

УДК 624.131.54:656.7.084:004.942

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.1.6>**Кирилаха Світлана Вікторівна,**

аспірантка кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій
факультету будівництва, архітектури та дизайну,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>
E-mail: lanakirilaha@gmail.com

АНАЛІЗ ДВОШАРОВИХ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто методи розрахунку двошарових жорстких аеродромних покриттів із застосуванням сучасних програмних комплексів, зокрема програмного комплексу «ЛІРА-САПР» і FEAFAA. Виконано порівняння результатів, отриманих за допомогою цих програм, із традиційними розрахунками за чинними нормами. Основну увагу приділено моделюванню взаємодії шарів покриття, зокрема ефекту поперечного обтиснення та впливу пружного прошарку між несучими шарами на їхню поведінку під навантаженнями.

Для моделювання покриттів використовувалися скінченні елементи, що враховують як лінійні, так і нелінійні характеристики матеріалів, а також різні варіанти навантажень (еквівалентне одноколісне навантаження, розподілене навантаження). Розрахунки показали, що врахування ефекту поперечного обтиснення в чисельних моделях покриття дозволяє отримати більш точні результати, зокрема вищий момент у верхньому шарі та зменшення моменту в нижньому шарі через податливість поперечному зсуву.

Порівнянням результатів розрахунку за допомогою програмного комплексу «ЛІРА-САПР» і FEAFAA із традиційними методами виявлено, що розходження не перевищує 1%, що підтверджує високу точність чисельного моделювання та можливість використання цих програм для проектування аеродромних покриттів. У результаті проведених досліджень показано, що чисельні моделі можуть ефективно використовуватися для врахування складних механічних взаємодій, як-от обтиснення, зсув і спільна робота шарів покриття, що забезпечує точніше оцінювання їхньої поведінки під час експлуатації.

Ці результати можуть бути корисними для інженерів і проєктувальників аеродромних покриттів, які працюють із сучасними програмними комплексами, для оптимізації процесу розрахунку та забезпечення надійності аеродромної інфраструктури.

Ключові слова: аеропорт, моделювання, програмні комплекси, ЛІРА-САПР, двошарові жорсткі покриття, жорсткість, властивості, метод скінчених елементів.

Kyrylakha Svitlana. Analysis of two-layered airport pavements using computer simulation methods

Abstract. The paper discusses the methods for calculating two-layer rigid airport pavements using modern software packages, specifically the "LIRA-SAPR" and FEAFAA programs. A comparison of the results obtained using these programs with traditional calculations based on current standards is presented. The focus is on modeling the interaction between pavement layers, particularly the effect of transverse compression and the influence of the elastic layer between the bearing layers on their behavior under loading.

In particular, finite elements were used for modeling the pavements, accounting for both linear and nonlinear material characteristics, as well as different types of loads (equivalent single-wheel load, distributed load). The calculations showed that considering the effect of transverse compression in the numerical models of the pavement allows for more accurate results, specifically a higher moment in the upper layer and a reduction of the moment in the lower layer due to the compliance of the transverse shear in the separating layer.

When comparing the results of calculations using "LIRA-SAPR" and FEAFAA with traditional methods, the difference was found to be less than 1%, which confirms the high accuracy of the numerical modeling and the feasibility of using these programs for airport pavement design. The conducted research demonstrates that numerical models can effectively be used to account for complex mechanical interactions, such as compression, shear, and the cooperative behavior of the pavement layers, providing a more accurate assessment of their performance during operation.

These results can be useful for engineers and designers of airport pavements who work with modern software packages to optimize the calculation process and ensure the reliability of airport infrastructure.

Key words: airport, modeling, software packages, LIRA-SAPR, two-layer rigid pavements, stiffness, properties, finite element method.

Вступ. Розвиток авіаційної техніки потребує висування нових вимог до проєктування та будівництва аеродромів. Це зумовлює потребу в постійному вдосконаленні методів проєктування, будівництва, ремонту, утримання та експлуатації.

12 жовтня 2021 р. Україна приєдналася до Авіаційної стратегії Європейського Союзу, уклала Угоду про Спільний авіаційний простір. Стратегія спрямована на забезпечення надійного сполучення, високих стандартів безпеки. До 2030 р. планується дослідження стану регіональних аеродромів, їх модернізація для сучасних повітряних суден [1].

