

**СУЧАСНІ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 620.179:534.6

**С.Ф. Філоненко**<sup>1</sup>  
**О.П. Космач**<sup>2</sup>  
**Т.М. Косицька**<sup>3</sup>**ЗАКОНОМІРНОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У РАЗІ ЗРОСТАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПАРУ ТЕРТЯ З КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ**Національний авіаційний університет  
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680  
E-mails: <sup>1</sup>films01@mail.ru; <sup>2</sup>alexkos86@gmail.com; <sup>3</sup>balishap@gmail.com

*Подано результати моделювання акустичного випромінювання зі зростанням осьового навантаження на пару тертя з композиційного матеріалу. Показано, що збільшення осьового навантаження приводить до зростання амплітудних та енергетичних параметрів результуючих сигналів акустичної емісії. Визначено залежності процентного приросту амплітудних та енергетичних параметрів результуючих сигналів акустичної емісії. Описано, що зі збільшенням осьового навантаження на пару тертя підвищення середнього рівня амплітуди випереджає зростання його стандартного відхилення та дисперсії. Розглянуто найбільш чутливі параметри до зростання осьового навантаження на пару тертя – дисперсія середнього рівня енергії результуючих сигналів акустичної емісії.*

**Ключові слова:** акустична емісія; амплітуда; енергія; закономірність; композиційний матеріал; навантаження; параметр; приріст; рівень; сигнал; тертя.

**Постановка проблеми**

Питанням використання композиційних матеріалів (КМ) у вузлах тертя приділяється велика увага в науковій літературі.

Проведені дослідження спрямовані як на оптимізацію вибору контактуючих КМ, так і на оптимізацію режимів роботи вузлів тертя. Отримані результати показують, що використання КМ сприяє підвищенню трибологічних характеристик фрикційного контакту та продовження термінів експлуатації вузлів тертя.

Водночас існує проблема контролю та діагностики стану вузлів тертя з КМ, що зумовлено специфікою будови та руйнування КМ.

Використання традиційних методів (визначення моменту тертя, сили тертя, коефіцієнта тертя та ін.) дозволяє фіксувати розвиток макропроцесів руйнування в поверхневих шарах матеріалів вузла тертя. Фактично це означає, що фіксується прискорений перехід зі стадії нормального до стадії катастрофічного зношування, коли відбувається повна втрата працездатності вузла тертя. З цієї точки зору найбільший інтерес становить фіксація процесів, що розвиваються в зоні фрикційного контакту, які є початковими етапами зародження катастрофічного руйнування поверхневих шарів КМ.

В останні десятиліття при дослідженні процесів тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту з традиційних матеріалів (з кристалічною структурою) та КМ використовується метод акустичної емісії (АЕ).

Реєстровані сигнали АЕ є відображенням процесів, що розвиваються на субмікро-, мікро- і макрорівнях. Послідовний розвиток цих процесів призводить до видозміни акустичного випромінювання та його параметрів, що може використовуватися під час розроблення методів контролю та діагностики стану вузлів тертя, включаючи і вузли тертя з КМ. Однак низька інерційність і висока чутливість методу АЕ потребують визначення взаємозв'язків параметрів реєстрованого акустичного випромінювання з параметрами процесів, що розвиваються, тобто зумовлює проблему визначення впливу параметрів процесів, що розвиваються, на параметри АЕ. Вирішення цієї проблеми повинно ґрунтуватися на теоретичних дослідженнях.

Подібні дослідження з моделюванням акустичного випромінювання дозволяють визначати закономірності його випромінювання за дії різних факторів – фізико-механічних характеристик КМ, дисперсності їх властивостей, швидкості обертання пари тертя та ін. Подібні закономірності повинні бути основою методів контролю та діагностики вузлів тертя із КМ.

Одним з факторів, що впливають на процеси зношування і, отже, на АЕ, є осьове навантаження, прикладене до пари тертя.

Дослідження закономірностей акустичного випромінювання у разі зміни осьового навантаження безумовно становить науковий та практичний інтерес.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Акустична емісія широко використовується під час дослідження процесів тертя та зношування поверхонь, виготовлених з матеріалів з кристалічною структурою та КМ [2; 10–14].

Результати досліджень показують складний характер зміни реєстрованих сигналів АЕ на всіх стадіях розвитку процесу тертя та зношування.

Порівняння характеру кривих зміни стандартних параметрів, використовуваних під час дослідження процесів тертя (криві зміни коефіцієнта тертя, сили тертя, моменту тертя), і середньоквадратичного рівня амплітуд акустичного випромінювання в часі показує значну їх розбіжність.

Для стандартних параметрів отримані залежності мають плавний характер їх зміни. Різка зміна на залежностях спостерігається у разі переходу зі стадії нормального до стадії катастрофічного зношування поверхонь. Для середньоквадратичного рівня амплітуд реєстрованих сигналів АЕ отримані залежності мають значну динаміку їх зміни в часі.

Зростання та падіння середньоквадратичного рівня амплітуд сигналів АЕ спостерігається безперервно на всіх стадіях процесу тертя:

- на стадії нормального зношування;
- на стадії, що передують стадії катастрофічного зношування;
- при переході зі стадії нормального до стадії катастрофічного зношування.

Така видозміна акустичного випромінювання свідчить про малу інерційність методу і реакції методу на мікропроцеси, що розвиваються в поверхневих шарах матеріалів. Однак інтерпретація цих процесів значно ускладнюється через складності теоретичних досліджень. Ця проблема, безумовно, обмежує використання методу АЕ для контролю та діагностики вузлів тертя і процесів, що розвиваються в поверхневих шарах матеріалів.

Теоретичні дослідження акустичного випромінювання в умовах тертя поверхонь матеріалів з традиційною структурою розглянуто в працях [3; 16].

