

ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКА

Численные и лабораторные эксперименты по разрушению конструкционных материалов под воздействием электромагнитного поля

В. Б. Лапшин,^{1,2,а} В. Б. Смирнов,^{1,3,б} А. А. Скубачевский,²
 А. В. Пономарев,³ А. В. Патонин,⁴ А. А. Хромов,³ М. Г. Потанина^{1,3,в}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова. Россия, 129128, Москва, ул. Ростокинская, д. 9

³ Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук. Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

⁴ Геофизическая обсерватория «Борок» филиал Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук. Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 142

Статья поступила 17.11.2017, принята к публикации 15.01.2018.

В статье приводятся результаты численного эксперимента по воздействию электромагнитного излучения на прочностные характеристики природных и искусственных материалов и данные лабораторных экспериментов по разрушению материалов (песчаники Береа и бетоны) под воздействием электрического тока при нагружении образцов с постоянной скоростью деформации.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, разрушение образцов горных пород, лабораторное моделирование, численные эксперименты.

УДК: 550.34.016. PACS: 91.30.Ab.

ВВЕДЕНИЕ

Образование микротрещин при различных внешних воздействиях является одной из основных причин разрушения горных пород и современных конструкционных материалов. Мелкие сетевидные трещины могут привести к полной потере несущей способности и эксплуатационных свойств строительных сооружений или изделий.

Определение механизмов разрушения конструкций путем распространения трещины до истечения срока несущей способности, изучение свойств конструкционных материалов при распространении трещин, разработка методик испытания материалов и конструкций послужили причинами активизации исследований в таком важном направлении инженерной физики, как механика разрушения [1, 2].

Эффект разупрочнения горных пород под воздействием сильных электромагнитных полей известен и используется в практических целях [3]. В качестве объяснения результатов экспериментов, изложенных здесь и в работе [4], предложен следующий физический механизм. При прохождении электрического тока через поры, заполненные проводящей жидкостью, выделяется джоулево тепло. В результате действия дисперсионных сил, связывающих жидкость с поверхностью пор и блокирующих ее вытеснение за счет нагрева, в образце увеличивается поровое давление. Оценки избыточного давления в порах в соответствии с результатами работ [4–6] дают значения, сравнимые с прочностными характеристиками материалов, используемых в лабораторных экспериментах. Результаты численных экспериментов, изложенных в данной статье, подтверждают этот вывод.

1. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов, результаты которых приведены ниже, используется метод FDTD (Finite-Difference Time-Domain) [7, 8]. Данный метод применяется для численного решения уравнений Максвелла.

1.1. Система уравнений

Для изотропных, недиспергирующих материалов воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H} - \frac{1}{\varepsilon} \sigma \mathbf{E}, \quad (2)$$

где $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля, $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля, ε — диэлектрическая проницаемость, μ — магнитная проницаемость, σ — электрическая проводимость.

В данном методе пространственные и временные производные физических величин заменяются их конечно-разностными аналогами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) &= \\ &= \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\delta x} + O[(\Delta x)^2], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) &= \\ &= \frac{u_{i,j,k}^{n+1/2} - u_{i,j,k}^{n-1/2}}{\delta t} + O[(\Delta t)^2], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$ — величины шага по каждой координате и времени соответственно, u — одна из $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$. Для производных по y и z конечно-разностные выражения записываются так же.

^а E-mail: lapshin-vb1@mail.ru

^б E-mail: vs60@mail.ru

^в E-mail: potanina@physics.msu.ru

Электрическое и магнитное поля в правой части уравнений (1), (2) будут записаны для времени $n\Delta t$, а в левой — $(n-1/2)\Delta t$ и $(n+1/2)\Delta t$. Для их согласования представим конечно-разностные выражения полей E и H в точке n в следующем виде:

$$E_x|_{i,j,k}^n = \frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1/2} + E_x|_{i,j,k}^{n-1/2}}{2}. \quad (5)$$

Конечно-разностные выражения для компонент E_y , E_z , H_x , H_y , H_z записываются аналогично.