Двошарове жорстке аеродромне покриття є одним із найефективніших типів конструкцій, які забезпечують високу міцність і довговічність за інтенсивних навантажень з боку авіаційного транспорту. Такий тип покриття активно використовується для злітно-посадкових смуг (далі – ЗПС), руліжних доріжок і перонів аеропортів [2].

Це конструкція покриття, що складається із двох основних шарів:

1. Нижнього шару (базовий):

- виконує функцію розподілу навантажень і передачі їх на основу;
- зазвичай виготовляється з бетону низької міцності або стабілізованого матеріалу.

2. Верхнього шару (робочий):

- приймає безпосереднє навантаження від повітряних суден;
- виконується з високоміцного цементобетону, який має підвищену зносостійкість і тріщиностійкість.

У двошарових покриттях для нижнього шару застосовують бетон низької марки, пескобетон, ґрунтоцемент, шлакобетон або керамзитобетон, що підтверджує наведений опис конструкції.

Переваги двошарового покриття

1. Зменшення витрат на матеріали:

- використання бетону нижчої міцності для нижнього шару дозволяє зменшити витрати.

2. Підвищена довговічність:

- верхній шар забезпечує стійкість до стирання, тріщиноутворення та температурних перепадів.

3. Можливість локального ремонту:

- у разі пошкодження верхнього шару ремонт може бути проведений без заміни нижнього шару.

4. Рівномірний розподіл навантаження:

- нижній шар запобігає надмірному просіданню конструкції, що особливо важливо для аеродромних покриттів.

Основні матеріали

Для верхнього шару: високоміцний цементобетон (міцність класу не менше С35/45). Додатки для підвищення тріщиностійкості (фібра, полімери).

Для нижнього шару: бетон середньої міцності (клас С20/25). Стабілізовані ґрунти або інші доступні матеріали.

Технології влаштування

1. Одночасне укладання обох шарів:

- використовується спеціальна техніка, яка дозволяє влаштовувати обидва шари одночасно;
- це забезпечує міцний зв'язок між шарами.

2. Роздільне укладання:

- кожен шар укладається окремо, а між ними додається спеціальний адгезивний прошарок для міцного зчеплення.

Використання в сучасних аеропортах.

Двошарові жорсткі покриття застосовуються в багатьох міжнародних аеропортах завдяки їхнім технічним перевагам. Як-от:

1. Аеропорт «Франкфурт» (Німеччина): використовуються двошарові конструкції для злітно-посадкових смуг, що витримують навантаження від великих авіалайнерів, як-от “airbus A380”.

2. Міжнародний аеропорт «Дубай» (ОАЕ): двошарові покриття застосовуються для інтенсивно використовуваних руліжних доріжок і перонів.

Перспективи використання новітніх матеріалів, як-от фібробетон або полімербетон, для подовження терміну експлуатації та автоматизації процесу укладання [2–9].

Матеріали та методи. Проблематика розрахунку та проєктування двошарових жорстких аеродромних покриттів є важливим складником забезпечення надійності та довговічності експлуатації злітно-посадкових смуг, рубіжних доріжок і стоянок повітряних суден.

Останніми роками значну увагу дослідників привертає використання чисельних методів і спеціалізованих програмних комплексів, як-от «ЛІРА-САПР», для аналізу напружено-деформованого стану (далі – НДС) багатошарових конструкцій.

У роботах [10; 11] досліджується вплив жорсткості верхнього та нижнього шарів покриття на розподіл навантажень, що виникають від дії статичних і динамічних навантажень. Автори зазначають, що використання чисельних моделей дозволяє враховувати нерівномірність розподілу жорсткості шарів, що є ключовим чинником для реальних умов експлуатації.

У публікаціях [12; 13] розглядається застосування програмного забезпечення для моделювання багатошарових систем. Дослідники акцентують увагу на точності розрахунків, можливості врахування неоднорідності матеріалів і впливу зовнішніх умов, як-от температура й вологість.

Особливу увагу приділено моделюванню з використанням програмного комплексу (далі – ПК) «ЛІРА-САПР». У роботах [12; 13] висвітлено переваги цього комплексу в точності обчислень і гнучкості в налаштуванні параметрів моделі. Зокрема, автори підкреслюють можливість детального аналізу НДС для конструкцій складної геометрії.

Попри значний обсяг досліджень, залишається актуальним питання вдосконалення методів моделювання взаємодії шарів покриття та врахування впливу циклічних навантажень, що є типовими для аеродромних покриттів.