Для аналізу акустичного випромінювання, яке формується в процесі тертя, використано моделі сигналів АЕ при руйнуванні вторинних структур I і II типів, а результуючий сигнал має вигляд

$$U'(t) = U_T(t) + U_d(t); \quad (1)$$

$$U_d(t) = U_{0d} \varepsilon_{0d} e^{rt} e^{-B \varepsilon_{0d} e^{rt}};$$

$$U_T(t) = U_0'' \delta_i \sigma_{0e}^3 e^{4zt} e^{-b \sigma_{0e} e^{zt}};$$

$$U_{0d} = a_0 M \frac{v_d}{\ell_0} \delta_d;$$

$$U_0'' = k N_0 c z;$$

$$z = \frac{E}{\xi};$$

$\varepsilon_{0d}$  – початкова відносна деформація;

$r, B$  – коефіцієнти, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу;

$t$  – час;

$\delta_i$  – середня тривалість одиночного імпульсу збурення у разі крихкого руйнування елементарного об'єму матеріалу;

$\sigma_{0e}$  – початкове еквівалентне напруження;

$U_{0d}$  – амплітуда зсуву, яка залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу;

$a_0$  – амплітуда одиночного імпульсу збурення під час руху одиночної дислокації;

$M$  – коефіцієнт, який залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу;

$v_d$  – середня швидкість руху дислокацій;

$\ell_0$  – відстань між двома актами випромінювання одиночної дислокації;

$\delta_d$  – середня тривалість одиночного імпульсу збурення під час руху дислокації;

$U_0''$  – максимально можливе зміщення у разі крихкого руйнування бездисперсного за міцністю поверхневого шару матеріалу;

$k$  – коефіцієнт пропорційності;

$N_0$  – вихідна кількість елементів КМ;

$c$  – коефіцієнт, який залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу;

$z$  – коефіцієнт, який характеризує в'язкопружні властивості матеріалу;

$E$  – модуль пружності матеріалу;

$\xi$  – коефіцієнт в'язкості.

На основі розроблених моделей у працях [3; 7; 16] проведено моделювання сигналів АЕ за

дії різних факторів. Показано, що результуючі сигнали АЕ є неперервними сигналами із сильно порізаною формою. Результати проведених досліджень дозволили також визначити основні закономірності зміни параметрів сигналів АЕ у разі зміни впливу факторів. Отримані результати моделювання узгоджуються з результатами експериментальних досліджень.

У працях [4–6; 15] були розглянуті результати моделювання сигналів АЕ у разі руйнування КМ поперечної сили. За таких умов навантаження з урахуванням правила «OR» (елементи КМ руйнуються унаслідок згину або розтягу, коли еквівалентна деформація досягає деякого порогового рівня) і незалежних рівномірних розподілів порогових рівнів з межами [0, 1], а також кінетики розвитку процесу руйнування елементів КМ формований сигнал АЕ набуває вигляду

$$U(t) = U_0 v_0 [\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g \sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0})] \times e^{r[\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g \sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0})]} \times e^{-v_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g \sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0})]} \quad (2)$$

де  $U_0$  – максимально можливе зміщення у разі миттєвого руйнування всіх елементів:

$$U_0 = N_0 \beta \delta_S;$$

$\beta$  – коефіцієнт пропорційності;

$\delta_S$  – параметр, числове значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення у разі руйнування одного елемента (має розмірність часу);

$\alpha$  – швидкість навантажування елементів;

$t, t_0$  – відповідно поточний час та час початку руйнування елементів;

$g$  – коефіцієнт, що залежить від геометричних розмірів елементів;

$r, v_0$  – константи, які залежать від їх фізико-механічних характеристик;

Моделювання сигналів АЕ згідно з рівнянням (2) дозволило визначити основні закономірності зміни їх параметрів (амплітудно-енергетичних та часових) за дії різних факторів – швидкості навантаження КМ, фізико-механічних характеристик (крихкості і дисперсності властивостей за міцністю) елементів КМ, а також їх розмірів.

Розроблена модель сигналу АЕ (2), як і у випадку матеріалів з традиційною структурою, може бути використана для опису результуючого

сигналу АЕ, який формується в умовах тертя поверхонь із КМ. При цьому вираз для результуючого сигналу АЕ можна записати у вигляді

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t - t_j), \quad (3)$$

де  $j$  – порядковий номер  $j$ -ї зруйнованої площадки контактної взаємодії ( $j = 1, 2, 3, \dots, m$ );

$m$  – кількість імпульсних сигналів АЕ на довжині реалізації (часу роботи вузла тертя);

$U_j(t_j)$  –  $j$ -й імпульсний сигнал АЕ, формований на  $j$ -й площадці контактної взаємодії згідно з виразом (1);

$t_j$  – момент часу появи  $j$ -го сигналу АЕ.

Початковими умовами в моделі (3) такі. Для вузла тертя у вигляді кілець або роликів площадки контактної взаємодії являє собою деяку малу та змінну в часі площадку  $S_T$  у площі  $S$  перекриття поверхонь із КМ.

При обертанні вузла тертя в межах площадки  $S_T$  відбувається руйнування заданої кількості елементів  $N_0$ , які мають певні фізико-механічні характеристики та розміри – параметри  $v_0, r$  і  $g$ , які входять у вираз (2).

Зміна положення площадки контактної взаємодії в часі забезпечується швидкістю обертання вузла тертя  $\alpha$ .

Задана швидкість обертання та осьове навантаження на вузол тертя з урахуванням розмірів елементів визначають закономірність зміни еквівалентних напружень та порогового напруження  $\sigma_0$  початку руйнування елементів КМ

$$\sigma_0 = \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0}). \quad (4)$$

Згідно з рівнянням (3) та з урахуванням виразу (2) можна провести моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються в умовах тертя поверхонь із КМ залежно від впливових факторів. Одним із таких факторів є осьове навантаження, яке прикладене до вузла тертя із КМ.