Конечно-разностный вариант уравнений (1) и (2) в координатном представлении, используя (3)–(5), для E_x — компоненты уравнения (1) можно записать в следующем виде:

$$E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+1/2} = C_a|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \cdot E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \\ + C_b|_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot \left(H_z|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - H_z|_{i,j,k+1/2}^n - \right. \\ \left. - H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n + H_y|_{i,j+1/2,k}^n \right),$$

где

$$C_a|_{i,j,k} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \right) / \left(1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \right), \\ C_b|_{i,j,k} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}h} \right) / \left(1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \right),$$

где h — размер ячейки сетки.

Уравнения для остальных компонент полей записываются аналогично.

В качестве граничных условий в этой модели используются неотражающие условия PML (Perfectly Matched Layer), основой которых является разделение каждой компоненты поля на две взаимно ортогональные, а также задание в граничном слое заданной проводимости [9–13].

1.2. Результаты эксперимента по электромагнитному воздействию на сухой бетон

Рассмотрим следующий численный эксперимент. Электромагнитная волна падает перпендикулярно на плоский слой с заданными диэлектрической и магнитной проницаемостями и проводимостью, общим размером $5 \text{ см} \times 5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$ с сеткой 200×400 ячеек (шаг сетки h равен $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, шаг по времени с учетом условия устойчивости $\tau = \frac{h}{c\sqrt{2}}$, где c — скорость света в вакууме) [9]. В данном эксперименте в качестве материала используется бетон. Электрическое поле в волне задается в виде импульса Гаусса:

$E = E_0 e^{-\frac{(t-t_1)^2}{T^2}}$, где E_0 — амплитуда, t_1 — начало отсчета, T — характерная ширина импульса. Поле в остальных ячейках сетки рассчитывается с помощью метода FDTD, с использованием TFSF (Total-Field Scattered-Field) условий [10]. Используются следующие характеристики бетона: $\varepsilon = 4.5\varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$, где ε_0 и μ_0 соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума. Диэлектрическая проницаемость и проводимость в численных экспериментах меняются соответственно: от $2\varepsilon_0$ до $8\varepsilon_0$, от 0.1 до 1 (Ом·м)^{-1} .

На рис. 1 показана зависимость глубины проникновения волны в бетон (м) от проводимости ($1/(\text{Ом·м})$).

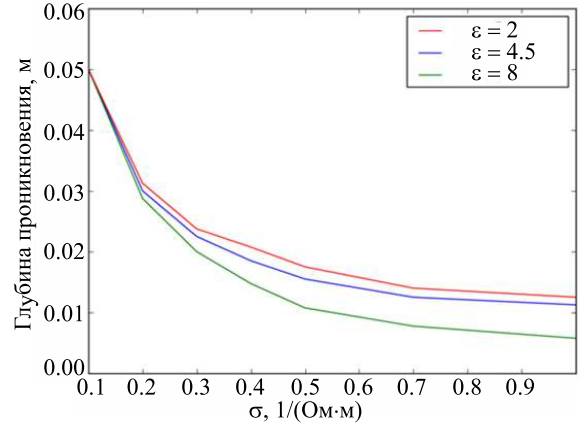


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения волны в бетон от проводимости

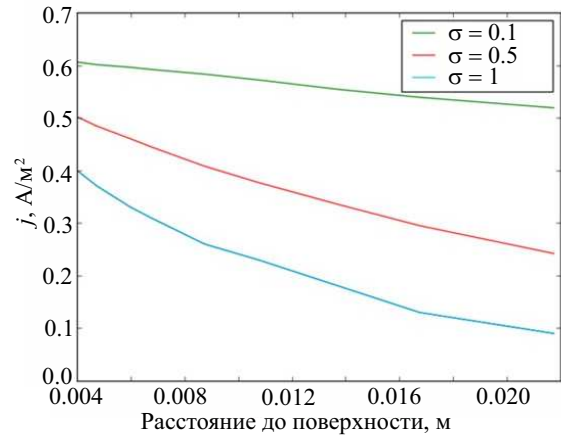


Рис. 2. Зависимость плотности тока в бетоне от расстояния до поверхности

Глубина проникновения оценивалась по ослаблению электрического поля в e раз.

На рис. 2 показана зависимость плотности тока в бетоне (А/м^2) от расстояния до поверхности (м) при проводимости $0.1, 0.5$ и 1 (1/(Ом·м)) .

