

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБЕРНЕНОГО РОЗРАХУНКУ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ВИПРОБУВАНЬ FFWD

Коршак А.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна,
alinakorshak18@gmail.com, orcid.org/0009-0003-3100-1137

ANALYSIS OF METHODS FOR INVERSE CALCULATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF AIRPORT PAVEMENT BASED ON FFWD TESTS

Korshak A.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, alinakorshak18@gmail.com,
orcid.org/0009-0003-3100-1137

Постановка проблеми.

Сучасна інфраструктура аеропортів вимагає постійного моніторингу технічного стану покриттів елементів аеродромів. Інтенсивність руху та навантаги від повітряних суден призводять до утворення дефектів та зниження несучої здатності конструкції [1]. Забезпечення належного експлуатаційного стану елементів аеродромів є одним з основних завдань утримання та експлуатації існуючих аеродромів. Передчасне виявлення таких процесів дає змогу ефективно планувати ремонтні роботи, оптимізувати витрати та продовжити термін експлуатації.

Одним з найпоширеніших способів діагностики технічного стану є дефлектометричні випробування з використанням Fast Falling Weight Deflectometer (FFWD). Суть методу полягає у прикладанні короткочасного імпульсного навантаження до поверхні покриття та вимірюванні прогинів у ряді точок на різних відстанях від центру навантаження. За так званою «чашею прогинів» можна оцінити реакцію конструкції.

Проте вимірювання прогинів не дає повної картини оцінювання існуючого технічного стану. Для прийняття інженерних рішень необхідно знати інформацію про характеристики існуючих шарів (модулі пружності та товщини), за якими визначають несучу здатність покриття. Визначення модулів пружності на основі вимірюваних прогинів є оберненою задачею механіки шаруватих систем, що має складний, неоднозначний характер і потребує застосування спеціальних методів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Обернений розрахунок модуля пружності аеродромних покриттів на основі результатів випробувань FFWD є важливим, але складним завданням, що передбачає оцінку фізико-механічних властивостей шарів покриття на основі вимірюваних прогинів від прикладеної навантаги. Зазвичай використовуються багат шарові моделі, що дають змогу за допомогою оптимізаційних алгоритмів підібрати модулі пружності шарів так, щоб змодельовані значення прогинів відповідали експериментальним даним. Однак такі моделі мають високу залежність від початкових заданих параметрів та мають обмеження з урахування нелінійних та часових ефектів, характерних для асфальтобетону, що призводить до суттєвих похибок під час розрахунку модулів [2, 3]. З метою більш точного моделювання матеріалів із в'язкоеластичними характеристиками застосовують математичні методи з урахуванням часової залежності деформацій. Застосування оптимізаційних методів дозволяє отримати більш реальні розрахунки модулів, враховуючи реальні характеристики матеріалів, що підтверджується похибкою до 15 % у порівнянні з класичними методами [4,5]. У сучасних дослідженнях все частіше використовуються методи швидкого визначення математичного або технічного значення без точних технічних обчислень (евристичні методи), які забезпечують ефективний пошук найкращого результату у складних багатовимірних параметрах і працюють добре навіть, якщо вихідні дані неточні [6]. Чисельні методи, зокрема 3D-моделювання на основі методу скінченних елементів, дозволяють врахувати геометричні параметри покриттів, наявність дефектів, температурні коливання та нелінійні властивості матеріалів. Це значно підвищує точність оберненого розрахунку модулів [7]. Проте такі методи є більш складними у розрахунку і вимагають точних вхідних даних. Отже, сучасні методи оберненого розрахунку поєднують класичні теоретичні моделі із новими алгоритмами оптимізації та чисельними моделюваннями. Це сприяє підвищенню надійності та точності визначення механічних характеристик аеродромних покриттів на основі випробувань FFWD.

Мета роботи. Аналізування існуючих методів оберненого розрахунку модуля пружності аеродромних покриттів за даними випробувань FFWД з оцінюванням їхніх переваг та недоліків.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Аеродромне покриття – це багатошарова конструкція. Під дією імпульсного навантаження F , прикладеного через жорстку круглу плиту, у вимірювальних точках на відстані від центру навантаження фіксуються прогини D , на підставі яких формується чаша прогинів (рис. 1).

