

УДК 656.71-048.38(045)

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.37.9>

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВІДНОВЛЕННЯ АЕРОПОРТУ

**Дубик Олександр Миколайович¹, Дудар Тамара Вікторівна²,
Чернишова Оксана Сергіївна³, Осовський Іван Миколайович⁴**

¹ кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри інфраструктури авіаційного транспорту,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: oleksandr.dubyk@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0001-8082-7603

² доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, завідувач кафедри екології,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: tamara.dudar@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0003-3114-9732

³ кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інфраструктури авіаційного транспорту,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: oksana.chernyshova@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153

⁴ аспірант кафедри інфраструктури авіаційного транспорту, Державний університет
«Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: 5177530@stud.kai.edu.ua, orcid: 0009-0003-8294-6990

Анотація. У статті розглядається аналіз напружено-деформованого стану конструкцій жорстких аеродромних покриттів на дію навантаження від повітряного судна Ан-225 «Мрія». Отримано результати визначення несної здатності та розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій жорстких аеродромних покриттів. На підставі розрахунків напружено-деформованого стану надано конструктивні рішення та пропозиції щодо відновлення жорстких аеродромних покриттів. Отримано ізополя вертикальних переміщень, згинальних моментів та поперечних зусиль у плитах жорстких аеродромних покриттів за дії навантаження від повітряного судна Ан-225 «Мрія». Визначено значення класифікаційних параметрів PCR жорстких аеродромних покриттів.

Комплекс виконаних чисельних експериментальних досліджень дав змогу вирішити наукову проблему оцінювання напружено-деформованого стану конструкцій жорстких аеродромних покриттів з урахуванням просторового навантаження повітряних суден.

Мета роботи полягає у визначенні несної здатності та дослідженні напружено-деформованого стану конструкцій жорстких аеродромних покриттів з урахуванням реального просторового навантаження та властивостей ґрунтових основ, на підставі чого надаються пропозиції та конструктивні рішення аеродромних покриттів.

Методологія. Методи дослідження: аналіз літературних джерел, метод класифікаційних параметрів ACR–PCR, метод скінченних елементів.

Результати. Виконано розрахунок конструкцій жорстких аеродромних покриттів на дію навантаження від надважкого повітряного судна Ан-225 «Мрія». Проведено чисельні експерименти з використанням методу скінченних елементів та методу ACR–PCR, що дали змогу визначити несну здатність покриття та оцінити напружено-деформований стан. Розрахунки показали, що наявна конструкція злітно-посадкової смуги Міжнародного аеропорту «Гостомель» не забезпечує експлуатації літака Ан-225 «Мрія» навіть за мінімальної інтенсивності зльотів.

Установлено необхідність збільшення товщини верхнього шару цементобетонного покриття до 350–391 мм залежно від кількості зльотів. Запропоновано конструктивні рішення, спрямовані на підвищення міцності та довговічності аеродромних покриттів з урахуванням реальних просторових навантажень і властивостей ґрунтових основ.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у реалізації принципово нового підходу до дослідження напружено-деформованого стану жорстких аеродромних покриттів на основі методу скінченних елементів, ураховуючи реальне просторове навантаження та вплив ґрунтових основ.

Практична значущість. Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів розрахунків напружено-деформованого стану конструкцій жорстких аеродромних покриттів з урахуванням реального просторового навантаження від повітряних суден під час конструювання та будівництва елементів аеродромів.

Ключові слова: аеродромні покриття, елементи аеродромів, повітряні судна, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, метод ACR-PCR, ґрунтові основи.

ВСТУП

Ваеропорту «Київ-Антонов-2» у смт Гостомель унаслідок ворожих дій російських загарбників значна частина аеродрому, у тому числі злітно-посадкової смуги, є пошкодженою. Злітно-посадкова смуга даного аеропорту є непридатною для експлуатації.

Міжнародний аеропорт «Гостомель» розташований на відстані 25 км від міста Київ і мав вигідне географічне положення в плані організації повітряних середньомагістральних і трансконтинентальних сполучень.

Міжнародний аеропорт «Гостомель» – авіаційне підприємство, що здійснювало в довоєнний період усі технологічні процеси, пов'язані з перевезенням вантажів повітряним транспортом. До його складу входять: льотна зона (ШЗПС, МРД і РД, МС і перони), спецмайданчики, радіо і світлосигнальні системи посадки повітряних суден і зони життєзабезпечення комплексу (вантажні склади, площадки), служби аеродромного забезпечення, спецавтотранспорту, авіапаливозабезпечення, інженерного забезпечення, а також розвинена інфраструктура неавіаційного характеру.

Міжнародний аеропорт «Гостомель» у довоєнний період обслуговував вантажні перевезення великогабаритних, довгомірних нестандартних вантажів енергодобувних і машинобудівних галузей важкими дальномістральними літаками типу Ан-124-100, В-747 та ін.

Географічне і геополітичне положення Київського авіаційного вузла, і зокрема Міжнародного аеропорту «Гостомель», є оптимальним для організації транспортних повітряних зв'язків Захід – Схід, Північ – Південь

і за певних фінансових витрат приносить максимальний прибуток. Удале географічне розміщення Міжнародного аеропорту «Гостомель» дає потенційну можливість у загальному обсязі авіаційної роботи забезпечувати близько 60% транзитних рейсів, що за рівних експлуатаційних витрат забезпечує чистий прибуток із максимальним економічним ефектом. Сучасна злітно-посадкова смуга, достатня авіаційна інфраструктура давали змогу задіювати Міжнародний аеропорт «Гостомель» як запасний аеродром для Київського авіаційного вузла і низки аеродромів України.

Літаки, які експлуатувалися в Міжнародному аеропорту «Гостомель»: Ан-225 «Мрія», Ан-124 «Руслан», Ан-22 «Антей», Ан-70, Ан-74, Ан-72, Ан-26, Ан-178, Ан-148/Ан-158.

Окрім цього, Міжнародний аеропорт «Гостомель» приймав чартерні рейси та спеціальні рейси інших великих літаків: Boeing 747, Airbus A330, McDonnell Douglas DC-10.

Уведення в експлуатацію надважкого повітряного судна Ан-225 «Мрія», який має значну масу (близько 285 тис кг), потребує створення на аеродромах штучних покриттів із більш високою несною здатністю.

Це потребує створення методик проектування і розрахунку покриттів на міцність під будь-які типи навантажень від літаків. Особливість розрахунку таких конструкцій полягає у необхідності врахування не лише активних сил, а й реактивних сил ґрунтової основи.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначенню напружено-деформованого стану конструкцій аеродромних покриттів

присвячено дослідження та наукові праці вітчизняних учених [1–7].

Дослідженням напружено-деформованого стану аеродромних покриттів присвячено праці закордонних учених, серед яких: Дж. Цай, Л.Н.Й. Вонг, Х.В. Ян, Г. Шафабахш, Е. Каші, М. Тахані, А. Резаї-Тарахомі, О. Кая, Х. Сейлан, С. Кім, К. Гопалакрішнан, Д.Р. Брілл, Б. Сюй, В. Чжан, Дж. Мей, Г. Юе, Л. Ян, П. Лю, С. Ванг, В. Лу, М. Мохарекпур, М. Езер, Д. Ванг, А. Рахмаваті, Ф. Рахмаваті, Дж. Юань, В. Лі, Й. Лі, Л. Ма, Дж. Чжан [9; 11–18].

