

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

УДК 351.814.12

¹Дуленко Дмитро Іванович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-3900-1612>

¹Мильников Геннадій Васильович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-5245-2955>

¹Косков Юрій Максимович

<https://orcid.org/0000-00034707-9898>

²Голик Максим Віталійович

¹Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

²Військова частина А 1356, Миргород, Україна

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ ЖОРСТКИХ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ

Відомо, що аеродроми Повітряних Сил Збройних Сил України (ПС ЗС України) експлуатуються понад встановлені нормативними документами терміни. Зміни експлуатаційного стану жорстких покриттів аеродромів (ЖПА) є дуже гострою проблемою. Встановлено, що в результаті експлуатації аеродромів ПС ЗС України понад встановлених строків їх жорсткі покриття досягли граничних експлуатаційних станів та мають пошкодження, які впливають на безпеку польотів авіації. Основним фактором, який сприяє виникненню пошкоджень ЖПА вважається інтенсивний вплив літаків на покриття в результаті багатоциклічних динамічних навантажень.

В статті розкрито підхід щодо математичного моделювання зміни експлуатаційного стану жорстких аеродромних покриттів на основі кінцево-елементного аналізу.

Ключові слова: аеродроми, жорсткі покриття аеродромів, напружено-деформований стан, кінцево-елементний аналіз.

Вступ

Одним із пріоритетних напрямків розвитку авіації Повітряних Сил Збройних Сил України (ПС ЗС України) є забезпечення безпеки експлуатації бойової авіаційної системи.

Бойову авіаційну систему (БАС), яка є об'єктом теорії безпеки польотів, складає сукупність структурно та функціонально зв'язаних елементів в інтересах вирішення бойових завдань авіацією ПС ЗС України шляхом виконання польотів без авіаційних подій. Всі ці елементи об'єднуються в рамках польотного завдання в три підсистеми - "людина", "бойова авіаційна техніка" та "зовнішнє середовище", які тісно взаємодіють між собою.

Аналіз вказує, що кількість інцидентів з бойовою авіаційною технікою (БАТ) ПС ЗС України значно зросла та у відсотковому відношенні за підсистемами БАС складає: "людина" - 12% від усіх інцидентів; "бойова авіаційна техніка" - 65% від усіх інцидентів; "зовнішнє середовище" - 23% від усіх інцидентів [1].

Встановлено, що кількість інцидентів з БАТ за підсистемами БАС "людина" та "бойова авіаційна техніка" зменшується. Це пов'язано із збільшенням

кількості годин нальоту льотного складу, модернізацією БАТ та підвищенням рівня професійної підготовки особового складу, який приймає участь у комплексі завдань щодо забезпечення польотів.

В той же час інциденти за підсистемою "зовнішнє середовище" мають негативну тенденцію щодо постійного зростання. Тобто збільшується кількість інцидентів з причини впливу факторів зовнішнього середовища. Особливо це стосується факторів зовнішнього середовища штучного походження, зокрема, стану аеродромної мережі ПС ЗС України.

Встановлено, що однією з найважливіших проблем є попадання у двигуни БАТ елементів конструкцій жорстких аеродромних покриттів (ЖАП) з аеродромів військового призначення. При зіткненні таких предметів із лопатками компресорів авіаційних двигунів утворюються забоїни, які погіршують їх тактико-технічні характеристики, а також характеристики міцності елементів конструкцій. Це призводить до виходу двигуна з ладу, подальшого його ремонту, або дострокового зняття з експлуатації та у цілому знижує безпеку експлуатації бойової авіаційної

техніки і взагалі бойової авіаційної системи. Тільки в період 2019...2022 років з причин попадання в авіаційні двигуни БАТ елементів ЖАП аеродромів військового призначення достроково знято 70 двигунів, вартість ремонту яких склала 289 млн грн.

Зараз аеродромна мережа ПС ЗС України налічує 26 аеродромів військового призначення, 21 з них з жорстким покриттям. При цьому 90% аеродромів з жорстким покриттям були побудовані більше 60 років тому та експлуатуються понад граничні терміни експлуатації без проведення капітальних ремонтів.

