распределение энергии акустических импульсов (b) при  $P = 0.6P_{ul}$ .

наблюдается. Однако в полулогарифмических координатах (с линейным масштабом по оси энергий), графики зависимости  $\log_{10} N(E > E')$  от  $E'$  — ложатся на прямые линии, отвечающие соотношению:

$$\log_{10} N(E > \epsilon) \propto -a\epsilon \quad (2)$$

или, что тоже:

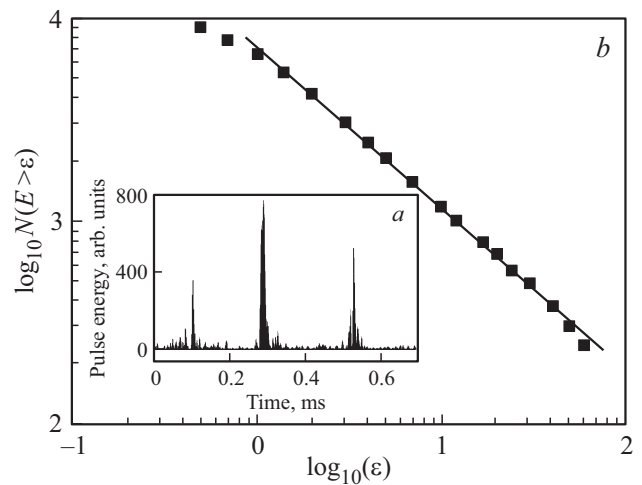
$$N(E > \epsilon) \propto \exp(-a\epsilon), \quad (2a)$$

где  $a$  — постоянная (наклон прямой на графике). Экспоненциальное соотношение пуассоновского типа (2a) указывает на случайный характер возникновения источников АЭ.

Переход от коррелированного к случайному накоплению микротрещин можно объяснить высокой пористо-

стью цемента М-400 (около 30%). Хорошо известно, что даже при незначительном сжатии ЦК его пористость существенно падает, что ведет к уменьшению „резервуара слабых мест“ в материале [15]. Соответственно, увеличивается радиус необходимого взаимодействия, то есть размер вновь образовавшейся трещины становится меньше расстояния до ближайшего слабого места.

При увеличении сжимающего давления до  $P = 0.6P_{ul}$  интенсивность АЭ незначительно увеличивается по сравнению с нагрузкой  $P = 0.3P_{ul}$  (ср. рис. 3 и рис. 5, а), а распределение энергии также следует экспоненциальному закону (рис. 5, b). В то же время, наклон прямой на последнем графике (величина параметра  $a$ ) выше, чем на графике рис. 5, а, что указывает на меньший вклад в распределение энергий со стороны крупных микротрещин.



**Рис. 6.** Временная развертка амплитуд АЭ после воздействия удара на образец (а) и распределение энергии акустических импульсов (b) при  $P = 0.9P_{ul}$ .

Следующее сжимающее давление было близко к порогу разрушения свободных образцов:  $P = 0.9P_{ul}$ . Интенсивность импульсов в развертке АЭ в этом случае оказалась почти на порядок величины выше, чем в трех предыдущих режимах статического нагружения.

Кроме того, серии импульсов концентрировались в двух-трех разнесенных пиках (рис. 6, а), причем последний по времени пик предшествовал „допороговому“ ( $P < P_{ul}$ ) разрушению — триггерному срыву.

Распределение энергии в импульсах АЭ (рис. 6, б) вновь вернулось к коррелированному накоплению по типу закона Гутенберга–Рихтера. В условиях близкого к порогу разрушения сжимающего давления ударная нагрузка индуцирует в материале вместо дисперсного накопления микротрещин последовательное формирование нескольких мощных локальных очагов разрушения, в которых происходило эффективное взаимодействие микротрещин. Поэтому при  $P = 0.9P_{ul}$  первые выбросы АЭ (рис. 6, а), после которых образец сохранял стабильность формы, играют роль „пре-триггера“.

#### 4. Заключение

Рассмотрена статистика накопления микротрещин в одноосно-сжатом цементном камне при ортогональной ударной нагрузке. Проблема актуальна для безопасности бетонных фундаментов сооружений, испытывающих боковые механические импульсные воздействия природного и техногенного происхождения. Образование микротрещин при боковом ударе регистрировалось методом АЭ. Статистическая обработка временных серий импульсов АЭ позволила дифференцировать либо случайный (дисперсный), либо коррелированный (обусловленный взаимодействием) характер накопления микроповреждений. Используемый в экспериментах ЦК М-400 имеет высокую пористость (28%). Поэтому ударное повреждение множественных перегородок между порами в ненагруженных статически образцах вызывает действующий эффект коллективного накопления микротрещин по степенному закону. Приложение одноосной статической нагрузки существенно повышает плотность материала, что приводит к изолированному накоплению невзаимодействующих микротрещин по экспоненциальному закону.

Наконец, при статической нагрузке, близкой к порогу разрушения ЦК, в массе материала возникают крупные очаги разрушения, в которых вновь возникает взаимодействие между микротрещинами, приводящее к триггерному срыву.

#### Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

#### Список литературы

- [1] D.G. Aggelis. *Mech. Res. Commun.* **38**, 153 (2013).
- [2] D.D. Mandal, M. Bentahar, A. El Mahi, A. Brouste, R. El Guerjouma, S. Montresor, F.B. Cartiaux. *Materials*. **15**, 3486 (2022).
- [3] A. Carpinteri, J. Xu, G. Lacidogna, A. Manuello. *Cem. Concr. Compos.* **34**, 529 (2012).
- [4] J. Davidsen, T. Goebel, G. Kwiatak, S. Stanchits, J. Baró, G.J. Dresen. *Geophys Res: Solid Earth*. **126**, e2021JB022539 (2021).
- [5] B. Haimson, C. Chang. *Int. J. Rock. Mech. Min.* **37**, 285 (2000).
- [6] В.Б. Смирнов, А.В. Пономарев, А.Д. Завьялов. *Физика Земли*. **1**, 38 (1995). [V.B. Smirnov, A.V. Ponomarev, A.D. Zavyalov. *Izvestiya. Phys. Solid Earth*. **31**, 38 1995].
- [7] М. Бриганте, М.А. Сумбатян. *Дефектоскопия*. **4**, 3 (2013).
- [8] А.И. Сагайдак. *Вестник НИЦ „Строительство“*. **38**, 63 (2023).
- [9] I. Dakanali, A. Kyriazopoulos, I. Stavrakas, D. Triantis. *Proc. Intern. Conference: Science in Technology 2015 Athens, Greece*.
- [10] I.S. Colombo, I.G. Main, J. Mater. Civ. Eng. **15**, 280 (2003).
- [11] C. Guzmána, D. Torresa, C. Hucailuka, D. Filipussi. *Proc. Mater. Sci.* **8**, 148 (2015).
- [12] R. Vidya Sagar, B.K. Raghu Prasad, R.K. Singh. In book: *Acoustic emission (AE) and related Non-destructive evaluation (NDE) techniques in fracture mechanics of concrete* Ed.: M. Ohtsu, Woodhead publishing, 2015.
- [13] J.X. Zhengwu, F. Qinghua, H.G. Lacidogna, A. Carpinteri. *Struct. Health Monit.* **17**, 147592171773053 (2017).
- [14] A. Esmailzadeh, M. Nikkhah, E. Eidivandi. *Geopersia*. **13**, 49 (2023).
- [15] В.И. Бетехтин, А.Н. Бахтибаев, А.Г. Кадомцев, Д.А. Иманбеков. *Цемент*, **5–6**, 16 (1991).

*Редактор Е.В. Толстякова*