МЕТА

Метою статті є визначення несної здатності та дослідження напружено-деформованого стану конструкцій жорстких аеродромних покриттів з урахуванням реального просторового навантаження та властивостей ґрунтових основ, на підставі чого надаються пропозиції та конструктивні рішення аеродромних покриттів.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначення несучої спроможності конструкцій аеродромних покриттів виконується за методом класифікаційних параметрів $ACR - PCR$, де ACR – класифікаційний параметр повітряного судна; PCR – класифікаційний параметр аеродромного покриття відповідно до рекомендацій ICAO – Міжнародної організації цивільної авіації [8; 10].

Для вирішення поставленого завдання у статті також використано метод скінченних елементів, який дає змогу розв'язувати різноманітні завдання теорії пружності та пластичності.

Основна ідея методу скінченних елементів полягає у переході від нескінченної кількості диференціальних рівнянь із частинними похідними та граничними умовами до кінцевої системи алгебраїчних рівнянь відносно кінцевого числа невідомих, що віднесені до просторової сітки скінченноелементної моделі.

Під час вирішення практичних задач методом скінченних елементів розглядається область скінченних розмірів. Для зниження похибки від крайових ефектів розмір розрахункової області призначається більше, ніж та, у якій оцінюється напружено-деформований стан системи. Грані області, що розглядається, закріплюються від переміщень.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Конструкцію аеродромного покриття в Міжнародному аеропорту «Гостомель» у довоєнний період наведено на рис. 1.

Верхній шар – твердий, виконаний із бетону класу C32/40, який має такі характеристики:

- призматична міцність на стиснення: $R_b = 224 \text{ кгс/см}^2$;
- осьовий розтяг: $R_{bt} = 14,3 \text{ кгс/см}^2$;

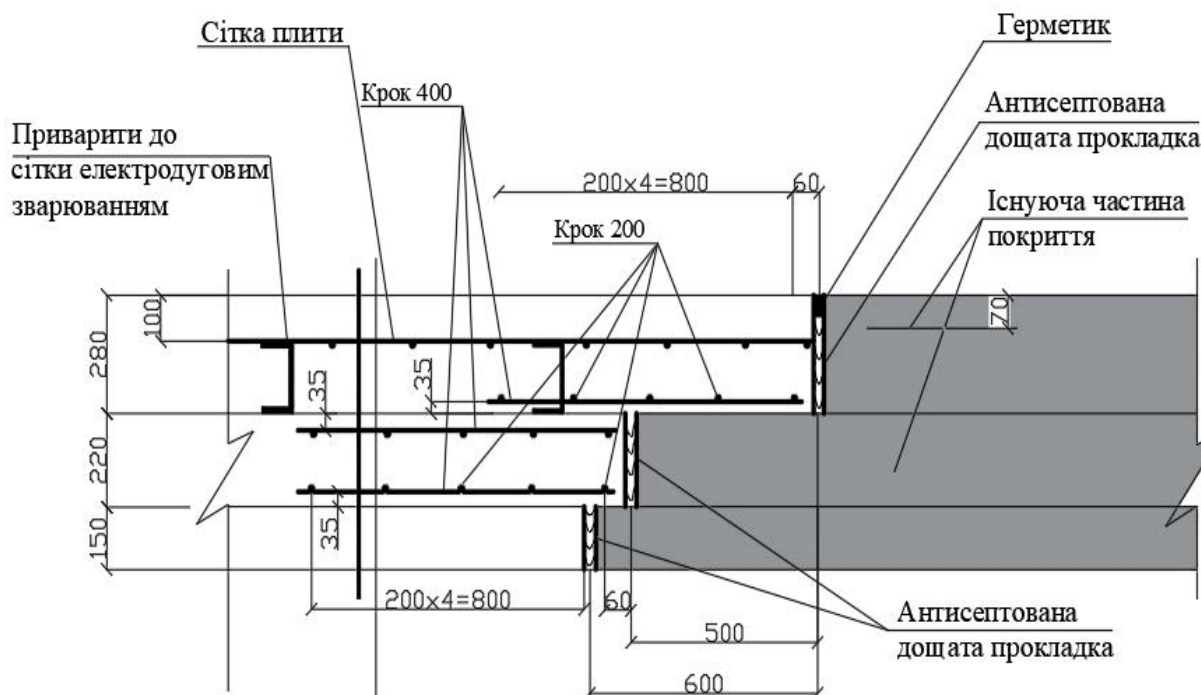


Рис. 1. Конструкція аеродромного покриття в Міжнародному аеропорту «Гостомель» у довоєнний період

– модуль пружності: $E_b = 3,67 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$.

Нижній шар – виконаний із бетону класу C12/15, який має такі розрахункові характеристики:

– призмена міцність на стискання:

$$R_b = 86,7 \text{ кгс/см}^2;$$

– осьовий розтяг: $R_{bt} = 7,65 \text{ кгс/см}^2$;

– модуль пружності: $E_b = 2,35 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$.

Жорстка основа – тверда, укріплена бетоном:

– призмена міцність на стискання:

$$R_{bt} = 2,65 \text{ кгс/см}^2;$$

– осьовий розтяг: $R_{bt} = 2,65 \text{ кгс/см}^2$;

– модуль пружності: $E_b = 0,714 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$.

Клімат району – помірно-континентальний, характеризується середньорічною температурою повітря $7,2^\circ\text{C}$ і середньорічною кількістю опадів 685 мм. Розподіл температур повітря за місяцями наведено в табл. 1.

Абсолютна мінімальна температура повітря дорівнює мінус 32°C , абсолютна максимальна – плюс 39°C .

Середня температура повітря дорівнює:

– найбільш холодної доби – мінус 26°C ;

– найбільш холодної п'ятиденки – мінус 22°C ;

– найбільш холодного періоду – мінус 10°C .

Тривалість періоду із середньою добовою температурою повітря, що дорівнює або менше ніж 8°C , становить 187 діб за середньої температури мінус $0,2^\circ\text{C}$. Тривалість періоду із середньою добовою температурою повітря, що дорівнює або менше ніж 0°C , становить 118 діб.

Середня місячна відносна вологість повітря найбільш холодного місяця дорівнює 82%, найбільш спекотного місяця – 52%.

Нормативна глибина промерзання ґрунтів:

– для супісків і пісків пилуватих – 108 см;

– для суглинків – 90 см.

Геологічна будова майданчика до розвіданої глибини 16,0 м складена комплексом четвертинних еолово-делювіальних та водно-льодовикових відкладів, представлених суглинками, супісками та пісками.

Гідрогеологічні умови ділянки вишукувань характеризуються наявністю лінозоподібного водоносного горизонту, який утворився в четвертинних водно-льодовикових відкладах. Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та втрат із водонесучих мереж. Підземні води гідралічного тиску не мають.

Середньозважене значення коефіцієнта постелі ґрунту становить: $K_{se} = 50 \text{ МН/м}^3$.

Розрахунок несної здатності конструкцій аеродромних покриттів виконується двома методами:

– методом класифікаційних параметрів ACR-PCR, де ACR – класифікаційний параметр повітряного судна, PCR – класифікаційний параметр покриття;

– чисельним методом розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій аеродромних покриттів із використанням ПК ЛІРА САПР.

Розрахунок аеродромного покриття виконується на дію навантаження від повітряного судна Ан-225 «Мрія». При цьому розрахунок за методом ACR-PCR із використанням програми FAARFIELD 2.1.1 виконується на 1, 2, 3, 4 та 5 зльотів за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія». Добові та річні зльоти повітряного судна Ан-225 «Мрія» наведено в табл. 2.

