

УДК 656.71-048:38(045)

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.38.2.11>

РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ПЕРЕВІРКА МІЦНОСТІ ТРУБ КАБЕЛЬНОЇ КАНАЛІЗАЦІЇ У КОНСТРУКЦІЯХ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

**Дубик Олександр Миколайович¹, Дашкова Світлана Вікторівна²,
Данілін Олексій Миколайович³**

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 асистент кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: svitlana.dashkova@npp.kai.edu.ua, orcid: 0009-0002-8425-0877

³ аспірант кафедри економіки будівництва,
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: alexnikdanilin@gmail.com, orcid: 0009-0004-1727-8030

Анотація. У статті представлено результати дослідження напружено-деформованого стану конструкцій аеродромних покриттів із розташованими в їхній товщі трубами кабельної каналізації. Проаналізовано умови взаємодії елементів конструкції за дії власної ваги матеріалів та змінних експлуатаційних навантажень від сучасних повітряних суден великої злітної маси. Особливу увагу приділено впливу положення труб у шарах покриття на розподіл напружень і деформацій, а також на загальну несну здатність конструкції.

Дослідження виконано з використанням чисельного моделювання у програмному комплексі SCAD Office. Проведено перевірку міцності труб і обойм, визначено граничні значення напружень та деформацій, отримано залежності між геометричними параметрами системи та її несною здатністю. Результати свідчать, що за умови дотримання розрахованих параметрів товщини стінок труб та захисних шарів покриття забезпечується надійна експлуатація кабельної каналізації без ризику втрати працездатності.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих даних під час проектування та реконструкції аеродромних покриттів для забезпечення їх довговічності та безпечної експлуатації в умовах дії інтенсивних авіаційних навантажень.

Сучасні умови експлуатації аеродромів пов'язані з високими навантаженнями від повітряних суден нового покоління. Це зумовлює необхідність підвищення надійності інженерних мереж, зокрема кабельної каналізації, що влаштовується у конструкціях покриттів. Недостатня увага до їхнього напружено-деформованого стану може призвести до пошкоджень і порушення функціонування систем.

Мета. Оцінити напружено-деформований стан та перевірити міцність труб кабельної каналізації у конструкціях аеродромних покриттів для різних варіантів розташування з урахуванням дії постійних та змінних навантажень.

Методологія. Дослідження ґрунтуються на використанні методу скінченних елементів під час розрахунку напружено-деформованого стану труб кабельної каналізації у конструкціях аеродромних покриттів.

Результати. Розрахунки показали, що досліджувані конструкції кабельної каналізації відповідають вимогам міцності та експлуатаційної надійності. Товщина стінок труб і параметри обойм забезпечують допустимі напруження та деформації під дією навантажень від сучасних літаків (A321 NEO XLR, B737-9 MAX). Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування проектних рішень у будівництві та модернізації аеродромних покриттів.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в удосконаленні існуючих методик оцінювання напружено-деформованого стану труб кабельної каналізації у конструкціях аеродромних покриттів.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів під час реконструкції, нового будівництва аеродромів.

Ключові слова: аеродромне покриття, кабельна каналізація, напружено-деформований стан, міцність, чисельне моделювання, SCAD Office.

ВСТУП

В умовах повномасштабного вторгнення та тривалих воєнних дій значна частина аеродромів України зазнала пошкоджень різного ступеня руйнування. Це стосується як основних елементів злітно-посадкових смуг і руліжних доріжок, так і систем енергопостачання, навігації, зв'язку та аеродромного освітлення. У зв'язку із цим постає актуальне завдання відновлення та модернізації.

Сучасний етап розвитку авіаційної галузі України характеризується необхідністю відновлення та модернізації аеродромної інфраструктури, значна частина якої зазнала руйнувань унаслідок воєнних дій. Одним із важливих напрямів технічного переоснащення є забезпечення надійності інженерних мереж, розташованих у товщі аеродромних покриттів, зокрема систем кабельної каналізації, що забезпечують функціонування систем зв'язку, навігації, енергопостачання та аеродромного освітлення. Надійність цих систем безпосередньо впливає на безпечну експлуатацію повітряних суден і ефективність роботи всього аеродрому.

Під дією зростаючих навантажень від сучасних повітряних суден великої злітної маси відбувається складна взаємодія між шарами аеродромного покриття, трубами кабельної каналізації та основою. Недостатнє урахування напружено-деформованого стану елементів таких конструкцій може призвести до порушення їхньої цілісності, втрати працездатності або передчасного виходу з ладу. Саме тому виникає потреба у проведенні поглиблених розрахунків та моделюванні процесів, які визначають поведінку трубопроводних систем під впливом постійних і змінних навантажень.

Сьогодні існує низка досліджень, присвячених аналізу жорстких аеродромних

покриттів і взаємодії їх із ґрунтовими основами, однак питання оцінки напружено-деформованого стану труб кабельної каналізації в умовах складного багат шарового середовища залишається недостатньо висвітленим. Це особливо актуально для українських аеродромів, де під час реконструкції необхідно забезпечити сумісність нових матеріалів і конструкцій із наявними інженерними комунікаціями.