Отже, аналіз літератури свідчить про актуальність використання ПК «ЛІРА-САПР» для дослідження і оптимізації двошарових аеродромних покриттів, а також про необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Матеріали та методи. У дослідженні використовувалися сучасні підходи до моделювання аеродромних покриттів, зокрема двошарових жорстких конструкцій, за допомогою ПК «ЛІРА-САПР». Для досягнення високої точності розрахунків і проведення аналізу напружено-деформованого стану (НДС) покриттів була застосована чисельна методика скінчених елементів.

Матеріали. Типи аеродромних покриттів. Для дослідження було вибрано двошарове аеродромне покриття, що складається з асфальтобетонного верхнього шару та цементно-бетонного нижнього шару. Ці матеріали були вибрані на основі практичних рекомендацій для аеродромів середніх і великих класів.

Механічні властивості матеріалів: для кожного шару були задані характеристики матеріалів, що включають модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт теплового розширення та інші параметри, що впливають на напружено-деформований стан покриття.

Для моделювання ґрунтових основ використовувався тип ґрунту із середнім значенням модуля деформації, який відповідає умовам експлуатації аеродрому середнього навантаження.

Методи. Метод скінчених елементів (далі – СЕ): розрахунки виконувалися методом скінчених елементів, що дозволяє точно враховувати складну геометрію, неоднорідність матеріалів і умовні параметри для кожного із шарів конструкції. Це дозволяє отримати точні результати для аналізу НДС й оцінювання деформацій.

Програмне забезпечення: основним інструментом для розрахунку стало програмне забезпечення «ЛІРА-САПР», яке дозволяє створювати точні математичні моделі аеродромних покриттів і проводити чисельні дослідження для визначення їхньої поведінки під впливом різноманітних навантажень.

Результати. У програмному комплексі «ЛІРА-САПР» для дослідження впливу опор ПС (під крилами, під фюзеляжем) рекомендується моделювати аеродромне покриття дев'ятьма плитами (рис. 1), з'єднаними штирями, що точніше враховує

вплив, ніж одна шарнірно закріплена плита [14].

У ПК «ЛІРА-САПР» штирьові з'єднання моделювалися скінченними елементами (КЕ 55), що відтворюють пружний зв'язок між вузлами (рис. 2), моделювалася лінійна податливість зв'язку між плитами у вертикальному напрямку [2; 18].

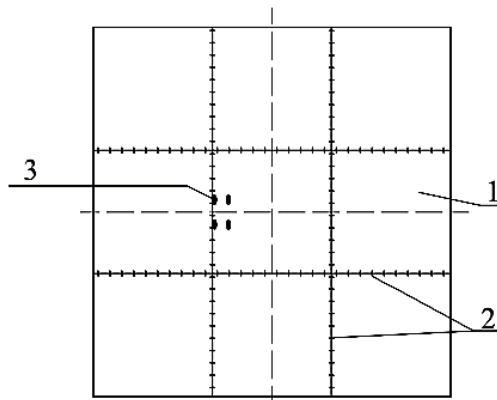


Рис. 1. Схема покриття із дев'яти плит [13]:

- 1 – плита жорсткого аеродромного покриття;
- 2 – штирьові з'єднання між плитами;
- 3 – навантаження (опора повітряного судна).

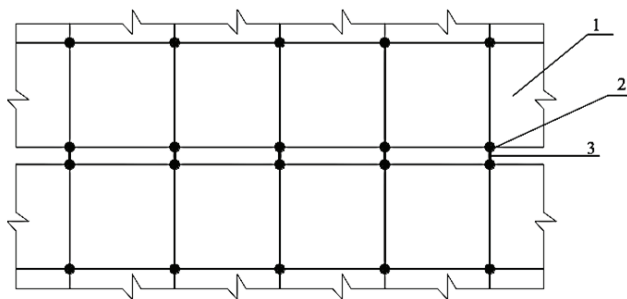


Рис. 2. Моделювання штирьових з'єднань між плитами [13]:

- 1 – скінченний елемент, пластина (КЕ пластина у ПК «ЛІРА-САПР»);
- 2 – вузол;
- 3 – скінченний елемент, що моделює пружний зв'язок між вузлами (КЕ 55 у ПК «ЛІРА-САПР»).

