

УДК 620.179:534.6

Т.Н. Косицька, к.х.н.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ РУЙНУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний авіаційний університет, email:balishp@gmail.com

Розглянуто закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії при механічному руйнуванні композиційного матеріалу з урахуванням впливу дисперсності його властивостей і швидкості навантаження. Визначено аналітичні вирази для зміни параметрів сигналів акустичної емісії, що формуються, та показана їх інформативність.

Ключові слова: акустична емісія, моделювання сигналів, руйнування, композиційний матеріал, руйнування волокон.

Постановка проблеми

Композиційні матеріали (КМ) це багатокомпонентні матеріали, які складаються з матриці та зв'язки. Особливості їх будови забезпечують отримання заданих фізико-механічних характеристик, що сприяє усе більшому застосуванню КМ в практичному використанні. Для забезпечення експлуатаційної надійності таких матеріалів розробляються методи контролю та діагностики їх стану. Такі розробки охоплюють широке коло питань, пов'язаних не тільки з дослідженнями процесів руйнування КМ, але й з використанням нових методів, що дають інформацію про протікання даних процесів. Одним з таких методів є метод акустичної емісії (АЕ). Сигнали АЕ, що реєструються при навантаженні КМ, є відображенням внутрішніх процесів, які відбуваються в структурі матеріалів на субмікро, мікро та макрорівнях. До таких процесів відносяться пластична деформації, утворення та ріст тріщин. Висока чутливість методу АЕ до подібних процесів забезпечує значні переваги при розробці методів діагностики виробів. Проте, складна структура КМ та проблеми, пов'язані з дослідженнями процесів їх руйнування, насамперед із кінетикою руйнування, призводять до певних складностей у застосуванні методу АЕ. У першу чергу це стосується проблеми теоретичних досліджень, спрямованих на отримання основних закономірностей поведінки акустичного випромінювання, що формується при руйнуванні КМ. При цьому необхідно враховувати дію різних факторів - швидкості зміни зовнішнього навантаження, фізико-механічні характеристики КМ, дисперсність їх властивостей і т.п. Безумовно, вирішення подібних завдань забезпечить розробку достовірних методів діагностики стану виробів із КМ з урахуванням кінетики розвитку процесів руйнування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Можна виділити два напрямки досліджень АЕ при руйнуванні КМ. Перший, пов'язаний з дослідженням акустичного випромінювання, наприклад, процесу накопичування енергії АЕ або накопиченої енергії [1, 2]. При цьому закономірності зміни акустичного випромінювання розглядаються тільки в наближенні до моменту повного руйнування КМ. Другий напрямок, пов'язаний із розробкою моделей сигналів АЕ, що формуються при руйнуванні КМ при розтягу або під дією поперечної сили [3-7]. В основі побудови моделей, як першого, так і другого напрямків, лежить аналіз руйнування КМ, що представлений у вигляді пучка волокон [8-9], з урахуванням перерозподілу напружень на незруйновані елементи (волокна). Безумовно, другий напрямок є цікавим, тому що дозволяє моделювати сигнали АЕ. Таке моделювання спрямоване на встановлення основних закономірностей зміни параметрів сигналів АЕ, що формуються при руйнуванні КМ, із урахуванням дії різних факторів - швидкості навантаження КМ, їх фізико-механічних характеристик, геометричних розмірів зв'язки і т.п.

У роботі [3] була розроблена модель сигналу АЕ, що формується при руйнуванні КМ, представленого у вигляді пучка волокон. При цьому було враховано термоактивніший механізм руйнування та кінетику розвитку цього процесу. Результати досліджень показали, що сигнал АЕ, що формується, є відео імпульсом із акселератційним наростанням переднього фронту та різким падінням заднього фронту. При цьому було отримано основні закономірності зміни сигналів АЕ при зміні різних факторів. На основі розробленої моделі в роботі [10] було проведено дослідження інформативності параметрів сигналів АЕ та визначено залежності зміни

параметрів сигналів АЕ, що формуються при зростанні швидкості руйнування КМ. При цьому було показано, що площа під обвідною сигналів АЕ не залежить від швидкості руйнування КМ. Це узгоджується із результатами експериментальних досліджень. У роботі [4] було відзначено, що реальні сигнали АЕ, які реєструються при руйнуванні КМ, відрізняються від модельованих сигналів. Вони мають різке наростання переднього фронту та релаксаційне падіння амплітуди заднього фронту. При цьому падіння амплітуди по задньому фронту відбувається за експоненціальним законом. Така зміна амплітуди по задньому фронту обумовлена зміною у механізмі руйнування на початковому етапі розвитку процесу, тобто відбувається перехід від термоактиваційного руйнування до механічного. При моделюванні механічного руйнування КМ формовані сигнали АЕ мають добре узгодження з реальними сигналами, що було показано в роботі [11].