Змодельовану конструкцію аеродромного покриття в програмі FAARFIELD 2.1.1 наведено на рис. 2. Геометричні характеристики повітряного судна Ан-225 «Мрія» наведено на рис. 3.

Результати розрахунків класифікаційних параметрів PCR аеродромного покриття при

Таблиця 1

Розподіл температур повітря за місяцями

Місяці	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура	-5,9	-5,2	-0,4	7,5	14,7	17,8	19,8	18,7	13,9	7,5	1,2	-3,5

Таблиця 2

Річні та добові зльоти повітряного судна Ан-225 «Мрія»

Тип повітряного судна	Кількість зльотів повітряного судна за добу	Кількість зльотів повітряного судна за рік
Ан-225 «Мрія»	1	365
	2	730
	3	1095
	4	1460
	5	1825

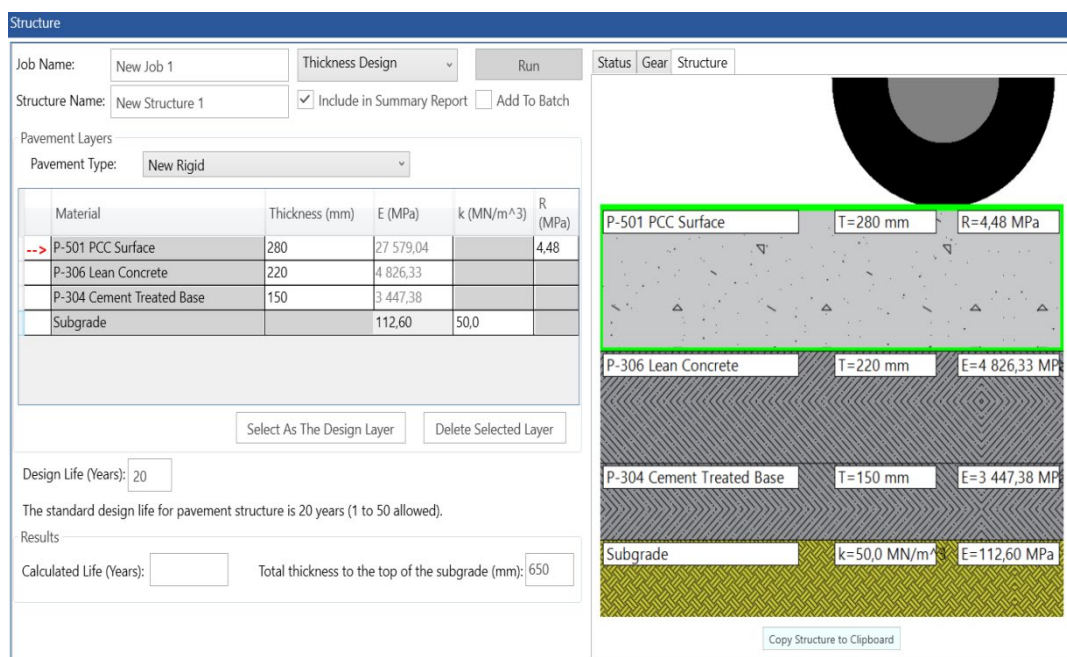


Рис. 2. Модель конструкції аеродромного покриття в програмі FAARFIELD 2.1.1

1-му, 2-х, 3-х, 4-х та 5-х зльотах за добу наведено на рис. 3–7.

На рис. 8–12 наведені результати розрахунку рекомендованих товщин верхнього шару бетону класу С32/40 при 1-му, 2-х, 3-х, 4-х та 5-х зльотах за добу.

При 1-му зльоті повітряного судна Ан-225 «Мрія» значення класифікаційного параметру аеродромного покриття становить 589,1/R/V; при 2-х зльотах – 545,8/R/V; при 3-х зльотах – 523,3/R/V; при 4-х зльотах – 507,4/R/V; при 5-х зльотах – 496,3/R/V.

При 1-му зльоті повітряного судна Ан-225 «Мрія» значення рекомендованої товщини верхнього шару аеродромного покриття з бетону класу С32/40 становить 350 мм; при 2-х зльотах – 368 мм; при 3-х зльотах – 378 мм; при 4-х зльотах – 386 мм; при 5-х зльотах – 391 мм.

Це означає, що навіть за одного зльоту повітряного судна Ан-225 «Мрія» не буде забезпечена несна здатність аеродромного покриття, оскільки класифікаційний параметр літака $ACR=793,6$, що є більшим, ніж класифікаційні параметри аеродромного покриття при 1-му, 2-х, 3-х, 4-х та 5-х зльотах за добу.

Чисельний розрахунок напружено-деформованого стану конструкції жорсткого аеродромного покриття.

Для дискретної скінченно-елементної моделі гнучкої пластинки варіаційне рівняння руху з урахуванням дисипативних сил зводиться до такого диференціального рівняння руху скінченно-елементної моделі гнучкої пластинки на пружній основі:

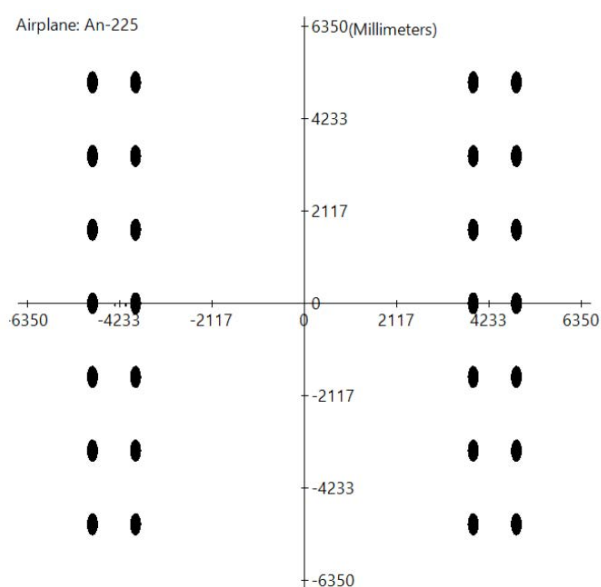


Рис. 3. Геометричні характеристики повітряного судна Ан-225 «Мрія»

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + \{R(u)\} - \{Q(u)\} = \{Q_0(u)\}, \quad (1)$$

де $[M]$ – матриця мас скінченно-елементної моделі; $[C]$ – матриця в'язкого демпфування скінченно-елементної моделі; u , $\dot{u}$, $\ddot{u}$ – вектори приростів переміщень, швидкостей і прискорень скінченно-елементної моделі; $\{R(u)\}$, $\{Q(u)\}$ – матриці узагальнених реакцій внутрішніх та зовнішніх сил скінченно-елементної моделі; $\{Q_0(u)\}$ – матриця узагальнених реакцій пружної основи скінченно-елементної моделі.

