

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШАЮЩИХСЯ ОБРАЗЦОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Проведена количественная интерпретация экспериментальных данных по двум амплитудно-частотным спектрам акустической эмиссии, зарегистрированным при разрушении образца бетона. В результате исследован характер временных изменений распределений пористости и удельной внутренней поверхности.

Акустическая эмиссия, функция распределения, пористость, удельная внутренняя поверхность.

STUDY TIME CHANGE OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS DESTROYS THE SAMPLE ACCORDING TO OBSERVATIONAL DATA OF ACOUSTIC EMISSION

Belikov V.T., Ryvkin D.G. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract A quantitative interpretation of the experimental data for two amplitude-frequency spectra of acoustic emission recorded at failure of specimen concrete was held. As a result, the character of the temporal changes the distributions of porosity and specific inner surface was investigated.

Acoustic emission, distribution function, porosity, specific internal surface.

Введение

Информация о временных изменениях структурных характеристик разрушающегося твердого тела может быть получена в результате анализа экспериментальных данных по наблюдениям сигналов акустической эмиссии (АЭ). Некоторые авторы (Баранов, 1990) разделяют ее на два вида: непрерывную и дискретную. Сигналы непрерывной АЭ характеризуются низкой энергией и относительно высокой частотой, поэтому быстро затухают (Грешников, Дробот, 1976). При дискретном характере АЭ энергия излучаемых упругих волн, а также их амплитуда, на много порядков превосходит энергию и амплитуду импульсов непрерывной АЭ (Баранов, 1990). Появление дискретной АЭ, спектральные характеристики которой смещены в область более низких, чем у непрерывной АЭ, частот, обусловлено возникновением и развитием макроскопических дефектов в материале (Грешников, Дробот, 1976). По этой причине именно сигналы дискретной АЭ следует использовать для изучения временных изменений структурных характеристик разрушающегося твердого тела и, в частности, горных пород. Такими характеристиками являются, прежде всего, порис-

тость, а также рассчитанная на единицу объема поверхность, ограничивающая пространство пор и трещин – удельная внутренняя поверхность (УВП). Для проведения количественной интерпретации результатов наблюдений дискретной АЭ необходимо иметь соотношения, связывающие характеристики ее сигналов с параметрами источников. Такие соотношения могут быть получены как следствие разработанных физико-математических моделей, описывающих процессы АЭ. При этом предлагаемые модели должны быть тесно увязаны с целями исследований. Например, если мы хотим изучить характер временных изменений пористости и УВП материала, всю область твердого тела, где развиваются процессы разрушения, следует рассматривать как гетерогенную среду, состоящую, по крайней мере, из двух фаз: твердой и трещинной (газообразной). При этом источником дискретной АЭ будут в данном случае колеблющиеся межфазные поверхности, разделяющие эти фазы. Основы такого подхода и соответствующая физико-математическая модель для описания процессов АЭ были разработаны в статьях (Алейников и др., 1992; 1993). Там же были получены соотношения, характе-

ризирующие функциональные связи между структурными характеристиками материала и параметрами сигналов АЭ, которые можно использовать для количественной интерпретации результатов ее наблюдений. Зависимость морфологии амплитудно-частотного (АЧ) спектра АЭ от структурных и физических характеристик разрушающегося твердого тела была изучена в работе (Беликов, 2008). В дальнейшем были сформулированы основные физические принципы и перечислены этапы процедуры реконструкции параметров среды с использованием результатов наблюдений АЭ (Беликов, 2010). Если имеются данные по АЧ спектрам АЭ, зафиксированным в различные моменты времени, их количественная интерпретация позволит исследовать особенности временных изменений структурных параметров твердого тела по мере развития процессов разрушения. К сожалению, в настоящее время экспериментальные данные по АЧ спектрам АЭ, зафиксированным на различных этапах развития процессов разрушения в образцах горных пород, отсутствуют. В то же время, подобного рода эксперименты проводятся со строительными материалами, например бетоном, структурные характеристики которого во многом схожи со структурными особенностями горных пород. В работах (Schiavi et al., 2011; Niccolini et al., 2010) проводились наблюдения сигналов АЭ при одноосном нагружении образца бетона, вплоть до его разрушения. По результатам экспериментов строились АЧ спектры АЭ для различных моментов времени. Цифровые данные по двум из них были любезно предоставлены нам одним из авторов, доктором А. Schiavi. В данной работе они использованы для изучения характера временных изменений пористости и УВП образца бетона в процессе разрушения.

