

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ВОЛОКОН НА АКУСТИЧНУ ЕМІСІЮ ПРИ РУЙНУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Філоненко С.Ф., Космач О.П.

Національний авіаційний університет

fls01@mail.ru

*Проведено моделювання процесу руйнування композиційного матеріалу і сигналів акустичної емісії, що формуються залежно від геометричних розмірів волокон. Показано основні закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії.*

*The modeling of composite material fracture and formed of acoustic emission signal is conducted depending on the geometrical size of fibers. Basic conformities to the law of change acoustic emission signal parameters are showed.*

### Постановка проблеми

Створення нових видів техніки потребує розробки та використання високоміцних і легких матеріалів. Одним із класів таких матеріалів є композиційні матеріали. У процесі дослідження процесів руйнування таких матеріалів використовуються різноманітні методи, одним з яких є метод акустичної емісії (АЕ). Аналіз і обробка отриманих результатів з АЕ направлені на розробку методів діагностики стану матеріалів та прогнозування їх ресурсу. В дослідженнях з використанням АЕ суттєву увагу приділяють теоретичним розробкам, зокрема опису формованих сигналів АЕ та закономірностей акустичного випромінювання. Складність подібних досліджень обумовлена не тільки існуванням різноманітних концепцій руйнування матеріалів, але й необхідністю врахування специфіки структурного їх стану. Такі дослідження представляють суттєвий інтерес та є основою у встановленні взаємозв'язку АЕ з процесами руйнування композиційних матеріалів, з врахуванням впливу різноманітних факторів.

### Аналіз досліджень та публікацій

Однією з концепцій дослідження процесів руйнування композиційних матеріалів є концепція FBM (*fiber bundle model*) [1—5]. Згідно концепції руйнування композиційного матеріалу розглядається як послідовне руйнування волокон в пучку з перерозподілом напружень на не зруйновані волокна, що залишилися. FBM концепція використовується при аналізі процесів руйнування композиційних матеріалів для різних видів навантаження. Такі дослідження, в умовах прикладення поперечної сили, були розглянуті в роботах [6; 7]. При цьому отримані основні співвідношення зміни напружень і деформацій на волокнах композиційного матеріалу при їх руйнуванні у випадку незалежного рівномірного розподілу порогових значень деформацій розтягу

та згинання. На основі отриманих результатів у праці [8] розроблено моделі сигналів АЕ, які формуються в процесі руйнування волокон (елементів) композиційного матеріалу під дією поперечної сили. Моделі, як відмічено в [8], є найпростішими. Однак вони показали, що метод АЕ може бути успішно використаний для фіксації критичного напруження, коли починається руйнування волокон композиційного матеріалу.

Підходи, які використовувалися в [8] були застосовані при розробці моделі сигналів АЕ, розглянуто в працях [9; 10]. При побудові моделі враховано закономірності зміни еквівалентного осьового напруження при протіканні процесу руйнування волокон композиційного матеріалу у випадку рівномірного розподілу щільності ймовірності її елементів за міцністю в визначених межах, а також закономірності кінетики процесу руйнування. В результаті проведених досліджень отримано аналітичні залежності, які дозволяють описати кількість незруйнованих елементів у часі і формованого сигналу АЕ в такому вигляді:

$$-v_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t})-\alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt, \quad (1)$$

$$N(t) = N_0 e,$$

$$U(t) = U_0 v_0 [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t})-\alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] \times$$

$$\times e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t})-\alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} \times$$

$$\times -v_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t})-\alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt \times e$$

де  $N_0$  — вихідна (початкова) кількість елементів;  $v_0, r$  — константи, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу;  $\alpha$  — швидкість деформування (навантаження) матеріалу;  $t, t_0$  — поточний час та час початку руйнування елементів відповідно;  $g$  — коефіцієнт, який за-

лежить від геометричних розмірів елементів;  $U_0 = N_0 \beta \delta_s$  — максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні зразка композиційного матеріалу (всіх його елементів);  $\beta$  — коефіцієнт пропорційності;  $\delta_s$  — параметр, який є характеристикою форми імпульсу збурення при руйнуванні одиничного елемента.