1.3. Результаты численного эксперимента по электромагнитному воздействию на обводненный бетон

Воздействуем теперь на обводненный бетон, имеющий форму слоя размерами $5 \text{ см} \times 5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$, электромагнитным полем. Проводимость бетона прием равной 5 (Ом·м)^{-1} . Найдем тепло, выделившееся в бетоне за час:

$$Q = J^2 R t, \quad R = \frac{l}{\sigma S}, \quad j = \sigma E,$$

где E — величина электрического поля, σ — проводимость, R — сопротивление, J — плотность тока, S — площадь сечения проводника, l — длина проводника, t — время.

При пропускании импульсов с частотой $1.7 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$, мощностью 3 Вт и эффективной шириной спектра сигнала 1 ГГц выделяется 1.54 Дж , а за 1 ч — $5.55 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

Считая плотность бетона $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость бетона $c_6 = 1000 \text{ Дж/(кг·К)}$, а объем керна

$V = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, имеем:

$$\Delta T = \frac{Q}{\sigma \rho V c_6} \approx 17 \text{ К.}$$

Покажем, что в данном случае излучением можно пренебречь. $Q_{\text{изл}} = \sigma^* T^4 S = 1.15 \text{ Дж}$, что значительно меньше Q , где $\sigma^* = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{К}^2}$ — постоянная Стефана—Больцмана, $S = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ — площадь поверхности, $T = 300 \text{ К}$.

Вычислим, на сколько градусов нагреется жидкая фаза в обводненном бетоне. Считаем, что вода составляет одну десятую часть от массы бетона. Объем и плотность бетона указаны выше. Вычислим изменение температуры воды в бетоне:

$$\Delta T \frac{Q}{0.1 M c_b} = 40 \text{ К,}$$

где удельная теплоемкость воды $c_b = 4200 \text{ Дж/(кг·К)}$, масса воды $M = \rho_b V = 0.125 \text{ кг}$, плотность воды $\rho_b = 1000 \text{ кг/м}^3$, а объем керна $V = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

При этом изменение давления составит

$$\Delta p = \frac{\alpha_T}{\alpha_p} \Delta T = 4 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

где $\alpha_T = 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ — коэффициент теплового расширения воды, $\alpha_p = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ — коэффициент объемного расширения воды. Следует отметить, что прочность бетона марки М400 на разрыв составляет 400 кПа.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В лабораторных условиях были выполнены пилотные эксперименты, выявившие эффект влияния электрических полей на процесс разрушения образцов горных пород [4].

Далее в работе представлены результаты лабораторных экспериментов по инициации и усилению разрушения в естественных и искусственных конструкционных материалах под действием электрического тока. В качестве естественных образцов горной породы использовались керны песчаника Береа (Berea sandstone), который является стандартом в области исследований физических свойств песчаников при различных термодинамических параметрах [14, 15]. Диаметр кернов составлял 30 мм, длина — 60 мм. Сравнительно высокая пористость (до 15%) создает предпосылки для насыщения породы флюидом, который обеспечивает электрическую проводимость. В качестве искусственных материалов использовались образцы из бетона.

2.1. Лабораторные эксперименты по пропусканию электрического тока через нагруженные образцы песчаника

Предварительно в испытываемом образце посредством его частичного насыщения водой или водным раствором хлорида натрия концентрации 0.6 н создавалась гальваническая проводимость, затем к образцу через медные электроды и проводящую графитсодержащую пасту прикладывалась разность потенциалов в диапазоне от 20 до 1500 В, в результате чего в образце возникал электрический ток. Режим электрического воздействия выполнялся сеансами, в части опытов — в суперпозиции с дополнительным одноосным

нагрузением образцов при постоянной скорости деформации. Механическое нагружение сопровождалось возникновением относительно стационарного потока акустических сигналов, на фоне которого возникала электростимулированная акустическая эмиссия. Такой режим позволял надежно отделить эффект влияния электрических воздействий от эффекта изменения акустической активности при изменении действующих в образце напряжений.

В экспериментах регистрировались параметры акустической эмиссии (время возникновения сигнала и его максимальная амплитуда) с помощью пьезоэлектрических датчиков, размещенных на поверхности образцов, а также осевая нагрузка, осевая и радиальная деформации, средняя мощность электрического тока и температура на поверхности образца. На рис. 3 приведен один из характерных примеров появления акустической активности, вызванной электрическим воздействием.