**Метою роботи є:**

– моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються в умовах тертя поверхонь із КМ, зі зростанням осьового навантаження на пару тертя;

– дослідження середнього рівня амплітуди результуючих сигналів АЕ, яке збільшується зі зростанням осьового навантаження на пару тертя, величин його стандартного відхилення і дисперсії, підвищення середнього рівня амплітуди,

яке випереджає зростання його стандартного відхилення та дисперсії;

– аналіз енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ;

– дослідження зростання середнього рівня енергії результуючих сигналів АЕ, яке відбувається зі зростанням осьового навантаження на пару тертя, величин її стандартного відхилення і дисперсії, зростання дисперсії середнього рівня енергії, яке випереджає зростання середнього рівня енергії та його стандартного відхилення.

### Результати досліджень

Вплив осьового навантаження на вузол тертя призводить до зміни умов його роботи і впливає на розвиток процесу тертя і зношування [1]. Це передусім стосується зміни еквівалентних напружень, а також взаємозв'язаних параметрів – моменту обертання, моменту тертя, сили тертя та ін. Безумовно, що осьове навантаження впливає і на кінетику розвитку процесу тертя (кінетику процесу руйнування поверхневих шарів фрикційного контакту).

У працях [8; 9] під час розгляду кінетичних процесів тертя з використанням «моделі землетрусів» (earthquakes model, або EQ модель) показано, що зі збільшенням осьового навантаження зростають порогова та кінетична сили тертя, які необхідні для перебігу процесу тертя. Таке зростання сил тертя, у свою чергу, призводить до збільшення швидкості (локальної швидкості) переміщення фрикційного контакту та зменшення часу на руйнування фрикційних зв'язків (збільшення кількості фрикційних зв'язків, що руйнуються за одиницю часу). Інакше кажучи, за безперервного розвитку процесу тертя на макrorівні руйнування площадок контактної взаємодії відбувається зі змінною швидкістю, яка зростає зі збільшенням порогової та кінетичної сил тертя.

Для поверхні фрикційного контакту з КМ це означає, що зі збільшенням порогової та кінетичної сил унаслідок зростання осьового навантаження та наближення до моменту часу початку руйнування елементів КМ, швидкість зміни еквівалентних напружень збільшується. Таке зростання швидкості забезпечується за рахунок нагромадження зовнішньої енергії, що витрачається. При цьому з досягненням порогового рівня напружень руйнування елементів КМ відбувається з більш високою швидкістю, починаючи з початкового моменту часу руйнування, або з

додатковим зростанням швидкості порівняно з попереднім рівнем осьового навантаження.

З урахуванням цих умов проведемо моделювання результуючих сигналів АЕ згідно з виразом (3) та врахуванням зміни осьового навантаження на пару тертя із КМ. Під час моделювання будемо вважати, що у вузлі тертя у вигляді кілець або роликів площадка контактної взаємодії являє собою деяку малу і змінну в часі площадку  $S_T$  площі  $S$  перекриття поверхонь з КМ.

Зміна положення площадки контактної взаємодії  $S_T$  у часі забезпечується швидкістю обертання вузла тертя.

При обертанні вузла тертя в межах цієї площадки відбувається руйнування елементів  $N_0$ , які мають задані фізико-механічні характеристики та розміри, обумовлені параметрами,  $r$  і  $g$ . Будемо вважати, що за заданої початкової швидкості  $\alpha$  величина осьового навантаження дорівнює одиниці ( $P=1$ ), а також, що зі зростанням осьового навантаження  $P$  збільшуватиметься швидкість руйнування елементів КМ відносно початкової швидкості  $\alpha$ , тобто швидкість руйнування стає такою:

$$\alpha_i = \alpha + \Delta\alpha_i,$$

де  $i$  – номер приросту осьового навантаження.

Моделювання будемо виконувати у відносних одиницях.

Початкове значення  $\tilde{\alpha}=200$ , а значення осьового навантаження  $\tilde{P}=1$ .

За даних умов час початку руйнування  $\tilde{t}_0$  першої площадки контактної взаємодії у відносних одиницях становить  $\tilde{t}_0=0,0006$ .

Для заданих значень  $\tilde{\alpha}$  і  $\tilde{t}_0$  з розрахунку залежності зміни еквівалентних напружень  $\tilde{\sigma}$  визначимо граничне напруження руйнування  $\tilde{\sigma}_0$  згідно з виразом (4), тоді

$$\tilde{\sigma}_0 = 0,1528445825.$$

Значення параметрів  $v_0$ ,  $g$  і  $r$ , що входять у вираз (2), беремо такими:

$$\tilde{v}_0 = 1\ 000\ 000;$$

$$\tilde{g} = 0,1;$$

$$\tilde{r} = 10\ 000.$$

Осьове навантаження  $P$  на пару тертя із КМ не входить в явному вигляді у вираз (2). Його вплив визначатимемо через зміну граничного

напруження, яке розраховуватимемо у вигляді еквівалентного напруження з урахуванням взаємозв'язку дотичного та нормального напружень згідно з працею [2].

Для виконання розрахунків покладемо, що коефіцієнт тертя  $f=1$ , а осьове навантаження зростає від 1 до 1,6 з кроком 0,15.

Час  $\tilde{t}_0$  початку руйнування елементів КМ зі зростанням  $\tilde{P}$  залишається незмінним.

За отриманими значеннями порогового напруження визначимо значення  $\alpha_i$ , виходячи з рівняння (4), або  $\Delta\alpha_i$  приріст становить до  $\tilde{\alpha} = 200$ .

Результати виконаних розрахунків для проведення моделювання результуючих сигналів АЕ наведено в таблиці.

Результати розрахунків  $\tilde{\sigma}_0$  та  $\tilde{\alpha}$

$\tilde{P}$	$\tilde{t}_0$	$\tilde{\sigma}_0$	$\tilde{\alpha}$
1	0,0006	0,10194190869441454	200
1,15	0,0006	0,11041324719634700	220
1,3	0,0006	0,11858646007796404	240
1,45	0,0006	0,12646368867491953	260
1,6	0,0006	0,1340468883894890	280

Відповідно до моделі результуючого сигналу АЕ (3) руйнування площадок контактної взаємодії відбувається послідовним чином.