Згідно (1) та (2) у працях [9; 10] визначено основні закономірності зміни кількості не зруйнованих волокон і сигналів АЕ залежно від швидкості навантаження композиційного матеріалу  $\alpha$ . При цьому показано, що зі збільшенням  $\alpha$  відбувається зменшення часу початку руйнування композиційного матеріалу, зростання амплітуди і зменшення тривалості формованих сигналів АЕ. У вирази (1) та (2) входить параметр  $g$ , який є характеристикою геометричних розмірів елементів композиційного матеріалу і являє собою відношення площі перерізу елемента та його довжини. Безумовно, зміна геометричних розмірів елементів буде впливати як на закономірності процесу руйнування елементів, так і на закономірності зміни параметрів формованих сигналів АЕ.

### Формулювання мети статті

Мета роботи — проведено моделювання сигналів АЕ, формованих у процесі руйнування композиційного матеріалу при зміні геометричних розмірів волокон; показано, що зі збільшенням площі перерізу елементів за сталої довжини або зменшенні довжини за сталої площі перерізу змінюється нахил залежності еквівалентного напруження від часу, що відповідає зменшенню швидкості деформування. Показано, що така зміна еквівалентних напружень призводить до зменшення амплітуди, збільшення тривалості переднього фронту та тривалості формованих сигналів АЕ.

### Моделювання сигналів акустичної емісії

Під час побудови моделей (1) та (2), які описують відповідно, процес руйнування елементів композиційного матеріалу в умовах дії поперечної сили та формованого сигналу АЕ у випадку рівномірного розподілу щільності ймовірності елементів за міцністю, врахована залежність зміни еквівалентних напружень [7], яка описується виразом:

$$\sigma(t) = \alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t}). \quad (3)$$

Вираз (3), отримано за умови, що модуль пружності матеріалу  $E$  дорівнює одиниці, тобто  $E = 1$ .

Результати моделювання зміни напружень на волокнах в часі згідно (3), показано на рис. 1 у відносних одиницях.

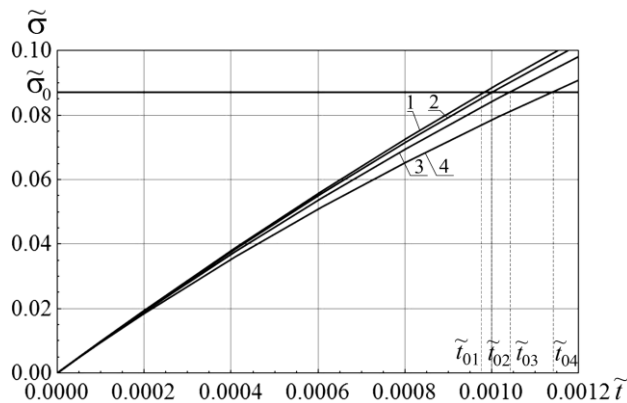


Рис. 1. Залежності зміни напружень у відносних одиницях в часі при деформуванні композиційного матеріалу під дією поперечної сили.

Значення параметра  $g$ : 1 —  $g=0,05$ ; 2 —  $g=0,1$ ; 3 —  $g=0,2$ ; 4 —  $g=0,4$ ;  $\alpha = 100$ . Напруження початку руйнування  $\tilde{\sigma}_0=0,08715395$ .

Час початку руйнування:  $\tilde{t}_{01}=0,000981805$ ;  $\tilde{t}_{02}=0,001$ ;  $\tilde{t}_{03}=0,00103972$ ;  $\tilde{t}_{04}=0,00113657$

При моделюванні було прийнято, що зразок композиційного матеріалу, який складається з  $N_0$  елементів, деформується поперечною силою з постійною швидкістю, тобто  $\varepsilon = \alpha t$ . При цьому  $\alpha$  прийнято таким, що дорівнює  $\alpha = 100$ . Значення параметра  $g$  змінюється в діапазоні величин від 0,05 до 0,4.

Зростання  $g$  означає, що змінюється розмір елементів композиційного матеріалу. При цьому або зростає площа перерізу елемента за сталої його довжини, або зменшується довжина за сталої площі перерізу.

З отриманих результатів (рис. 1) випливає, що при збільшенні параметра  $g$  збільшується нелінійність зміни напруження на елементах композиційного матеріалу в часі, тобто супроводжується зменшенням швидкості зміни напружень. Проведемо чисельне моделювання закономірностей зміни кількості не зруйнованих елементів і сигналів АЕ, згідно (1) та (2), для різних значень  $g$  за сталої швидкості навантаження композиційного матеріалу.