У той же час, необхідно провести дослідження основних закономірностей зміни параметрів сигналу АЕ, що формується при механічному руйнуванні КМ, в залежності від різних факторів із визначенням їх інформативності.

Завдання дослідження

У роботі буде розглянуто закономірності зміни параметрів сигналів АЕ, що формуються при механічному руйнуванні КМ, в залежності від швидкості навантаження та дисперсності КМ за характеристиками міцності. Також будуть визначені аналітичні вирази для закономірностей зміни параметрів сигналів АЕ та буде показана їх інформативність.

Результати досліджень

Згідно [11], аналітичний вираз, що описує формований сигнал АЕ при механічному руйнуванні КМ, має вигляд

$$U(t) = u_0 t \alpha \nu_0 e^{r\alpha t} e^{-\frac{\nu_0}{r\alpha}(e^{r\alpha t} - 1)}, \quad (1)$$

де $u_0 = N_0 \psi \delta_S$ - максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні зразка із заданими фізико-механічними характеристиками; ψ - коефіцієнт пропорційності між напруженням і амплітудою імпульсом збурення, що формується при руйнуванні одиничного елемента КМ (ϵ константою); δ_S - величина, яка пропорційна тривалості збурення при руйнуванні одиничного елемента; α - швидкість навантаження; ν_0, r - параметри, що характеризують фізико-механічні характеристики КМ.

Відповідно до проведених досліджень [11], сигнал АЕ, що описувався виразом (1), є відео імпульсом. Згідно визначень [12] і [13], основними його параметрами є: тривалість переднього фронту τ_0 ; тривалість τ_m сигналу; максимальна амплітуда U_{\max} ; енергія E ; площа під обвідною сигналу S_U . С точки зору визначення закономірностей зміни даних параметрів сигналів АЕ при зміні фактора, що впливає, та їх інформативності інтерес представляє отримання аналітичних виразів, що описують параметри сигналу АЕ. Згідно [13], енергія E , площа під обвідною сигналу АЕ S_U та його максимальна амплітуда визначаються за виразами

$$E = \int_0^{\tau_m} U^2(t) dt; \quad S_U = \int_0^{\tau_m} U(t) dt; \quad U_{\max} = U(t = \tau_{m0}), \quad (2)$$

де τ_m - тривалість сигналу АЕ; τ_{m0} - момент часу, що відповідає максимальній амплітуді сигналу АЕ.

З (2) видно, що для одержання аналітичних виразів параметрів сигналу АЕ необхідно визначити τ_{m0} та τ_m . Момент часу τ_{m0} можна визначити за умови, що в цей момент часу похідна від функції $U(t)$ дорівнюватиме нулю, тобто

$$\left. \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|_{t=\tau_{m0}} = 0. \quad (3)$$

Проведені дослідження показали, що рішення рівняння (3) у явному вигляді, відносно τ_{m0} , не можливе, що не дозволяє визначити аналітичний вираз для τ_m . Тому параметри сигналів АЕ, згідно (2), можна визначити, використовуючи чисельні методи рішень. При цьому максимальна амплітуда сигналу АЕ U_{\max} та тривалість переднього фронту τ_{m0} легко визначаються з графічної залежності зміни амплітуди сигналу АЕ за часом $U(t)$. У той же час, згідно (1), зміна амплітуди сигналу АЕ по задньому фронту носить асимптотичний характер. Виходячи із цього, тривалість сигналу АЕ, як і в роботі [10], будемо визначати з умови $U(t = \tau_m) \ll U_{\max}(t = \tau_{m0})$, а тривалість сигналу АЕ будемо задавати у вигляді

$$\tau_m = m\tau_{m0}, \quad (4)$$

де m – деяке ціле число.

