

04,14

## Ударное повреждение цементного камня, подвергнутого кратковременному одноосному сжатию

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

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в Редакцию 23 января 2025 г.

В окончательной редакции 10 февраля 2025 г.

Принята к публикации 12 февраля 2025 г.

Исследовано влияние одноосного давления, приложенного после естественного твердения цементного камня (ЦК), на его ударную стойкость в направлении, ортогональном приложенному сжатию. Геометрия испытаний отвечает распределению нагрузок в строительных сооружениях, в которых постоянная вертикальная нагрузка сочетается с горизонтальным динамическим силовым воздействием различного происхождения. Формирование локального повреждения лабораторных образцов контролировалось методом акустической эмиссии, чувствительным к разрушению структуры ЦК на микромеханическом уровне. Показано, что цикл статической нагрузки изменяет характер выделения энергии при локализованном ударе в сжатом и разгруженном образце в зависимости от приложенного давления.

**Ключевые слова:** осевое давление, повторная нагрузка, акустическая эмиссия.

DOI: 10.61011/FTT.2025.02.59981.17-25

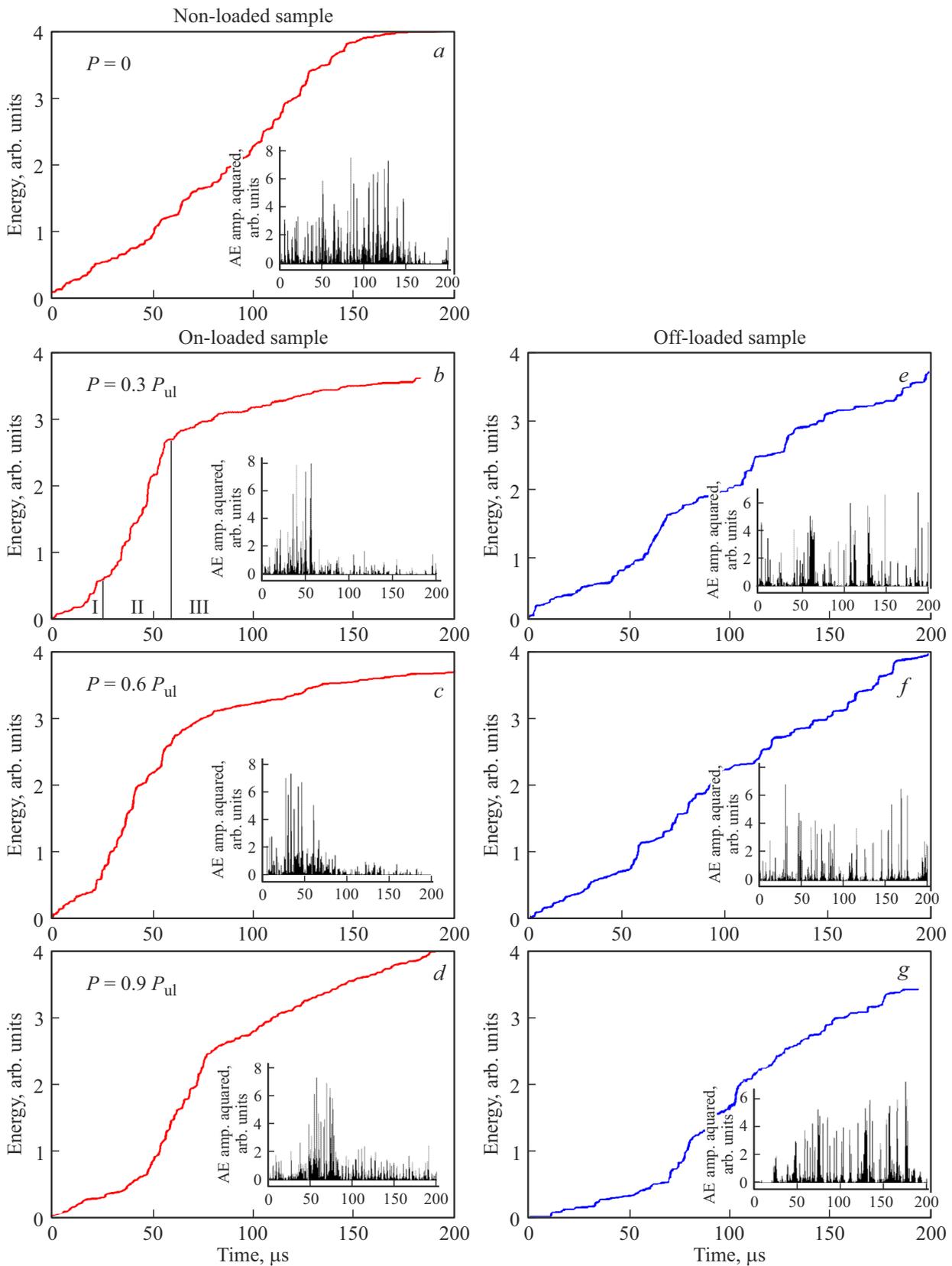
### 1. Введение

Пористость является одной из важнейших характеристик цементного камня (ЦК). Эффективным воздействием на пористость с целью улучшения механических свойств ЦК является применение гидростатического давления на стадии твердения [1]. В то же время, в период эксплуатации сооружений ЦК может подвергаться воздействию ударных волн [2] техногенного (взрывы, ведение горных работ) и естественного (вулканическая деятельность, землетрясения) происхождения, а также нагрузок периодического характера [3] (приливы, ураганы). Сжимающие давления конечного пористого продукта потенциально могут в определенной степени модифицировать его прочностные свойства [4]. В настоящей работе определялось влияние одноосной компрессии лабораторных образцов ЦК на ударное воздействие, направленное ортогонально сжатию, что является малоисследованной областью.

Характер локального разрушения при точечном ударе оценивался методом акустической эмиссии (АЭ), позволяющим определять выход энергии образования/накопления микротрещин при статической и динамической (в частности, ударной) нагрузке [5–8]. В экспериментах моделировались ситуации двух типов: производилось ударное повреждение поверхности непосредственно на сжатом образце и на том же образце после снятия статической нагрузки. Выбор геометрии нагружения соответствовал реальному распределению механических сил в строительных сооружениях, нижние элементы которых сжаты в вертикальном направлении, а боковые поверхности испытывают динамические нагрузки.