Основные уравнения

В работах (Алейников и др., 1992; 1993) на основе осредненных (по объему с характерными размерами много большими характерного размера фаз) уравнений тепломассопереноса в многофазных средах были получены соотношения, описываю-

щие процесс распространения продольных и поперечных упругих волн в гетерогенном твердом теле. Функция источника A_i в этих соотношениях, описывающая процессы генерации АЭ, вызванной колебанием межфазных поверхностей, может быть записана так (Алейников и др., 1992; 1993; Беликов, 2008; 2010)

$$A_i = \frac{1}{2} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta}} v_{\alpha\beta}^2 L_i^{\alpha\beta}, \quad (1)$$

где $v_{\alpha\beta}$ – частота АЭ, соответствующая пульсации межфазной поверхности $S_{\alpha\beta}$ между α -ой и β -ой фазами гетерогенной среды, определяемая так (Беликов, 2008; 2010)

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{\alpha\beta} \Omega_{\alpha\beta}}{\rho L^{\alpha\beta}}}. \quad (2)$$

Обозначения в (1–2) следующие:

$L_i^{\alpha\beta} = L^{\alpha\beta} e_i^{\alpha\beta}$; $L^{\alpha\beta}$ – осредненная амплитуда колебаний межфазной поверхности $S_{\alpha\beta}$; $e_i^{\alpha\beta}$ – единичный вектор в направлении силы, действующей на единицу площади поверхности $S_{\alpha\beta}$; $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$ – модуль осредненного вектора этой силы; $\Omega_{\alpha\beta} = S_{\alpha\beta} / V$ – УВП, соответствующая межфазной поверхности $S_{\alpha\beta}$; ρ – плотность среды; V – величина объема осреднения. Параметр $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$ мы будем называть в дальнейшем осредненной разностью упругих напряжений на межфазной границе $S_{\alpha\beta}$. Будем предполагать, что в процессе генерации АЭ межфазная поверхность $S_{\alpha\beta}$ слабо отклоняется от положения равновесия. Тогда величина $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$ практически совпадает с ее равновесным значением (Беликов, Рывкин, 2014а).

Для проведения количественной интерпретации экспериментальных данных по наблюдениям АЭ при разрушении образца бетона предложенную выше модель необходимо конкретизировать. С этой целью материал образца бетона будем рассматривать как двухфазную гетерогенную среду, состоящую из твердой фазы – “1”, которую мы считаем гомогенной, и газообразной фазы – “2”, представляющей собой пространство пор и трещин, заполненных газообразным флюидом. Указанные фазы разделены межфазной поверхностью S_{12} ,

которой соответствует УВП Ω_{12} . Тогда функция источника A_i , в соответствии с (1), может быть записана так (Беликов, 2008; 2010; Беликов, Рывкин, 2014а, б)

$$A_i = v_{12}^2 L_i^{12}, \quad (3)$$

а (2) примет следующий вид

$$v = v_{12} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{12}\Omega_{12}}{\rho L^{12}}} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma\Omega}{\rho L}}, \quad (4)$$

где $\Delta\sigma_{12} = \Delta\sigma$; $L = L^{12}$; $\Omega = \Omega_{12}$. Формула (4) устанавливает связь между параметрами АЧ спектра АЭ (v и L), а также структурными и динамическими характеристиками образца бетона (Ω и $\Delta\sigma$).