Аналіз залежностей зміни параметрів сигналів АЕ будемо проводити за умови зміни швидкості навантаження КМ. Обробка даних, отриманих в [11], показала, що при $\alpha=10$ і $m=2$ співвідношення амплітуд становить 0,79. При $\alpha=10$ і $m=2,5$ це співвідношення дорівнює 0,0364, а при $\alpha=10$ і $m=3$ воно вже становить 0,000956. При $\alpha=20$ і $m=2$ співвідношення амплітуд становить 0,073, а при $\alpha=20$ і $m=2,5$ воно вже дорівнює 0,0095. Для $\alpha=40$ і $m=2$ співвідношення амплітуд становить 0,0003. При $\alpha=50$ і $m=2$ співвідношення амплітуд дорівнює 0,000116. Якщо обмежитися третім знаком після коми, то при проведенні розрахунків параметрів сигналів АЕ приймемо наступні значення коефіцієнта m : для $\alpha=10$ значення $m=3$; для $\alpha=20$ значення $m=2,5$; для $\alpha=40$ і $\alpha=50$ значення $m=2$.

Результати чисельного розрахунку параметрів модельних сигналів АЕ, згідно (2), з урахуванням умов визначення тривалості сигналів, залежно від швидкості навантаження КМ, показано на рис. 1. Графіки на рис. 1 представлені у відносних одиницях. При проведенні розрахунків параметри, що входять в (1), приведені до безрозмірних величин, а час представлений у відносних одиницях. При цьому значення параметрів ν_0 і r , що входять у вирази (1), дорівнювали: $\nu_0 = 100000$; $r = 10000$.

З рис. 1 видно, що при зростанні швидкості навантаження КМ спостерігається зменшення тривалості переднього фронту та тривалості сигналів АЕ (рис. 1, а, б), а їх максимальна амплітуда та енергія зростають (рис. 1, в, г). Аналіз отриманих даних з апроксимацією залежностей зміни тривалості переднього фронту та тривалості сигналу АЕ (рис. 1, а, б) показує, що вони описуються виразом виду

$$\tilde{\tau}_{m,m0} = ab\tilde{\alpha}, \quad (5)$$

де a та b – коефіцієнти апроксимуючого виразу; $\tilde{\alpha}$ – швидкість навантаження КМ.

Умовою вибору апроксимуючого виразу є мінімальне значення дисперсії. Коефіцієнти апроксимуючого виразу a та b для τ_{m0} становлять: $a = 0,00002$; $b = -0,417$. Для τ_m їх значення дорівнюють: $a = 0,00004$; $b = -0,9668$. Дисперсія σ^2 для заданої ймовірності p становить: для τ_{m0} - $\sigma^2 = 2,052 \times 10^{-14}$, $p = 0,9958$; для τ_m - $\sigma^2 = 3,888 \times 10^{-12}$, $p = 0,96576$.

Максимальна амплітуда й енергія сигналів АЕ (рис. 1, в, г) характеризуються практично лінійним зростанням при збільшенні швидкості навантаження КМ. Як показує аналіз отриманих залежностей, вони добре описуються виразом виду

$$\tilde{P} = c + k\tilde{\alpha}, \quad (6)$$

де \tilde{P} – аналізований параметр сигналів АЕ (максимальна амплітуда або енергія); c та k – коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Значення коефіцієнтів апроксимуючого виразу c та k для максимальної амплітуди формованих сигналів АЕ становлять: $c = -4,5887$; $k = 0,901$. Для енергії сигналів АЕ значення даних коефіцієнтів дорівнюють: $c = -0,00906$; $k = 0,017$. При цьому дисперсія σ^2 для заданої ймовірності p становить: для максимальної амплітуди сигналів АЕ - $\sigma^2 = 0,16$, $p = 0,99882$; для енергії сигналів АЕ - $\sigma^2 = 9,2669 \times 10^{-4}$, $p = 0,9997$.