У зв'язку із цим у роботі проведено розрахунок напружено-деформованого стану труб кабельної каналізації, розташованих у конструкціях аеродромних покриттів, а також перевірку їхньої міцності для різних варіантів розташування труб у шарах покриття з урахуванням дії власної ваги матеріалів і навантажень від сучасних літаків типу A321 NEO XLR та B737-9 MAX. Дослідження виконано із застосуванням методу скінченних елементів у програмному комплексі SCAD Office, що дало змогу отримати детальну картину розподілу напружень, деформацій і критичних зон у конструкції.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Труби кабельної каналізації під аеродромними покриттями розглядають як нескінченну балку, яка знаходиться на пружній основі, котра характеризується еквівалентним коефіцієнтом постелі. Визначення внутрішніх зусиль у трубах кабельної каналізації зводиться до розрахунку балки-обойми на пружній основі за дії колісного навантаження від повітряних суден. Динамічний вплив навантаження розраховують уведенням у розрахунок коефіцієнта динамічності.

Визначенню напружено-деформованого стану конструкцій аеродромних покриттів, труб кабельної каналізації та водостічно-дренажної системи під аеродромними покриттями

присвячено публікації [1–20]. Міцність таких конструкцій значною мірою залежить від механічних властивостей ґрунтових основ. Механічні властивості ґрунтових основ суттєво змінюються протягом року. Ґрунтові основи піддаються зволоженню, просиханню, промерзанню та відтаванню поверхні товщі. Збільшення вологості ґрунтів призводить до зниження їхньої несної здатності. Основи покриттів в окремі періоди року різко змінюють несну здатність та стають неоднорідними за глибиною. У працях багатьох учених [1–10] згадується про необхідність проектування покриттів аеродромів виходячи з реального стану ґрунтової основи, коли її несна здатність є найбільш низькою. Точне врахування природних механічних властивостей ґрунтів практично є неможливим. Під час розрахунку конструкцій доводиться вводити схематизацію механічних властивостей ґрунтів шляхом заміни природної ґрунтової основи деякою розрахунковою моделлю, властивості якої відомі. Досліди із вдавлюванням штампів у розпушені, пористі ґрунти поверхневої товщі вказують на переважання залишкових деформацій різко вираженого місцевого характеру. Найбільш поширена модель Вінклера, у якій осідання штампів пропорційне навантаженню, а деформації моделі пружні та після зняття навантаження відновлюються [1; 3; 6; 8]. Вони мають місцевий характер, розвиваються безпосередньо під штапом, не поширюючись у сторони. Сьогодні існує багато різноманітних моделей ґрунтової основи. Для деяких із них розроблено методи розрахунку, доведені до стадії практичної реалізації.

МЕТА

На підставі теоретичних досліджень необхідно дослідити напружено-деформований стан труб кабельної каналізації у конструкціях аеродромних покриттів для двох варіантів розташування кабельної каналізації від дії власної ваги матеріалів аеродромного покриття та навантаження від повітряних суден А 321 NEO XLR та В 737-9 MAX.

Постановка проблеми. Необхідно виконати аналіз напружено-деформованого стану та перевірити на міцність труби кабельної каналізації у конструкціях аеродромних покриттів для двох варіантів розташування кабельної каналізації від дії власної ваги матеріалів аеродромного покриття та навантаження від повітряних суден А 321 NEO XLR та В 737-9 MAX (рис. 1 а, б).

Розрахункова схема зводиться до балки-обойми скінченної довжини на пружній основі, схему навантаження якої та граничні

умови наведено на рис. 2. Для визначення тиску і погонного навантаження на труби кабельної каналізації розглядається переріз аеродромного покриття (варіант № 1):

- асфальтобетон гарячий дрібнозернистий товщиною 15 см;
- асфальтобетон гарячий крупнозернистий товщиною 15 см;
- щебінь, просочений бітумом способом просочення, товщиною 8 см кожний.

Ураховуючи питому вагу матеріалів шарів аеродромного покриття, рівномірно розподілене навантаження від матеріалів на 1 погонний метр балки-обойми становить:

$$q = P_0 \cdot b = 1,211 \cdot 0,21 = 2,5 \text{ кгс / см пог}, \quad (1)$$

де q – рівномірно розподілене навантаження на 1 погонний метр балки-обойми; P_0 – тиск від власної ваги матеріалів аеродромного покриття (ураховуючи, що коефіцієнт динамічності – $k_d = 1,25$); b – ширина перерізу балки-обойми.