За таких умов момент часу появи імпульсних сигналів АЕ  $U_j(t_j)$  при руйнуванні кожної наступної площадки контактної взаємодії запишемо у вигляді

$$t_j = j\Delta t_j \pm \delta,$$

де  $j$  – номер імпульсного сигналу АЕ ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ );

$\Delta t_j$  – інтервал часу між початком появи наступного і попереднього імпульсних сигналів АЕ;

$\delta$  – випадкова складова моменту часу появи кожного наступного сигналу АЕ.

Значення інтервалу часу для  $\tilde{\alpha}=200$  і  $\tilde{P}=1$  становить

$$\Delta\tilde{t}_j=1,1 \cdot 10^{-6},$$

який вибрано з урахуванням тривалості сигналу АЕ, сформованого при  $\tilde{\alpha}=200$ , який визначено під час розрахунку зміни амплітуди імпульсного сигналу в часі згідно з рівнянням (2).

При цьому величину будемо змінювати в діапазоні значень від  $\tilde{\delta} = 0$  до  $\tilde{\delta} = 5,0 \cdot 10^{-7}$  випадковим чином.

Зі зростанням  $\tilde{P}$  відбувається зростання  $\tilde{\alpha}$ , що, в свою чергу, призводить до зменшення тривалості імпульсного сигналу АЕ згідно з виразом (2). Величини  $\Delta\tilde{t}_j$  і  $\tilde{\delta}$  зі зростанням  $\tilde{P}$  ( $\tilde{\alpha}$ ) будемо задавати пропорційно зміні тривалості імпульсних сигналів АЕ.

Моделювання результуючих сигналів АЕ у вигляді графіків зміни їх амплітуди в часі у відносних одиницях, якщо  $\tilde{P} = 1$  і  $\tilde{P}=1,6$ , згідно з рівнянням (3) показано на рис. 1.

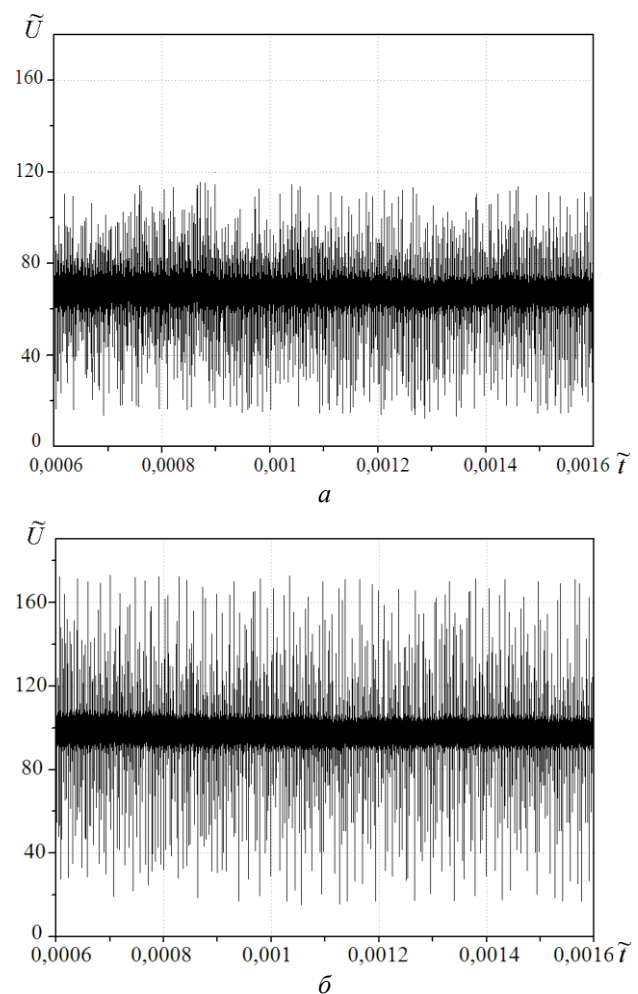


Рис. 1. Зміна амплітуди результуючих сигналів акустичної емісії в часі  $\tilde{P}$ :  
а –  $\tilde{P} = 1$ ;  
б –  $\tilde{P} = 1,6$

Під час моделювання результуючих сигналів АЕ згідно з виразом (3) для кожного значення  $\tilde{P}$  виконувався розрахунок та оброблення 5000 імпульсних сигналів.

Початкове значення  $\tilde{\alpha}$  дорівнює  $\tilde{\alpha}=200$ . Час початку руйнування елементів композиційного матеріалу  $\tilde{t}_0=0,0006$ . Параметри моделювання згідно з рівнянням (2):

$$\tilde{v}_0 = 1\,000\,000;$$

$$\tilde{g} = 0,1.$$

Результати проведеного моделювання показують, що зростання осьового навантаження, яке впливає на зміну напруженого стану пари тертя, приводить до зростання середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$  результуючих сигналів АЕ та величини її розкиду. Як показує статистичний аналіз отриманих даних, якщо  $\tilde{P}=1$ , середній рівень амплітуди результуючого сигналу АЕ становить  $\tilde{U} = 67,1$ , а стандартне відхилення  $s_{\tilde{U}}$  і дисперсія середнього рівня амплітуди  $s_{\tilde{U}}^2$  відповідно становлять:

$$s_{\tilde{U}} = 20,92;$$

$$s_{\tilde{U}}^2 = 437,65.$$

Зі зростанням  $\tilde{P}$  в 1,15 разу значення  $\tilde{U}$  і  $s_{\tilde{U}}$ ,  $s_{\tilde{U}}^2$  відповідно збільшуються в 1,1 разу, 1,02 разу і 1,04 разу.

Якщо збільшується  $\tilde{P}$  в 1,3 разу,  $\tilde{U}$  і  $s_{\tilde{U}}$ ,  $s_{\tilde{U}}^2$  відповідно зростають в 1,21 разу, 1,05 разу і 1,1 разу.

Зі збільшенням  $\tilde{P}$  в 1,45 разу значення  $\tilde{U}$  і  $s_{\tilde{U}}$ ,  $s_{\tilde{U}}^2$  відповідно збільшуються в 1,32 разу, 1,07 разу і 1,15 разу.