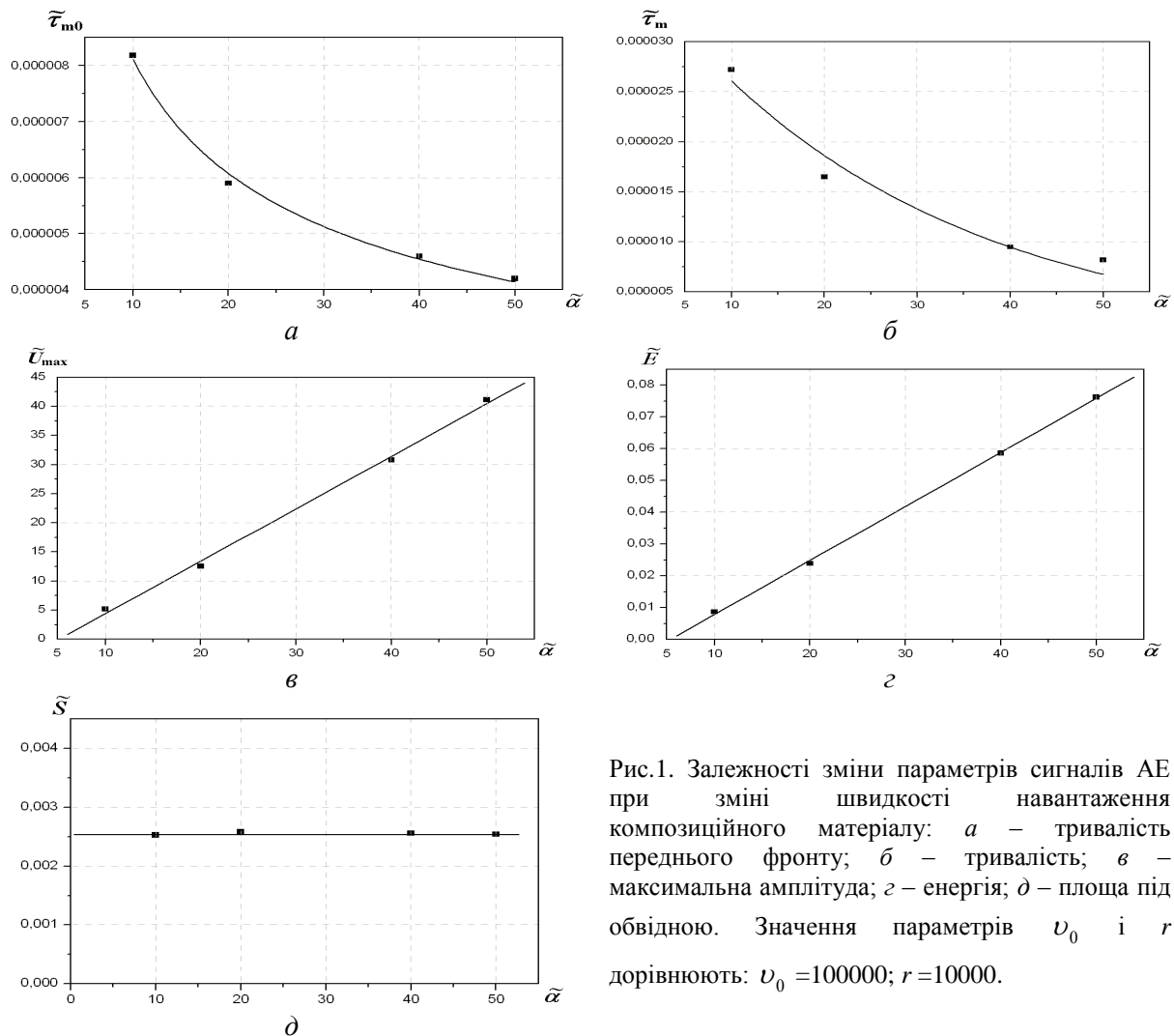


Рис.1. Залежності зміни параметрів сигналів АЕ при зміні швидкості навантаження композиційного матеріалу: *a* – тривалість переднього фронту; *б* – тривалість; *в* – максимальна амплітуда; *г* – енергія; *д* – площа під обвідною. Значення параметрів ν_0 і r дорівнюють: $\nu_0 = 100000$; $r = 10000$.

З рис. 1, *д* також видно, що площа під обвідною сигналів АЕ не залежить від швидкості навантаження КМ. Її обробка показує, що середнє значення площі під обвідною сигналів АЕ становить $\tilde{S}_c = 0,00255$, а дисперсія σ^2 для заданої ймовірності $p = 0,99995$ становить $\sigma^2 = 2,715 \times 10^{-5}$. Оскільки, для зразка КМ заданого розміру, не залежно від швидкості навантаження, площа утвореної тріщини є постійною величиною, то зрозуміло, що інформативним параметром АЕ є площа під обвідною формованих сигналів. Відзначимо, що отриманий результат узгоджується із даними експериментальних досліджень, які розглянуто в роботі [10].