2.2. Лабораторные эксперименты по пропусканию электрического тока через ненагруженные образцы песчаника

Кроме экспериментов с дополнительным механическим нагружением были выполнены опыты, в которых электрическое воздействие прикладывалось к обводненным ненагруженным образцам песчаника. Основной целью этих опытов была проверка предположения о тепловом механизме обнаруженного эффекта воздействия электрического тока на процесс разрушения горных пород и исключение влияния механического нагружения образцов.

В ряде публикаций показано, что источниками генерации термостимулированной акустической эмиссии в горных породах могут являться рост и закрытие дефектов среды, трение на контактах зерен, фазовые переходы, процессы двойникования, выход дислокаций на границы зерен. Возможно возникновение акустических сигналов вследствие испарения порового флюида и микровзрывов газово-жидких включений, хотя вклад этих и других источников в регистрируемую акустическую эмиссию различен. Локальные изменения градиента температуры в горных породах генерируют термоупругие напряжения, которые в свою очередь могут приводить к распространению существующих трещин [16].

Технические решения для исследования этих процессов традиционно основаны на использовании нагревательных элементов, внутрь которых помещается образец горной породы. В наших экспериментах, в отличие от традиционных подходов, нагрев образца осуществлялся постоянным стабилизированным током 35 мА. Электрическая мощность воздействий в течение экспериментов составляла от 1 до 3 Вт. Длительность сеансов электрического воздействия была, как правило, от 100 до 600 с.

На рис. 4 приведен типичный график последовательности акустических импульсов в сопоставлении с температурой образца током, протекающим через образец, и электрическим напряжением, приложенным к образцу. Акустическая активность при токовом воздействии возникает почти без задержки (или с малой, первые секунды—десятки секунд, задержкой) по отношению к началу воздействия. Эта особенность отличает выполненные «токовые» эксперименты от опытов

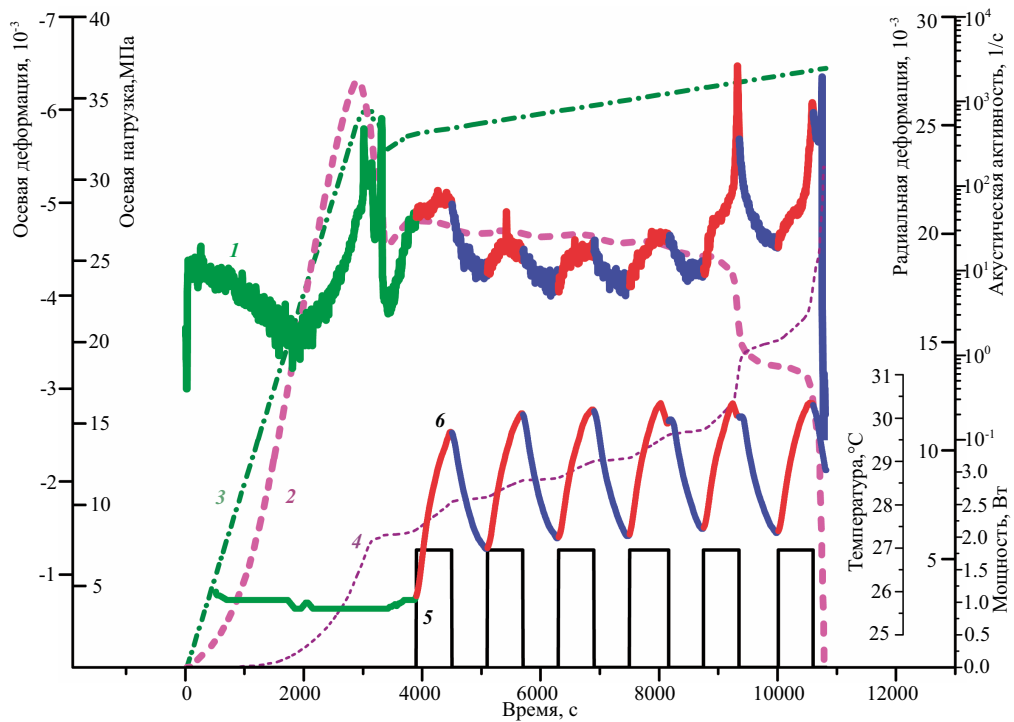


Рис. 3. Вариации акустической активности (1), кривые осевой нагрузки (2), осевой (3) и радиальной (4) деформаций, средней мощности электрического тока (5) и температуры на поверхности образца (6). Цветом показаны стадии нагружения и электрического воздействия: красный — интервалы электрического воздействия, синий — интервалы без воздействия, зеленый — подготовительный этап эксперимента