Брак фінансування призвів до того, що ремонт елементів аеродромів військового призначення, в тому числі і ЖАП штучних злітно-посадкових смуг (ШЗПС) зводиться тільки до проведення поточних ремонтів. Разом з тим в теперішніх умовах це єдина можливість, яка дозволяє підтримувати ЖАП аеродромів військового призначення в експлуатаційному стані та забезпечувати безпеку експлуатації БАС.

Відомі у практиці методики забезпечення безпеки експлуатації БАС, які базуються на основі оцінки експлуатаційного стану ЖАП, дають можливість провести оцінку стану покриття тільки в момент моніторингу та не дозволяють спрогнозувати зміну його експлуатаційного стану в часі. При цьому не враховується напружено-деформований стан ЖАП при впливі експлуатаційних навантажень та умов зовнішнього середовища, в якому воно експлуатується.

Таким чином актуальність полягає в необхідності розробки методики, яка дозволить спрогнозувати зміну експлуатаційного стану ЖАП в процесі його експлуатації, надасть можливість передбачати момент його руйнування та ризик виникнення інцидентів з БАТ в залежності від експлуатаційного стану ЖАП та в цілому забезпечити безпеку експлуатації БАС.

Матеріали та методи

Для прогнозування зміни експлуатаційного стану ЖАП в процесі його експлуатації проведено математичне моделювання – обґрунтовано процес формування моделі ЖАП, отримання інформації про процес, який протікає в об'єкті, та отримання інформації, яку можна використовувати для дослідження об'єкту, що моделюється [2, 3]. Використано методику математичного моделювання прогнозування експлуатаційного стану ЖАП, яка базується на багатофакторному плануванні експериментальних досліджень і математичній обробці статистичних даних.

Удосконалено методики оцінки властивостей ЖАП за міцністю та тріщиностійкістю, які характеризуються напруженням σ_{pt} (МПа) та шириною розкриття тріщини a_{arc} (мм), що виникають в покритті в результаті спільного впливу на покриття експлуатаційних параметрів БАТ та умов зовнішнього середовища.

Аналіз експлуатації БАТ показує, що при здійсненні багатоциклових посадкових операцій, в момент дотику пневматика ЖАП перевантаження

літака n_p сягає від 1,1 до 2,5 g. Це сприяє зміні в покритті аеродрому напружень σ_{pt} (МПа), які різко збільшуються та зменшуються, що веде до розвитку тріщин в покритті a_{arc} (мм) та його подальшого руйнування. Тому удосконалені методики визначення напруження в ЖАП σ_{pt} (МПа) та ширини розкриття тріщини a_{arc} (мм), на відміну від існуючих, додатково враховують: багатоцикловий динамічний вплив БАТ з урахуванням її перевантаження при посадці, зміну температури зовнішнього середовища. Таким чином, удосконалені методики визначення напруження в ЖАП σ_{pt} (МПа) та ширини розкриття тріщини a_{arc} (мм) представлені формулами (1, 2):

$$\sigma_{pt} = \frac{Q_p k_u k_d k_f \gamma_f 60 k_{умв} k_{умт} (0,0592 - 0,09284 \cdot \ln(\frac{R}{l_{np}}))}{h^2 k_t} \quad (1)$$

де Q_p – розрахункове навантаження від літака (Н) з урахуванням перевантаження бойової авіаційної техніки при посадці n_p ; k_u – коефіцієнт, що враховує число прикладених навантажень (кількість посадок); k – перехідний коефіцієнт від згинального моменту при центральному навантаженні до моменту при крайовому навантаженні; k_d – коефіцієнт динамічності; γ_f – коефіцієнт розвантаження; $k_{умв}$ – коефіцієнт, що враховує умови роботи; $k_{умт}$ – коефіцієнт, що враховує вплив штирових з'єднань на умови контакту плит з основою; R – радіус кола рівновеликого площі відбитка колеса (м); l_{np} – пружна характеристика плити (м); h – товщина плити (м); k_t – коефіцієнт, що враховує вплив температурної деформації аеродромних плит.