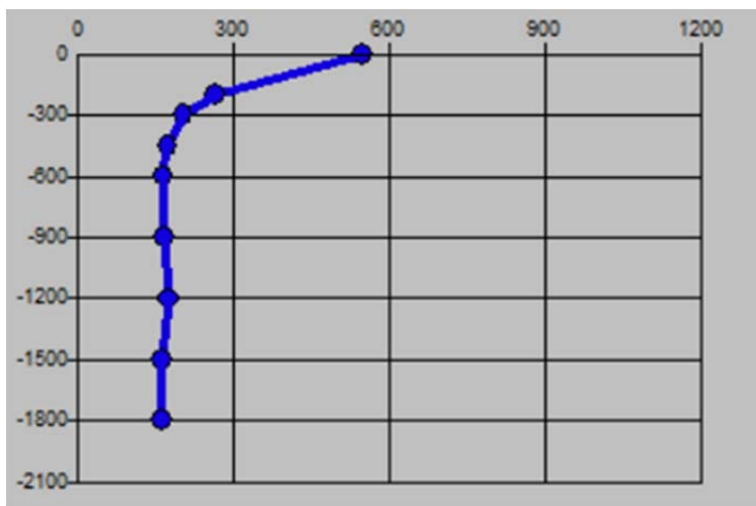


Рисунок 1 – «Чаша прогинів»
Figure 1 – «Bowl of deflections»

Прямий розрахунок полягає у визначенні прогинів за відомих модулів пружності E , товщин h та коефіцієнтів Пуассона ν за допомогою класичних розрахунків для багатошарових конструкцій.

Процес оберненого розрахунку модулів пружності покриттів – це складний процес, оскільки модулі кожного шару конструкції та їх взаємодія впливають на значення загального прогину, вимірюного на поверхні. За роки досліджень розроблено багато підходів та методів, а також програм для оберненого розрахунку шарів покриття та реакції земляного полотна.

Обернений розрахунок – це метод визначення характеристик шарів покриття, що відрізняється від прямого розрахунку. Його суть у використанні даних про деформації для визначення модулів пружності кожного з існуючих шарів. Цей метод полягає у визначенні характеристик конструкції модуля пружності E та товщини шару h , для якого розраховані прогини $D_{i,calc}$ максимально близькі до експериментальних даних $D_{i,exp}$.

Такий розрахунок використовує значення вимірних параметрів (деформацій, навантажень, переміщень тощо) для визначення невідомих властивостей матеріалів, таких як модуль пружності. Цей метод застосовується, коли безпосереднє вимірювання модуля пружності складне або неможливе.

Обернений розрахунок передбачає:

- моделювання поведінки матеріалу – вибір відповідної математичної моделі для опису його властивостей;
- аналіз експериментальних даних – збирання даних про напруження, деформації тощо;
- оптимізація або інверсія – методи для пошуку параметрів моделі, які найкраще відповідають експериментальним даним.

Алгоритм розрахунку:

- збір даних про прогини, навантаження та геометричні параметри;
- вибір моделі/програмного забезпечення для проведення розрахунку;
- визначення основних даних шарів покриття: модулів, коефіцієнтів, товщин;
- мінімізація невідповідностей та аналізування отриманих даних.

Важливим є точний збір даних та вибір адекватної теоретичної моделі.

Необхідними даними для розрахунку є: деформації – вимірювання прогинів і дефектацій (тріщиноутворення); товщина шарів – георадарне сканування, буріння кернів та отримання даних з проєктої документації; навантаження – інтенсивність руху та осьові навантаження; інформація про кліматичні умови проведення випробувань – температура, опади, глибина промерзання.

Наявність дефектів, таких як тріщини, слабкі зони, неоднорідності матеріалу чи пористості, нерівномірність товщини шарів, часто знижує точність методів. Навіть поперечні тріщини можуть впливати на результати: модулі асфальтобетонного шару можуть бути переоцінені, а модулі основи – недооцінені. Різниця може сягати від – 68 % до +23 % для асфальтобетону і – 57 % до +36 % для основи.

Неоднорідність шарів чи матеріалів ускладнює процес визначення стандартними методами, чи змінився модуль пружності, чи лише змінилася товщина або ущільнення.

Існуючі методи вимірювання деформацій:

- геодезичні: нівелювання та GPS-вимірювання;
- механічні: Балка Бенкельмана, дефлектометр падаючого навантаження;
- безконтактні: лазерне сканування та фотограмметрія.