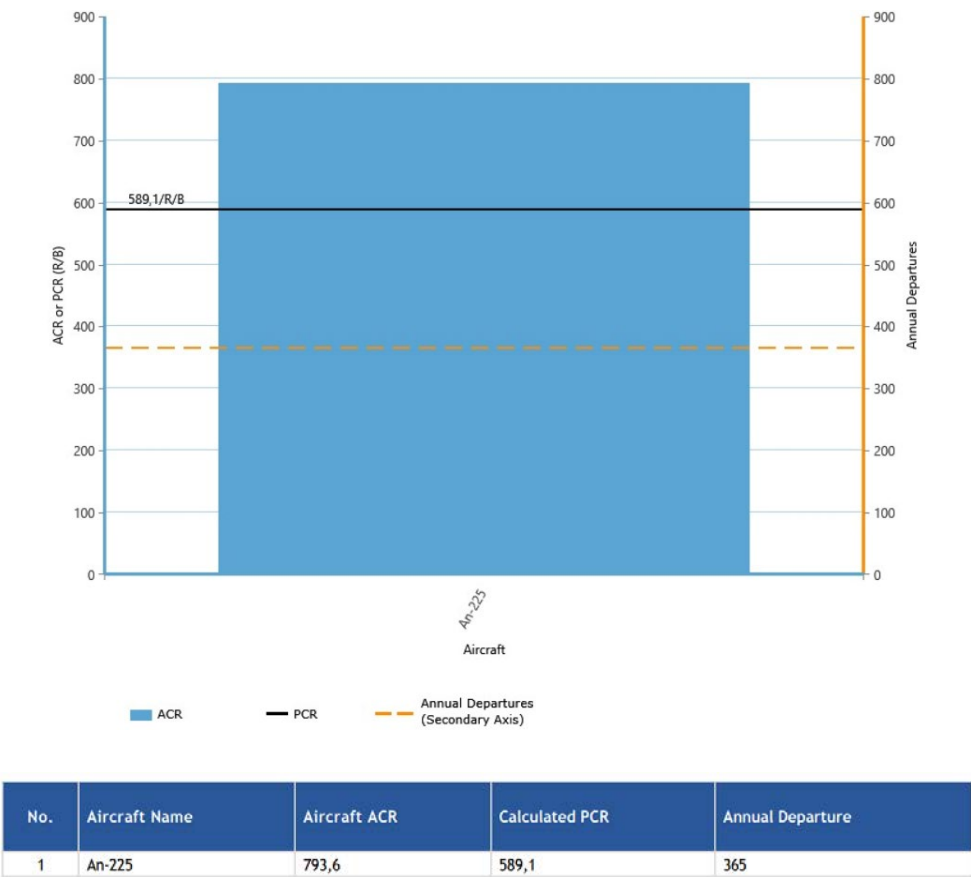


Рис. 4. Результати розрахунку класифікаційного параметра аеродромного покриття при 1-му зльоті за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія» при товщині $t=28$ см верхнього шару бетону класу С32/40

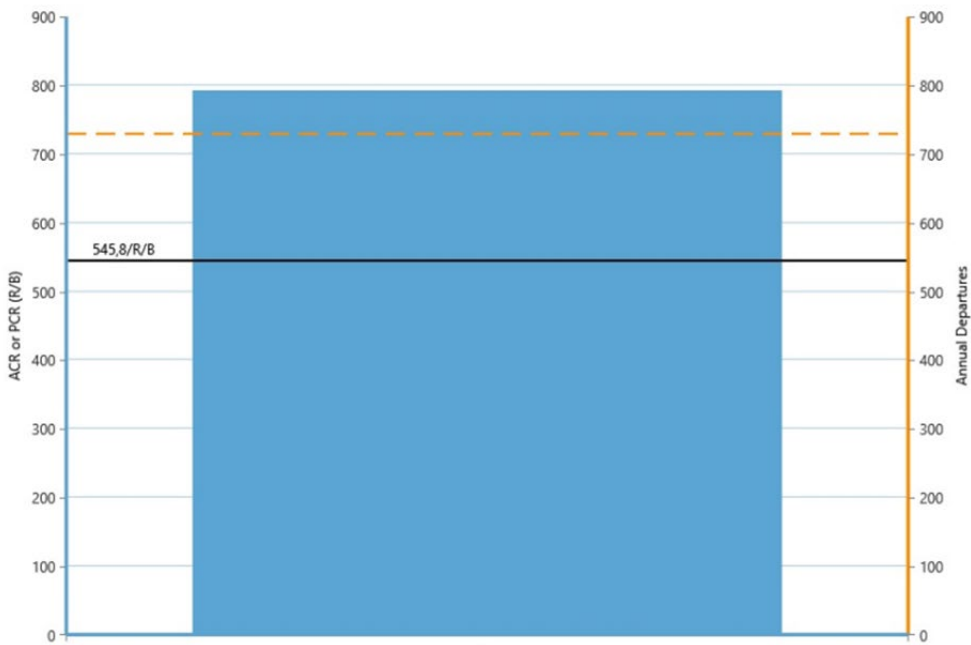


Рис. 5. Результати розрахунку класифікаційного параметра аеродромного покриття при 2-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія» при товщині $t=28$ см верхнього шару бетону класу С32/40

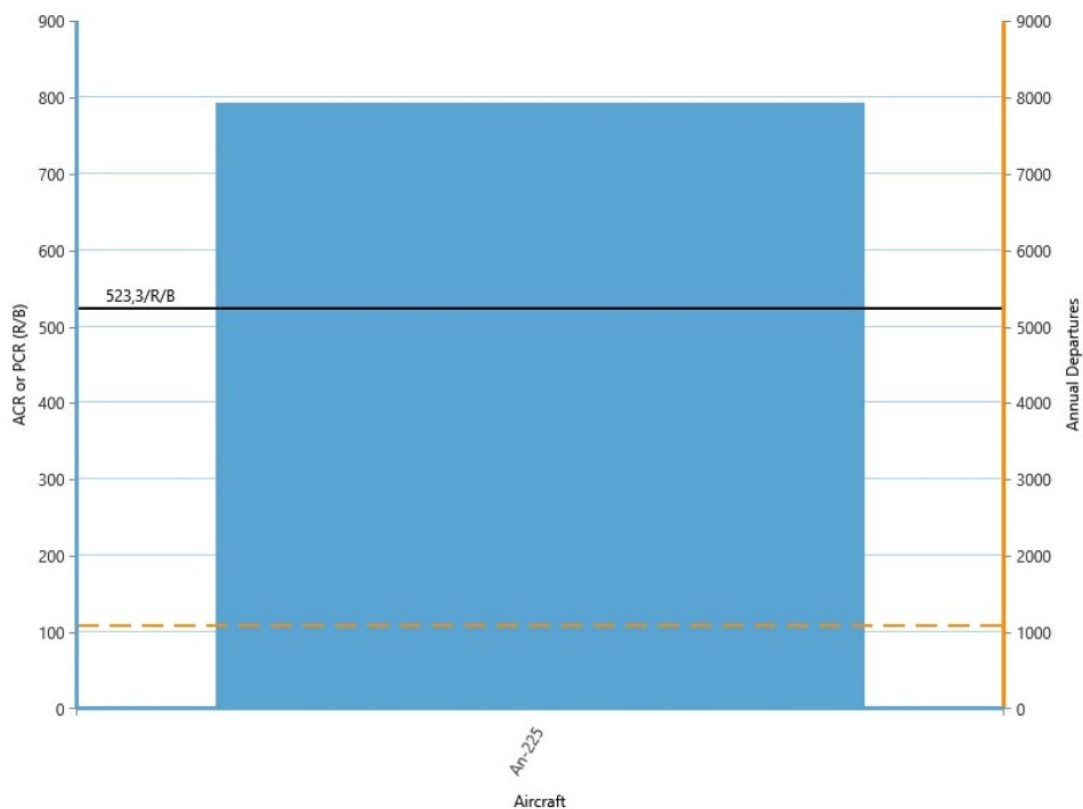


Рис. 6. Результати розрахунку класифікаційного параметра аеродромного покриття при 3-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія» при товщині $t=28$ см верхнього шару бетону класу С32/40