$$a_{arc} = 1000 \frac{m_d}{E_s} \frac{A_s (h_0 \frac{x}{3})}{E_s} \cdot k_c \frac{d E_s}{4 E_b} \eta_1, \quad (2)$$

де m_d – розрахункове значення згинального моменту на одиницю перерізу жорсткого покриття; A_s – площа перерізу розтягнутої арматури на одиницю ширини перерізу плити;

h_0 – робоча висота перерізу (відстань від стиснутої грані перерізу до центру тяжіння розтягнутої арматури);

x – висота стиснутої зони бетону в перерізі;

E_s – модуль пружності арматури;

E_b – модуль пружності бетону;

η_1 – коефіцієнт для стержневої арматури.

Для оцінки напружено-деформованого стану ЖАП використовувався метод кінцево-елементного аналізу, який є потужним чисельним методом вирішення різноманітних інженерних задач та має вирішальне місце в прогнозуванні експлуатаційного стану покриття при дії експлуатаційних факторів та факторів зовнішнього середовища [4-9]. Для розрахунку

використовувався програмний продукт MSC VISUAL NASTRAN for WINDOWS 2003, який має спільну розрахункову базу на основі методу

кінцевих елементів і є однією з програм кінцево-елементного аналізу.

При оцінці ризику виникнення інциденту з БАТ в залежності від експлуатаційного стану жорсткого аеродромного покриття, крім терміну експлуатації ЖАП t (кількість років експлуатації ЖАП), важливим є число впливів експлуатаційних навантажень $n_{\text{бам}}$ (кількість посадкових операцій БАТ), що в майбутньому викликають руйнування ЖАП за даний період часу.

При інтенсивній експлуатації ЖАП може настати такий момент, при якому експлуатаційний стан ЖАП P_e досягає значення, яке менше мінімально допустимого значення P_e^{min} ($P_e < P_e^{\text{min}}$), тобто є дефектні ділянки покриття, що мають пошкодження із значеннями, які неприпустимі з умов забезпечення безпеки експлуатації БАТ. Експлуатаційний стан визначає інтервал часу роботи ЖАП $t_{\text{експл}}$ при наявності окремих пошкоджень допустимого ризику, сумарна кількість яких може бути на покритті з умов забезпечення безпеки експлуатації БАТ, та встановлюється допустимим рівнем P_e^{min} :

$$t_{\text{експл}} = \frac{n_{\text{бам}}^{\text{дон}} P_e^{\text{min}}}{g}, \quad (3)$$

де $t_{\text{експл}}$ – термін експлуатаційного стану ЖАП;

$n_{\text{бам}}^{\text{дон}}$ – допустима кількість впливів БАТ при (P_e^{min});

g – інтенсивність впливів БАТ.

Таким чином, якщо відома інтенсивність впливів БАТ g на ЖАП та при визначенні допустимої кількості впливів $n_{\text{бам}}^{\text{дон}}$ за період експлуатації ЖАП, виходячи із заданого рівня (P_e^{min}), можна визначити експлуатаційний стан покриття при відомій величині $r_{\text{дон}}$ та спрогнозувати ризик виникнення інциденту з БАТ в залежності від експлуатаційного стану ЖАП при відомій величині g .

Результати

В якості критеріїв оцінки процесу зміни експлуатаційного стану ЖАП вибрано: міцність ЖАП, що характеризується інтенсивністю зміни напружень $\sigma_{\text{рт}}$ (МПа) та тріщиностійкість, яка характеризується шириною розкриття тріщини $\alpha_{\text{арс}}$ (мм) в ЖАП під впливом багаточислових навантажень БАТ та зміною умов зовнішнього середовища. Встановлено, що серед великої кількості факторів, що впливають на експлуатаційний стан ЖАП, можна виділити: посадкову масу БАТ, перевантаження БАТ при посадці, кількість посадок, температуру зовнішнього середовища, глибину промерзання ґрунту, ширину колії шасі БАТ, посадкову швидкість БАТ, тип ЖАП, довжину та довжину ШЗПС аеродрому. Найбільший вплив на експлуатаційний стан ЖАП здійснюють такі фактори, як: посадкова маса БАТ, перевантаження БАТ при посадці, кількість посадок БАТ, температура зовнішнього середовища (табл. 1).