Дефлектометричні методи: Falling Weight Deflectometer (FFWD) – метод неруйнівного випробування з імітуючим навантаженням від 7 до 150 кН; Heavy Weight Deflectometer (HWD) застосовується для аеродромів, імітує навантаження від літака до 250 кН; Dynamic Deflection (Dynaflect) (рис. 2).

Недеструктивні методи: ультразвуковий метод; ударно-імпульсний метод.

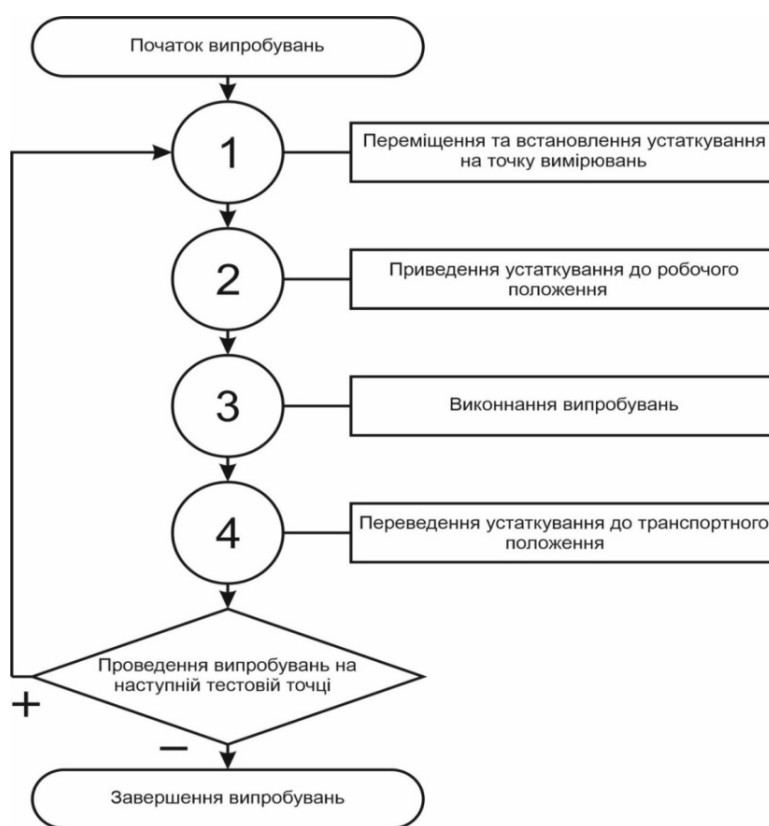


Рисунок 2 – Схема проведення вимірювань динамічного модуля пружності

Figure 2 – Scheme of measurements of dynamic elastic modulus

Методи статичних (вимірювання прогинів від статичного навантаження) (рис. 3) та динамічних навантажень (рис. 4) є надійними і точними для оцінювання реакції покриття в реальних умовах експлуатації. Вони враховують як постійні (статичні) навантаження, так і змінні (динамічні) навантаження. Проте проведення таких випробувань потребує високоточного обладнання, а інтерпретація результатів ускладнюється наявністю нелінійних ефектів.

З рисунків 3 та 4 можна зробити висновок, що динамічні випробування є ефективнішими, оскільки відображають поведінку покриття в реальних умовах експлуатації з урахуванням змінних навантажень, швидкості реакції та інших факторів, які не можна повністю змодельовати під час статистичних випробувань. Динамічні випробування дають більш точні та надійні результати, що важливо для оцінювання довговічності, безпеки та ефективності конструкцій.

Вибір методу залежить від конкретних умов випробування, необхідної точності та доступного обладнання.

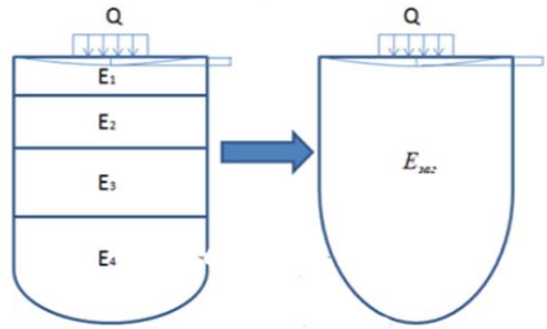


Рисунок 3 – Схема статистичних вимірювань
Figure 3 – Statistical measurement scheme