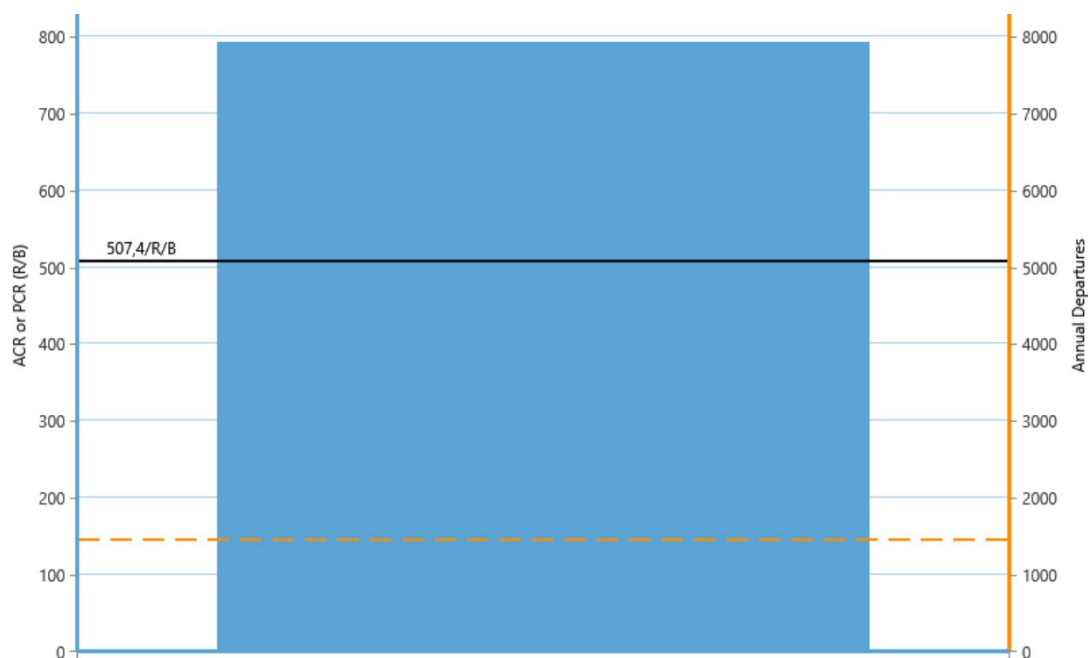


Рис. 7. Результати розрахунку класифікаційного параметра аеродромного покриття при 4-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія» при товщині $t=28$ см верхнього шару бетону класу С32/40

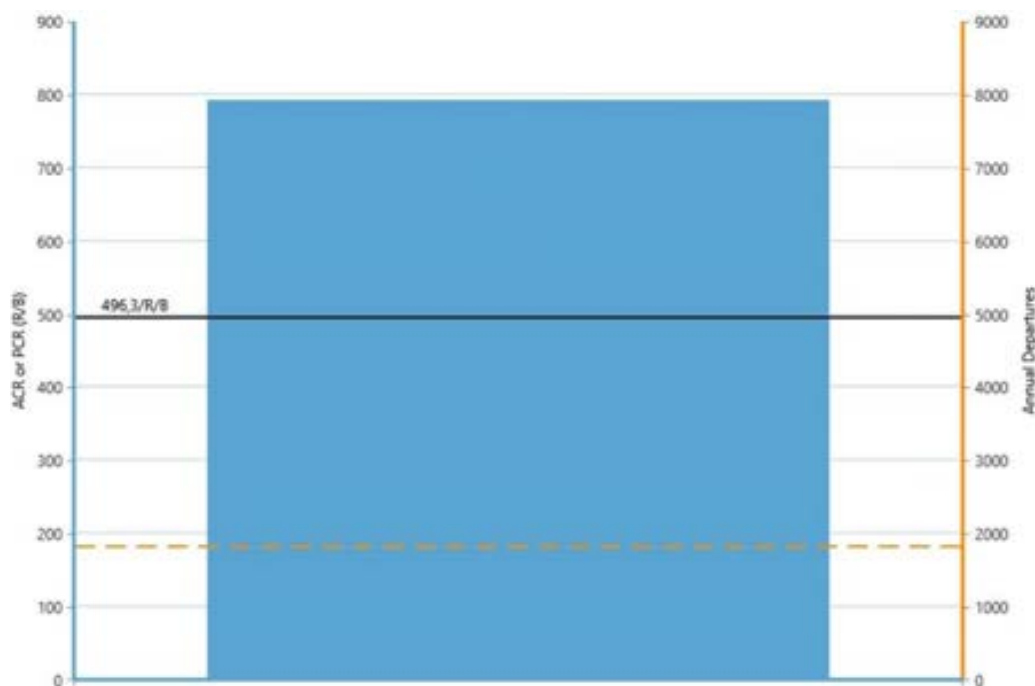


Рис. 8. Результати розрахунку класифікаційного параметра аеродромного покриття при 5-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія» при товщині $t=28$ см верхнього шару бетону класу C32/40

Structure

Job Name: Thickness Design Status Gear Structure

Structure Name: ☒ Include in Summary Report ☐ Add To Batch

Pavement Layers

Pavement Type:

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	k (MN/m ³)	R (MPa)
--> P-501 PCC Surface	350	27 579,04		4,48
P-306 Lean Concrete	220	4 826,33		
P-304 Cement Treated Base	150	3 447,38		
Subgrade		112,60	50,0	

Design Life (Years):

The standard design life for pavement structure is 20 years (1 to 50 allowed).

Results

Calculated Life (Years): Total thickness to the top of the subgrade (mm):

Рис. 9. Результати розрахунку рекомендованої товщини верхнього шару бетону класу C32/40 при 1-му зльоті за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія»

Structure

Job Name: New Job 1 Thickness Design Run

Structure Name: New Structure 1 ☒ Include in Summary Report ☐ Add To Batch

Pavement Layers

Pavement Type: New Rigid

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	k (MN/m ³)	R (MPa)
--> P-501 PCC Surface	368	27 579,04		4,48
P-306 Lean Concrete	220	4 826,33		
P-304 Cement Treated Base	150	3 447,38		
Subgrade		112,60	50,0	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): 20

The standard design life for pavement structure is 20 years (1 to 50 allowed).

Results

Calculated Life (Years): Total thickness to the top of the subgrade (mm): 738

Рис. 10. Результати розрахунку рекомендованої товщини верхнього шару бетону класу C32/40 при 2-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія»

Structure

Job Name: New Job 1 Thickness Design Run

Structure Name: New Structure 1 ☒ Include in Summary Report ☐ Add To Batch

Pavement Layers

Pavement Type: New Rigid

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	k (MN/m ³)	R (MPa)
--> P-501 PCC Surface	378	27 579,04		4,48
P-306 Lean Concrete	220	4 826,33		
P-304 Cement Treated Base	150	3 447,38		
Subgrade		112,60	50,0	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): 20

The standard design life for pavement structure is 20 years (1 to 50 allowed).