Для детального изучения процессов генерации АЭ, позволяющего учесть вклад в АЧ спектр отдельных составляющих ТПП, можно ввести для них соответствующую функцию распределения (ФР). Причем в качестве основной величины, описывающей структуру ТПП, целесообразно выбрать характерный размер и ограничиться рассмотрением ФР лишь только по этому параметру, считая, что ТПП представляет собой совокупность (ансамбль) сферических полостей, радиусы которых изменяются в некотором промежутке. Границы промежутка определяются структурой среды (Беликов, 2010; Беликов, Рывкин, 2014а, б). Тогда радиус каждой сферической полости можно трактовать как характерный (эффективный) размер соответствующей составляющей ТПП. Выбор параметров ансамбля сферических полостей должен быть осуществлен таким образом, чтобы их общая поверхность, а также общий объем, сколь угодно мало отличались от значений аналогичных характеристик единицы объема образца бетона (Беликов, Рывкин, 2014а, б). Каждую из полостей мы будем рассматривать как монополь, имеющий хоть и малые (по сравнению с длиной излучаемой им волны), но конечные размеры (Исакович, 1973). Будем предполагать также, что энергия, излучаемая данным ансамблем сферических полостей в единицу времени, практически совпадает с мощностью излучения, генерируемого средой. Таким образом, звуковое поле, возбуждае-

мое межфазной поверхностью S^{12} , находящейся в единичном объеме образца, мы заменяем суперпозицией полей ансамбля монополей, параметры которого должны удовлетворять изложенным выше условиям (Беликов, Рывкин, 2014б). Определим нормированную ФР сферических полостей по размерам $f(r)$ как относительное их количество в единице объема, приходящееся на единичный интервал радиусов (Беликов, 2010). Если предположить, что материал образца однороден, то ФР можно считать постоянной во всем рассматриваемом объеме. Сферы с радиусами от r до $r + \Delta r$ будут соответствовать составляющим ТПП, эффективный размер которых изменяется в этих же пределах. Для этого набора сферических полостей, рассматриваемых как отдельная фаза (в рамках всего ТПП), можно, согласно (4), ввести характерную частоту. Помимо функции $f(r)$ мы будем использовать далее ФР $\tilde{f}(r)$, которую назовем ненормированной, связанную с $f(r)$ соотношением $\tilde{f}(r) = Nf(r)$, где N – общее количество излучающих сфер в единице объема с радиусами от R_{\min} до R_{\max} (минимальный и максимальный размеры, соответственно).

Структурные характеристики материала, такие как пористость ϕ и УВП Ω , могут быть выражены через ФР $\tilde{f}(r)$ следующим образом (Беликов, 2010; Беликов, Рывкин, 2010; 2014а)

$$\phi = \frac{4\pi}{3} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 \tilde{f}(r) dr; \quad \Omega = 4\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \tilde{f}(r) dr. \quad (5)$$

В дальнейшем нам понадобится понятие среднего (по всему ансамблю сферических излучателей) радиуса полости \bar{r} , который определяется так

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r \tilde{f}(r) dr = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r f(r) dr. \quad (6)$$

Расчеты и обсуждение результатов

Процедуру решения обратной задачи о восстановлении структурных характеристик материала по АЧ спектру АЭ можно подразделить на три основных этапа (Беликов, 2010). На первом должна быть проведена идентификация источников АЭ

и установлена их физическая природа. На втором этапе следует определить интервал изменения характерных размеров составляющих ТПП, которые в процессе излучения формируют наблюдаемый спектр АЭ. На третьем этапе необходимо задать распределение $\Delta\sigma(r)$.

Говоря о первом этапе, мы будем предполагать, что источником АЭ является колеблющаяся поверхность S_{12} , выведенная из равновесия. По поводу второго этапа отметим следующее. Непосредственная информация о границах указанного интервала в образце бетона, используемого в (Schiavi et al., 2011; Niccolini et al., 2010), отсутствует. Однако существуют данные, что средний характерный размер пор в цементосодержащих материалах составляет по порядку величины десятки микрон (Alder, 1992). Исходя из этого, мы предполагали, что излучает весь набор сферических полостей, радиусы которых изменяются в пределах от 1 до 100 мкм. Рассматривая третий этап, допустим, как было сказано выше, что межфазная поверхность S_{12} слабо отклоняется от ее равновесного положения, в этом случае незначительно будет меняться и ее кривизна. Для полостей, совершающих малые сферически-симметричные колебания, это допущение эквивалентно предположению о том, что в процессе излучения слабо меняется их радиус. В этом случае $\Delta\sigma$ для каждого r можно принять равным его минимальному значению, для которого (считая твердую фазу изотропной), в соответствии с формулой Лапласа, можно записать выражение