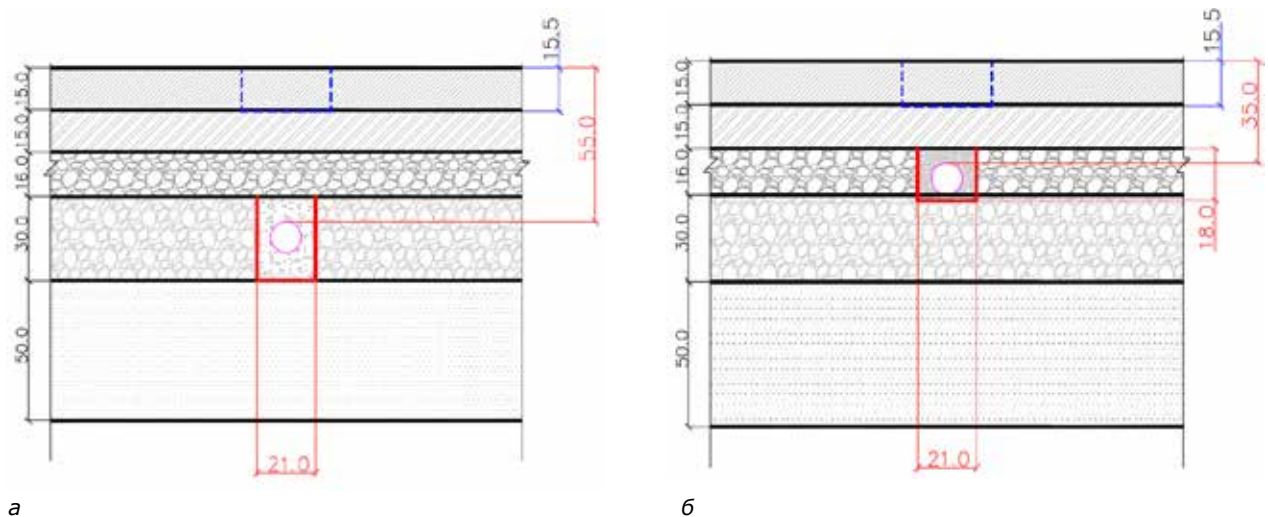
Для визначення тиску і погонного навантаження на поверхню труби за варіантом № 2 розглядається такий переріз аеродромного покриття:

- асфальтобетон гарячий щільний дрібнозернистий товщиною 15 см;
- асфальтобетон гарячий щільний крупнозернистий товщиною 15 см.

Рівномірно розподілене навантаження від матеріалів покриття на 1 погонний метр балки-обойми становить $q = 1,81 \text{ кгс / см пог}$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розрахункові схеми балки-обойми за двома варіантами конструктивних рішень наведено на рис. 3 а, б. Дійсні перерізи балок-обойм наведено на рис. 4. Геометричні характеристики перерізів балок-обойм за варіантами № 1 та № 2 наведено в табл. 1. Результати розрахунку переміщень, поперечних зусиль та згинальних моментів у вузлах 1–33 від комбінації навантажень наведено в табл. 2 та на рис. 5–8. За першим варіантом розрахунку максимальний згинальний момент у найбільш небезпечному перерізі балки-обойми становить: $M_{max} = 35,1 \text{ кН} \cdot \text{м}$, а максимальне розрахункове напруження є меншим, ніж допустиме значення розрахункового опору матеріалу дійсного перерізу: $\sigma_{max} = 12,154 \text{ МПа} \leq R = 26,193 \text{ МПа}$. При цьому необхідна товщина стінки труби повинна становити не менше ніж 4 мм. Відносний вертикальний прогин труби за варіантом 1 є меншим, ніж його допустиме значення: $\delta_1 = 5,9 \cdot 10^{-6} \% \leq 3,75\%$.



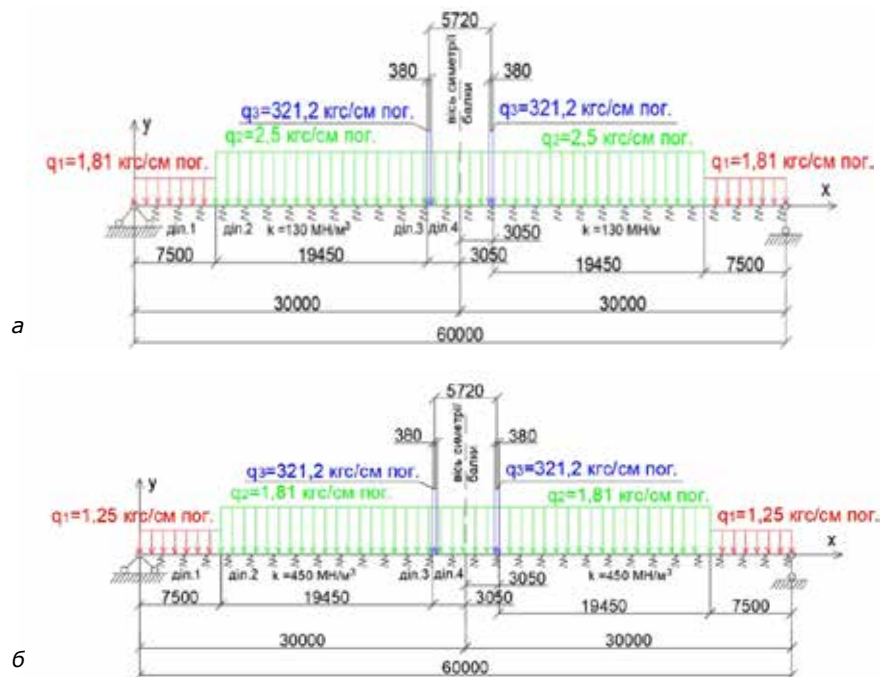
а

б

Рис. 1. Варіанти влаштування кабельної каналізації у конструкціях аеродромних покриттів
Джерело: розроблено автором.