Аналогічні дослідження були проведені при зміні дисперсності властивостей КМ за умови постійності швидкості навантаження. Розрахунки параметрів сигналів АЕ показано на рис. 2. Графіки на рис. 2 нормовані аналогічно графікам рис. 1. При розрахунках значення параметрів ν_0 і α дорівнювали: $\nu_0 = 100000$; $\alpha = 10000$. Тривалість сигналів АЕ $\tilde{\tau}_m$ визначали, відповідно до розглянутої вище методики.

З рис. 2, *a*, *б* видно, що при зростанні параметра r , який характеризує зменшення дисперсності КМ за властивостями, спостерігається зменшення тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ. Аналіз отриманих даних із апроксимацією залежностей зміни тривалості переднього фронту та тривалості сигналу АЕ (рис. 2, *a*, *б*) показує, що вони добре описуються виразом виду

$$\tilde{\tau}_{m,0} = d e^{\frac{g}{r+w}}, \quad (7)$$

де d , g і w – коефіцієнти апроксимуючого виразу.

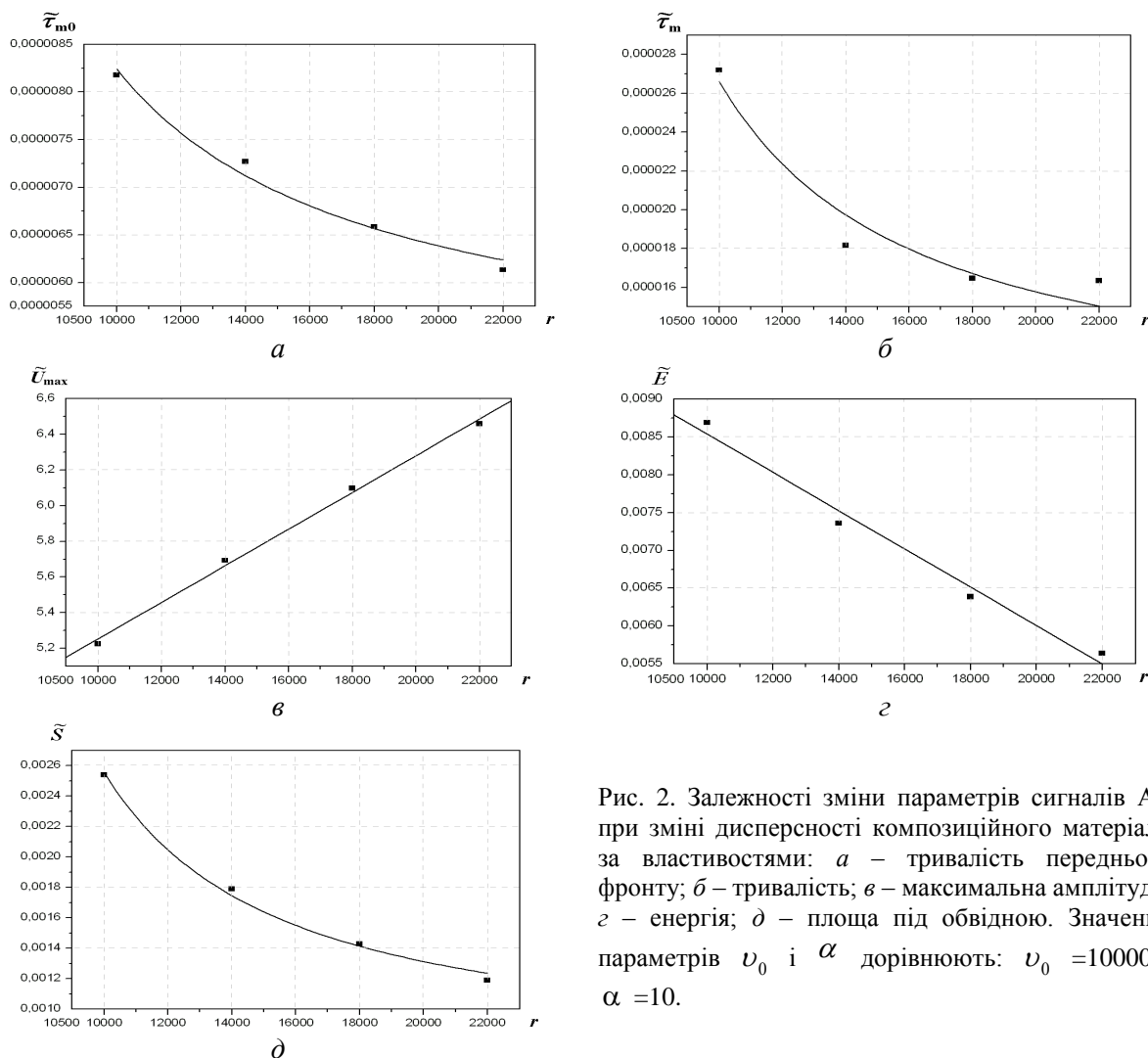


Рис. 2. Залежності зміни параметрів сигналів АЕ при зміні дисперсності композиційного матеріалу за властивостями: *a* – тривалість переднього фронту; *б* – тривалість; *в* – максимальна амплітуда; *г* – енергія; *д* – площа під обвідною. Значення параметрів ν_0 і α дорівнюють: $\nu_0 = 100000$; $\alpha = 10$.

Умовою вибору апроксимуючого виразу, як і раніше, є мінімальне значення дисперсії. Значення коефіцієнтів апроксимуючого виразу *d*, *g* і *w* для тривалості τ_{m0} переднього фронту сигналів АЕ становлять: $d = 4,945 \times 10^{-6}$; $g = 5107,797$; $w = 0,5$. Для тривалості τ_m сигналів АЕ значення даних коефіцієнтів дорівнюють: $d = 9,35 \times 10^{-6}$; $g = 10462,337$; $w = 0,5$. При цьому дисперсія σ^2 для заданої ймовірності *p* становить: для тривалості переднього фронту сигналів АЕ - $\sigma^2 = 1,84 \times 10^{-14}$, $p = 0,98451$; для тривалості сигналів АЕ - $\sigma^2 = 2,288 \times 10^{-12}$, $p = 0,97292$.