$$\Delta\sigma(r) = K/r, \quad (7)$$

где $K = 2\gamma_{12}$; γ_{12} – коэффициент поверхностного натяжения (Ландау, Лифшиц, 1964; 1986).

Необходимо отметить, что зависимость (7), вообще говоря, приближенная и справедлива она только в рамках высказанных выше предположений. Мы будем использовать ее для вычисления $\Delta\sigma$, придавая при этом величине K несколько иной смысл. А именно, будем считать, что K в (7), особенно для полостей малых радиусов, является,

фактически, удельной (рассчитанной на единицу площади поверхности) работой пластической деформации (Беликов, Рывкин, 2014а, б). Далее, величину K мы рассматривали как коэффициент пропорциональности и рассчитывали его значение в процессе интерпретации.

Разобьем шкалу размеров излучающих сферических полостей, а также шкалу частот в АЧ спектре АЭ, на промежутки. Если считать эти шкалы разнонаправленными (Беликов, Рывкин, 2014б), то минимальному размеру R_{\min} будет соответствовать максимальная частота в АЧ спектре, а максимальному R_{\max} – минимальная. Для установления соответствия между промежуточными значениями ν и r была использована линейная зависимость. Формулы для расчета поинтервальных значений ненормированной ФР $\tilde{f}(r)$, УВП Ω и пористости ϕ , полученные с использованием соотношений (4, 5, 7), приведены в работах (Беликов, Рывкин, 2014а, б).

Вычисления проводились в следующей последовательности. В первом приближении коэффициент K считался постоянным во всем промежутке изменения размеров излучающих сфер и определялся по данным поинтервальных значений размеров полостей, а также частот и амплитуд в АЧ спектре АЭ (там же).

При проведении расчетов во втором приближении предполагалось, что коэффициент K может принимать различные значения в каждом из интервалов разбиения шкалы радиусов. Для определения его поинтервальных значений была использована процедура, сводящаяся к поиску минимума УВП Ω при неизменном объеме фаз (там же). В качестве истинного выбирался вариант, при котором УВП была минимальной, а пористость отличалась от принятого нами ее значения $\phi = 0,1$ не более чем на десять процентов. Предложенная выше методика количественной интерпретации результатов наблюдений АЭ была применена для каждого из двух АЧ спектров АЭ, зарегистрированных через $t = t_1 = 25$ мин и $t = t_2 = 36,1$ мин после начала нагружения образца бетона.

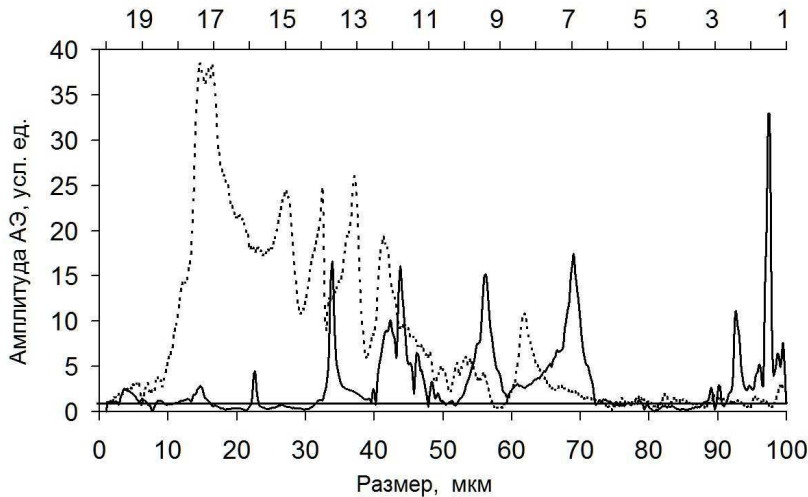


Рис. 1. Распределение амплитуд АЭ в зависимости от радиуса (размера) излучающих сферических полостей. Верхняя шкала – частота АЭ (кГц). Пунктир – момент времени t_1 , сплошная линия – момент времени t_2