Results

Calculated Life (Years): Total thickness to the top of the subgrade (mm): 748

Рис. 11. Результати розрахунку рекомендованої товщини верхнього шару бетону класу C32/40 при 3-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія»

Structure

Job Name: New Job 1 Thickness Design Run

Structure Name: New Structure 1 ☒ Include in Summary Report ☐ Add To Batch

Pavement Layers

Pavement Type: New Rigid

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	k (MN/m ³)	R (MPa)
--> P-501 PCC Surface	386	27 579,04		4,48
P-306 Lean Concrete	220	4 826,33		
P-304 Cement Treated Base	150	3 447,38		
Subgrade		112,60	50,0	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): 20

The standard design life for pavement structure is 20 years (1 to 50 allowed).

Results

Calculated Life (Years): Total thickness to the top of the subgrade (mm): 756

Рис. 12. Результати розрахунку рекомендованої товщини верхнього шару бетону класу C32/40 при 4-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія»

Structure

Job Name: New Job 1 Thickness Design Run

Structure Name: New Structure 1 ☒ Include in Summary Report ☐ Add To Batch

Pavement Layers

Pavement Type: New Rigid

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	k (MN/m ³)	R (MPa)
--> P-501 PCC Surface	391	27 579,04		4,48
P-306 Lean Concrete	220	4 826,33		
P-304 Cement Treated Base	150	3 447,38		
Subgrade		112,60	50,0	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): 20

The standard design life for pavement structure is 20 years (1 to 50 allowed).

Results

Calculated Life (Years): Total thickness to the top of the subgrade (mm): 761

Рис. 13. Результати розрахунку рекомендованої товщини верхнього шару бетону класу C32/40 при 5-х зльотах за добу повітряного судна Ан-225 «Мрія»

Визначається центр ваги перерізу дискретної моделі реальної плити відносно координат ХОУ: $y_1^c = 16,6527\text{см}$; $y_2^c = 8,3478\text{см}$; $y_3^c = 26,8478\text{см}$.

Еквівалентні характеристики умовної плити становлять: $b_l = 100\text{см}$; $h_l = 60\text{см}$; $E_{(e)} = 2752833 \text{ кгс} / \text{см}^2$; $\nu = 0,2349$.

Еквівалентні пневмовідбиткам квадрати та матриці навантажень цього відбитку становлять: $R_e = 0,242 \text{ м}$; $a = R_e \cdot \sqrt{\pi} = 42,89 \text{ см}$. Розрахунковий згинальний момент за аналітичним розрахунком становить $m_d = 73,63 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м}$. Розрахункова схема фрагмента окремо взятих 9 плит аеродромного покриття наведена на рис. 13.

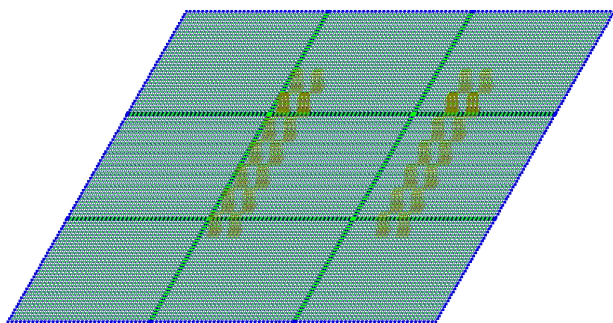


Рис. 14. Розрахункова схема плит кінцевих розмірів 7,5x7,5 м із моделюванням різних граничних умов

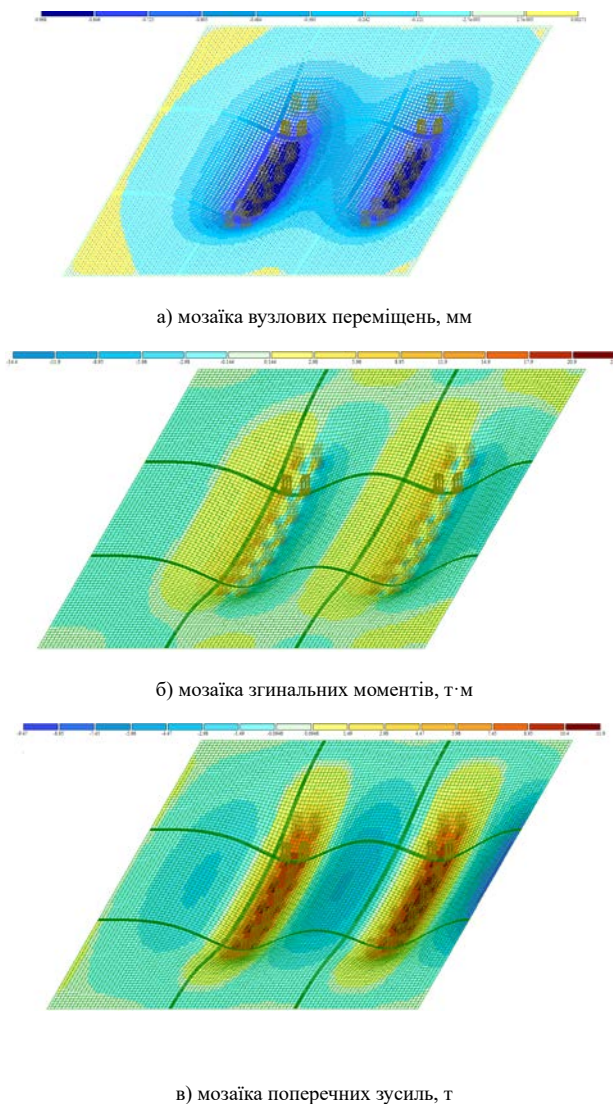
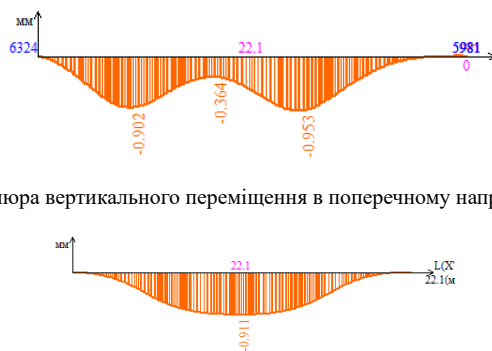


Рис. 15. Ізолінії вузлових переміщень, згинальних моментів та поперечних зусиль у плитах аеродромного покриття

Сіткова область має регулярну нерівномірну структуру із сітковими координатами M_1 , M_2 , M_3 , які змінюються в межах: $M_1=2$; $M_2=115$, $M_3=115$. Сіткова область побудована так, що включає дискретні моделі



а) епюра вертикального переміщення в поперечному напрямку

б) епюра вертикального переміщення в поздовжньому напрямку

Рис. 16. Епюри вертикальних переміщень, мм

чотирнадцятиколісних відбитків шасі літака Ан-225 «Мрія». Розміри сіткової області $M_1 \times M_2 \times M_3$, тобто $2 \times 115 \times 115$, усього вузлів $N_v = 26\,450$, що відповідає системі рівнянь рівноваги $k = N_v \cdot 3 = 26\,450 \cdot 3 = 79\,350$ (без урахування накладених зв'язків).

Результати розрахунку аеродромного покриття за розрахунковою схемою (рис. 13) під час моделювання стикових з'єднань нерозрізної схеми за рахунок граничних умов наведено на рис. 14 та 15 у вигляді ізоліній та епюр переміщень u_N^1 , згинальних моментів M_N^{22} та поперечних зусиль Q_N^{22} .