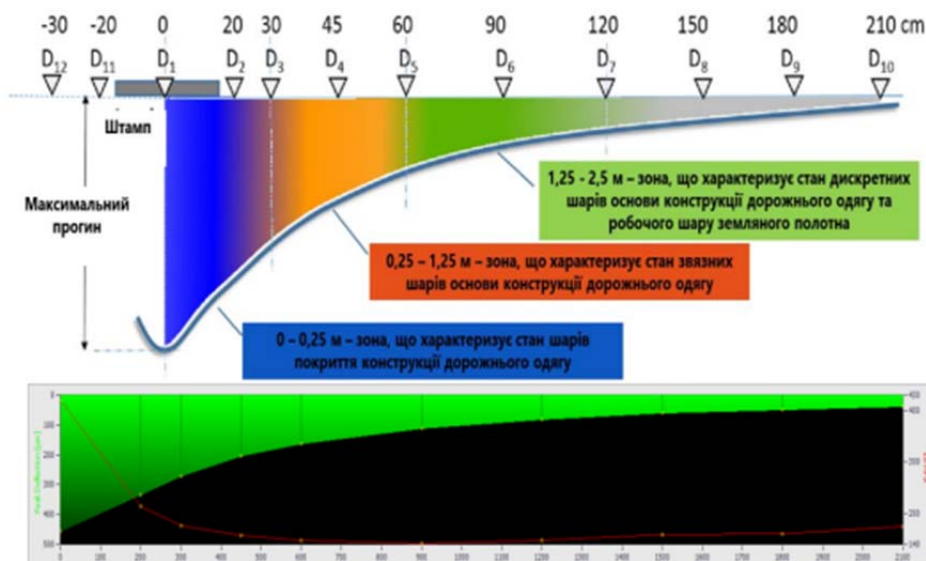


Рисунок 4 – Схема динамічних вимірювань
Figure 4 – Dynamic measurement scheme

Методи оберненого розрахунку дозволяють визначити характеристики матеріалів без руйнування.

Один з найпоширеніших методів – метод з використанням експериментальних деформацій. Його суть полягає у вимірюваннях деформацій конструкцій під впливом відомих навантажень з подальшим аналізуванням отриманих даних для оберненого розрахунку характеристик матеріалів. Такий метод дозволяє оцінити поведінку конструкції в реальних умовах експлуатації та є основою для створення числових моделей.

Метод скінченних елементів (МСЕ) – метод, який передбачає дискретизація конструкції (поділ на невеликі частини) для чисельного розв'язання. Є вагомим інструментом для моделювання реакції конструкції від навантажень, що дозволяє отримати детальну картину деформацій та напружень у різних частинах покриття. Застосування МСЕ для моделювання аеродромних покриттів дозволяє відтворити просторову структуру, фізико-механічні властивості матеріалів і геометричні параметри шарів конструкції.

Метод інверсії числової моделі передбачає використання результатів чисельного моделювання для визначення таких параметрів моделі (насамперед модуля пружності), при яких розрахункові значення максимально відповідають експериментальним. Цей метод включає створення обчислювальної моделі конструкції з припущенням щодо властивостей матеріалів та поступовим уточненням властивостей шляхом порівняння з результатами випробувань. Інверсійні методи ефективні для аналізу жорстких конструкцій, де класичні аналітичні методи не дають необхідної точності.

Метод моделювання на основі попередньо відомих властивостей використовує заздалегідь отримані експериментальні дані як вихідні параметри для розрахунку, наприклад, лабораторні характеристики матеріалів. У цьому методі модуль пружності визначається з урахуванням

теоретичних моделей, що описують механіку поведінки матеріалів, таких як рівняння теорії пружності або в'язкопружності. Такий метод доцільно застосовувати у випадках, коли достовірно відомі характеристики матеріалів існуючого покриття.

Метод оптимізації параметрів передбачає застосування алгоритмів чисельної оптимізації для підбору значень фізико-механічних характеристик, які мінімізують різницю між розрахунковими та експериментальними даними. У цьому методі модуль пружності розглядається як змінний параметр, що поступово коригується для зменшення похибки. Оптимізаційні методи можуть здійснюватися, як за допомогою класичних методів (методи найменших квадратів, градієнтний спуск), так і на сучасних евристичних підходах, що підвищує точність розрахунків у складних умовах.