На рис. 1 приведены два распределения амплитуд АЭ в зависимости от радиуса излучающих сферических полостей r характерного размера составляющих ТПП), построенные с использованием этих спектров. На вертикальной оси отложена относительная амплитуда $L/L_0 = \mu \cdot 10^{B/20}$, где B – используемая в работах (Schiavi et al., 2011; Niccolini et al., 2010) магнитуда (в децибелах); μ – введенный для удобства постоянный множитель; L_0 – уровень отсчета амплитуды. Отметим, что ФР $f(r)$, а также рассматриваемые далее соответствующие относительные (по отношению к ϕ и Ω) распределения пористости и УВП, не зависят от размерности амплитуды.

Анализируя графики на рис. 1, можно отметить, что АЧ спектр АЭ при $t = t_1$ характеризуется значительной его составляющей в области высоких частот (малых

характерных размеров ТПП). В момент времени t_2 в АЧ спектре АЭ происходит резкое уменьшение вклада этой области частот и увеличивается интенсивность АЭ на низких частотах, соответствующих составляющим ТПП с относительно большими r (более 40 мкм). При этом основная часть энергии излучается в окрестности характерных размеров 43,6; 55,9; 68,7; 92,4 и 97,2 мкм. Восстановленные в соответствии с описанной выше процедурой нормированные ФР второго приближения $f(r)$ для этих же моментов времени представлены на рис. 2. Сравнение графиков на рис. 1 и 2 показывает, что существует тесная связь отмеченных выше особенностей АЧ спектров АЭ с морфологией соответствующих ФР второго приближения. А именно, если при $t = t_1$ у ФР, в основном, присутствуют составляющие ТПП с относительно

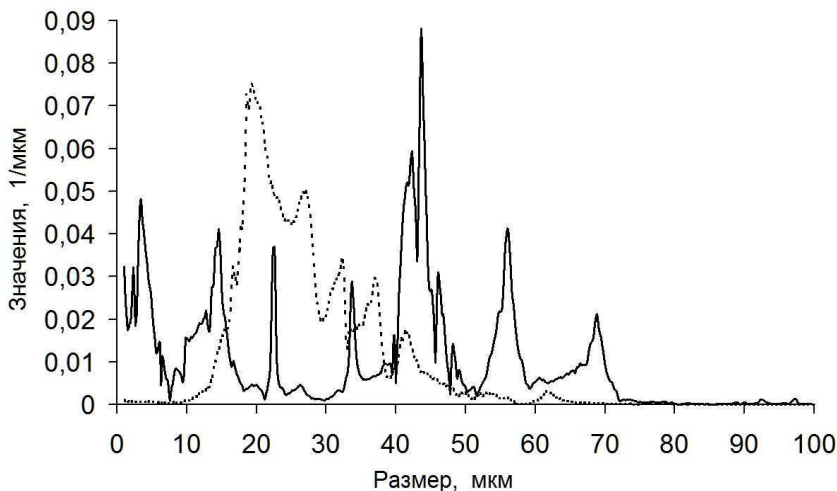


Рис. 2. Нормированная функция распределения $f(r)$ второго приближения. Пунктир – момент времени t_1 , сплошная линия – момент времени t_2