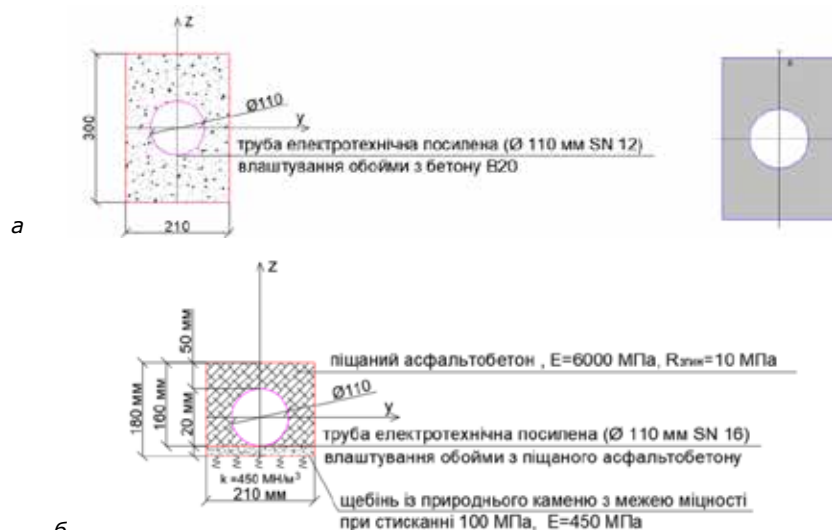
Рис. 2. Розрахункова схема балки-обойми скінченної довжини на пружній основі,
схема навантаження та граничні умов
Джерело: розроблено автором.



а

б

Рис. 3. Розрахункова схема балки-обойми як скінченно-мірної шарнірно-опертої балки
на пружній основі: а – варіант № 1; б – варіант № 2
Джерело: розроблено автором.



б

Рис. 4. Дійсні перерізи балки-обойми: а – варіант № 1; б – варіант № 2

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 1.

Геометричні характеристики балок-обойм

Назва параметра	Од. вим.	Значення	
		Варіант 1	Варіант 2
Площа поперечного перерізу	см ²	537.391	285.391
Умовна площа зрізу вздовж осі U	см ²	348.157	169.776
Умовна площа зрізу вздовж осі V	см ²	317.294	149.015
Кут нахилу головних осей інерції	град	0	90
Момент інерції відносно центральної осі Y1 паралельної осі Y	см ⁴	46567.41	9247.424
Момент інерції відносно центральної осі Z1 паралельної осі Z	см ⁴	22469.91	13208.91
Момент інерції за вільного крутіння	см ⁴	50317.14	17189.35
Секторіальний момент інерції	см ⁶	1246524	245096.8
Радіус інерції відносно осі Y1	см	9.309	5.692
Радіус інерції відносно осі Z1	см	6.466	6.803
Максимальний момент опору відносно осі U	см ³	3104.494	1257.992
Мінімальний момент опору відносно осі U	см ³	3104.494	1257.992
Максимальний момент опору відносно осі V	см ³	2139.992	1086.239
Мінімальний момент опору відносно осі V	см ³	2139.992	974.773
Пластичний момент опору відносно осі U	см ³	4511.61	1771.11
Пластичний момент опору відносно осі V	см ³	3094.11	1450.206
Максимальний момент інерції	см ⁴	46567.41	13208.91
Мінімальний момент інерції	см ⁴	22469.91	9247.424
Максимальний радіус інерції	см	9.309	6.803
Мінімальний радіус інерції	см	6.466	5.692
Ядрова відстань вздовж позитивного напрямку осі Y(U)	см	3.982	3.806
Ядрова відстань вздовж негативного напрямку осі Y(U)	см	3.982	3.416
Ядрова відстань вздовж позитивного напрямку осі Z(V)	см	5.777	4.408
Ядрова відстань вздовж негативного напрямку осі Z(V)	см	5.777	4.408
Координата центру мас по осі Y	см	0	0
Координата центру мас по осі Z	см	0	0
Координата центру згину по осі Y	см	7.271e-06	1.079e-04
Координата центру згину по осі Z	см	1.148e-04	1.468
Периметр	см	136.336	112.336
Внутрішній периметр	см	34.336	34.336
Зовнішній периметр	см	102	78
Полярний момент інерції	см ⁴	69037.32	22456.33
Полярний радіус інерції	см	11.334	8.871
Полярний момент опору	см ³	3770.505	1586.917

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 2.

