

РЕЦЕНЗІЯ

декана факультету транспортного будівництва, професора кафедри
транспортного будівництва та управління майном, доктора технічних наук,
професора **Бубели Андрія Володимировича**,
на дисертаційну роботу **Касая Костянтина Івановича**
на тему: **«Удосконалення методу розрахунку інфільтраційного зволоження
робочого шару земляного полотна автомобільних доріг»**,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
у галузі знань 19 «Архітектура та будівництво»
за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок із науковими програмами, планами, темами

Забезпечення надійності та довговічності автомобільних доріг значним чином залежить від стабільності фізико-механічних характеристик ґрунтів робочого шару земляного полотна. Для дорожніх конструкцій нежорсткого типу ґрунтова основа є одним із визначальних елементів, оскільки зміна її вологості безпосередньо впливає на модуль пружності, деформативність, опір зсуву та здатність конструкції сприймати транспортні навантаження.

Одним із найбільш поширених чинників погіршення стану ґрунтової основи є інфільтраційне зволоження від атмосферних опадів. Вода може надходити до робочого шару через узбіччя, тріщини і дефекти покриття, стики конструктивних елементів, ділянки з недостатнім поперечним похилом, зони незабезпеченого поверхневого водовідведення тощо. У реальних умовах цей процес є нерівномірним у часі та за глибиною, а його інтенсивність залежить від виду ґрунту, початкової вологості, ступеня ущільнення, тривалості опадів і конструкції земляного полотна.

Традиційні балансові методики здебільшого дають змогу визначити сумарну кількість води, що надходить до дорожньої конструкції, однак не забезпечують достатнього опису розвитку зони зволоження. З іншого боку, застосування повних нелінійних моделей ненасиченого руху вологи потребує значної кількості гідрофізичних параметрів, визначення яких не завжди можливе під час звичайного проектування.

У зв'язку з цим удосконалення інженерного методу, який дає змогу прогнозувати зміну вологості за глибиною і в часі, оцінювати момент досягнення критичного стану та враховувати наслідки зволоження під час вибору дорожньої конструкції, є актуальним науково-прикладним завданням.

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до наукового напрямку Національного транспортного університету: «Розроблення сучасних методів будівництва та експлуатації автомобільних доріг, транспортних споруд».



оцінкою їх якісного стану, проведення експертної оцінки основних фондів дорожніх підприємств», державний реєстраційний номер 0122U001566. Окремі результати використано під час науково-технічного супроводу робіт на автомобільних дорогах державного значення Р-24, Н-03 і Н-25 в Івано-Франківській та Хмельницькій областях, а також упроваджено в освітній процес Національного транспортного університету.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Дисертаційна робота має логічну структуру, яка відповідає сформульованій меті та завданням дослідження. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків.

У першому розділі виконано аналіз причин зволоження земляного полотна, умов формування водно-теплогового режиму та впливу вологості ґрунту на міцність і деформативність дорожньої конструкції. Встановлено, що спрощені балансові підходи є придатними для визначення загального обсягу інфільтраційної води, однак не дають можливості достатньо повно визначати зміну вологості в часі та за глибиною, тоді як складні моделі руху води у ненасичених ґрунтах потребують значного обсягу експериментальних даних. За результатами аналізу обґрунтовано доцільність використання дифузійної моделі із просторово-часовою функцією джерела зволоження.

Другий розділ присвячено розробленню математичної моделі інфільтраційного зволоження. Для напівобмеженого ґрунтового масиву отримано аналітичний розв'язок із застосуванням функції помилок, а для шару скінченної товщини — розв'язок методом Фур'є, що дало змогу перейти від визначення загального обсягу вологи до прогнозування поля вологості $W(z, t)$. Окремої уваги заслуговує обґрунтування критичного ступеня водонасичення ґрунту на рівні $S_{r, \text{кр}} \approx 0,80$, визначеного на основі кількох незалежних критеріїв. Значення коефіцієнта детермінації в межах від 0,977 до 0,997 свідчать про високий ступінь відповідності розрахункових і експериментальних даних.