малыми характерными размерами (от 10 до 40 мкм), то в момент времени t_2 у нее появляются высокоамплитудные максимумы в промежутках 40–50, 50–60 и 60–70 мкм, несколько смещенные в сторону увеличения r по сравнению со слабыми максимумами, наблюдавшимися в этих же интервалах в момент времени t_1 . Вместе с тем, при $t = t_2$ у ФР практически исчезают составляющие ТПП с характерными размерами от 15 до 40 мкм (кроме двух узких максимумов при $r = 22,4$ мкм и $r = 33,7$ мкм) и появляются локальные максимумы при $r = 3,35$ мкм и $r = 14,6$ мкм. Указанные особенности морфологии ФР позволяют говорить о том, что по мере развития процессов разрушения в образце в течение промежутка времени $t_2 - t_1$, с одной стороны, происходит слияние и укрупнение трещин с появлением в интервале от 40 до 70 мкм трех составляющих ТПП, отмеченных на графике ФР максимумами при 43,6; 55,9 и 68,7 мкм. С другой стороны, за этот же период времени возникают и растут относительно мелкие трещины, о чем свидетельствует факт появления при $t = t_2$ двух максимумов ФР, соответствующих составляющим ТПП, имеющим характерные размеры 3,35 и 14,6 мкм. То, что в процессе разрушения образца в течение промежутка времени $t_2 - t_1$ происходит слияние и укрупнение трещин, подтверждает и анализ распределений относительных значений излучающей УВП в моменты времени t_1 и t_2 , представленных на рис. 3.

Сравнение этих распределений показывает, что при $t = t_1$ основной вклад в излучение вносят участки УВП из области малых характерных размеров от 10 до 40 мкм. В момент времени t_2 эти фрагменты УВП (за исключением, как и у ФР, двух узких максимумов при $r = 22,4$ мкм и $r = 33,7$ мкм) практически исчезают, а подавляющая часть интенсивности АЭ обусловлена излучением участков межфазной поверхности, соответствующих составляющим ТПП, у которых r изменяется в пределах от 40 до 80 и от 90 до 100 мкм. При этом основной вклад в УВП образца вносят ее фрагменты в окрестности характерных размеров 42,3; 43,6; 55,9; 68,7; 92,3 и 97,1 мкм. Отметим, что сделанный выше и основанный на анализе морфологии ФР вывод о том, что при $t = t_2$ возникают и растут относительно мелкие трещины, не находит четкого подтверждения в характере соответствующего распределения УВП. Это объясняется тем, что появление в момент времени t_2 у ФР двух максимумов при $r = 3,35$ мкм и $r = 14,6$ мкм практически не отражается на морфологии распределения УВП образца в силу очень малого вклада в нее составляющих ТПП небольших размеров.

Сравнение распределений относительных значений пористости для моментов времени t_1 и t_2 , представленных на рис. 4, также указывает на то, что происходит процесс укрупнения трещин, сопровождающийся при $t = t_2$ смещением максиму-

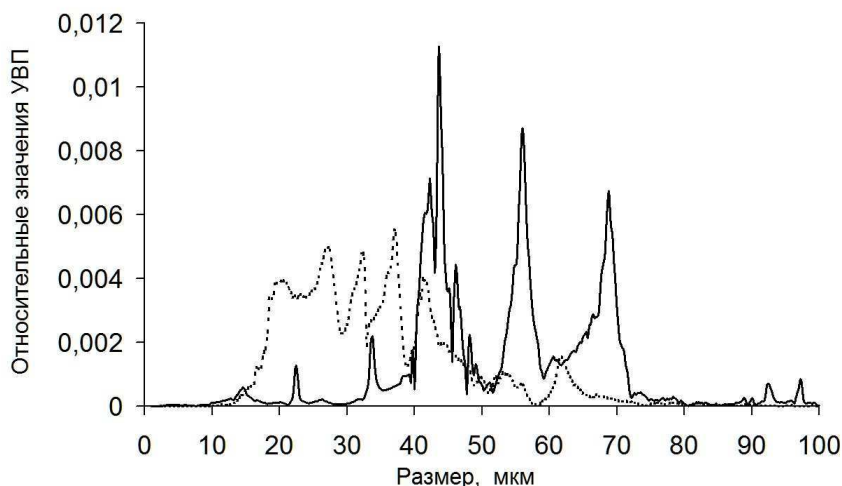


Рис. 3. Распределения относительных значений УВП. Пунктир – момент времени t_1 , сплошная линия – момент времени t_2