Значення переміщень, поперечних зусиль Q_z та згинальних моментів M_y

№ вузла	Вертикальні переміщення, u_z , мм		Поперечне зусилля, Q_z , кН		Згинальний момент, M_y , кН·м	
	В. № 1	В. № 2	В. № 1	В. № 2	В. № 1	В. № 2
1	-0,1	-0,01	0	0	0	0
2	-0,1	-0,01	0	0	0	0
3	-0,1	-0,01	0	0	0	0
4	-0,1	-0,01	0	-0,02	-0,05	-0,01
5	-0,1	-0,02	0,2	-0,02	0	0,01
6	-0,1	-0,02	0	0	0,04	0
7	-0,1	-0,02	0	0	0	0
8	-0,1	-0,02	0	0	0	0
9	-0,1	-0,02	0	0	0	0
10	-0,1	-0,02	0	0	-0,01	0
11	-0,1	-0,02	0,1	0	0,02	0,001
12	-0,1	-0,02	0,1	0	0,3	0,001
13	-0,01	-0,02	-2	-2,54	-0,9	0,446
14	-0,4	0,101	-1,5	60,3	-7,2	18,12
15	-1,9	-0,95	-59,6	-59,6	35,1	18,12
16	-0,6	0,058	-4,9	4,48	-6,6	-1,28
17	0,01	-0,03	0	-4,48	-6,8	-1,28
18	-0,6	0,058	4,9	59,6	-6,6	18,12
19	-1,9	0,955	-60,4	-60,3	35,1	18,12
20	-0,4	0,101	1,5	2,54	-7,2	0,446
21	-0,01	-0,02	2	-0,02	-0,9	-0,04
22	-0,1	-0,02	-0,1	0	0,3	0,001
23	-0,1	-0,02	-0,1	0	0,02	0
24	-0,1	-0,02	0	0	-0,01	0
25	-0,1	-0,02	0	0	0	0
26	-0,1	-0,02	0	0	0	0
27	-0,1	-0,02	0,005	0	0	0
28	-0,1	-0,02	0,043	0,02	0,04	0,01
29	-0,1	-0,02	0,003	0,02	-0,1	-0,01
30	-0,1	-0,01	0,043	0	-0,04	0,001
31	-0,1	-0,01	0,007	0	0	0
32	-0,1	-0,01	0	0	0	0
33	-0,1	-0,01	0	0	0	0

Джерело: розроблено автором.

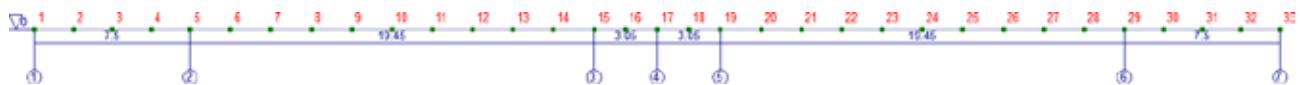


Рис. 5. Нумерація вузлів відповідно до розрахункової схеми балки-обойми

Джерело: розроблено автором.

Таким чином, усі критерії міцності балки-обойми за варіантом 1 виконуються. За другим варіантом розрахунку максимальний згинальний момент у найбільш небезпечному перерізі балки-обойми становить: $M_{max}=18.1 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Усі критерії міцності балки-обойми за варіантом № 2 виконуються.

ВИСНОВКИ

Для вирішення поставленого завдання оцінювання напружено-деформованого стану та перевірки міцності труб кабельної

каналізації у роботі виконано аналітичні та чисельні розрахунки з використанням сертифікованого програмного комплексу SCAD Office. При цьому розглянуто чотири варіанти влаштування труб кабельної каналізації від дії власної ваги матеріалів аеродромного покриття та навантаження від повітряних суден А 321 NEO XLR та В 737-9 MAX:

– варіант 1: труба електротехнічна, посилена, поліетиленова, діаметром 110 мм, кільцевою жорсткістю Sn12. Під трубу влаштовується бетонна обойма розмірами 21,0х30,0 см із бетону класу В20;

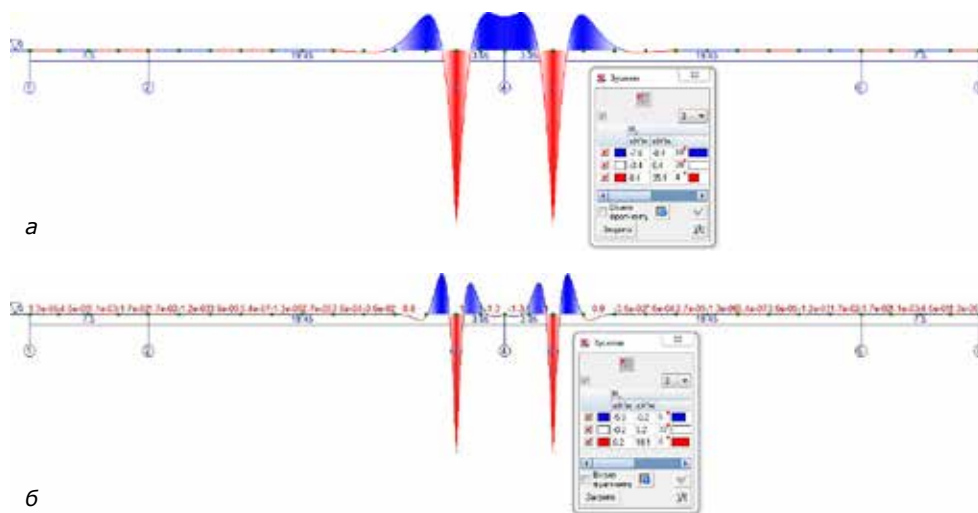


Рис. 6. Розподіл згинальних моментів від суми всіх навантажень: а – для варіанта № 1; б) – для варіанта № 2
Джерело: розроблено автором.