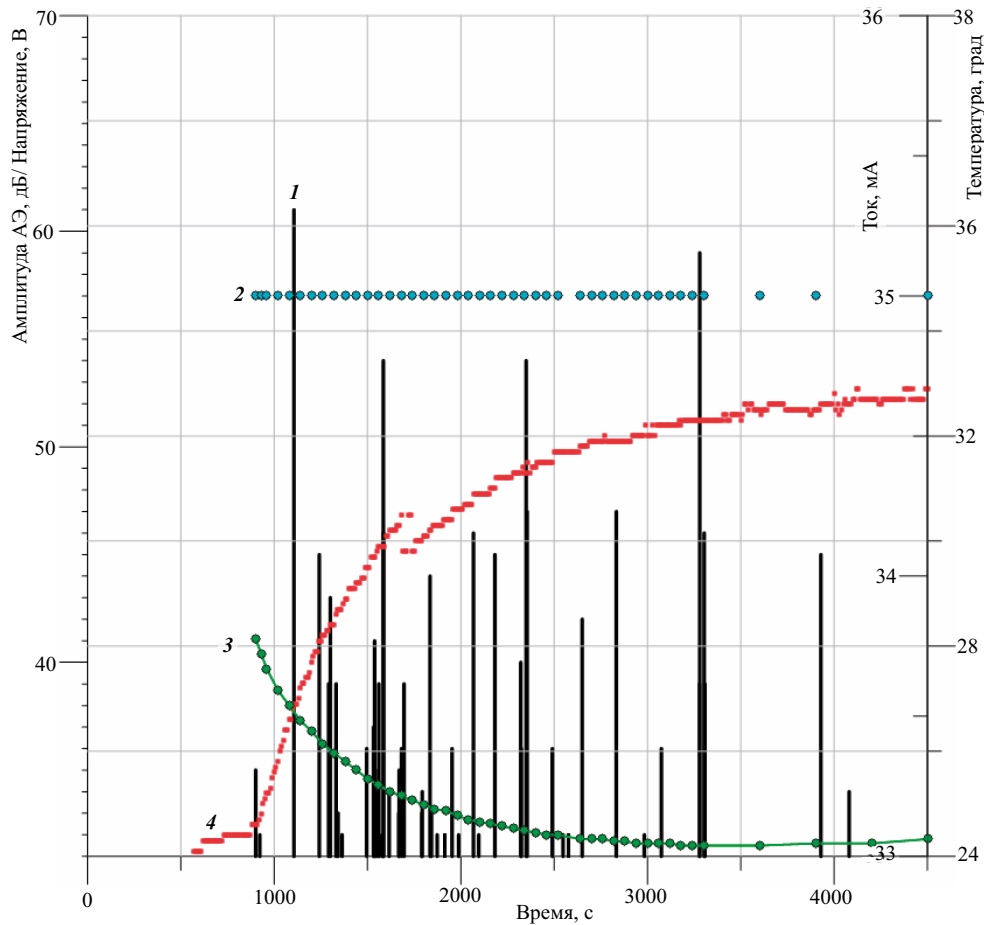


Рис. 4. Последовательность акустических импульсов (1) в сопоставлении с током, протекающим через образец 2, электрическим напряжением, приложенным к образцу 3, и температурой образца 4