Метод багат шарових лінійно-еластичних моделей є простим і досить швидким, тому його можна використовувати для масових та широких оцінювань. Однак він не враховує динамічні навантаження, демпфування та в'язкоеластичну реакцію матеріалів. Через це можуть виникати похибки для жорстких або в'язкоеластичних конструкцій. Згідно з дослідження [8], модулі, що обчислені за таким методом, суттєво відрізняються від лабораторних значень.

Переваги: простота у реалізації та розумінні, низька вартість, широке застосування, наявність великої кількості програмних засобів.

Недоліки:

- не врахування динамічних навантажень: метод не звертає увагу на тривалість удару, хвильові процеси та інерційні явища, що суттєво важливо для асфальтобетонних шарів;
- висока залежність від вихідних даних (товщини шарів та інших параметрів, які точно відомі);
- неоднозначність рішень: різні набори модулів можуть давати схожі часті прогинів.

Оптимізаційні алгоритми дозволяють долати проблеми локальних мінімумів та невідомості початкових даних. Наприклад, у дослідженні [10] було показано, що такі методи забезпечують кращу якість підгонки та дозволяють одночасно визначати товщини шарів. Однак їх застосування може бути складним через: велику кількість параметрів, потребу у значній кількості ітерацій, ризик навчання у випадку використання штучних нейронних мереж [11].

Хвильові методи та аналізування часових історій підвищують інформаційність під час виявлення резонансних і динамічних явищ. У дослідження [12] показано, що реакції покриття можуть мати резонансні частоти, які не враховують класичні методи. Такий метод дозволяє покращити відповідність змодельованих і вимірних даних.

Динамічне моделювання дає змогу точніше відтворювати реальні умови краще, враховуючи інерційні властивості, демпфування основи та часові ефекти. Проєкт [9] показав, що динамічна модель може бути не лише ефективною, а й швидкою за умови верифікації параметрів на основі польових випробувань.

Такий метод має низку переваг: швидкість та точність обчислень; неруйнівний метод випробувань; можливість отримати модулі пружності кожного шару; менше спотворення результатів через ігнорування динамічних явищ, особливо при ударному навантаженні.

Але також є недоліки: складність оброблення отриманих даних та проведення розрахунків: складність калібрування: демпфування, градієнти по глибині, температурні залежності, неоднорідності матеріалів; висока залежність від температури; висока вартість обладнання для проведення випробувань.

На сьогодні існує багато програмних забезпечень (ПЗ) для проведення таких розрахунків, основні з яких наведено у табл. 1. Вони мають високу точність та широке застосування.

У роботі [2] було порівняно три поширені програми (BAKFAA, MODULUS, EVERCALC) для оберненого розрахунку модулів пружності для аеродромних покриттів. Результати значно залежать від початкового значення модуля пружності. Програма EVERCALC показала точність порівняно з BAKFAA і MODULUS.

Використання методів оберненого розрахунку на основі даних FFWD дає змогу точно визначити необхідні параметри для подальшого планування ремонтних робіт або для вибору робіт з відновлення покриття.

Обернений розрахунок дозволяє провести:

- оцінювання фізичних та механічних характеристик існуючих покриттів (модуль пружності покриття та окремих шарів конструкції, деформацій та вплив на довговічність покриття, визначення товщини шарів);

– прогнозування довговічності та життєвого циклу, що дозволяє визначити через скільки років конструкція може зазнати критичних пошкоджень, а також оцінити необхідні витрати на його обслуговування в майбутньому;

Таблиця 1 – Основні ПЗ для оберненого розрахунку
Table 1 – Basic software for inverse calculation

№ ч.ч.	Назва ПЗ	Прямий метод розрахунку	Обернений метод розрахунку	Схема конвергенції
1	BAKFAA	Багатошарова пружності теорія	Ітеративний	Сума квадратів абсолютної похибки
2	DIPLOBACK	Кінцевий елемент	База даних	
3	ELMOD®	Еквівалентна товщина/скінченний елемент	Ітеративний	Відносна похибка
4	ILLI-BACK	Закрита форма	Закрита форма	
5	MICHBACK©	Багатошарова пружності теорія	Метод РафсонаНьютона	Найменших квадратів
6	WESDEF	Багатошарова пружності теорія	Ітеративний	Сума квадратів абсолютної похибки
7	PCASE	Багатошарова пружності теорія	Ітеративний	Сума квадратів абсолютної похибки

– проектування та оптимізація покриттів (можна врахувати дані про навантаження та обрати найкращу товщину і склад матеріалів для кожного шару);

– аналізування пошкоджень покриття та їх ремонт, що дозволяє визначити, потребу у локальному ремонті чи більш масштабному відновленні покриття;

– оцінювання ефективності різних типів покриттів;

– управління обслуговуванням і планування. Можна використовувати для оцінки загального стану і складання плану обслуговування, що дозволяє зменшити витрати на ремонт і продовжити термін експлуатації.