Величини параметрів  $r$  та  $\nu_0$  прийемо таким же, як і в праці [4]:  $r=10000$ ;  $\nu_0=1000000$ . При моделюванні значення  $g$ , як і на рис. 1, будемо змінювати від 0,05 до 0,4. Значення швидкості навантаження прийемо таким, що дорівнює  $\alpha = 100$ .

Результати моделювання  $\tilde{N}(t) = N(t)/N_0$  та  $\tilde{U}(t) = U(t)/U_0$ , представлених у відносних одиницях, показано на рис. 2.

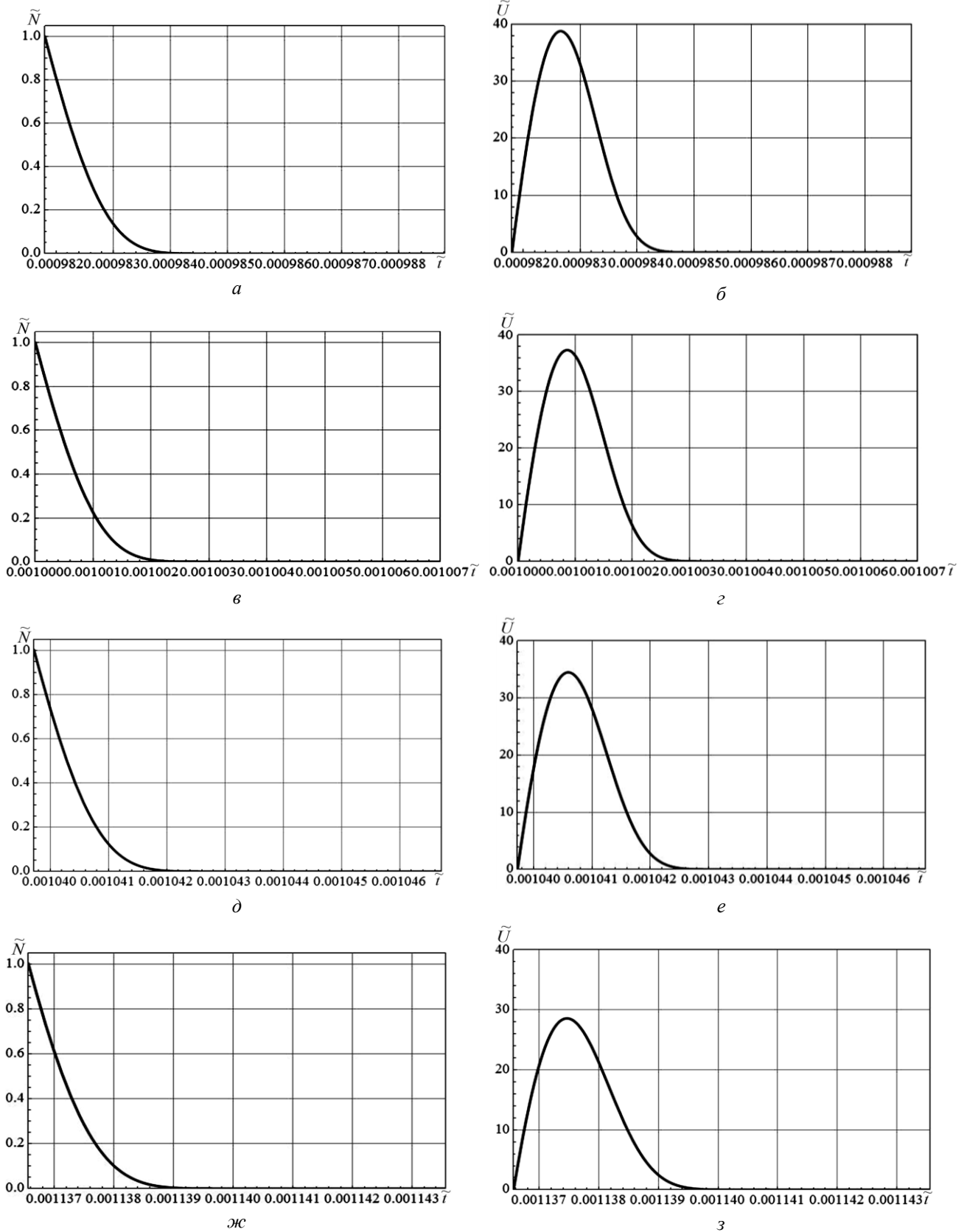


Рис. 2. Залежності зміни кількості не зруйнованих елементів (*a, в, д, ж*), згідно (1), і сигналів АЕ (*б, г, е, ж*), згідно (2), у відносних одиницях при руйнуванні композиційного матеріалу в часі під дією поперечної сили.