Жорсткість стикового з'єднання k визначається за формулою [15]:

$$k = \frac{D}{s}, \quad (1)$$

де s – відстань між штирями, м;

D – коефіцієнт, що залежить від вертикальної жорсткості:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{DCI} + \frac{1}{12C}}, \quad (2)$$

де DCI (dowel-concrete interaction) – взаємодія штиря та бетону, визначається за таким співвідношенням [15]:

$$DCI = \frac{4\beta^3}{(2 + \beta_\omega)} E_d I_d, \quad (3)$$

де E_d – модуль Юнга, МПа;

I_d – момент інерції штиря, м⁴.

Модуль зчеплення між штирем і бетоном K для штирів, улаштованих зануренням у цементобетон, становить $4,07 \times 10^5$ МН/м³ [15].

Параметр C визначається зі співвідношення [15]:

$$C = \frac{E_d I_d}{\omega(1 + \varphi)}, \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{12 E_d I_d}{G_d A_z \omega^2}, \quad (5)$$

де G_d – модуль зсуву штиря, МПа, що визначається за формулою [15]:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)}, \quad (6)$$

де μ_d – коефіцієнт Пуассона сталі ($\mu_d = 0,3$);

A_z – ефективна поперечна площа штиря, м².

$$A_z = 0,9 \frac{\pi d^2}{3}, \quad (7)$$

де d – діаметр штиря, м.

Жорсткість скінченних елементів (КЕ 55), що моделюють штирьове з'єднання між плитами покриття за рівномірного розташування вузлів, визначається за формулою згідно з [15]:

$$\bar{R}_z = \frac{kL}{(n-1)}, \quad (8)$$

де L – довжина з'єднання, м;

n – кількість вузлів уздовж з'єднання.

Жорсткість скінченних елементів (КЕ 55), що моделюють пружний зв'язок між крайніми вузлами плит [15]:

$$R_Z^K = 0,5 \cdot \bar{R}_z. \quad (9)$$

Жорсткість скінченних елементів (КЕ 55), що моделюють пружний зв'язок між середніми вузлами плит [15]:

$$R_Z^K = \bar{R}_z. \quad (10)$$

У табл. 1 наведено результати розрахунку класифікаційних чисел PCN для покриттів за допомогою нормативної методики, формули Вестергарда [16; 17], FEAFAA та ПК «ЛПРА-САПР». У табл. 1 наведено результати тестового розрахунку за дії одноколійної опори з розрахунковим навантаженням на одне колесо літака B787-9, розташованої по краю плити, виконані за допомогою чинних норм та ПК «ЛПРА-САПР».

Формула Вестергарда для визначення максимального напруження у плиті за розташування навантаження, розподіленого за площею кола по краю плити [16]:

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left(\frac{Eh^3}{100 \cdot ka^4} \right) + 1,84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{1-\nu}{2} + 1,18 \left(1 + 2\nu \frac{a}{l} \right) \right\}, \quad (11)$$

де σ – розтягувальне напруження при згині, МПа;

P – навантаження на одноколійну опору, МН;

ν – коефіцієнт Пуассона;

h – товщина плити, м;

E – модуль пружності бетону, МПа;

k – коефіцієнт постелі, МН/м³;

a – радіус кола, рівновеликого площі відбитка пневматика колеса опори ПС, м.

Визначається за формулою:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}, \quad (12)$$

де p – тиск у пневматику, МПа;

l – радіус відносної жорсткості Вестергарда (пружна характеристика плити), м.

Розрахунковий згинальний момент визначається за формулою [15] з урахуванням понижувального коефіцієнта, що враховує наявність стикових з'єднань між плитами. Цей коефіцієнт становить 0,75 [20].

$$M = \frac{0,75 \cdot \sigma \cdot h^2}{6}, \quad (13)$$

$$\nu_1 = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}, \quad (14)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона прошарку, що розділяє.

Коефіцієнт стиснення між такими, що взаємодіють, верхнім і нижнім шарами покриття:

$$c_p = \frac{2,4 \cdot E_{sup} E_{inf}}{E \cdot (h_{sup} E_{inf} + h_{inf} E_{sup}) + 2,4 \cdot E_{sup} E_{inf} h \nu_1}, \quad (15)$$

де E_{sup} – модуль пружності верхнього шару, МПа;

E_{inf} – модуль пружності нижнього шару, МПа;

h_{sup} – товщина верхнього шару, м;

h_{inf} – товщина нижнього шару, м.