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



**Рис. 2.** Активность АЭ (вставки) и кинетика выхода энергии образования микротрещин в ЦК М400 при точечном ударном повреждении одноосно сжатых образцов. Пояснения буквенной маркировки в тексте.

## 2. Образцы и оборудование

Образцы ЦК М400 естественного твердения размером  $10 \times 10 \times 40$  mm помещались под настольный гидравлический пресс GE-TPO10, сжимающий образец вдоль наибольшего размера пластины (рис. 1). Ортогонально осевой статической нагрузке по образцу с помощью маятникового копра производился заостренным бойком удар с энергией 0.1 J, создававший локальное повреждение поверхности размером  $\sim 1$  mm<sup>2</sup>.

Номинальная прочность бетона М400 составляет около 40 МПа, но может многократно превышать это значение в лабораторных условиях [1]. Поэтому предварительно для конкретных образцов была измерена предельная (пороговая) нагрузка на сжатие без ударной нагрузки  $P_{ul}$ . Текущая нагрузка  $P$  при ударном воздействии изменялась ступенчато от 0 до  $P = 0.3P_{ul}$ ;  $0.6P_{ul}$ ;  $P = 0.9P_{ul}$ . При каждом цикле сжатия образец находился под осевой нагрузкой менее 3 min. Пьезодатчиком из керамики PZT, установленном на боковой поверхности образца, в диапазоне 400–600 kHz регистрировались временные развертки АЭ, вызванной образованием микротрещин в материале ЦК [9]. Генерация АЭ записывалась в течение 2 ms с временным разрешением 40 ns.

## 3. Результаты и обсуждение

На вставках рис. 2 показаны развертки сигналов АЭ, индуцированные ударом копра до приложения сжимающей нагрузки (рис. 2, *a*), сжатых осевым давлением  $P$  (рис. 2, *b–d*) и разгруженных (вновь  $P = 0$ ) образцов (рис. 2, *e–g*). На вставках можно видеть, что период активной генерации АЭ резко сокращается при наложении сжимающей нагрузки (рис. 2, *b–d*), что можно объяснить уменьшением пористости ЦК. В работе [1] было показано, что при давлении 60 МПа пористость бетона М400 уменьшается приблизительно в полтора раза; при более высоком сжатии изменение незначительно. После снятия осевой нагрузки продолжительность разверток приблизительно восстанавливается (рис. 2, *e–g*).