Отримані дані також показують, що при зростанні *r* спостерігається зростання максимальної амплітуди формованих сигналів АЕ (рис. 2, в). Проте подібне зростання незначне. Таке незначне зростання максимальної амплітуди та зменшення тривалості сигналів АЕ приводить до падіння енергії сигналів, що формуються (рис. 2, г). Слід зазначити, що падіння енергії теж незначне. Залежності зміни максимальної амплітуди й енергії сигналів АЕ добре описуються виразом (6). Значення коефіцієнтів *c* та *k* апроксимуючого виразу (6) для максимальної амплітуди формованих сигналів АЕ становлять: $c = 4,228$; $k = 1,026 \times 10^{-4}$. Для енергії сигналів АЕ значення даних коефіцієнтів дорівнюють: $c = 0,01107$; $k = -2,53 \times 10^{-7}$. При цьому дисперсія σ^2 для заданої ймовірності *p* становить: для максимальної амплітуди сигналів АЕ - $\sigma^2 = 0,01298$, $p = 0,99829$; для енергії сигналів АЕ - $\sigma^2 = 2,0625 \times 10^{-4}$, $p = 0,99179$.

З рис. 2, д також видно, що при зростанні *r* відбувається зменшення площі \tilde{S} під обвідною сигналів АЕ. Як показує аналіз отриманої залежності, вона добре описується виразом (7). Значення коефіцієнтів апроксимуючого виразу *d*, *g* і *w* для площі \tilde{S} під обвідною сигналів АЕ становлять: $d = 0,00068$; $g = 13312,672$; $w = 0,5$. При цьому дисперсія σ^2 для заданої ймовірності

p становить: $\sigma^2 = 2,24 \times 10^{-9}$, $p = 0,9957$.