Максимальне вертикальне переміщення становить 0,968 мм і знаходиться під центром відбитку коліс повітряного судна Ан-225 «Мрія». Максимальний згинальний момент становить $M_N^{22} = 11,9 \text{ т} \cdot \text{м} / \text{м}$, а максимальне поперечне зусилля – $Q_N^{22} = 14,4 \text{ т}$.

В області стикових з'єднань плит значення згинальних моментів практично дорівнюють нулю, що свідчить про адекватне моделювання стикових з'єднань аеродромних плит покриттів у розрахунковій схемі.

Результати розрахунку на міцність розглядуваного двошарового бетонного покриття свідчать про універсальність методу скінченних елементів, що дає змогу враховувати:

- адекватність стикових з'єднань плит на розподіл внутрішніх зусиль;
- довірну схему впливу колісного шасі будь-якого типу повітряного судна, а також оцінити характер розподілу внутрішніх зусиль у плиті та реакції ґрунтової основи.

ВИСНОВКИ

У ході проведених досліджень було здійснено комплексний аналіз напружено-деформованого стану жорстких аеродромних покриттів під дією навантажень від надважкого повітряного судна Ан-225 «Мрія». Отримані

результати засвідчили, що наявна конструкція злітно-посадкової смуги Міжнародного аеропорту «Гостомель» не забезпечує необхідного рівня несної здатності навіть за мінімальної інтенсивності експлуатації. Це підтверджено розрахунками класифікаційних параметрів PCR.

Визначено, що реальні експлуатаційні навантаження суттєво перевищують допустимі параметри для існуючої товщини верхнього шару цементобетонного покриття. Зокрема, навіть за одного зльоту Ан-225 «Мрія» на добу класифікаційний параметр аеродромного покриття не відповідає вимогам ICAO. Це зумовлює необхідність збільшення товщини верхнього шару бетону класу С32/40 до 350–391 мм залежно від інтенсивності руху, що підтверджує доцільність упровадження нових конструктивних рішень під час відновлення покриттів.

Запропоновані у роботі конструктивні рішення базуються на поєднанні методу класифікаційних параметрів ACR-PCR та методу скінченних елементів, що дає змогу комплексно врахувати вплив просторового навантаження від повітряних суден, особливості ґрунтових основ та стикових з'єднань плит. Такий підхід забезпечує більш високу точність, оцінку та надійність прогнозування працездатності аеродромних покриттів у довгостроковій перспективі.

Практична значущість отриманих результатів полягає у тому, що вони можуть бути використані під час відновлення Міжнародного аеропорту «Гостомель», а також під час проектування та експлуатації інших аеродромних комплексів, призначених для обслуговування надважких повітряних суден. Таким чином, проведене дослідження не лише підтвердило обмеження існуючих конструкцій, а й надало реальні рекомендації щодо їх удосконалення з урахуванням сучасних технічних та експлуатаційних вимог.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Гамеляк І.П., Дмитриченко А.М. Система управління техніко-експлуатаційним станом аеродромного покриття. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 113. Ч. 2. С. 141–155.
- [2] Гамеляк І.П., Дмитриченко А.М., Райковський В.Ф. Концепція моніторингу та діагностики штучних аеродромних покриттів. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2023. № 1. С. 14–24.
- [3] Гамеляк І.П., Дмитриченко А.М., Райковський В.Ф. Удосконалення методики оцінювання стану аеродромного покриття. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2023. № 2. С. 20–32.
- [4] Родченко О. В. Комп'ютерні технології проектування двошарових жорстких аеродромних

покриттів. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2020. № 2. С. 19–23.

[5] Родченко О.В. Удосконалення методу визначення несучої здатності двошарових монолітних цементобетонних аеродромних покриттів. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2017. № 4. С. 20–23.

[6] Талах С. М., Дубик О. М., Лисницька К. М., Ільченко В. В. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану жорстких аеродромних покриттів при взаємодії зі слабкою ґрунтовою основою. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2019. № 1(52). С. 124–132.

[7] Dubyk O. Improving the monitoring of the operational and technical condition of rigid airfield pavements. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2021. № 2(57). С. 59–67.

[8] Annex 14: Aerodromes. Volume I: Aerodromes Design and Operations. 9th Edition. July 2022. URL: <https://news.mcaa.gov.mn/uploads/bookSubject/2022-10/63587f6c9ed35.pdf>

[9] Cai J., Wong L.N.Y., Yan H.W. Dynamic response of airport concrete pavement to impact loading. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 594–597. P. 1395–1401. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1395.

[10] ICAO. Doc 9157 Aerodrome Design Manual. Part 3: Pavements. 3rd Edition. 2022 (Unedited). URL: <https://www.scribd.com/document/718551321/Aerodrome-Design-Manual-Part-3-Pavements-Doc-9157-Part-3-Edition>

[11] Kavin Mathi K., Nallasivam K. Static analysis of rigid airfield pavement using finite element method vs closed-form solution. *Computational Engineering and Physical Modeling*. 2022. Vol. 5, № 4. С. 23–50. DOI: 10.22115/cepm.2023.354941.1219.

[12] Kavin Mathi K., Nallasivam K. Dynamic and fatigue life prediction analysis of airfield runway rigid pavement using finite element method. *Computational Engineering and Physical Modeling*. 2022. Vol. 5, № 3. P. 1–23. DOI: 10.22115/CEPM.2022.347999.1215.

[13] Liu P., Wang C., Lu W., Moharekpour M., Oeser M., Wang D. Development of an FEM-DEM model to investigate preliminary compaction of asphalt pavements. *Buildings*. 2022. Vol. 12, № 7. Article 932. DOI: 10.3390/buildings12070932.

[14] Rahmawati A., Rahmawati F. Runway pavement strength evaluation of Yogyakarta International Airports depends on ICAO (ACN/PCN) method with COMFAA 3.0 software. *International Journal of Integrated Engineering*. 2022. Vol. 14. P. 350–359.

[15] Rezaei-Tarahomi A., Kaya O., Ceylan H., Kim S., Gopalakrishnan K., Brill D. R. Development of rapid three-dimensional finite-element based rigid airfield pavement foundation response and moduli prediction models. *Transportation Geotechnics*. 2017. Vol. 13. P. 81–91. DOI: 10.1016/j.trgeo.2017.08.011.

[16] Shafabakhsh G., Kashi E., Tahani M. Analysis of runway pavement response under aircraft moving load by FEM. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2018. Vol. 16. P. 233–243. DOI: 10.1108/JEDT-09-2017-0093.

[17] Xu B., Zhang W., Mei J., Yue G., Yang L. Optimization of structure parameters of airfield jointed concrete pavements under temperature gradient and

aircraft loads. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Article ID 3251590. 11 p. DOI: 10.1155/2019/3251590.

[18] Yuan J., Li W., Li Y., Ma L., Zhang J. Fatigue models for airfield concrete pavement: literature review and discussion. *Materials*. 2021. Vol. 14. Article 6579. DOI: 10.3390/ma14216579.

REFERENCES

[1] Hamelyak, I.P., & Dmytrychenko, A.M. (2023). Systema upravlinnya tekhniko-ekspluatatsiynym stanom aerodromnoho pokryttya [Management system for the technical and operational condition of the airfield pavement]. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo: naukovy zhurnal*, 113(2), 141–155 [in Ukrainian].