Якщо збільшується  $\tilde{P}$  в 1,6 разу, то значення  $\tilde{U}$  і  $s_{\tilde{U}}$ ,  $s_{\tilde{U}}^2$  відповідно зростають в 1,43 разу, 1,1 разу і 1,2 разу.

Графіки відсоткового приросту  $\Delta\tilde{Z}_{AE}$  середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$  результуючих сигналів АЕ, а також відсоткового приросту величин його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  та дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$  відносно їх значень, якщо  $\tilde{P}=1$ , показано на рис. 2.

Отримані дані (рис. 2) показують, що відсотковий приріст середнього рівня амплітуд результуючих сигналів АЕ, його стандартного відхилення і дисперсії зі зростанням  $\tilde{P}$  відбувається за лінійним законом.

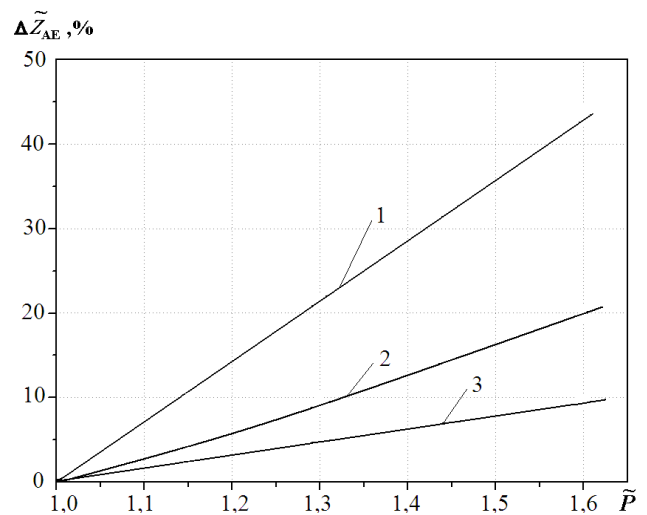


Рис. 2. Зміна відсоткового приросту середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$  (1), його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  (3) і дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$  (2)

Аналіз отриманих залежностей (рис. 2) з проведеним їх апроксимації показав, що вони добре описуються виразом вигляду

$$\Delta\tilde{Z}_{AE} = A + B\tilde{P}, \quad (5)$$

де  $\Delta\tilde{Z}_{AE}$  – відсотковий приріст середнього рівня амплітуди результуючих сигналів АЕ, його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  і дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$ ;

$A, B$  – коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Для залежностей зміни середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$  результуючих сигналів АЕ, а також відсоткового приросту величин його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  та дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$  коефіцієнти апроксимуючого виразу (5) дорівнюють:

– для відсоткового приросту середнього рівня амплітуди

$$A = -73,42; \quad B = 72,86;$$

– для відсоткового приросту стандартного відхилення середнього рівня амплітуди

$$A = -15,98; \quad B = 15,84;$$

– для відсоткового приросту дисперсії середнього рівня амплітуди

$$A = -33,54; \quad B = 33,13.$$

Коефіцієнти кореляції для відсоткового приросту середнього рівня амплітуди  $\tilde{U}$  результуючих сигналів АЕ, його стандартного відхилення  $s_{\tilde{U}}$  і дисперсії  $s_{\tilde{U}}^2$  відповідно становлять:

$$R = 0,9996; \quad R = 0,9995; \quad R = 0,9991.$$

Результати проведеного моделювання показують, що зростання осьового навантаження на пару тертя з КМ впливає на амплітудні параметри результуючих сигналів АЕ. Відбувається збільшення середнього рівня амплітуди результуючих сигналів АЕ, його стандартного відхилення і дисперсії. Однак найбільший вплив осьового навантаження спостерігається для середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ (рис. 2).

Аналогічні дослідження були проведені при обробленні енергії результуючих сигналів АЕ зі зростанням  $\tilde{P}$ .

Результати досліджень показали, що, як і для амплітуд результуючих сигналів АЕ, зростання осьового навантаження на пару тертя зумовлює підвищення середнього рівня їх енергії  $\tilde{E}$ , його стандартного відхилення  $s_{\tilde{E}}$  і дисперсії  $s_{\tilde{E}}^2$ .

Оброблення енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ у вигляді залежностей зміни відсоткового приросту середнього рівня енергії, його стандартного відхилення і дисперсії зі зростанням осьового навантаження  $\tilde{P}$  відносно початкових їх значень при  $\tilde{P}=1$  показано на рис. 3.

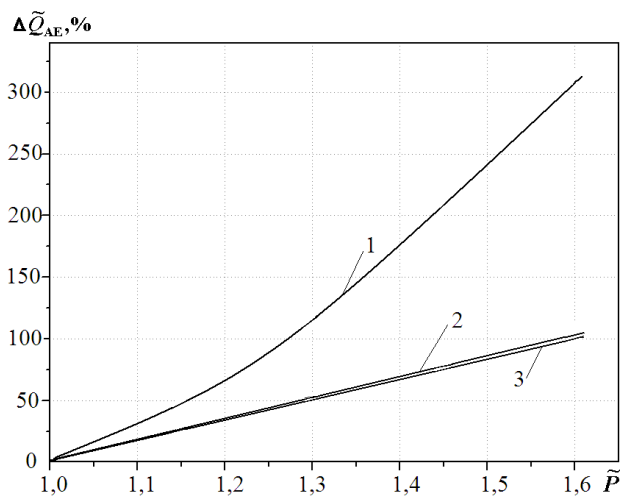


Рис. 3. Зміна відсоткового приросту середнього рівня енергії  $\tilde{E}$  (3), його стандартного відхилення  $s_{\tilde{E}}$  (2) і дисперсії  $s_{\tilde{E}}^2$  (1)

Аналіз отриманих результатів показав, що відсотковий приріст середнього рівня енергії і його стандартного відхилення, як і у випадку амплітудних параметрів результуючих сигналів АЕ, зі зростанням  $\tilde{P}$  відбувається лінійним чином.