Така зміна параметрів сигналів імовірно пов'язана з тим, що зменшення дисперсності властивостей КМ приводить до незначного зростання швидкості його механічного руйнування і, як наслідок, до незначної зміни чисельних значень параметрів сигналів АЕ, що формуються.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що для КМ із заданими фізико-механічними характеристиками зростання швидкості його навантаження приводить до нелінійного зменшення тривалості переднього фронту й тривалості формованих сигналів АЕ. При цьому максимальна амплітуда та енергія сигналів АЕ зростають за лінійним законом. Як показує аналіз даних, при зростанні швидкості навантаження в п'ять разів тривалість переднього фронту й тривалість сигналів АЕ зменшується більш ніж у три рази, а їх максимальна амплітуда й енергія зростають більш ніж у вісім разів. У той же час, при зростанні швидкості навантаження площа під обвідною сигналів АЕ є постійною величиною. Це узгоджується із результатами експериментальних досліджень [10]. При зменшенні дисперсності КМ за характеристиками міцності відбувається зменшення тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ за нелінійним законом. При цьому спостерігається зростання максимальної амплітуди та зменшення енергії сигналів АЕ за лінійними законами. Фіксується зменшення площі під обвідною сигналів АЕ. При цьому зростання параметра, що характеризує дисперсність властивостей, більш ніж у два рази призводить до зменшення тривалості переднього фронту, тривалості сигналів АЕ, їх енергії та площі під обвідною сигналів АЕ менш, ніж в 1,5 рази, а максимальна амплітуда сигналів АЕ зростає не більш, ніж в 1,3 рази. Така зміна параметрів сигналів АЕ обумовлена тим, що модель сигналу АЕ, формованого при механічному руйнуванні КМ, має деяке обмеження, а саме всі елементи КМ мають однакові фізико-механічні характеристики. Тому при зміні параметра, що характеризує дисперсність властивостей КМ, необхідно враховувати швидкість зміни процесу руйнування. Це необхідно врахувати при проведенні подальших досліджень.

Список літературних джерел

1. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems /R. Shcherbakov // A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university).-2002.-209 P.
2. Turcotte D.L. Micro and macroscopic models of rock fracture/ D.L. Turcotte, W.I. Newman, R. Shcherbakov // Geophes. J. Intern.-2003.-v.152.-№ 3.-P.718-728.
3. Філоненко С.Ф. Модель формування сигналу акустической емиссии при разрушении композиционного материала /С.Ф. Філоненко, В.М. Калита, Т.В. Німченко // Технологические системы-2009-№ 2(46).-С.17-25
4. Філоненко С.Ф. Закономерности изменения акустической емиссии при разрушении хрупких композиционных материалов /С.Ф. Філоненко, В.М. Калита, Т.В. Німченко // Технологические системы-2009-№ 3(47).-С.27-33.
5. Філоненко С.Ф. Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів/ С.Ф. Філоненко, В.М. Калита, О.П. Космач // Вісник НАУ. – 2010. – № 1.–С.133–141.
6. Філоненко С.Ф. Модель сигнала акустической емиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы/ С.Ф. Філоненко, В.М. Калита, А.П. Космач, Т.Н. Косицкая // Технологические системы.-2010.-№ 2.-С.23-32.
7. Філоненко С.Ф. Моделювання сигналів акустической емісії при руйнуванні композиційних матеріалів під дією поперечної сили // С.Ф. Філоненко, О.П. Космач, Т.М. Косицька // Вісник НАУ. – 2010. – № 2.– С.85 – 93.
8. Moreno Y. Fracture and second-order phase transition/ Y. Moreno, J.B. Gomez, A.F. Pacheco// Phys. Rev. Lett.-2000.-No 85.-P.2865-2668.
9. Raisel F. Fibre model for shear failure and plasticity /F. Raisel //Zur erlangung der würde eines doktors der naturwissenschaften genehmigte abhandlung. Institut für computerphysik der universität Stuttgart, 2007.-122 p.
10. Філоненко С.Ф. Информативность параметров сигналов акустической емиссии при разрушении композиционных материалов /С.Ф. Філоненко, Т.В. Німченко, Т.Н. Косицкая// Технологические системы.- 2009.-№ 4(48).-С.22-28
11. Косицька Т.М. Моделювання сигналів акустической емісії при механічному руйнуванні композиційного матеріалу/ Т.М. Косицька// Вісник Чернігівського Державного технологічного університету. Серія Технічні науки.-№45, 2010.-С.214-220.
12. ASTM E 1316-94.Standart difinitions of terms relating to acoustic emissions.