Переваги оберненого розрахунку: можливість отримання точних результатів при наявності обмежених експериментальних даних, використання для різноманітних умов навантаження та експлуатації, можливість адаптації методів до конкретних типів покриттів, зниження вартості проектування завдяки оптимізації матеріалів та конструкцій, швидкість оброблення даних та призначення ремонтних робіт.

Обмеження та недоліки оберненого розрахунку: потреба в точних експериментальних даних для успішного застосування методу, залежність від якості моделі та вихідних даних, обмеження в точності результатів при неправильному виборі методів оптимізації або числових моделей, складність у виборі оптимальних математичних моделей для складних матеріалів, висока обчислювальна складність для великих або складних моделей.

Рекомендації та практичне застосування.

Для покриттів з невеликою товщиною шарів (наприклад, гнучких покриттів з асфальтобетону) може бути достатньо класичних методів, особливо коли доступні якісні дані FFWD і немає вимог щодо точності.

Якщо покриття має більшу товщину або має жорсткий тип конструкції, або ж потрібно оцінити реакцію під важким літаком, слід застосовувати динамічні методи, які враховують демпфування і інерційних ефектів.

Оптимізаційні методи корисні, за умови обмеженої інформації або, якщо класичні моделі дають неоднозначні результати. Необхідно мати достатню кількість даних та обмежень під час використання даного методу.

Хвильові методи та аналіз часових історій деформацій рекомендовані, якщо є змога вимірювати часовий відгук, а не лише максимальні прогини, адже це дає додаткову інформацію і підвищує точність.

Отримані модулі пружності потрібно перевіряти лабораторними тестуваннями або порівнювати з результатом реальних випробувань для перевіряння точності.

Висновки.

Обернений розрахунок модуля пружності є важливим методом для оцінювання стану та залишкового терміну експлуатації аеродромних покриттів. Класичні методи багатошарової конструкції залишаються актуальними, тому що вони простіші та швидші у застосуванні, проте вони мають обмеження у випадках жорстких або конструкцій з великою товщиною. Сучасні методи

дозволяють значно підвищити точність, але потребують більше ресурсів, даних і ретельного калібрування.

Вибір методу залежить від властивостей матеріалів, структури конструкції, наявності даних (FFWD), можливості вимірювати часову історію та необхідній точності. У майбутньому слід спрямовувати дослідження на стандартизацію методу динамічного оберненого розрахунку, розвитку програмних засобів з вбудованими оптимізаційними алгоритмами та методами, а також проводити польові дослідження для перевірки точності

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Білякович О. І., Тарасюк С. В. Дослідження експлуатаційного стану покриттів аеродромів. Вісник Національного транспортного університету. 2021. № 2. С. 33–41.
2. Tarefder, R. A., & Ahmed, A. (2013). Consistency and accuracy of selected FWD backcalculation software for computing layer modulus of airport pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 123–132. DOI: 10.1080/10298436.2012.693051
3. Munir, M., & Mohammad, L. N. (2010). Evaluation of resilient modulus predictive models using LTPP data. *Transportation Research Record*, 2186(1), 40–49. DOI: 10.3141/2186-01
4. Varma, S., Kutay, M. E., & Levenberg, E. (2013). Viscoelastic backcalculation of traffic speed deflection measurements. *Transportation Research Record*, 2369(1), 75–84. DOI: 10.3141/2369-05
5. Zhang, K., Zhang, H., & Zheng, J. (2019). Back-Calculation of Soil Modulus from PFWD Based on a Viscoelastic Model. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: 10.1155/2019/1316341
6. Singh, D., Kumar, P., & Reddy, K. S. (2021). Prediction of back-calculated layer moduli using cuckoo search algorithm for pavement asset management at a network level. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2), 220–229. DOI: 10.1007/s41062-021-00553-6
7. Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Carpenter, S. H. (2023). Effects of Transverse Cracks on the Backcalculated Layer Properties Using FWD Data. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(2), 45–57. DOI: 10.1007/s10921-023-00978-2
8. Wang, H., Xie, P., Ji, R. (2020). Backcalculation of Airfield Pavement Layer Moduli Under HWD Testing. In: *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 96, Springer, Cham.
9. Elie Y. Hajj, Rami Skaff, Peter E. Sebaaly, Xiaolong Ma, Heyang Qin, Feng Yan. (2024). Enhancing Pavement Assessment With Dynamic Backcalculation: A Dynamic FE Approach. DOT/FAA/TC-24/13.
10. Kameyama, S., Himeno, K., Kasahara, A., Maruyama, T. (1999). Backcalculation of Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*.
11. Bouriaud, F., Roult, G., et al. (2016). Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm. *Construction and Building Materials*, Volume 119, 2016, Pages 288–295.
12. Ketcham, S. A. (1993). Dynamic Response Measurements and Identification Analysis of a Pavement During Falling-Weight Deflectometer Experiments. *Transportation Research Record* 1415.