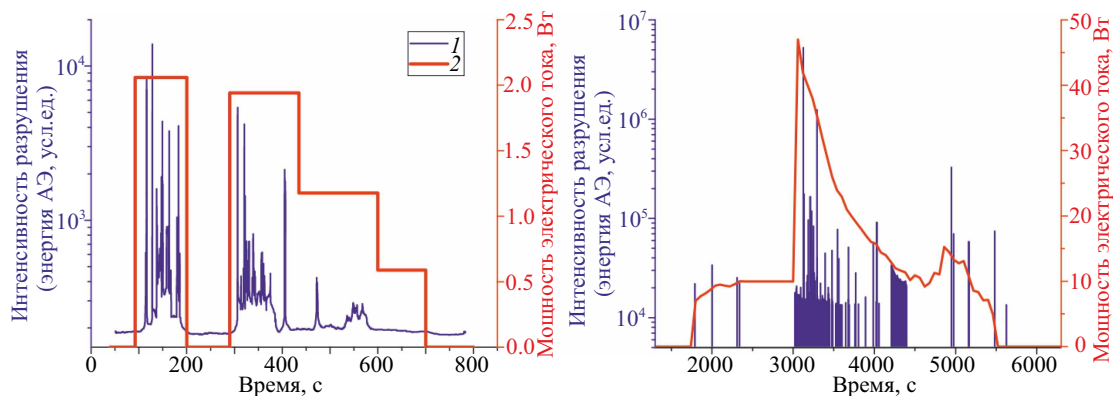


Рис. 5. Развитие микроразрушения в двух бетонных образцах при прохождении через них электрического тока: 1 — интенсивность разрушения, 2 — мощность тока

с нагреванием образца в термических печах. Можно предположить, что нагрев образца электрическим током происходит сразу по всему его объему.

2.3. Лабораторные эксперименты по пропусканию электрического тока через ненагруженные образцы бетона

Несколько экспериментов были выполнены на бетонных образцах объемом от 40 до 500 см³. На рис. 5 приведены графики, демонстрирующие развитие микроразрушения в образцах бетона при пропускании через них постоянного электрического тока. Прослеживается четкая корреляция между периодами прохождения через образец электрического тока и возникновения акустической эмиссии.

2.4. Результаты лабораторного моделирования

Обобщение результатов анализа вариаций акустической активности по совокупности экспериментов с воздействием электрическим током позволяет сделать следующие выводы:

- воздействие электрическим током сопровождается увеличением акустической активности. Это означает, что электрический ток вызывает увеличение интенсивности образования микротрещин и стимулирует тем самым процесс разрушения материала;
- увеличение акустической активности начинается без существенной задержки после начала токового воздействия. При неизменной во времени величине воздействия активность постепенно увеличивается. После выключения воздействия активность плавно уменьшается. При увеличении длительности воздействия рост активности происходит до больших значений. До больших значений происходит рост активности и при увеличении мощности воздействующего электрического тока;
- увеличение акустической активности при воздействии электрическим током и ее уменьшение при выключении тока четко коррелирует с изменением температуры образца;
- увеличение акустической активности контролируется единственным параметром, являющимся комбинацией параметров воздействующего тока (величины тока, создающей его разности потенциалов),

длительности воздействия, электрических параметров образца (эффективной проводимости, обусловленной количеством вносимой жидкости и концентрацией растворенной в ней соли). Этот параметр равен произведению мощности электрического тока на длительность интервала воздействия, т.е. представляет собой количество джоулевого тепла, рассеивающегося в образце при прохождении через него электрического тока. Этот результат объясняет отмеченную четкую корреляцию вариаций акустической активности с изменениями температуры образца.

Следует отметить, что известен механизм термической активации разрушения, определяемый градиентами термоупругих напряжений в неоднородных средах [16]. Однако, учитывая, что полученное выделение джоулевого тепла нагретого проводящего флюида вызывает увеличение температуры всего образца в целом не более 10° (рис. 3, 4), этот механизм не приведет к заметному росту акустической эмиссии. Как показано в [16, 17], для этого требуются существенно большие температуры в 100–300°. Поскольку рассматриваемый нами эффект наблюдается даже в механически ненагруженных образцах, он может быть связан с термокинетическим зарождением и дальнейшим развитием микроразрушения вблизи вершин существующих и возникающих микротрещин [18], где распирающие напряжения, вызванные давлением нагретого флюида, удерживаемого в вершинах трещин дисперсионными силами, создают высокие локальные напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом выполненные лабораторные эксперименты по инициированию акустической эмиссии в результате пропускания электрического тока через флюидосодержащие образцы Berea (Berea sandstone) и бетона и численные эксперименты по моделированию избыточного порового давления в бетонах показали, что воздействие электрическим током и электромагнитными импульсами провоцирует микроразрушения материала. В лабораторных экспериментах эффект увеличения микроразрушений наблюдается как в механически напряженных образцах, так и в свободных, ненагруженных образцах. Полученные результаты могут быть использованы для проведения специальных исследований по определению стойкости природных и искусственных конструкционных материалов к электрофизическим воздействиям различной природы. Прежде всего