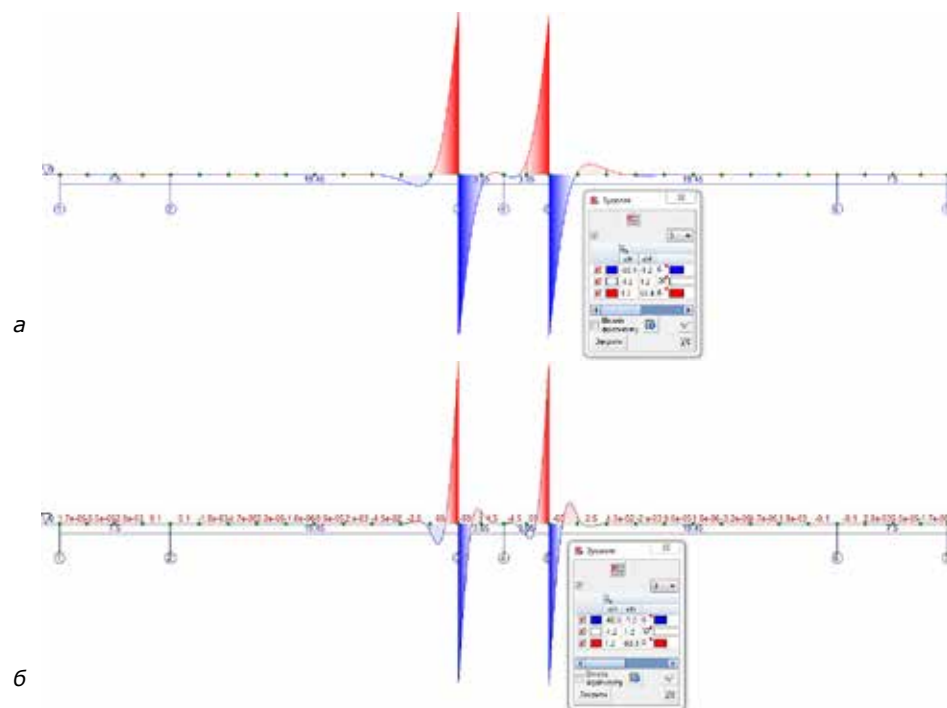


Рис. 7. Розподіл поперечних зусиль від суми всіх навантажень: а – для варіанта № 1; б – для варіанта № 2
Джерело: розроблено автором.

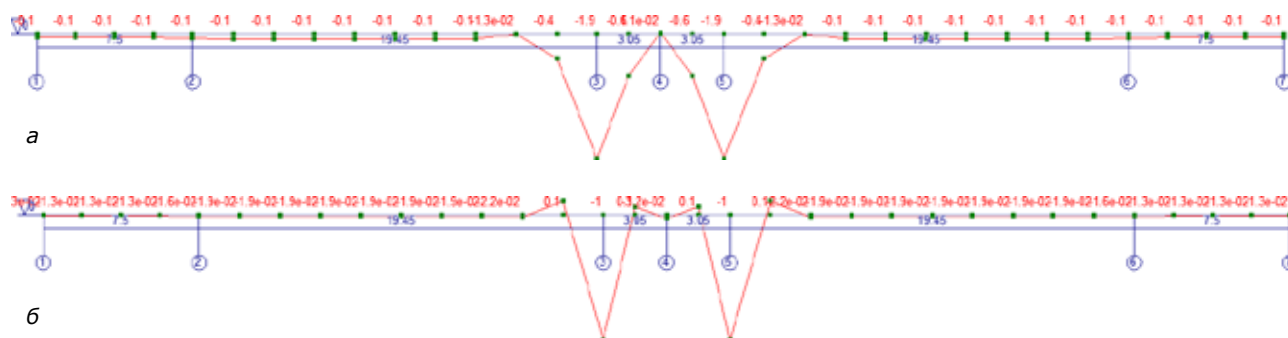


Рис. 8. Розподіл поперечних зусиль від суми всіх навантажень: а – для варіанта № 1; б – для варіанта № 2
Джерело: розроблено автором.

– варіант 2: труба електротехнічна, посилена, поліетиленова, діаметром 110 мм, кільцевою жорсткістю Sn16. Під трубу влаштовується обойма 16x18 см із піщаного асфальтобетону.

Отримано результати напружено-деформованого стану труб кабельної каналізації для двох варіантів, які дають змогу прийняті основні стратегічні рішення під час будівництва.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Белятинський А.О., Першаков В.М., Талах С.М., Дубик О.М. Визначення напружено-деформованого стану жорстких аеродромних покриттів від багатоколісного навантаження надважкого літака. *Вісник ХНАДУ*. 2020. № 89. С. 59–66. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.89.0.59>

[2] Дубик О.М. Розрахунок на міцність захисних залізобетонних обойм безнапірних труб дощових мереж від дії дорожнього покриття і тиску тягача НК-80. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 87. С. 23–28.

[3] Родченко О.В. Комп'ютерні технології проектування двохшарових жорстких аеродромних покриттів. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2020. № 2. С. 19–23.