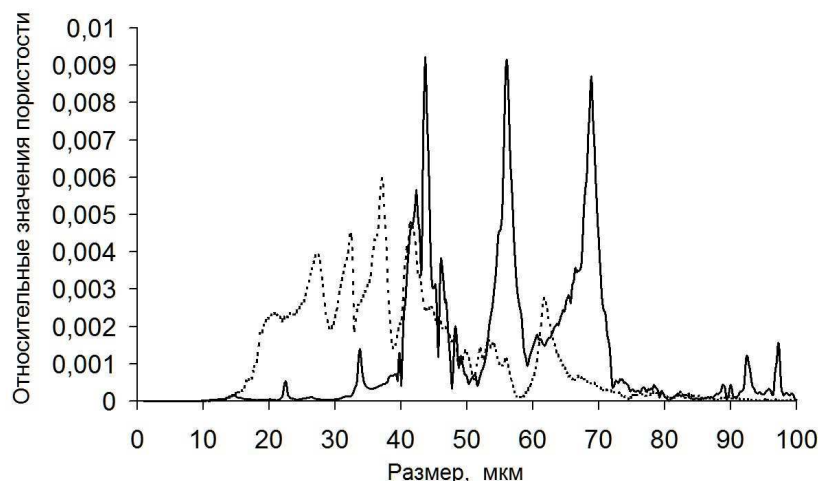


Рис. 4. Распределения относительных значений пористости. Пунктир – момент времени t_1 , сплошная линия – момент времени t_2

мов в область больших характерных размеров. В результате, в момент времени t_2 , основной вклад в пористость дают ее составляющие в окрестности локальных максимумов, соответствующих значениям r 42,3; 43,6; 55,9; 68,7; 92,3 и 97,1 мкм.

Обратим внимание на то, что при этих же размерах фиксируются максимумы у ФР (см. рис. 2), а также в распределении УВП (см. рис. 3). Причем в момент времени t_2 при $r = 43,6$ мкм наблюдается глобальный максимум как у ФР, так и у распределений пористости и УВП.

Следует отметить, что максимумы $f(r)$, а также распределений пористости и УВП при $t = t_2$, практически совпадают с максимумами амплитуды в АЧ спектре АЭ в этот же момент времени. Однако соотношение между их значениями при различных размерах в АЧ спектре и указанных распределениях неодинаково.

Следующий из анализа морфологии ФР факт появления мелких трещин с характерными размерами 3,35 и 14,6 мкм в распределении пористости, также как и в распределении УВП, не проявляется по причине, которая была указана выше. Обратим внимание на следующее важное обстоятельство. В момент времени t_2 в распределении УВП величина максимумов при 43,6; 55,9 и 68,7 мкм с увеличением размеров уменьшается, а в распределении пористости максимумы, соответствующие этим же значениям r , приблизительно одинаковы. Связано это с тем, что с ростом

размеров УВП увеличивается пропорционально их квадрату, а пористость - пропорционально кубу. По этой же причине в распределении пористости отмечается более существенный рост максимумов при 92,3 и 97,1 мкм по сравнению с их относительными значениями при этих же размерах в распределении УВП. При построении распределений относительных значений пористости, мы должны использовать ту ее величину, которую имеет образец в данный момент времени. Между тем, строго говоря, пористость может меняться в процессе разрушения. Мы предполагали, что ее изменение за время $t_2 - t_1$ мало. Тогда при расчете распределений пористости при t_1 и t_2 можно считать ϕ одинаковой и равной принятому ее значению. Точно также мы считали, что интервал изменения характерных размеров составляющих ТПП (1–100 мкм) за время $t_2 - t_1$ не меняется. Таким образом, результаты количественной интерпретации данных по двум АЧ спектрам АЭ, зафиксированным в моменты времени t_1 и t_2 , позволяют говорить о том, что по мере развития деструктивных процессов в образце происходит изменение $f(r)$, а также соответствующих распределений пористости и УВП, что является отражением перераспределения составляющих ТПП по их характерным размерам.