Энергия  $E$  акустического импульса пропорциональна квадрату его амплитуды  $A$ :  $E \propto A^2$ . Энергии возбужденных ударом последовательных импульсов суммировались. Профили кривых выхода энергии, построенные при ударе копра по поверхности под давлением образца  $P = 0$ ;  $0.3P_{ul}$ ;  $0.6P_{ul}$ ; и  $0.9P_{ul}$ , последовательно изменяются по мере увеличения статического давления. При нулевой нагрузке временная зависимость накопления суммарной энергии АЭ близка к линейной, но при приложении осевого сжатия трансформируется в сложную кривую, включающую три элемента, показанные на рис. 2, *b*: начальный отрезок с небольшим наклоном кривых (зона I); участок с увеличенной скоростью накопления трещин (зона II); финишный участок с затухающей эмиссией (зона III).

Накопление индуцированных ударом микротрещин на исходном участке определяется распределением ограниченного числа изначальных структурных дефектов в ЦК, снижающих прочность материала. Их разрушение происходит с выделением импульсов АЭ с низкой энергией — кривая накопления имеет пологий участок (I). Начальный участок наиболее хорошо выражен при максимальной нагрузке  $P = 0.9P_{ul}$  (рис. 2, *d*), поскольку „резервуар“ относительно слабых мест расширяется с приближением порогового разрушения. По мере истощения „слабых мест“ начинается разрушение основной структуры ЦК, с выделением импульсов с высокой энергией — возникает короткий всплеск АЭ, увеличивая наклон кривой накопления (II). На последнем этапе нагрузки (III) наклон кривой снова уменьшается при релаксации ударной волны.

После снятия статической нагрузки те же образцы были вновь подвергнуты ударному воздействию. Обращает внимание большая продолжительность разверток АЭ, чем при ударе сжатых образцов (рис. 2, *e–g*). Эта деталь указывает на определенную релаксацию структуры материала образцов, подвергнутых циклу статического нагружения.

Кривые накопления суммарной энергии импульсов АЭ из разгруженных образцов, получивших нагрузку  $P = 0.3P_{ul}$  и  $P = 0.6P_{ul}$ , проявили лишь заметное уменьшение наклона кривой накопления по сравнению с графиком образца, не подвергавшегося сжатию (рис. 2, *a*); снижение наклона указывает на некоторое упрочнение материала за счет ухода части „слабых мест“. Однако при приложении максимального давления копра  $P = 0.9P_{ul}$  кривая выделения энергии разгруженного образца оказалась близкой к таковой для испытанных под статической нагрузкой. Это свидетельствует о возникновении остаточных механических повреждений структуры ЦК при последнем (критическом) цикле сжатия.

## 4. Заключение

Методом акустической эмиссии (АЭ) показано, что приложенная статическая осевая нагрузка существенно изменяет характер ударного разрушения ЦК М400, проявляя три различных режима выделения энергии. Разгрузка образца после сжатия на величину 0.3 и 0.6 от порога глобального разрушения в основном повторяет временной паттерн импульсов АЭ при  $P = 0$ , но с меньшим выходом энергии, что указывает на некоторое упрочнение материала. После цикла сжатия на величину 0.9 от порога разрушения в строении материала обнаружались необратимые изменения.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.И. Бетехтин, А.Н. Бахтибаев, А.Г. Кадомцев, Д.А. Иманбеков. Цемент и его применение 5–6, 16 (1991).
- [2] J. Pachman, D.J. Chapman, M. Foglar, M. Künzel, W.G. Proud. *Int. J. Impact Eng.* **183**, 104787 (2024).  
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104787>
- [3] J.H. Kurz, F. Finck, C.U. Grosse, H.W. Reinhardt. *Struct. Health Monit.* **5**, 69 (2006).  
<https://doi.org/10.1177/1475921706057983>
- [4] C. Lian, Y. Zhuge, S. Beecham. *Constr. Build. Mater.* **25**, 11, 4294 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>
- [5] E. Verstryngne, G. Lacidogna, F. Accornero, A. Tomor. *Constr. Build. Mater.* **268**, 121089 (2021).  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121089>
- [6] В.Н. Савельев, Х.Ф. Махмудов. *ЖТФ* **90**, 1, 143 (2020).  
<https://doi.org/10.21883/ЖТФ.2020.01.48676.74-19>  
[V.N. Savel'ev, Kh.F. Makhmudov. *Tech. Phys.* **65**, 1, 133 (2020)]
- [7] В.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов. *ЖТФ* **85**, 1, 153 (2015).  
[V.P. Surzhikov, N.N. Khorsov. *Tech. Phys.* **60**, 1, 148 (2015).]
- [8] F. Sagasta, M.E. Zitto, R. Piotrkowski, A. Benavent-Climent, E. Suarez, A. Gallego. *MSSP* **102**, 262 (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.09.022>
- [9] С.Г. Никольский. *Инженерно-строительный журнал* **2**, 39 (2008).

Редактор *Е.В. Толстякова*