У третьому розділі досліджено вплив вологісного стану ґрунту на напружено-деформований стан дорожньої конструкції. Числове моделювання виконано методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛПРА-САПР для семи видів ґрунтів, дорожніх конструкцій висотою від 1,00 м до 2,00 м, нормативного і понаднормативного навантаження та трьох сценаріїв вологісного стану. Обсяг числового експерименту становить майже тисячу розрахунків, у яких основним показником прийнято вертикальні переміщення вузлів скінченно-елементної моделі за напрямком осі Z . Установлено, що за повного зволоження максимальні вертикальні переміщення збільшуються у 2,2–2,4 рази, а за

поступового — у 1,5–1,6 раза порівняно з нормативним станом; зв'язні ґрунти виявилися більш чутливими до зміни вологості, ніж піщані.

У четвертому розділі результати математичного та числового моделювання інтегровано в методику вибору конструктивних рішень. Сформовано алгоритм оцінювання ризику перезволоження та вибору заходів регулювання водно-теплого режиму. Для порівняння альтернативних дорожніх конструкцій використано методи багатокритеріального аналізу TOPSIS, VIKOR і MOORA, спільне застосування яких зменшує залежність кінцевого рішення від особливостей одного конкретного методу ранжування; методику реалізовано у вигляді програмного модуля VBA в середовищі Microsoft Excel. За умов повного зволоження раціональним визначено варіант із легким суглинком ($h = 1,00$ м, 685,17 тис. грн), а за умов поступового зволоження — варіанти з дрібним та однорідним піском ($h = 1,00$ м, 588,83 тис. грн).

Обґрунтованість наукових положень забезпечується використанням положень механіки ґрунтів, теорії фільтрації, математичної фізики, теорії водно-теплого режиму земляного полотна, методу скінченних елементів і методів багатокритеріального аналізу. Достовірність одержаних результатів підтверджується фізично обґрунтованою постановкою математичної задачі, розмірнісною узгодженістю параметрів, порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними, високими значеннями коефіцієнтів детермінації, значним обсягом числових експериментів і зіставленням результатів трьох методів багатокритеріального оцінювання.

Наукова новизна одержаних результатів

- уперше виконано комплексне числове дослідження напружено-деформованого стану тривимірних моделей дорожньої конструкції для різних видів ґрунтів, висот земляного полотна, рівнів транспортного навантаження та сценаріїв зволоження;
- удосконалено математичну модель інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна шляхом використання просторово-часової функції джерела, яка враховує нерівномірність надходження вологи в часі та її згасання за глибиною;
- удосконалено методику визначення критичного вологісного стану ґрунту, яка враховує критичну вологість, критичний час, максимальну глибину та бокове поширення вологи;
- удосконалено метод вибору дорожньої конструкції за деформативними та економічними показниками із застосуванням методів TOPSIS, VIKOR і MOORA;

– набули подальшого розвитку підходи до техніко-економічного порівняння варіантів дорожньої конструкції з урахуванням їх кошторисної вартості.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості використання запропонованої методики під час нового будівництва, реконструкції та капітального ремонту автомобільних доріг, оцінювання причин деформацій дорожнього одягу, експлуатаційного утримання, вибору заходів регулювання водно-теплогового режиму та техніко-економічного порівняння проектних варіантів. Методика дозволяє встановлювати не лише факт можливого зволоження, а й кількісно оцінювати глибину проникнення вологи, час досягнення небезпечного стану, ступінь впливу зволоження на деформації та технічну й економічну перевагу альтернативних рішень.

Результати роботи використано під час науково-технічного супроводу робіт на автомобільних дорогах Р-24, Н-03 і Н-25 в Івано-Франківській та Хмельницькій областях, а окремі положення дисертації впроваджено в освітній процес Національного транспортного університету, що підтверджує прикладну спрямованість роботи.

Повнота викладення основних положень дисертації у наукових публікаціях

За темою дисертації опубліковано 13 наукових праць, серед яких 4 статті, що відображають основні наукові результати, у виданнях, включених до переліку МОН України, та 9 публікацій апробаційного характеру, з яких одна – у зарубіжному виданні. У наукових статтях висвітлено аналіз методик оцінювання просочування атмосферної вологи в ґрунт узбіччя, дослідження характеристик опадів для розрахунків поверхневого водовідведення й інфільтрації, математичне моделювання впливу атмосферних опадів на водно-тепловий режим та оцінювання впливу вологості ґрунту на міцнісні й деформативні показники дорожньої конструкції.