Значення  $g$  : *a, б* —  $g=0,05$ ; *в, г* —  $g=0,1$ ; *д, е* —  $g=0,2$ ; *ж, з* —  $g=0,4$ .  $v_0=1000000$ ,  $r=10000$ ,  $\alpha=100$ .

$\tilde{\sigma}_0=0,08715395$ . Час початку руйнування: *a, б* —  $\tilde{t}_{01}=0,000981805$ ; *в, г* —  $\tilde{t}_{02}=0,001$ ;

*д, е* —  $\tilde{t}_{03}=0,00103972$ ; *ж, з* —  $\tilde{t}_{04}=0,00113657$

При моделюванні всі параметри, які входять у вирази (1) та (2), приведено до безрозмірних величин. Час нормований на час введення навантаження. Граничне напруження руйнування у відносних одиницях, прийнято таким, що дорівнює  $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395$ . З врахуванням  $\tilde{\sigma}_0$ , час початку руйнування елементів композиційного матеріалу для заданих значень  $g$ , згідно рис. 2, дорівнюватиме:  $g = 0,05 - \tilde{t}_{01} = 0,000981805$ ; для  $g = 0,1 - \tilde{t}_{02} = 0,001$ ;  $g = 0,2 - \tilde{t}_{03} = 0,00103972$ ;  $g = 0,4 - \tilde{t}_{04} = 0,00113657$ .

З рис. 2, а, в, д, ж видно, що зі зростанням параметра  $g$  відбувається зменшення крутизни падіння кривих не зруйнованих елементів, а також зростання часу протікання процесу руйнування. При цьому відношення часу протікання процесу руйнування по відношенню до часу введення навантаження (часу початку руйнування) для всіх досліджуваних значень  $g$  складає величину порядку  $\sim 10^{-3}$ .

Такі зміни характеру протікання процесу руйнування мають приводити до зменшення амплітуди та збільшення часових параметрів формованого сигналу АЕ. Це спостерігається в результатах моделювання сигналів АЕ (рис. 2, б, г, е, з).

Обробка отриманих даних показує, що при значенні  $g = 0,05$  максимальна амплітуда сигналу АЕ становить  $\tilde{U}_{\max} = 38,759$ . Збільшення  $g$  у 2 рази, тобто з 0,05 до 0,1 приводить до зменшення амплітуди  $\tilde{U}_{\max}$  у 1,037 рази. При збільшенні  $g$  у 4 рази  $\tilde{U}_{\max}$  зменшується в 1,12 рази, а при збільшенні  $g$  у 8 разів амплітуда сигналу АЕ зменшується в 1,356 рази.

Як було відмічено вище, зростання  $g$  призводить до зміни тривалості  $\tilde{\tau}_0$  переднього фронту та тривалості  $\tilde{\tau}$  сигналу АЕ. Так при  $g = 0,05$  тривалість переднього фронту сигналів АЕ дорівнює  $\tilde{\tau}_0 = 8,547 \cdot 10^{-7}$ . Збільшення  $g$  у 2 рази призводить до збільшення  $\tilde{\tau}_0$  у 1,006 рази. При збільшенні  $g$  у 4 рази  $\tilde{\tau}_0$  збільшується в 1,016 рази, а при збільшенні  $g$  у 8 разів тривалість переднього фронту збільшується в 1,046 рази (рис. 2, б, г, е, з). Згідно [10] для тривалості  $\tilde{\tau}$  сигналу АЕ можна записати вираз у вигляді

$$\tilde{\tau} = m\tilde{\tau}_0,$$

де  $m$  — ціле число порядку декількох одиниць.

Величину  $m$ , як і в [10], визначимо з умови відношення амплітуд  $\tilde{U}(\tilde{t} = \tilde{\tau}) \ll \tilde{U}_{\max}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_0)$ . Для цього проведемо оцінки значень  $m$ , відповідно до результатів проведеного моделювання

(рис. 2, б, г, е, з). Так, при  $g = 0,05$  для  $m = 2$  відношення амплітуд складає 0,01017, а для  $m = 2,2$  це відношення вже дорівнює 0,00316. При  $g = 0,1$  для  $m = 3$  відношення амплітуд складає 0,01207, а для  $m = 3,2$  це відношення вже дорівнює 0,00397. При  $g = 0,2$  для  $m = 3$  відношення амплітуд складає 0,01754, а для  $m = 3,5$  це відношення вже дорівнює 0,00107.