Коефіцієнт стиснення між взаємодіючими нижнім шаром покриття та штучною основою, укріпленою в'язучим:

Таблиця 1

Результати тестового розрахунку

Метод розрахунку	M_{sup} , кН · м/м	Δ_{sup} , %	M_{inf} , кН · м/м	Δ_{inf} , %
БНіП	79,078	-11	11,280	6
ПК «ЛПРА-САПР»	87,823		10,601	

Джерело: [13].

$$c_f = \frac{2,4 \cdot E_{inf} E_f E}{E \cdot (h_{inf} E_f + h_f E_{inf}) + 2,4 \cdot E_{inf} E_f h_{v1}}, \quad (16)$$

де E_{inf} – модуль пружності нижнього шару, МПа;

E_f – модуль пружності штучної основи, укріпленої в'язучим, МПа;

h_{sup} – товщина нижнього шару, м;

h_{inf} – товщина штучної основи, укріпленої в'язучим, м.

Жорсткість скінченних елементів (КЕ 262) (дискретні пружини), що моделюють такий, що розділяє, прошарок між шарами і враховують ефект обтиснення, визначається розмірами елементів плити, що розташовані в зоні вузла, де розміщується пружина.

Жорсткість скінченних елементів КЕ 262, розташованих між середніми вузлами плит, що взаємодіють:

$$R_{f,c} = R_f \cdot R_{f,c} = R_f. \quad (17)$$

Жорсткість скінченних елементів КЕ 262, розташованих між крайніми вузлами:

$$R_{p,k} = \frac{1}{2} R_p; R_{f,k} = \frac{1}{2} R_f. \quad (18)$$

Жорсткість скінченних елементів КЕ 262, розташованих між кутовими вузлами:

$$R_{p,y} = \frac{1}{42} R_p; R_{f,y} = \frac{1}{4} R_f. \quad (19)$$

Жорсткість КЕ 262 визначається за формулою:

$$R_{p(f)} = \frac{C_{p(f)} (a_1 b_1 + a_2 b_1 + a_1 b_2 + a_2 b_2)}{4}, \quad (20)$$

де a_1, a_2, b_1, b_2 – розміри скінченних елементів плити, розташованих у зірці вузла, у який ставиться КЕ 262.

У FEAFAA навантаження моделювалося як рівномірно розподілене за площею прямокутника, а у ПК «ЛІРА-САПР» – у формі квадратного штампа з розмірами $0,57 \times 0,57$ м, $0,60 \times 0,60$ м та $0,63 \times 0,63$ м для 1-го, 2-го та 3-го типу покриття відповідно (табл. 2). Жорсткість скінченних елементів (КЕ 55) для пружного зв'язку між крайніми вузлами плит дорівнює 184,919 МН/м, а між середніми – 369,838 МН/м [2; 18].

FEAFAA та ПК «ЛІРА-САПР» занижують розрахунковий момент на 0,5–1,6% порівняно з нормативною методикою. Ця тенденція залишається незмінною незалежно від величини еквівалентного одноколісного навантаження. Різниця в розрахунках, виконаних за допомогою ПК «ЛІРА-САПР» та FEAFAA, не перевищує 1% [13; 15; 21].

Двошарове жорстке аеродромне покриття моделюється прямокутними пластинами: верхній і нижній шари – пластини, а піскоцементна основа – пластини на пружній основі Вінклера. Пружний прошарок між шарами представлено стержньовими елементами, що забезпечують односторонній зв'язок вузлів [19].

Використання скінченного елемента для моделювання одностороннього лінійного зв'язку між шарами дозволяє врахувати їхнє обтиснення. За наявності пружного прошарку стиснення між несучими шарами визначається коефіцієнтом стиснення (жорсткість елемента, що моделює цей зв'язок) (рис. 3).

Жорсткість скінченних елементів (КЕ 55), що моделюють пружний зв'язок між край-

Таблиця 2

Результати розрахунку PCN

№ типу покриття	Одноколісне навантаження, кН/PCN	Розрахунковий момент, кН · м/м			
		БНіП	Вестергард	FEAFAA	ЛІРА
1	375 / PCN75/R/C/W/T	112,086	112,844	112,050	111,944
2	425 / PCN85/R/C/W/T	123,384	23,249	123,268	123,238
3	465 / PCN93/R/C/W/T	32,966	130,865	132,064	130,855

Джерело: [13].