Таблиця 1

Фактори та рівні їх варіювання

| № з/п | Фактори | Позначення | Рівні варіювання |
|-------|---|------------|------------------|
| 1. | Посадкова маса БАТ (кг) | X_1 | 12900...28000 |
| 2. | Перевантаження БАТ при посадці | X_2 | 1,1...2,2 |
| 3. | Кількість посадок БАТ | X_3 | 432...5184 |
| 4. | Температура зовнішнього середовища (°C) | X_4 | -20...50 |

План експерименту для 16 варіантів дослідження зміни властивостей ЖАП було згенеровано на основі ЛПГ – чисел. Розрахунок значень критеріїв оцінки процесу зміни експлуатаційного стану ЖАП $\sigma_{\text{рт}}$ (МПа) та $\alpha_{\text{арс}}$ (мм) проводився за виразами (1, 2). В результаті проведених досліджень відповідно до плану експерименту отримано значення критеріїв оцінки процесу зміни експлуатаційного стану жорсткого аеродромного покриття, а саме міцності $\sigma_{\text{рт}}$ (Y_1) та тріщиностійкості $\alpha_{\text{арс}}$ (Y_2).

Показано, що у залежності від зміни експлуатаційних параметрів бойової авіаційної техніки та умов зовнішнього середовища значення критеріїв оцінки експлуатаційного стану жорсткого аеродромного покриття змінюються в залежності від впливу комплексу факторів (X_1, X_2, X_3, X_4) за кожним експериментом (табл. 4). Причому, характерною рисою є те, що при збільшенні одного з факторів впливу на експлуатаційний стан ЖАП не обов'язково збільшуються критерії оцінки стану ЖАП $\sigma_{\text{рт}}$ (МПа) або $\alpha_{\text{арс}}$ (мм). Це говорить про те, що тільки комплексний вплив обраних факторів на експлуатаційний стан жорсткого аеродромного покриття призводить до зміни його властивостей. Регресійний аналіз результатів експерименту й розрахунок моделей проводився із використанням ППП "ПРІАМ". За результатами регресійно-статистичного аналізу отримані математичні моделі (4, 5), що описують залежність міцності $\sigma_{\text{рт}}$ (Y_1) та тріщиностійкості $\alpha_{\text{арс}}$ (Y_2) ЖАП від керованих факторів. Проведено аналіз якості отриманих моделей.

$$Y_1 = 3,84 - 1,054x_4^2 - 0,642x_1x_2 - 0,672x_1^2x_3^2, \quad (4)$$

$$Y_2 = 0,452 + 0,07x_2^2x_3^2 + 0,075x_4^2 - 0,054x_1^2 + 0,023x_3 - 0,035x_1^2x_2^2 - 0,047x_3x_4^2 + 0,035x_2x_4. \quad (5)$$

де Y_1 – математична модель для зміни величини напруження $\sigma_{\text{рт}}$ (МПа) в ЖАП в кодованих значеннях;

Y_2 – математична модель для ширини розкриття тріщини $\alpha_{\text{арс}}$ (мм) в ЖАП в кодованих значеннях.

Формули переходу від кодованих значень до натуральних:

$$x_1 = 0,00107117(X_1 - 19941,4);$$

$$x_1^2 = 1,645(X_1^2 - 0,0193286X_1 - 0,372767);$$

$$x_2 = 2,22222(X_2 - 1,65);$$

$$x_2^2 = 1,45292(X_2^2 + 0,0833334X_2 - 0,395062);$$

$$x_3 = 0,000474651(X_3 - 2780,19);$$

$$x_3^2 = 1,57622(X_3^2 - 0,0379294X_3 - 0,35039);$$

$$x_4 = 0,0310078(X_4 - 13,75);$$

$$x_4^2 = 1,73014(X_4^2 - 0,0736548X_4 - 0,348356).$$

де X_1, X_2, X_3, X_4 – керовані фактори.