Зростання відсоткового приросту середнього рівня енергії і його стандартного відхилення добре описуються виразом вигляду

$$\Delta \tilde{Q}_{AE} = C + D\tilde{P}, \quad (6)$$

де  $C, D$  – коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Коефіцієнти апроксимуючого виразу (6) для аналізованих залежностей дорівнюють:

– для відсоткового приросту середнього рівня енергії

$$C = -127,23; \quad D = 164,44;$$

– для відсоткового приросту стандартного відхилення середнього рівня енергії

$$C = -175,79; \quad D = 172,68.$$

При цьому коефіцієнти кореляції для відсоткового приросту середнього рівня енергії  $\tilde{E}$  і його стандартного відхилення  $s_{\tilde{E}}$  відповідно становлять:

$$R = 0,99665; \quad R = 0,99802.$$

Залежність зміни відсоткового приросту дисперсії  $s_{\tilde{E}}^2$  середнього рівня енергії результуючих сигналів АЕ зі зростанням  $\tilde{P}$  має нелінійний характер.

Апроксимація залежності зміни відсоткового приросту  $s_{\tilde{E}}^2$  зі зростанням  $\tilde{P}$  показує, що вона добре описується виразом

$$\Delta \tilde{Q}_{AE} = a + b\tilde{P} + c\tilde{P}^2, \quad (7)$$

де  $\Delta \tilde{Q}_{AE}$  – відсотковий приріст дисперсії середнього рівня енергії;

$a, b, c$  – коефіцієнти апроксимуючого виразу.

Коефіцієнти апроксимуючого виразу (7) для аналізованої залежності становлять:

$$a = 215,4;$$

$$b = -677,8;$$

$$c = 461,5.$$

Коефіцієнт кореляції для відсоткового приросту дисперсії середнього рівня енергії результуючих сигналів АЕ

$$R = 0,99974.$$

Результати проведених досліджень показують, що закономірності зміни енергетичних параметрів результуючих сигналів АЕ зі зростанням осьового навантаження стають подібними до закономірностей зміни амплітудних параметрів. Однак існують і відмінності в отриманих закономірностях.

Відсотковий приріст середнього рівня енергії і його стандартного відхилення зі зростанням  $\tilde{P}$  майже однаковий (рис. 3). Цей приріст перевищує відсотковий приріст середнього рівня амплітуди і його стандартного відхилення.

Найбільший приріст спостерігається в дисперсії середнього рівня енергії, який у сім разів перевищує відсотковий приріст середнього рівня амплітуди результуючих сигналів АЕ. Це означає, що в реальному експерименті зі збільшенням осьового навантаження слід очікувати найбільшого зростання середнього рівня амплітуди результуючих сигналів АЕ або дисперсії середнього рівня їх енергії. Однак найбільш чутливим параметром є дисперсія середнього рівня енергії результуючих сигналів АЕ.

### Висновки

Результати моделювання результуючих сигналів АЕ зі збільшенням осьового навантаження на пару тертя із КМ показують, що збільшення осьового навантаження призводить до зростання амплітудних параметрів результуючих сигналів АЕ, таких як середнього рівня амплітуди, його стандартного відхилення і дисперсії. Отримано закономірності зміни амплітудних параметрів формованих сигналів. Визначено, що залежності зміни відсоткового приросту середнього рівня амплітуди, його стандартного відхилення і дисперсії мають однотипний характер та добре описуються лінійними функціями. Зі збільшенням осьового навантаження найбільший відсотковий приріст має середній рівень амплітуди результуючих сигналів АЕ.

Виконано аналіз енергетичних параметрів акустичного випромінювання зі збільшенням осьового навантаження на пару тертя із КМ. Відсотковий приріст середнього рівня енергії і його стандартного відхилення також описуються лінійними функціями. Дисперсія середнього рівня енергії має нелінійний характер зростання і добре описується поліномом другого порядку. Водночас найбільший відсотковий приріст зі збільшенням осьового навантаження на пару тертя спостерігається в дисперсії середнього рівня енергії результуючих сигналів АЕ.

Під час експериментального дослідження зі збільшенням осьового навантаження на пару тертя з КМ найбільшого зростання слід очікувати в середньому рівні амплітуди результуючих сигналів АЕ. Зростання його стандартного відхилення і дисперсії не буде значним. Проте найбільшого зростання слід очікувати в дисперсії середнього рівня енергії сигналів АЕ. Безумовно, інтерес становить експериментальне дослідження сигналів АЕ, а також визначення закономірностей зміни їх параметрів у разі зміни умов навантаження пари тертя із КМ.

### Література

1. *Ибатуллин И.Д.* Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самарский государственный технологический университет, 2008. – 387 с.
2. *Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения* / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, В.Л. Попов // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т.39. – Вып. 4. – С. 79–86.
3. *Моделі сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів пар тертя* / В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Стадниченко, А.П. Стахова // Проблеми тертя та зношування. – 2007. – № 47. – С. 5–18.
4. *Філоненко С.Ф.* Вплив швидкості навантаження на амплітудні та енергетичні параметри сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів поперечною силою / С.Ф. Філоненко, О.П. Космач, Т.М. Косицька // Технологические системы. – 2012. – № 1 (58). – С. 46–51.
5. *Філоненко С.Ф.* Закономірності зміни амплітудно-енергетичних параметрів сигналів акустичної емісії при зміні розмірів елементів композиційного матеріалу / С.Ф. Філоненко, О.П. Космач // Вісник Національного авіаційного університету. – 2012. – № 4. – С. 66–73.
6. *Філоненко С.Ф.* Закономірності зміни часових параметрів сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційного матеріалу / С.Ф. Філоненко, О.П. Космач // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2012. – № 2 (57). – С. 114–122.
7. *Філоненко С.Ф.* Моделирование сигналов акустической эмиссии при изменении объема материала, вступившего в пластическую деформацию / С.Ф. Філоненко, А.П. Стахова, В.Г. Кравченко // Технологические системы. – 2008. – № 1 (41). – С. 22–27.
8. Braun, O.M.; Manini, N.; Tosatti, E. 2008. *Role of lubricant molecular shape in microscopic friction*. Physical review. Vol. 78: 195402-1–195402-10.
9. Braun, O.M.; Tosatti, E. 2011. *Kinetics and dynamics of frictional stick-slip in mesoscopic boundary lubrication*. Philosophical magazine. Vol. 91: 3253–3275.
10. Cao, D. 2010. *Investigation of acoustic emission and surface treatment to improve tool materials and metal forming process*. Dissertation The Degree Doctor of Philosophy in Materials Engineering. University of Dayton (Dayton, Ohio). 116 p.