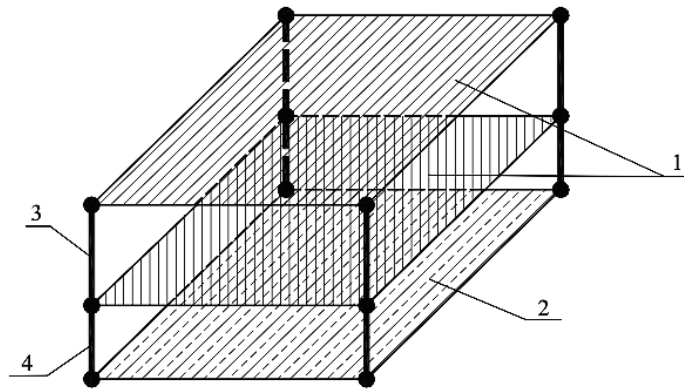


Рис. 3. Скінченно-елементна модель двошарового жорсткого аеродромного покриття на штучній основі, укріпленій в'язучим [13]:

- 1 – скінченний елемент, пластина для моделювання верхнього та нижнього шарів покриття (КЕ пластина у ПК «ЛІРА-САПР»);
- 2 – скінченний елемент, пластина на пружній основі Вінклера для моделювання штучної основи, укріпленої в'язучим (КЕ пластина у ПК «ЛІРА-САПР»);
- 3 – скінченний елемент для моделювання прошарку, що розділяє, між верхнім і нижнім шарами покриття (КЕ 262 у ПК «ЛІРА-САПР», моделює односторонній пружний зв'язок між вузлами);
- 4 – скінченний елемент для моделювання прошарку, що розділяє, між нижнім шаром покриття та штучною основою, укріпленою в'язучим.

німи вузлами плит, становить 184,919 МН/м; між середніми вузлами плит – 369,838 МН/м.

Жорсткість скінченного елемента (КЕ 262), що моделює односторонній лінійний зв'язок:

– між верхнім і нижнім шарами покриття:

$$R_{p,c} = 12\,442,07 \text{ МН/м}; R_{p,k} = 6\,221,03 \text{ МН/м}; R_{p,y} = 3\,110,52 \text{ МН/м};$$

– між нижнім шаром і піскоцементною штучною основою:

$$R_{p,c} = 8\,885,35 \text{ МН/м}; R_{p,k} = 4\,442,67 \text{ МН/м}; R_{p,y} = 2\,221,34 \text{ МН/м}.$$

Значне розходження в розрахунковому моменті між чинними нормами та ПК «ЛІРА-САПР» пояснюється врахуванням ефекту поперечного обтиснення в чисельній моделі покриття. Це приводить до збільшення моменту у верхньому шарі на 10% та зменшення на 10% у нижньому через податливість поперечного зсуву прошарку, що розділяє, та спільну роботу з верхнім шаром [2; 13; 18].

Висновки. Розрахунок двошарових жорстких аеродромних покриттів за допомогою

ПК «ЛІРА-САПР» дозволяє точно моделювати поведінку покриттів під дією навантажень, з урахуванням різних чинників, зокрема жорсткості елементів і взаємодії між шарами.

Результати розрахунків відповідають теоретичним моделям і практичним вимогам, що підтверджується малою різницею з іншими програмними комплексами, як-от FEAFAA, яка не перевищує 1%.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі передбачають удосконалення чисельних моделей для врахування складніших умов експлуатації, як-от вплив температурних і кліматичних чинників, утомних навантажень і довготривалої роботи покриттів. Також перспективним є використання штучного інтелекту для оптимізації проектування та проведення аналізу аеродромних покриттів, а також адаптація моделей до сучасних екологічних вимог і нових матеріалів.

Список використаних джерел:

1. Агєєва Г.М. Будівництво та експлуатація будівель і споруд аеропортів: освітній акцент. *Сталий розвиток авіаційної інфраструктури України* : монографія / за ред. В.В. Карпова. Львів ; Торунь : Liha-Pres, 2023. С. 63–111. DOI: 10.36059/978-966-397-312-8-3.