[4] Талах С.М., Дубик О.М., Лисницька К.М., Ільченко В.В. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану жорстких аеродромних покриттів за взаємодії зі слабкою ґрунтовою основою. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2019. № 1(52). С. 124–132. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.52.1685>

[5] Cai J., Wong L., Yan H. Dynamic Response of Airport Concrete Pavement to Impact Loading. *Adv Mater Res*. 2012. Vol. 594–597. P. 1395–1401. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1395>

[6] Aldea D., Popescu C.-G., Vasiliu M. Comparative numerical studies on the structural behavior of buried pipes subjected to extreme environmental actions. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 3385. <https://doi.org/10.3390/ma15093385>

[7] Dubyk O. Improving the monitoring of the operational and technical condition of rigid airfield pavements. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2021. Vol. 2(57). P. 59–67. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.52.1685>

[8] Hammad, A., Attia, M.A., Radwan, A.M., Farag, A. The behavior of underground conduits buried in soil. *Engineering Research Journal*. 2024. Vol. 179. P. 106–140. <https://doi.org/10.21608/erj.2024.345257>

[9] Oh, H.J., Cho, Y.K., Seo, Y., Kim, S.-M. Experimental analysis of curling behavior of continuously reinforced concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 128. P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.079>

[10] 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. P. 23–50. <https://doi.org/10.22115/cepm.2023.354941.1219>

[11] 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. <https://doi.org/10.22115/CEPM.2022.347999.1215>

[12] Lee H.-B., Park W.-J., Roh S. Performance evaluation of buried concrete pipe considering soil pressure and crack propagation using 3D finite element analysis. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(7). P. 3292. <https://doi.org/10.3390/app11073292>

[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. P. 932. <https://doi.org/10.3390/buildings12070932>

[14] Nam, B.H., Yeon, J.H., Behring, Z. Effect of daily temperature variations on the continuous deflection profiles of airfield jointed concrete pavements. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73. P. 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.073>

[15] 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. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01376-x>

[16] Rezaei-Tarahomi A, Kaya O, Ceylan H, Kim S, Gopalakrishnan K, Brill DR. Development of rapid three-dimensional finite-element based rigid airfield pavement foundation response and moduli prediction models. *Transp Geotech*. 2017. Vol. 13. P. 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.011>

[17] Shafabakhsh G, Kashi E, Tahani M. Analysis of runway pavement response under aircraft moving load by FEM. *J Eng Des Technol*. 2018. Vol. 16. P. 233–243. <https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2017-0093>

[18] Talakh, S., Dubyk, O., Bashynska, O., Ilchenko, V. Some Technical Solutions for the Use of Aerodrome Pavements in the Soft Soil Conditions. *Springer Nature Switzerland. Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Cham. 2019. № 73. P. 303. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_31

[19] Qin, Y., Hiller, J. E. Modeling the temperature and stress distributions in rigid pavements: impact of solar radiation absorption and heat history development. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2011. Vol. 15. P. 1361–1371. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1322-6>

[20] 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. <https://doi.org/10.3390/ma14216579>

REFERENCES

[1] Bieliatynskyi, A.O., Pershakov, V.M., Talakh, S.M., & Dubyk, O.M. (2020). Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu zhorstkykh aerodromnykh pokryttiv vid bahatokolisnogo navantazhennia nadvazhkoho litaka [Determination of the stress-strain state of rigid airfield pavements under multi-wheel loading of a heavy aircraft]. *Visnyk KhNADU*, (89), 59–66. Kharkiv: KhNADU. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.89.0.59> [in Ukrainian].

[2] Dubyk, O.M. (2013). Rozrakhunok na mitsnist zakhysnykh zalizobetonnykh oboim beznapirnykh trub

doshchovykh merezh vid dii dorozhnogo pokryttia i tysku tiahacha NK-80 [Strength calculation of protective reinforced concrete jackets of non-pressure drainage pipes under road pavement load and NK-80 tractor pressure]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnje budivnytstvo*, 87, 23–28. [in Ukrainian].

[3] Rodchenko, O.V. (2020). Kompiuterni tekhnolohii proektuvannia dvosharovykh zhorstkykh aerodromnykh pokryttiv [Computer technologies for designing two-layer rigid airfield pavements]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, 2, 19–23. Retrieved from <https://pbis.pntu.edu.ua/article/view/2020-02-19> [in Ukrainian].

[4] Talakh, S.M., Dubyk, O.M., Lysnytska, K.M., & Ilchenko, V.V. (2019). Chyselne modeliuвання na pruzhenodeformovanoho stanu zhorstkykh aerodromnykh pokryttiv pry vzaiemodii zi slabkoiu hruntovoiu osnovoiu [Numerical modeling of the stress-strain state of rigid airfield pavements interacting with weak soil foundation]. *Haluzeve Mashynobuduvannia, Budivnytstvo*, 1(52), 124–132. Retrieved from <https://pntu.edu.ua/journal/2019-1-52-124> [in Ukrainian].

[5] 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].

[6] Aldea, D.A., Popescu, C.-G., & Vasiliu, M. (2022). Comparative numerical studies on the structural behavior of buried pipes subjected to extreme environmental actions. *Materials*, 15, 3385. <https://doi.org/10.3390/ma15093385> [in English].