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерії оцінки, які характеризують міцність та тріщиностійкість ЖАП. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії. Графіки функції відгуку Y_1 та Y_2 , які побудовані на основі частинних рівнянь регресії в ППП “ПРІАМ”, наведено на рисунку 1.

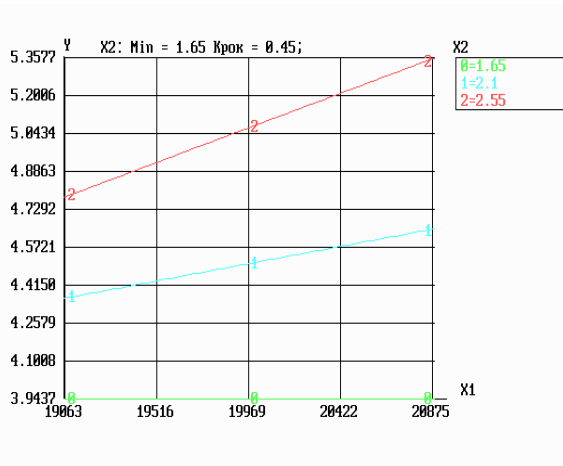


Рисунок 1. Графік частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_2)$.

За допомогою побудови відповідних геометричних поверхонь одержано наочне уявлення про графічний образ функції відгуку (рис. 2). Візуальний аналіз графіків дозволив провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити ті значення факторів, які протягом всього часу впливу мають найбільший ефект.

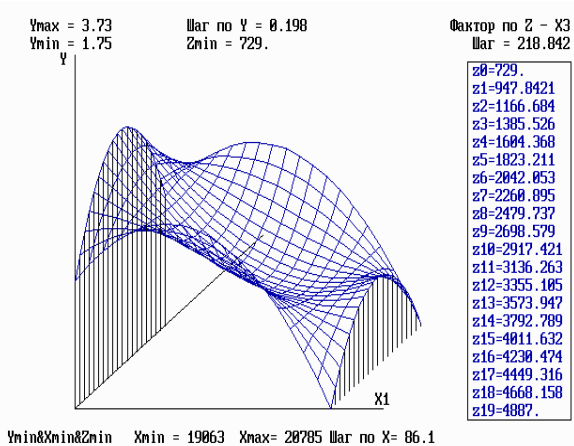


Рисунок 2. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_3)$

Аналіз напружено-деформованого стану (НДС) ЖАП проводився з використанням ліцензійного скінченно-елементного комплексу MSC VISUAL NASTRAN for WINDOWS 2003. Оскільки ЖАП аеродрому працює в важких температурно-силових умовах навантаження, то розглядалися задачі з визначення НДС покриття від дії нерівномірного силового навантаження, а також комбінована задача по визначенню НДС покриття з урахуванням температурної та силової складових навантаження. В якості початкових даних вносилися фізико-механічні властивості жорсткого (залізобетонного) збірного покриття аеродрому з плит типу ПАГ-18. Для розрахунку та аналізу НДС ЖАП з плит типу ПАГ-18 аеродрому військового призначення Краматорськ приймалася максимальна посадкова маса літака Су – 24 М, яка дорівнює 28000 кг (280000 Н).

Аналіз проведених експериментальних досліджень показує, що розбіжність результатів не перевищує 10%. Це дає змогу стверджувати про достовірність проведених розрахунків. Проведені розрахунки дозволяють побудувати графік зміни величини напруження σ_{pt} (МПа) в ЖАП на ділянці точного приземлення літака довжиною 400 м в залежності від розрахункової посадкової маси БАТ (Су – 24 М) в момент дотику шасі літака ШЗПС (рис. 3).



Рисунок 3. Значення напруження у ЖАП в момент дотику Су – 24 М

На рисунку 3 наведено: допустиме напруження σ_{pt} (МПа) в плиті ПАГ - 18, яке складає 0,15 МПа в момент стискання при проектуванні навантаженням 150 кН (ДСТУ Б В.2.6-137:2010); граничне значення величини напруження σ_{pt} (МПа) в плиті у процесі експлуатації ЖАП з ПАГ-18 (ДСТУ Б В.2.6-137:2010); критичне значення величини напруження σ_{pt} (МПа) у ЖАП в момент дотику шасі літака Су – 24 М ШЗПС.