2. Родченко О.В. Розрахунок двошарових жорстких аеродромних покриттів за допомогою програмного комплексу «ЛІРА». *Будівництво України*. 2008. № 5. С. 40–47.
3. Пашченко Т.М., Світла З.І. Будівельне матеріалознавство : навчальний посібник. Київ : Аграрна освіта, 2009. 434 с.
4. Dotzenrath C., Trosh W. Walzbeton-Baustoff der Zukunft. Walzbeton im Vergleich zu “klassischen” Befestigungsarten. *Beton*. 1991. Vol. 41. № 2. P. 70–75.
5. Die Herstellung einer hydraulisch gebundenen Tragschicht aus Aufbrachasphalt. *Strasse und Autobahn*. 1989. № 6. P. 211–214.
6. ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Суміші бетонні. Методи випробувань. (Чинний від 27.11.2001 р.). Київ, 2002. 27 с.
7. ДСТУ EN 196-1:2007. Методи випробування цементу. Ч. 1 : Визначення міцності. (Чинний від 01.08.2007 р.). Київ, 2007. 27 с.
8. Li V.C., Wang S., Wu H.C. Toughening of cement-based composites with discrete steel fibers. *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. №. 19. P. 3961–3966.
9. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Досвід застосування фібробетону у будівництві. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту*. Серія «Транспортні системи і технології». 2014. Вип. 24. С. 5–10.
10. Агєєва Г.М., Кривельов Л.І. Моніторинг реконструкції жорстких аеродромних покриттів. *Advances in Aerospace Technology*. 1998. № 1. С. 397–402. DOI: 10.18372/2306-1472.1.11002.
11. Murray S., Ogawa M. Evaluation of the behavior of airport pavement under heavy load using finite element analysis. *Transportation Geotechnics*. 2018. Vol. 16. P. 27–35. DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.02.002.
12. Агєєва Г.М. Особливості підсилення аеродромних покриттів за результатами експериментального оцінювання експлуатаційної придатності. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. Вип. 742. С. 4–11.
13. Карпов В.В. Проектування та будівництво аеродромних комплексів : монографія / за ред. В.В. Карпова. Херсон : Олді+, 2022. 336 с.
14. Родченко О.В. Розрахунок двошарових жорстких аеродромних покриттів за допомогою програмного комплексу «ЛІРА». *Будівництво України*. 2008. № 9. С. 37–41.
15. Hammons M.I. Advanced Pavement Design : Finite Element Modelling for Rigid Pavement Joints. Report II Model Development. Report № DOT/FAA/AR-97/7. Washington : Federal Aviation Administration. 1998. 180 p. URL: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar9870.pdf> (дата звернення: 12.03.2025).
16. Westergaard H.M. Stresses in Concrete Runways of Airports. *Proceedings, Highway Research Board, National Research Council*. 1939. Vol. 19. P. 199–200.
17. Westergaard H.M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields. *Transactions, American Society of Civil Engineers*. 1948. Vol. 113. P. 425–439.
18. Rodchenko O.V. Computer technologies of finite element modeling of airfield rigid pavement. *Science – Lithuania's Future. Transport : 15th Conference of Young Scientists of Lithuania*, 8 May 2013. Vilnius, 2013. P. 65–70.
19. Huang Y.H. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2004. 792 p.
20. Advisory Circular 150/5320-6G. *Airport Pavement Design and Evaluation*. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 2021. 195 p. URL: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5320-6G-Pavement-Design.pdf (дата звернення: 12.03.2025).
21. Родченко О.В. Sensitivity quantification of airport concrete pavement stress responses under impact of Airbus 321NEO. *ABIA-2021 : матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції*, м. Київ, 20–22 квітня 2021 р. Київ, 2021. С. 20.6–20.10.

References:

1. Aheieva, H.M. (2023). *Budivnytstvo ta ekspluatatsiia budivel i sporud aeroportiv: osvittii aktsent* [Construction and operation of airport buildings and structures: educational focus]. In V.V. Karpov (Ed.), *Stalyi rozvytok aviatsiinoi infrastruktury Ukrainy* [Sustainable development of aviation infrastructure in Ukraine], (pp. 63–111). Lviv; Torun: Liha-Pres. Retrieved from <https://doi.org/10.36059/978-966-397-312-8-3> [in Ukrainian].
2. Rodchenko, O.V. (2008). Rozrakhunok dvosharovykh zhorstkikh aierodromnykh pokryttiv za dopomo-hoiu prohranno-ho kompleksu “LYRA” [Calculation of two-layer rigid airfield pavements using the software package “LYRA”]. *Budivnytstvo Ukrainy* [Construction of Ukraine], 5, 40–47. Retrieved from <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/11780> [in Ukrainian].
3. Pashchenko, T.M., & Svitla, Z.I. (2009). *Budivelne materialoznavstvo: navchalnyi posibnyk* [Construction materials science: A textbook]. Kyiv: Ahrarna osvita [in Ukrainian].