[7] Dubyk, O., Ilchenko V., Stepanchuk O., & Talavira H. (2021). Improving the monitoring of the operational and technical condition of rigid airfield pavements. *Academic Journal: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 59–67. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.2.59-67> [in English].

[8] Hammad, A., Attia, M.A., Radwan, A.M., & Farag, A. (2024). The behavior of underground conduits buried in soil. *Engineering Research Journal*, 181, 106–140. <https://doi.org/10.21608/erj.2024.345257> [in English].

[9] Oh, H.J., Cho, Y.K., Seo, Y., & Kim, S.-M. (2016). Experimental analysis of curling behavior of continuously reinforced concrete pavement. *Construction and Building Materials*. Vol. 128. P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.079> [in English].

[10] 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].

[11] 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].

[12] Lee, H.-B., Park, W.-J., & Roh, S. (2021). Performance evaluation of buried concrete pipe considering soil pressure and crack propagation using 3D finite element analysis. *Applied Sciences*, 11(7), 3292. <https://doi.org/10.3390/app11073292> [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] Nam, B.H., Yeon, J.H., & Behring, Z. (2014). Effect of daily temperature variations on the continuous deflection profiles of airfield jointed concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 73, 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.073> [in English].

[15] Rahmawati, A., & Rahmawati, F. (2022). Runway pavement strength evaluation of Yogyakarta International Airport depending on ICAO (ACN/PCN) method with COMFAA 3.0 software. *International Journal of Integrated Engineering*, 14, 350–359. Retrieved from <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/13106> [in English].

[16] Rezaei-Tarahomi, 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].

[17] 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].

[18] Talakh, S., Dubyk, O., Bashynska, O., & Ilchenko, V. (2019, May). Some technical solutions for the use of aerodrome pavements in the soft soil conditions. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations* (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 73, pp. 303–311). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_31 [in English].

[19] Qin, Y. & Hiller, J.E. (2011). Modeling the temperature and stress distributions in rigid pavements: impact of solar radiation absorption and heat history development. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, 1361–1371. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1322-6> [in English].

[20] 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., Dashkova S., Danilin O. Calculation of the Stress-Strain State and Strength Analysis of Cable Conduit Pipes in Airfield Pavement Structures

The article presents the results of a study on the stress-strain state of airfield pavement structures with cable duct pipes embedded within their layers. The interaction of structural elements under the action of self-weight of materials and variable operational loads from modern large take-off mass aircraft is analyzed. Special attention

is paid to the influence of pipe positioning within pavement layers on the distribution of stresses and strains, as well as on the overall load-bearing capacity of the structure.

The study was carried out using numerical modeling in the SCAD Office software package. Strength verification of pipes and sleeves was performed, limit values of stresses and strains were determined, and dependencies between geometric parameters of the system and its load-bearing capacity were obtained. The results show that, provided the calculated parameters of pipe wall thickness and protective pavement layers are observed, reliable operation of the cable duct system is ensured without the risk of failure.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying the obtained data in the design and reconstruction of airfield pavements to ensure their durability and safe operation under conditions of intensive aviation loads.

Modern airfield operating conditions are associated with high loads from new-generation aircraft. This necessitates increased reliability of engineering networks, in particular cable ducts arranged within pavement structures. Insufficient attention to their stress-strain state may lead to damage and disruption of system functioning.

Modern airfield operating conditions are associated with high loads from new-generation aircraft. This necessitates increased reliability of engineering networks, in particular cable ducts arranged within pavement structures. Insufficient attention to their stress-strain state may lead to damage and disruption of system functioning.

Purpose. To assess the stress-strain state and verify the strength of cable duct pipes in airfield pavement structures for different placement options, taking into account the action of permanent and variable loads.

Methodology. The research methods are based on the use of the finite element method in calculating the stress-strain state of cable duct pipes in airfield pavement structures.

Results. The calculations showed that the studied cable duct structures meet the requirements of strength and operational reliability. The pipe wall thickness and sleeve parameters ensure permissible stresses and strains under loads from modern aircraft (A321 NEO XLR, B737-9 MAX). The obtained results can be used to justify design decisions in the construction and modernization of airfield pavements.

Scientific novelty. The scientific novelty lies in the improvement of existing methods for assessing the stress-strain state of cable duct pipes in airfield pavement structures.

Practical relevance. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results during the reconstruction and new construction of airfields.

Keywords: airfield pavement, cable duct, stress-strain state, strength, numerical modeling, SCAD Office.

AUTHOR`S NOTE:

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

Dashkova Svitlana, Assistant Professor at the Department of Computer Technologies in Construction, Kyiv, Ukraine, e-mail: svitlana.dashkova@npp.kai.edu.ua, orcid: 0009-0002-8425-0877.

Danilin Oleksii, Postgraduate Student at the Department of Construction Economics, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: alexnikdanilin@gmail.com, orcid: 0009-0004-1727-8030.

Стаття подана до редакції: 17.10.2025.

Стаття прийнята до опублікування: 05.11.2025.

Стаття опублікована: 20.11.2025.