Сравнительный анализ морфологии $f(r)$ и указанных распределений, восстановленных на моменты времени t_1 и t_2 , показывает, что развитие процессов разруше-

ния в этом временном интервале характеризуется двумя особенностями. Суть первой заключается в том, что происходит слияние и укрупнение трещин. Вторая особенность связана с тем, что продолжается образование и рост трещин малых размеров. Последнее явление, характерное для начальных этапов разрушения, однако, слабо отражается на морфологии распределений пористости и излучающей УВП. Из этих двух особенностей главной на данном этапе развития процессов разрушения в образце является первая. Иными словами, за промежуток времени $t_2 - t_1$, в основном, происходит слияние и укрупнение трещин. Этот вывод подтверждается также следующими двумя фактами. Во-первых, отношение общей УВП в момент времени t_2 к ее значению при $t = t_1$ равно 0,776, то есть по мере развития процессов разрушения УВП образца уменьшается. Во-вторых, средний (по всему интервалу от 1 до 100 мкм) характерный размер ТПП в момент времени t_1 , определяемый в соответствии с (6), составляет 27 мкм, а в момент времени $t_2 - 36$ мкм.

Заключение

Интерпретация данных по двум АЧ спектрам АЭ, зарегистрированным через $t_1 = 25$ мин и $t_2 = 36,1$ мин после начала нагружения образца бетона, позволила построить соответствующие нормированные ФР излучающих сферических полостей по их радиусам, моделирующие распределение по характерным размерам составляющих ТПП. Кроме того, были восстановлены распределения пористости и излучающей УВП при t_1 и t_2 . Сравнительный анализ морфологии ФР и соответствующих распределений пористости и УВП, в моменты времени t_1 и t_2 , позволяет сделать вывод о том, что при развитии процессов разрушения в этом временном интервале, в основном, происходит слияние и укрупнение трещин, приводящее к появлению составляющих ТПП с относительно большими характерными размерами, а также уменьшению общей УВП. При наличии экспериментальных данных по АЧ спектрам АЭ, зафиксированным при большем,

чем два количестве моментов времени, характер изменения структурных характеристик среды может быть восстановлен более детально. Опыт, приобретенный в ходе выполнения данной работы, будет использован в дальнейшем при количественной интерпретации результатов наблюдений АЭ в процессе разрушения горных пород. Выражаем искреннюю благодарность доктору А. Schiavi за предоставленные материалы.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 14-27-00059).

Литература

- Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И., Троянов А.К. Интерпретация наблюдений сигналов акустической эмиссии на Уральской сверхглубокой скважине // Геология и геофизика. 1992. № 6. С. 118–126.
- Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И., Акустическая эмиссия в гетерогенных средах // Дефектоскопия. 1993. № 3. С. 31–36.
- Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- Беликов В.Т. Моделирование процессов акустической эмиссии в твердом теле // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 77–84.
- Беликов В.Т. Восстановление структурных характеристик разрушающегося твердого тела по амплитудно-частотному спектру акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 56–63.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Использование амплитудно-частотного спектра акустической эмиссии для восстановления функции распределения трещин по размерам // Дефектоскопия. 2010. № 10. С. 26–33.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Использование данных наблюдений акустической эмиссии для изучения структуры горных пород // Уральский геофизический вестник. 2014а. № 1. С. 11–21.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Изучение структурных характеристик твердого тела по данным наблюдений акустической эмиссии // Уральский геофизический вестник. 2014б. № 2. С. 13–21.

Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Издательство стандартов, 1976. 272 с.

Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 568 с.

Alder P. M. Porous media: geometry and transports. Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1992. 544 p.

Niccolini G., Schiavi A., Tarizzo P., Carpinteri A., Lacidogna G., Manuello A. Scaling in temporal occurrence of quasi-rigid body vibration pulses due to macrofractures // Journals of the American Physical Society – Physical Review E. 2010. V. 82 (4). 046115. P. 1–5.

Schiavi A., Niccolini G., Tarizzo P., Carpinteri A., Lacidogna G., Manuello A.

Acoustic emissions at high and low frequencies during compression tests in brittle materials // Strain. 2011. V. 47 (Supp 1.2), P. 105–110.