[2] Hamelyak, I.P., Dmytrychenko, A.M., & Raykovs'kyi, V.F. (2023). Kontsepsiya monitoryngu ta diahnostyky shtuchnykh aerodromnykh pokryttiv [Concept of monitoring and diagnostics of artificial airfield pavements]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, (1), 14–24. [in Ukrainian]

[3] Hamelyak, I.P., Dmytrychenko, A.M., & Raykovs'kyi, V.F. (2023). Udoshkonalennya metody otsynuvannya stanu aerodromnoho pokryttya [Improving the methodology for assessing the condition of airfield pavement]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, (2), 20–32. [in Ukrainian]

[4] Rodchenko, O.V. (2020). Komp'yuterni tekhnolohiyi proektuvannya dvosharovykh zhorstkykh aerodromnykh pokryttiv [Computer technologies for designing two-layer rigid airfield pavements]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, (2), 19–23. [in Ukrainian]

[5] Rodchenko, O.V. (2017). Udoshkonalennya metody vyznachennya nesuchoyi zdatsnosti dvosharovykh monolitnykh tsementobetonnykh aerodromnykh pokryttiv [Improvement of the method for determining the bearing capacity of two-layer monolithic cement-concrete airfield pavements]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, (4), 20–23. [in Ukrainian]

[6] Talakh, S.M., Dubyk, O.M., Lysnytska, K.M., & Ilchenko, V.V. (2019). Chyselnemodelivannianapruzhenodeformovanoho stanu zhorstkykh aerodromnykh pokryttiv pry vzaiemodii zi slabkoii gruntovoiu osnovoiu [Numerical modeling of the stress-strain state of rigid airfield pavements in interaction with a weak soil base]. *Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo: zb. nauk. prats*, (1(52)), 124–132. [in Ukrainian]

[7] Dubyk, O. (2021). Improving the monitoring of the operational and technical condition of rigid airfield pavements. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 59–67 [in English].

[8] International Civil Aviation Organization. (2022). Annex 14: Aerodromes. Volume I: Aerodromes design and operations (9th ed.). Retrieved from: <https://>

news.mcaa.gov.mn/uploads/bookSubject/2022-10/63587f6c9ed35.pdf [in English].

[9] Cai, J., Wong, L.N.Y., & Yan, H.W. (2012). Dynamic response of airport concrete pavement to impact loading. *Advanced Materials Research*, 594–597, 1395–1401. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1395> [in English].

[10] International Civil Aviation Organization. (2022). Doc 9157 Aerodrome design manual. Part 3: Pavements (3rd ed.). Retrieved from: <https://www.scribd.com/document/718551321/Aerodrome-Design-Manual-Part-3-Pavements-Doc-9157-Part-3-Edition> [in English].

[11] Kavin Mathi, K., & Nallasivam, K. (2022). Static analysis of rigid airfield pavement using finite element method vs closed-form solution. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 5(4), 23–50. <https://doi.org/10.22115/cepm.2023.354941.1219> [in English].

[12] Kavin Mathi, K., & Nallasivam, K. (2022). Dynamic and fatigue life prediction analysis of airfield runway rigid pavement using finite element method. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 5(3), 1–23. <https://doi.org/10.22115/CEPM.2022.347999.1215> [in English].

[13] Liu, P., Wang, C., Lu, W., Moharekpour, M., Oeser, M., & Wang, D. (2022). Development of an FEM-DEM model to investigate preliminary compaction of asphalt pavements. *Buildings*, 12(7), 932. <https://doi.org/10.3390/buildings12070932> [in English].

[14] Rahmawati, A., & Rahmawati, F. (2022). Runway pavement strength evaluation of Yogyakarta International Airports depends on ICAO (ACN/PCN) method with COMFAA 3.0 software. *International Journal of Integrated Engineering*, 14, 350–359 [in English].

[15] Rezaei-Tarohmi, A., Kaya, O., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., & Brill, D.R. (2017). Development of rapid three-dimensional finite-element based rigid airfield pavement foundation response and moduli prediction models. *Transportation Geotechnics*, 13, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.011> [in English].

[16] Shafabakhsh, G., Kashi, E., & Tahani, M. (2018). Analysis of runway pavement response under aircraft moving load by FEM. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 16, 233–243. <https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2017-0093> [in English].

[17] Xu, B., Zhang, W., Mei, J., Yue, G., & Yang, L. (2019). Optimization of structure parameters of airfield jointed concrete pavements under temperature gradient and aircraft loads. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, Article ID 3251590, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/3251590> [in English].

[18] Yuan, J., Li, W., Li, Y., Ma, L., & Zhang, J. (2021). Fatigue models for airfield concrete pavement: Literature review and discussion. *Materials*, 14, Article 6579. <https://doi.org/10.3390/ma14216579> [in English].

ABSTRACT

Dubyk O., Dudar T., Chernyshova O., Osovskiy I. Proposals for airport restoration.

The article presents an analysis of the stress-strain state of rigid airfield pavement structures under the load of the heavy aircraft An-225 Mriya. The results of

determining the bearing capacity and calculating the stress–strain state of rigid airfield pavements were obtained. Based on the performed calculations, constructive solutions and proposals for the restoration of rigid airfield pavements are provided. Isolines of vertical displacements, bending moments, and shear forces in rigid airfield pavement slabs under the load of the An-225 aircraft were obtained. The values of the classification parameters (PCR) of rigid airfield pavements were determined. A set of numerical experimental studies made it possible to solve the scientific problem of assessing the stress–strain state of rigid airfield pavement structures, taking into account the spatial load of aircraft.

The purpose of the study is to determine the bearing capacity and investigate the stress–strain state of rigid airfield pavement structures considering real spatial loads and soil foundation properties, on the basis of which constructive proposals and engineering solutions for airfield pavements are provided.

Methodology. The research methods include literature review, the ACR–PCR classification parameter method, and the finite element method.

Results. Calculations of rigid airfield pavement structures under the load of the heavy An-225 aircraft were performed. Numerical experiments using the finite element method and the ACR–PCR method made it possible to determine the bearing capacity of the pavement and assess its stress–strain state. The calculations showed that the existing runway structure of Hostomel International Airport does not ensure the operation of the An-225 even with minimal take-off intensity. The need to increase the thickness of the upper layer of cement concrete pavement to 350–391 mm depending on the number of take-offs was established. The proposed constructive solutions are aimed at improving the strength and durability of airfield pavements, taking into account real spatial loads and soil foundation properties.

Scientific novelty. The scientific novelty lies in the implementation of a fundamentally new approach to the study of the stress–strain state of rigid airfield pavements based on the finite element method, considering real spatial loads and the influence of soil foundations.

Practical relevance. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the results of stress–strain calculations of rigid airfield pavement structures under real spatial aircraft loads in the design and construction of airfield elements.

Keywords: airfield pavements, airfield elements, aircraft, finite element method, stress–strain state, ACR–PCR method, soil foundations.

AUTHOR'S NOTE:

Dubyk Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Air Transport Infrastructure, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: oleksandr.dubyk@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0001-8082-7603.

Dudar Tamara, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor, Head of the Department of Ecology, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: tamara.dudar@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0003-3114-9732.

Chernyshova Oksana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Air Transport Infrastructure, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: oksana.chernyshova@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153.

Osovsky Ivan, Postgraduate Student the Department of Air Transport Infrastructure, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: 5177530@stud.kai.edu.ua, orcid: 0009-0003-8294-6990.

Стаття подана до редакції 29.07.2025 р.

Стаття прийнята до опублікування 28.08.2025 р.

Стаття опублікована 30.10.2025 р.