Зміст публікацій відповідає основним розділам дисертації, а результати дослідження пройшли апробацію на наукових і науково-практичних конференціях. Публікаційна активність здобувача є достатньою для оприлюднення основних результатів дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача та відсутність порушень академічної доброчесності

Основні наукові результати дисертації, з її аналізу, одержані здобувачем особисто: проведено аналіз нормативних і наукових підходів, запропоновано просторово-часову функцію джерела зволоження, виконано аналітичні розв'язки та числові експерименти, побудовано апроксимаційні залежності, сформовано

алгоритм вибору конструктивних заходів і реалізовано програмний модуль багатокритеріального оцінювання. У працях, опублікованих у співавторстві, внесок здобувача полягає у виконанні розрахунків, моделюванні, аналізі результатів і формулюванні висновків.

За результатами ознайомлення з дисертацією та науковими публікаціями здобувача ознак академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації не виявлено; дисертаційна робота відповідає принципам академічної доброчесності.

Зауваження та побажання до дисертаційної роботи

1. Доцільно чітко розмежувати фізичну розмірність, спосіб визначення та область застосування коефіцієнта фільтрації, коефіцієнта вологопровідності та ефективного коефіцієнта дифузивності, оскільки взаємозаміна цих понять може призвести до неправильної інтерпретації моделі.

2. У другому розділі калібрування моделі виконано за даними лабораторних експериментів в умовах, близьких до одновимірної фільтрації. Не зовсім зрозуміло, наскільки отримані параметри моделі можуть бути перенесені на реальні польові умови з неоднорідним ґрунтовим масивом і природною шаруватістю.

3. У третьому розділі як основний показник напружено-деформованого стану використано «деформації Z », хоча фактично йдеться про вертикальні переміщення вузлів скінченно-елементної моделі за напрямком осі Z . Оскільки деформація і переміщення є різними механічними величинами, доцільно чіткіше пояснити в тексті роботи зміст цього показника.

4. Доцільно детальніше пояснити, яким чином результати розрахунку поля вологості $W(z,t)$ використовуються для призначення механічних характеристик ґрунту (модуля деформації, коефіцієнта Пуассона) у скінченно-елементній моделі за окремих сценаріїв зволоження.

5. У четвертому розділі не достатньо розкрито процедуру визначення вагових коефіцієнтів критеріїв, які використовуються в методах TOPSIS, VIKOR і MOORA. Доцільно було б навести обґрунтування вибору цих коефіцієнтів та оцінити чутливість підсумкового ранжування варіантів дорожньої конструкції до їх зміни.

6. Також у четвертому розділі при виборі раціонального варіанта конструкції враховано кошторисну вартість влаштування, проте не враховано вартість подальшого утримання й ремонту дороги протягом строку служби. Доцільно було б обговорити можливість урахування експлуатаційних витрат у подальшому розвитку методики.

7. Кількісні економічні показники ефективності запропонованих рішень наведено лише на демонстраційних прикладах для одного набору дорожньо-

кліматичних умов. Розширення цієї частини кількома прикладами для різних умов підвищило б переконливість практичних рекомендацій.

Наведені зауваження мають дискусійний та рекомендаційний характер, не ставлять під сумнів достовірність основних результатів і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Касая Костянтина Івановича на тему «Удосконалення методу розрахунку інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна автомобільних доріг» є завершеною самостійною кваліфікаційною науковою працею, у якій вирішено актуальне науково-прикладне завдання у сфері будівництва та цивільної інженерії.

Структура дисертації є логічною, а наукові положення, результати математичного і числового моделювання та практичні рекомендації – взаємопов'язаними. Дисертацію оформлено відповідно до вимог наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Дисертаційна робота Касая Костянтина Івановича та наукові публікації, у яких висвітлено її основні результати, відповідають вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами.

Касай Костянтин Іванович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Рецензент,

декан факультету
транспортного будівництва,
професор кафедри транспортного
будівництва та управління майном
Національного транспортного університету,
доктор технічних наук, професор



Андрій БУБЕЛА