это относится к железобетонным конструкциям, используемым в железнодорожном транспорте (мосты, туннели, шпалы и т. д.) и гидротехническим сооружениям.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 16-47-02003 (в части выполнения лабораторных экспериментов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: ЛКИ, 2008.
2. Морозов Н. Ф., Понииков Н. В. Проблемы механики сплошных сред и элементов конструкций. К 60-летию со дня рождения Г. И. Быковцева. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН. 1998. С. 97.
3. Гончаров С. А., Ананьев П. П., Иванов В. Ю. Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. М.: Издательство МГГУ. 2006.
4. Лапшин В. Б., Патонин А. В., Пономарев А. В. и др. // ДАН. 2016. **469**, № 1. С. 97.
5. Дерягин Б. В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е. М. // УФН. 2015. **185**. С. 981.
6. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985.
7. Taflove A., Hagness S. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method, 3d edition. London: Artech House. 2005. P. 51.
8. Yee Kane // Transactions on Antenna and Propagation. 1966. **14**, N 3. P. 302.
9. Rumpf R. C., Garcia C. R., Berry E. A., Barton J. H. // PIERS B. 2014. N 61. P. 55.
10. Holland R., Williams J. // Trans. Nuclear Science. 1983. **30**, N 6. P. 4583.
11. Berenger J-P. // J. Computational Physics. 1994. **114**, N 2. P. 185.
12. Mur G. // Trans. Electromagn. Compat. 1981. **23**. P. 377.
13. Jurgens T. G., Taflove A., Umashankar K. R., Moore T. G. // Trans. Antennas Propagat. 1992. **40**. P. 357.
14. Schon J. H. Physical Properties of Rocks. A Workbook. Handbook of petroleum exploration and production. Vol. 8. Netherlands: Elsevier. 2011.
15. Jones C., Keaney G., Meredith P. G., Murrell S. A. F. // Phys. Chem. Earth. 1997. **22**, N 1/2, P. 1317.
16. Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., Вознесенский А. С., Винников В. А. Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. М.: Горная книга. 2015.
17. Менжулин М. Г., Махмудов Х. Ф. Термокинетическая модель разрушения гетерогенных материалов и особенности ее численной реализации при воздействии высокочастотными электромагнитными полями // ФТФ. 2017. **87**, № 7. С. 1040.
18. Журков С. Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел // В сб.: Физика прочности и пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1980. С. 5.

Numerical and Laboratory Experiments on the Destruction of Construction Materials under the Impact of an Electromagnetic Field

V. B. Lapshin^{1,2,a}, V. B. Smirnov^{1,3,b}, A. A. Skubachevsky², A. V. Ponomarev³, A. V. Patonin⁴, A. A. Chromov³, M. G. Potanina^{1,3,c}

¹Department of Physics of Earth, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²Fedorov Institute of Applied Geophysics. Moscow 107258, Russia.

³Schmidt Joint Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow 123995, Russia.

⁴Borok Geophysical Observatory, Schmidt Joint Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Borok, Yaroslavl region 152742, Russia.

E-mail: ^alapshin-vb1@mail.ru, ^bvs60@mail.ru, ^cpotanina@physics.msu.ru.

This paper presents the results of numerical experiments on the impact of electromagnetic radiation on strength characteristics of natural and artificial materials and the data of laboratory experiments on the destruction of Berea sandstones and concretes under the impact of an electric current on loaded samples with a constant velocity of deformation.

Keywords: acoustic emission, destruction of rock samples, laboratory modeling, numerical experiments.

PACS: 91.30.Ab.

Received 17 November 2017.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **73**, No. 5. Pp. 558–563.

Сведения об авторах

1. Лапшин Владимир Борисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав.кафедрой; тел.: (495) 939-12-80, e-mail: lapshin-vb1@mail.ru.
2. Смирнов Владимир Борисович — доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-38-48, e-mail: vs60@mail.ru.
3. Скубачевский Антон Александрович — ассистент; e-mail: antonious007@yandex.ru.
4. Пономарев Александр Вениаминович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 254-24-78, e-mail: avp@ifz.ru.
5. Патонин Андрей Викторович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: patonin_borok@mail.ru.
6. Хромов Анатолий Алексеевич — ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 254-23-30, e-mail: anton200605@mail.ru.
7. Потанина Мария Георгиевна — ассистент; тел.: (495) 939-38-48, e-mail: potanina@physics.msu.ru.