Обговорення

Моделювання посадки літака Су – 24 М з розрахунковою максимальною посадковою масою 28000 кг та максимальним перевантаженням 2,2 g на ділянці точного приземлення літака довжиною 400 м показує, що момент дотику шасі БАТ відбувається на ділянці 170 м. Дотик шасі БАТ викликає напруження в плиті ПАГ-18 ЖАП σ_{pt} , яке

різко зростає від 4,5 до 8 МПа та зменшується під час подальшого пробігу. В процесі експлуатації ЖАП різка зміна напружень σ_{pt} до критичних значень буде створювати передумови до розвитку тріщини в покритті a_{arc} (мм), яка в свою чергу, призведе до руйнування покриття аеродрому (рис. 4).

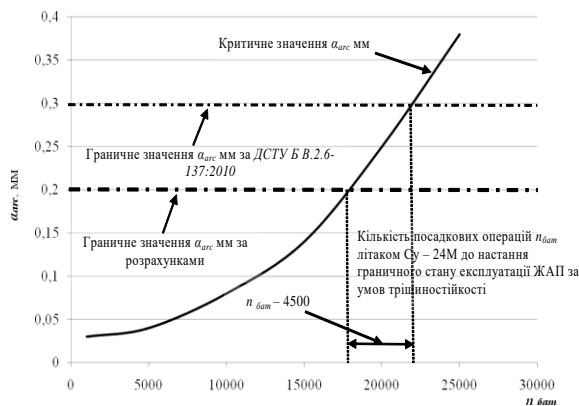


Рисунок 4. Значення ширини розкриття тріщини a_{arc} (мм) в залежності від кількості посадкових операцій Су – 24 М

На рисунку 4 видно, що при інтенсивній експлуатації ЖАП аеродрому м. Краматорськ тільки одним типом БАТ – Су – 24 М, свого граничного експлуатаційного стану покриття досягне за 18000 посадкових операцій, або 4,5 роки експлуатації аеродрому. Ширина розкриття тріщини a_{arc} (мм) складе 0,2. Вже за 4500 посадкових операцій, або ще 1 рік експлуатації ЖАП досягне свого граничного стану, яке буде дорівнювати за умови тріщиноустійкості a_{arc} (мм) 0,3. Загальний термін експлуатації ЖАП за умов тріщиноустійкості складає 10...15 років (ДСТУ Б В.2.6-137:2010). Тобто, ЖАП свого граничного стану за розрахунками досягає за 5...6 років. Подальша експлуатація аеродрому військового призначення з умов забезпечення безпеки експлуатації БАТ неможлива.

Таким чином, саме в цей період необхідно проводити відповідний вид ремонту жорсткого аеродромного покриття.

Висновки

Розроблено методику оцінки напружено-деформованого стану жорстких аеродромних

покриттів на основі кінцево-елементного аналізу, яка на відміну від існуючих, враховує вплив експлуатаційних параметрів бойової авіаційної техніки та умов зовнішнього середовища на експлуатаційний стан покриття. Це дає можливість: визначити час початку руйнування жорсткого аеродромного покриття в процесі інтенсивної експлуатації аеродрому; визначити кількість здійснення посадкових операцій бойової авіаційної техніки до початку руйнування покриття; зменшити ризик виникнення інциденту з бойовою авіаційною технікою на 10%.

Напрямок подальших досліджень може бути розробка системи управління безпекою експлуатації бойової авіаційної системи на основі ризику виникнення інцидентів з бойовою авіаційною технікою.