При  $g = 0,4$  для  $m = 3$  відношення амплітуд складає 0,03377, а для  $m = 3,5$  це відношення вже дорівнює 0,00373. Якщо обмежитися третім знаком після коми у відношеннях амплітуд, то при збільшенні  $g$  у 2 рази  $\tilde{\tau}$  збільшується в 1,02 рази, при збільшенні  $g$  у 4 рази  $\tilde{\tau}$  збільшується в 1,059 рази, а при збільшенні  $g$  у 8 разів  $\tilde{\tau}$  збільшується в 1,159 рази.

Подібні закономірності отримано як при зменшенні, так і збільшенні швидкості навантаження композиційного матеріалу. Однак при зменшенні швидкості навантаження спостерігається збільшення чисельних відношень параметрів сигналів АЕ.

З отриманих результатів випливає, що вплив зростання параметра  $g$  на залежності зміни кількості не зруйнованих елементів і параметри сигналів АЕ, згідно [10], аналогічно впливу зменшенню швидкості навантаження композиційного матеріалу.

## Висновки

Отримані результати показали, що зменшення розмірів елементів композиційного матеріалу, коли його переріз і довжина співпадають за порядком величин, призводять до зменшення швидкості зміни еквівалентного напруження на елементах при навантаженні матеріалу поперечною лінійно зростаючою силою. Такий характер зміни еквівалентних напружень, як показали результати моделювання, призводить до зменшення крутизни падіння кривих не зруйнованих елементів у часі і збільшенню тривалості протікання процесу руйнування. Безумовно, що зменшення швидкості зміни еквівалентного напруження має призводити до зростання тривалості і зменшення амплітуди сигналів АЕ. Такі зміни параметрів сигналів АЕ підтверджуються результатами проведеного моделювання.

У той же час, представляє інтерес використання розробленої моделі руйнування композиційного матеріалу для опису механізмів зношування поверхонь тертя, коли ділянками взаємодії виступають нерівності поверхонь матеріалів, які перебувають у контактній взаємодії, тобто ділянки, які змінюють свій розмір у процесі тертя.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Kun F.* Damage in fiber bundle models / F. Kun, S. Zapperi, H. J. Herrmann // *Eur. Phys. J. B.* — 2000. — Vol. 17. — № 2. — P. 269—279.
2. *Moreno Y.* Self-organized criticality in a fibre bundle-type model / Y. Moreno, J. B. Gomez, A. F. Pacheco // *Physics A.* — 1999. — Vol. 274. — P. 400—409.
3. *Kun F.* Damage development under gradual loading of composites/ F. Kun, H. J. Herrmann // *Journal of Materials Science.* — 2000. — Vol. 35. — № 18. — P. 4685—4693.
4. *Nechad H.* Creep ruptures in heterogeneous materials/ H. Nechad, A. Helmstetter, R. E. Guerjouma, D. Sornette // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — V. 94. — № 4. — P. 4.
5. *Hemmer P. C.* The Distribution of Simultaneous Fiber Failures in Fiber Bundles/ P. C. Hemmer, A. Hansen // *J. Appl. Mech.* — 1992. — Vol. 59. — № 4. — P. 909—914.
6. *Raischel F.* Simple beam model for the shear failure of interfaces / F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann // *Phys. Rev. E.* — 2005. — Vol. 72. — № 4. — P. 11.
7. *Raischel F.* Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder/ F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann // *Phys. Rev. E.* — 2006.— Vol. 74(2). — № 3. — P. 4.
8. *Філоненко С.Ф.* Акустична емісія при навантаженні композиційних матеріалів/ С. Ф. Філоненко, В. М. Каліта, О. П. Космач // *Вісник НАУ.* — 2010. — № 1. — С. 133—141.
9. *Філоненко С.Ф.* Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы/ С. Ф. Філоненко, В. М. Каліта, А. П. Космач, Т. Н. Косицкая // *Технологические системы.* — 2010. — № 2. — С. 23—32.
10. *Філоненко С.Ф.* Моделювання сигналів акустичної 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.