11. Dobrzanski, L.A.; Pakuła, D.; Krizb, A.; Sokovic, M. 2006. *Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics*. Journal of materials processing technology. Vol. 175: 179–185.

12. Ferrer, C.; Salas, F.; Pascual, M.; Orozco, J. 2010. *Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples*. Tribology International. Vol. 43, N 1: 1–6.

13. Hong, E.; Kaplin, B.; You, T.; Suh, M.; Kim, Y.S.; Choe, H. 2011. *Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles*. Wear. Vol. 270: 591–597.

14. Liao, C.; Suo, S.; Wang, Y.; Huang, W.; Liu, Y. 2012. *Study on stick-slip friction of reciprocating o-ring seals using acoustic emission techniques*. Tribology transactions. Vol. 55, N 1: 43–51.

15. Filonenko, S.; Kalita, V.; Kosmach, A. 2012. *Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation*. Aviation. Vol. 16, N 1: 5–13.

16. Filonenko, S.F.; Stahova, A.P.; Kositskaya, T.N. 2008. *Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction*. Proceedings of the National Aviation University. N 2: 24–28.

## References

1. Ibatullin I.D. 2008. *Kinetics of fatigue failure rate and destruction of surface layers*. Samara, Samara State Technological University press. 387 p. (in Russian).

2. Rubtsov, V.E.; Kolubaev, A.V.; Popov, V.L. 2013. *The use of acoustic emission analysis for the wear in sliding friction*. Letters to ZHTF. Vol. 4: 79–86 (in Russian).

3. Babak, V.P.; Filonenko, S.F.; Stadnychenko, V.M.; Stakhova, A.P. 2007. *Models of acoustic emission signals in the destruction of the surface layers of friction pairs*. Problems of friction and wear. Vol. 47: 5–18 (in Ukrainian).

4. Filonenko, S.F.; Kosmach, O.P.; Kositskaya, T.M. 2012. *Effect of loading rate on the amplitude and energy parameters of acoustic emission signals in the destruction of composite shear force*. Technological systems. N 1 (58): 46–51 (in Ukrainian).

5. Filonenko, S.F.; Kosmach, O.P. 2012. *Laws of change in amplitude and energy parameters of acoustic emission signals at change of dimensions of the composite material*. Proceedings of National Aviation University. N 4: 66–73 (in Ukrainian).

6. Filonenko, S.F.; Kosmach, O.P. 2012. *Laws of change of time signal parameters of acoustic emission at destruction of composite material*. Proceedings of Chernihiv State Technological University. N 2 (57): 114–122 (in Ukrainian).

7. Filonenko, S.F.; Stakhova, A.P.; Kravchenko, V.G. 2008. *Modeling of acoustic emission signals at the amount of material that came in plastic deformation*. Technological systems. 2008. N 1 (41): 22–27 (in Russian).

8. Braun, O.M.; Manini, N.; Tosatti, E. 2008. *Role of lubricant molecular shape in microscopic friction*. Physical review. Vol. 78: 195402-1–195402-10.

9. Braun, O.M.; Tosatti, E. 2011. *Kinetics and dynamics of frictional stick-slip in mesoscopic boundary lubrication*. Philosophical magazine. Vol. 91: 3253–3275.

10. Cao, D. 2010. *Investigation of acoustic emission and surface treatment to improve tool materials and metal forming process*. Dissertation The Degree Doctor of Philosophy in Materials Engineering. University of Dayton (Dayton, Ohio). 116 p.

11. Dobrzanski, L.A.; Pakuła, D.; Krizb, A.; Sokovic, M. 2006. *Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics*. Journal of materials processing technology. Vol. 175: 179–185.

12. Ferrer, C.; Salas, F.; Pascual, M.; Orozco, J. 2010. *Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples*. Tribology International. Vol. 43, N 1: 1–6.

13. Hong, E.; Kaplin, B.; You, T.; Suh, M.; Kim, Y.S.; Choe, H. 2011. *Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles*. Wear. Vol. 270: 591–597.

14. Liao, C.; Suo, S.; Wang, Y.; Huang, W.; Liu, Y. 2012. *Study on stick-slip friction of reciprocating o-ring seals using acoustic emission techniques*. Tribology transactions. Vol. 55, N 1: 43–51.

15. Filonenko, S.; Kalita, V.; Kosmach, A. 2012. *Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation*. Aviation. Vol. 16, N 1: 5–13.

16. Filonenko, S.F.; Stahova, A.P.; Kositskaya, T.N. 2008. *Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction*. Proceedings of the National Aviation University. N 2: 24–28.

**Філоненко Сергій Федорович.** Доктор технічних наук. Професор.

Директор Інституту інформаційно-діагностичних систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Київський політехнічний інститут, Київ, Україна (1977).

Напрямок наукової діяльності: діагностика технологічних процесів та об'єктів, автоматизовані діагностичні системи.

Кількість публікацій: 215, 34 патенти.

E-mail: fils01@mail.ru

**Космач Олександр Павлович.** Молодший науковий співробітник.

Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Чернігівський державний технологічний університет, Чернігів, Україна (2008).

Напрямок наукової діяльності: діагностика технологічних процесів та об'єктів, автоматизовані діагностичні системи.

Кількість публікацій: 30, 4 патенти.

E-mail: alexkos86@gmail.com

**Косицька Тетяна Миколаївна.** Кандидат хімічних наук. Старший науковий співробітник.

Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Київський політехнічний інститут, Київ, Україна (1981).