Список використаних джерел

1. Дуленко Д.І. Аналіз стану безпеки польотів бойової авіаційної техніки повітряних сил збройних сил України / Дуленко Д.І., Мірненко В.І., Гончаренко Є.В. // Збірник наукових праць “Труди університету” – №6(145) – К.: НУОУ, 2017. - С. 171-176. Тасмно. Інв. №. 48028 у НУОУ.
2. Радченко С.Г., Лапач С.Н. Методология создания новой техники и технологий // Технологические системы. – 2003. – №1. – С. 41–44.
3. Ляшенко Б.А., Мирненко В.И., Соловых Е.К., Рутковский А.В., Черновол М.И. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости. // Под ред. В.В. Харченко/ Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 193 с.
4. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 158 с.
5. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Навчальний посібник. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 88 с.
6. Бабак В. П., Щепетов В.В., Мірненко В.І., Недайборщ С. Д. Математичне моделювання формування детонаційних покриттів // Технологические системы. – 2016. – №2(75). – С. 82-88.
7. Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ; Под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. – К.: СП «Текпор», 1993. – С. 24–27.
8. Иванов Г.А., Турбан А.Ф. Статистические методы восстановления истинной зависимости по экспериментальным данным. – К.: Знание, 1986. – 22 с.
9. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 111 с.

MATHEMATICAL SIMULATION OF CHANGES IN THE OPERATIONAL CONDITION OF HARD AIRFIELD SURFACES BASED ON FINITE ELEMENT ANALYSIS

¹**Dmytro Dulenko** (Candidate of Technical Sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0002-3900-1612>

¹**Gennadiy Mylnikov** (Candidate of Technical Sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0001-5245-2955>

¹**Yuriy Koskov**

<https://orcid.org/0000-00034707-9898>

²**Maksym Golyk**

¹*The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine*

²*Military unit A 1356, Myrhorod, Ukraine*

It is known that the airfields of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine (AF of the Armed Forces of Ukraine) are currently being operated beyond the time limits established by regulatory documents. Changes in the operating condition of hard surfaces and airfields (RPA) are a very acute problem. It was established that as a result of the operation of the airfields of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine beyond the periods established by the regulatory documents, their hard surfaces have reached the limit of operational conditions and have damage that affects the safety of aviation flights. The article describes an approach to mathematical modeling of changes in the operational state of rigid airfield coatings based on finite element analysis.

Keywords: *airfields, hard coverings of airfields, stress-strain state, method of finite element analysis.*

References

1. Dulenko D.I. Analysis of the state of flight safety of combat aviation equipment of the air forces of the armed forces of Ukraine / D.I. Dulenko, V.I. Mirnenko, E.V. Honcharenko. // Collection of scientific works "Works of the University" - No. 6(145) - K.: NUOU, 2017. - P. 171-176. Secretly. Inv. No. 48028 in NUOU.
2. Radchenko S.G., Lapach S.N. Methodology of creation of new technology and technologies // Technological systems. – 2003. – No. 1. – pp. 41–44.
3. Lyashenko B.A., Myrnenko V.I., Solovych E.K., Rutkovsky A.V., Chernovol M.I. Optimization of coating application technology according to durability and wear resistance criteria. // Ed. V.V. Kharchenko/ Kyiv: Institute of Strength Problems named after H.S. Pisarenko of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2010. – 193 p.
4. Adler Y.P. Introduction to experiment planning. - M.: Metallurgy, 1969. - 158 p.
5. Radchenko S.G. Mathematical modeling and optimization of technological systems: Study guide. - K.: Polytechnic Polytechnic Institute, 2001. - 88 p.
6. Babak V.P., Shchepetov V.V., Mirnenko V.I., Nedaiborshch S.D. Mathematical modeling of the formation of detonation coatings // Technological systems. – 2016. – No. 2(75). - P. 82-88.
7. Catalogue. Software products of Ukraine. Planning, regression and analysis of the PRIAM / NTU KPI model; Ed. S.N. Lapach, S.G. Radchenko, P.N. Babich - K.: SP "Tekpor", 1993. - P. 24–27.
8. Ivanov G.A., Turban A.F. Statistical methods of restoring the true dependence from experimental data. - K.: Znanie, 1986. - 22 p.
9. Sobol I.M., Statnikov R.B. Selection of optimal parameters in problems with many criteria. - M.: Nauka, 1981. - 111 p.