REFERENCES

1. Bilyakovich O. I., Tarasyuk S. V. Research on the operational condition of airfield coatings. *Bulletin of the National Transport University*. 2021. No. 2. P. 33–41.
2. Tarefder, R. A., & Ahmed, A. (2013). Consistency and accuracy of selected FWD backcalculation software for computing layer modulus of airport pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 123–132. DOI: 10.1080/10298436.2012.693051
3. Munir, M., & Mohammad, L. N. (2010). Evaluation of resilient modulus predictive models using LTPP data. *Transportation Research Record*, 2186(1), 40–49. DOI: 10.3141/2186-01
4. Varma, S., Kutay, M. E., & Levenberg, E. (2013). Viscoelastic backcalculation of traffic speed deflection measurements. *Transportation Research Record*, 2369(1), 75–84. DOI: 10.3141/2369-05
5. Zhang, K., Zhang, H., & Zheng, J. (2019). Back-Calculation of Soil Modulus from PFWD Based on a Viscoelastic Model. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: 10.1155/2019/1316341
6. Singh, D., Kumar, P., & Reddy, K. S. (2021). Prediction of back-calculated layer moduli using cuckoo search algorithm for pavement asset management at a network level. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2), 220–229. DOI: 10.1007/s41062-021-00553-6

7. Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Carpenter, S. H. (2023). Effects of Transverse Cracks on the Backcalculated Layer Properties Using FWD Data. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(2), 45–57. DOI: 10.1007/s10921-023-00978-2
8. Wang, H., Xie, P., Ji, R. (2020). Backcalculation of Airfield Pavement Layer Moduli Under HWD Testing. In: *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 96, Springer, Cham.
9. Elie Y. Hajj, Rami Skaff, Peter E. Sebaaly, Xiaolong Ma, Heyang Qin, Feng Yan. (2024). Enhancing Pavement Assessment With Dynamic Backcalculation: A Dynamic FE Approach. DOT/FAA/TC-24/13.
10. Kameyama, S., Himeno, K., Kasahara, A., Maruyama, T. (1999). Backcalculation of Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*.
11. Bouriaud, F., Roult, G., et al. (2016). Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm. *Construction and Building Materials*, Volume 119, 2016, Pages 288-295.
12. Ketcham, S. A. (1993). Dynamic Response Measurements and Identification Analysis of a Pavement During Falling-Weight Deflectometer Experiments. *Transportation Research Record* 1415.

РЕФЕРАТ

Коршак А.В. Аналіз методів оберненого розрахунку модуля пружності аеродромних покриттів на основі випробувань FFWD / А.В. Коршак // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті проведено порівняльний аналіз сучасних методів оберненого розрахунку модуля пружності шарів аеродромних покриттів на основі даних, отриманих із випробувань дефлектометром падаючої навантаги (Fast Falling Weight Deflectometer, FFWD).

Об'єкт дослідження – методи оберненого розрахунку.

Мета роботи – аналізування сучасних методів оберненого розрахунку для визначення модулів пружності аеродромних покриттів на основі даних FFWD випробувань

Методи дослідження – для досягнення мети роботи використовувалися наступні методи: аналіз, синтез, систематизація, узагальнення, формулювання висновків.