Напрямок наукової діяльності: фізико-хімічні процеси в матеріалах та їх діагностика.

Кількість публікацій: 30, 5 патентів.

E-mail: balishap@gmail.com

**S. Filonenko<sup>1</sup>, O. Kosmach<sup>2</sup>, T. Kositskaya<sup>3</sup>. Regularity of acoustic radiation at ascending load on a pair of friction from a composite material**

National Aviation University, Kosmonavta Komarova avenue, 1, Kyiv, Ukraine, 03680

E-mail: <sup>1</sup>fils01@mail.ru; <sup>2</sup>alexkos86@gmail.com; <sup>3</sup>balishap@gmail.com

In this article the simulation the results of acoustic emission signals formed by friction surfaces with composite materials at load increasing were showed. The results showed that at increase of axial load increases the amplitude of the resulting parameters of acoustic emission signals, such as the average amplitude, its standard deviation and variance. Thus were obtained the basic changes of amplitude parameters generated signals. Was determined that the variation of the percentage increase in the average amplitude, its standard deviation and variance were the same type of character, with well approximate by linear functions. The results showed that with growing of axial load the percent increase in average amplitude of the resulting acoustic emission signals. Also, an analysis of the energy parameters of acoustic emission with increasing axial load on the friction pair with composite materials was conducted. The simulation results showed that the percentage increase in the average level of energy and its standard deviation are approximate by linear functions. At the same time the greatest percentage increase with increasing axial load on the friction pair is observed in the dispersion of the average energy of the resulting acoustic emission signals. The results showed that at experimental study of the acoustic emission signals with increasing axial load on the friction pair with composite materials greatest growth is expected in the average amplitude of the resulting AE signals. The growth of its standard deviation and variance will be not significant. At the same time, the greatest growth is expected in the dispersion of the average energy of acoustic emission signals.

**Keywords:** acoustic emission; amplitude; composite material; energy; friction; increment; law; level; load; parameter; signal; variation.

**Filonenko Sergiy.** Doctor of Engineering. Professor.

Director of the Institute of Information-Diagnostic Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (1977).

Research area: diagnostics of technological processes and objects, automatic diagnostic systems.

Publications: 215, 34 patents.

E-mail: fils01@mail.ru

**Kosmach Oleksandr.** Junior Researcher.

National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine (2008).

Research area: diagnostics of technological processes and objects, automatic diagnostic systems.

Publications: 30, 4 patents.

E-mail: alexkos86@gmail.com

**Kositskaya Tetyana.** Candidate of Chemical Sciences. Senior Researcher.

National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (1981).

Research area: physical-chemical processes in the materials and their diagnostic.

Publications: 30, 5 patents.

E-mail: balishap@gmail.com

**С.Ф. Філоненко<sup>1</sup>, А.П. Космач<sup>2</sup>, Т.Н. Косицкая<sup>3</sup>. Закономірности акустического излучения при возрастании нагрузки на пару трения из композиционного материала**

Национальный авиационный университет, проспект Космонавта Комарова 1, Киев, Украина, 03680

E-mails: <sup>1</sup>filso1@mail.ru; <sup>2</sup>alexkos86@gmail.com; <sup>3</sup>balishap@gmail.com

Проведено моделювання результуючих сигналів акустическої емісії, що виникають при трінні поверхностей із композиційних матеріалів, а також при зростанні навантаження, яку сприймає досліджуєма пара тріння. Показано, що зростання осєвої навантаження призводить до зростання амплітудних параметрів результуючих сигналів акустическої емісії, таких, як середній рівень амплітуди, його стандартне відхилення і дисперсії. Отримані основні закономірности змінення амплітудних параметрів формувємих сигналів. Встановлено, що закономірности змінення процентного прироста середнього рівня амплітуди, його стандартного відхилення і дисперсії мають однотипний характер, добре описуються лінейними функціями і при зростанні осєвої навантаження найбільший процентний прирост значєний має середній рівень амплітуди результуючих сигналів акустическої емісії. Виконан аналіз енергетических параметрів акустического випромінювання при зростанні осєвої навантаження на пару тріння із композиційних матеріалів. Визначено, що процентний прирост середнього рівня енергії і її стандартного відхилення описуються лінейними функціями, найбільший процентний прирост з зростанні осєвої навантаження на пару тріння спостєрюється в дисперсії середнього рівня енергії результуючих сигналів акустическої емісії. Описано, що при експериментальному дослідженні сигналів акустическої емісії з зростанні осєвої навантаження на пару тріння з композиційних матеріалів найбільшого зростання слід очікувати в середньому рівні амплітуди результуючих сигналів акустическої емісії, при цьому зростання його стандартного відхилення і дисперсії буде незначительним. Відзначено, що найбільшого зростання слід очікувати і в дисперсії середнього рівня енергії сигналів акустическої емісії.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия; амплитуда; закономерность; композиционный материал; нагрузка; параметр; прирост; сигнал; трение; уровень; энергия.

**Філоненко Сергєй Федорович.** Доктор техніеских наук. Професор.

Директор Інститута інформаційно-діагностических систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Образование: Київський політехніеский інститут, Київ, Україна (1977).

Направленіє научної діяльності: діагностика технологіеских процесів і об'єктів, автоматизованіє діагностическіє системи.

Кількість публікацій: 215, 34 патента.

E-mail: filso1@mail.ru

**Космач Александр Павлович.** Молодший научний співробітник.

Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Образование: Черніговський державний технологіеский університет, Чернігов, Україна (2008).

Направленіє научної діяльності: діагностика технологіеских процесів і об'єктів, автоматизованіє діагностическіє системи.

Кількість публікацій: 30, 4 патента.

E-mail: alexkos86@gmail.com

**Косицкая Татьяна Николаевна.** Кандидат хіміеских наук. Старший научний співробітник.

Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Образование: Київський політехніеский інститут, Київ, Україна (1981).

Направленіє научної діяльності: фізико-хіміескіє процеси в матеріалах і їх діагностика.

Кількість публікацій: 30, 5 патентів.

E-mail: balishap@gmail.com