4. Dotzenrath, C., & Trosh, W. (1991). Walzbeton-Baustoff der Zukunft. Walzbeton im Vergleich zu “klassischen” Befestigungsarten [Roller concrete – construction material of the future. Comparison of roller concrete with “classic” pavements]. *Beton*, 2 (41), 70–75 [in Ukrainian].
5. Die Herstellung einer hydraulisch gebundenen Tragschicht aus Aufbrachasphalt [The production of hydraulically bound base layer from reclaimed asphalt]. (1989). *Strasse und Autobahn*, 6, 211–214 [in Ukrainian].
6. DSTU B V.2.7-114-2002 (2002). *Sumišči betonni. Metody vyprobuvan'* [Concrete mixtures. Methods of testing]. Kyiv, Ukraine: State Standard of Ukraine [in Ukrainian].
7. DSTU EN 196-1:2007 (2007). Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength [in Ukrainian].
8. Li, V.C., Wang, S., & Wu, H.C. (2002). Toughening of cement-based composites with discrete steel fibers. *Journal of Materials Science*, 37 (19), 3961–3966 [in English].
9. Doroshenko, O.Y., & Doroshenko, Y.M. (2014). Experience of using fiber-reinforced concrete in construction [Dosvid zastosuvannya fibrobietonu u budivnytstvi]. *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Series Transport Systems and Technologies*, 24, 5–10 [in Ukrainian].
10. Agieva, H.M., & Kriveliov, L.I. (1998). Monitoring of reconstruction of rigid airfield pavements [Monitorynh rekonstruktsii zhorstkikh aerodromnykh pokrytiv]. *Proceedings of the National Aviation University*, 1, 397–402. Retrieved from <https://doi.org/10.18372/2306-1472.1.11002> [in Ukrainian].
11. Murray, S., & Ogawa, M. (2018). Evaluation of the behavior of airport pavement under heavy load using finite element analysis. *Transportation Geotechnics*, 16, 27–35. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.02.002> [in English].
12. Aheieva, H.M. (2012). Osoblyvosti pidsylenna aierodromnykh pokryttiv za rezul'tatamy eksperimental'noho otsiniuvannya ekspluatatsiinoi prydatnosti [Features of reinforcement of airfield pavements based on the experimental evaluation of operational suitability]. *Visnyk Natsional'noho universytetu “L'vivska politekhnika”* [Bulletin of the National University “Lvivska Politekhnik”], 742, 4–11 [in Ukrainian].
13. Karpov, V.V. (Ed.). (2022). *Proiektuvannya ta budivnytstvo aierodromnykh kompleksiv: monohrafiia* [Design and construction of airfield complexes: Monograph]. Kherson: Oldi+. Retrieved from <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/54558> [in Ukrainian].
14. Rodchenko, O.V. (2008). Rozrakhunok dvosharovykh zhorstkikh aierodromnykh pokryttiv za dopomo-hoiu prohramnoho kompleksu “LYRA” [Calculation of two-layer rigid airport pavements using the “LYRA” software package]. *Budivnytstvo Ukrainy*, 9, 37–41 [in Ukrainian].
15. Hammons, M.I. (1998). Advanced Pavement Design: Finite Element Modelling for Rigid Pavement Joints, Report II – Model Development, Report № DOT/FAA/AR-97/7, FAA. Washington: Federal Aviation Administration. Retrieved from <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar9870.pdf> (accessed March 12, 2025) [in English].
16. Westergaard, H.M. (1939). Stresses in concrete runways of airports. *Proceedings, Highway Research Board, National Research Council*, 19, 199–200 [in English].
17. Westergaard, H.M. (1948). New formulas for stresses in concrete pavements of airfields. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 113, 425–439 [in English].
18. Rodchenko, O.V. (2013). Computer technologies of finite element modeling of airfield rigid pavement. In 15th Conference of Young Scientists of Lithuania “Science – Lithuania’s Future. TRANSPORT”, 8 May 2013. Vilnius. P. 65–70 [in English].
19. Huang, Y.H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall [in English].
20. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. (2021). *Advisory Circular 150/5320-6G: Airport pavement design and evaluation*. Retrieved from https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5320-6G-Pavement-Design.pdf [in English].
21. Rodchenko, O.V. (2021). Sensitivity quantification of airport concrete pavement stress responses under impact of Airbus 321NEO. In *AVIA-2021: XV International Scientific and Technical Conference, April 20–22, 2021: Proceedings* (pp. 20.6–20.10). Kyiv.