Розглянуто основні підходи, що застосовуються в інженерній практиці та наукових дослідженнях: класичний метод багатошарової еластичної системи, динамічне числове моделювання з використанням скінченних або спектральних елементів, методи оптимізації, а також хвильові методи, що враховують повну часову історію прогинів. Було проаналізовано переваги та недоліки кожного методу за критеріями точності результатів, залежність від дефектів покриття, необхідність у вихідних даних, складність розрахунків і практичне застосування. Врахування динамічних ефектів суттєво підвищує точність оцінювання модулів, але вимагає складного моделювання і детальних вихідних характеристик.

Для кожного з методів наведено приклади з літератури та результати їх порівняння. Отримані результати можуть бути корисними при проєктуванні, діагуванні та моніторингу технічного стану аеродромних покриттів.

На основі проведеного аналізу запропоновано рекомендації щодо вибору оптимального методу залежно від конкретних умов дослідження, цілей діагностики та наявності даних. Узагальнення дозволяють систематизувати ключові характеристики методів, що сприятиме підвищенню ефективності процесу оцінки технічного стану аеродромних покриттів. Результати дослідження мають важливе значення для практичних інженерних задач, пов'язаних із проєктуванням, експлуатацією та моніторингом інфраструктури аеродромів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АЕРОДРОМНЕ ПОКРИТТЯ, ДЕФЛЕКТОМЕТРИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ, ОБЕРНЕНИЙ РОЗРАХУНОК, МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ, FWD, НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ.

ABSTRACT

Korshak A.V. Analysis of methods for inverse calculation of the modulus of elasticity of airport pavement based on ffwd tests. *Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences»*. Scientific, scientific and production journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article presents a comparative analysis of modern methods of inverse calculation of the elastic modulus of airport pavement layers based on data obtained from tests using a Fast Falling Weight Deflectometer (FFWD).

The object of the study is inverse calculation methods.

The purpose of the work is to analyze modern inverse calculation methods for determining the elastic moduli of airfield pavements based on FWD test data.

Research methods: the following methods were used to achieve the purpose of the work: analysis, synthesis, systematization, generalization, and formulation of conclusions.

The main approaches used in engineering practice and scientific research are considered: the classical method of a multilayer elastic system, dynamic numerical modeling using finite or spectral elements, optimization methods, as well as wave methods that take into account the complete time history of deflections. The advantages and disadvantages of each method were analyzed according to the criteria of accuracy of results, dependence on coating defects, the need for initial data, the complexity of calculations, and practical application. Taking dynamic effects into account significantly increases the accuracy of module assessment, but requires complex modeling and detailed initial characteristics.

For each method, examples from the literature and the results of their comparison are given. The results obtained can be useful in the design, diagnosis, and monitoring of the technical condition of airfield pavements.

Based on the analysis, recommendations are made for selecting the optimal method depending on the specific conditions of the study, the objectives of the diagnosis, and the availability of data. The generalizations allow systematizing the key characteristics of the methods, which will contribute to improving the efficiency of the process of assessing the technical condition of airfield pavements. The research results are important for practical engineering tasks related to the design, operation, and monitoring of airfield infrastructure.

KEY WORDS: AIRFIELD PAVEMENT, DEFLECTOMETRIC TESTS, INVERSE CALCULATION, ELASTIC MODULUS, FWD, LOAD-BEARING CAPACITY.

АВТОР:

Коршак Аліна Володимирівна, аспірантка, Національний транспортний університет, головний спеціаліст Управління цифрового та інноваційного розвитку, Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, e-mail: alinakorshak18@gmail.com, тел: +380505960751, Україна, 03150, м. Київ, вул. Фізкультури, 9, orcid.org/0009-0003-3100-1137

AUTHOR:

Korshak Alina V., postgraduate student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Chief Specialist, Department of Digital and Innovative Development, State Agency for Infrastructure Restoration and Development of Ukraine, e-mail: alinakorshak18@gmail.com, tel: +380505960751, Ukraine, 03150, Kyiv, Fizkultury Str., 9, orcid.org/0009-0003-3100-1137

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Бубела А.В., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, декан факультету транспортного будівництва, Київ, Україна.

Райковський В. Ф., кандидат технічних наук, доцент, ДП «НІПІ», Київ, Україна.

REVIEWER:

Bubela A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Dean of the Faculty of Transport Construction, Kyiv, Ukraine.

Raikovsky V. F., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, SE«NIDI», Kyiv, Ukraine.