

ВІДГУК

Кузло Миколи Трохимовича

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне),

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

Стійкість земляного полотна автомобільних доріг визначається насамперед фізико-механічним станом ґрунтів (гранулометричного складу, щільності тощо) з яких воно споруджене, а цей стан критично залежить від їхньої вологості й тривалості впливу зовнішніх чинників.

Особливо небезпечним є наближення вологості до рівня, за якого ґрунт переходить із твердого або напівтвердого стану у пластичний. За таких умов навіть без значного збільшення транспортного навантаження може істотно змінитися реакція ґрунтової основи.

Рух води у ненасичених ґрунтах визначається сумісною дією гравітаційного, капілярного і сорбційного потенціалів. Гідравлічна провідність, водоутримувальна здатність і дифузивність не є сталими, а залежать від вологості, щільності сухого ґрунту, пористості, гранулометричного складу та структури порового простору.

Фізично повний опис цих процесів можливий за допомогою нелінійних моделей ненасиченої фільтрації. Проте їх практичне застосування вимагає визначення кривих водоутримання і залежностей гідравлічної провідності від вологості для кожного конкретного ґрунту.



Тому розроблення спрощеної інженерної моделі, яка зберігає фізичний зміст процесу, але потребує обмеженої кількості вихідних параметрів, є актуальним напрямом досліджень.

Дисертаційна робота Касая Костянтина Івановича присвячена саме такій задачі. Автор поєднав аналітичний опис інфільтраційного зволоження, визначення критичних вологісних параметрів, моделювання механічної реакції дорожньої конструкції та вибір раціонального конструктивного рішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Аналіз дисертаційної роботи та висновку про наукову новизну свідчать, що дисертаційна робота виконана відповідно до напрямку наукових досліджень Національного транспортного університету, пов'язаного з удосконаленням методів проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг, регулюванням водно-теплогового режиму земляного полотна та дослідженням фізико-механічних характеристик ґрунтів. Окремі результати застосовано під час науково-технічного супроводу робіт на автомобільних дорогах Р-24, Н-03 і Н-25. Результати також використано в освітньому процесі Національного транспортного університету.

Наведене підтверджує зв'язок дисертації з науковими та прикладними завданнями дорожньої галузі.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і семи додатків.

У **першому розділі** виконано огляд і критичний аналіз наявних нормативних, інженерних та математичних підходів до оцінювання просочування атмосферної вологи у ґрунт узбіччя та робочий шар земляного полотна. З погляду механіки ґрунтів варто відзначити коректність зіставлення балансових методів, аналітичних розв'язків рівняння дифузії вологи та чисельних розв'язків рівняння Річардса. Обґрунтовано доцільність введення

просторово-часової функції джерела зволоження $f(z,t) = q(t)p(z)$, де $q(t)$ характеризує зміну інтенсивності надходження вологи в часі, а $p(z)$ – її просторове затухання за глибиною.

У **другому розділі** розроблено аналітичну просторово-часову модель інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна на основі розв'язку рівняння дифузії вологи. Ефективні коефіцієнти дифузивності D_{eff} відкалібровано за експериментальними профілями вологості для трьох видів ґрунтів (пісок, супісок, суглинок), а критичний ступінь водонасичення $S_{r,кр} \approx 0,80$ підтверджено за чотирма незалежними джерелами; відповідність результатів моделювання експериментальним профілям вологості підтверджено значеннями коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,977-0,997$. Із позицій дорожнього ґрунтознавства цей розділ становить найбільший науковий інтерес, оскільки поєднує класичний апарат теорії фільтрації та дифузії вологи в пористому середовищі з практично орієнтованою інженерною постановкою задачі.

У **третьому розділі** методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР виконано моделювання напружено-деформованого стану дорожньої конструкції для семи видів ґрунтів земляного полотна за різних висот насипу, рівнів транспортного навантаження та сценаріїв зволоження. За результатами значного обсягу числових розрахунків встановлено кількісні залежності зростання вертикальних переміщень вузлів моделі за напрямком Z від виду ґрунту та ступеня його зволоження, що є цінним інженерно-геотехнічним матеріалом.

У **четвертому розділі** на основі отриманих результатів розроблено методику вибору раціональних параметрів дорожньої конструкції за допомогою двоетапного багатокритеріального ранжування альтернатив методами TOPSIS, VIKOR і MOORA, реалізовану у вигляді програмного модуля VBA в середовищі Microsoft Excel.

Загалом наукові положення, аналітичні та чисельні дослідження, викладені в роботі, є обґрунтованими і достовірними, а висновки логічно впливають зі змісту виконаних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Уперше проведено числові експериментальні дослідження напружено-деформованого стану на тривимірних моделях дорожньої конструкції для різних видів ґрунтів земляного полотна, висот насипу та рівнів транспортного навантаження за умов повного і поступового зволоження.
2. Удосконалено математичну модель прогнозування інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна шляхом введення просторово-часової функції джерела зволоження, яка враховує зміну інтенсивності атмосферних опадів у часі та згасання інфільтраційного впливу за глибиною ґрунтового масиву.
3. Удосконалено методику визначення межі критичного зволоження робочого шару земляного полотна та метод вибору дорожньої конструкції за характером зміни вертикальних переміщень вузлів моделі під навантаженням з урахуванням кошторисної вартості.
4. Дістали подальшого розвитку методичні підходи до прогнозування зміни вологості ґрунтів робочого шару земляного полотна за глибиною і в часі залежно від характеристик атмосферних опадів, поверхневого стоку та фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблена методика дає змогу під час проектування, реконструкції, капітального ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг оцінювати ризик перезволоження робочого шару земляного полотна та обґрунтовувати конструктивні заходи регулювання водно-теплогового режиму. Розроблені тривимірні скінченно-елементні моделі та методика багатокритеріального вибору на основі TOPSIS, VIKOR і MOORA дозволяють визначати оптимальний варіант дорожньої конструкції з урахуванням виду ґрунту, рівня зволоження та кошторисної вартості. Результати дослідження використано під час науково-технічного супроводу робіт на автомобільних дорогах державного значення в Івано-Франківській і Хмельницькій областях, що

є позитивним моментом дисертаційного дослідження, оскільки частково охоплює різні дорожньо-кліматичні зони (четверту і другу) України. Результати також упроваджено в освітній процес Національного транспортного університету про що свідчить довідка впровадження.

Повнота відображення дисертаційної роботи в опублікованих працях

За темою дисертаційного дослідження опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 4 статті у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України та 9 праць апробаційного характеру у збірниках матеріалів конференцій, з яких одна, як повноцінна стаття, у зарубіжному виданні. Кількість і рівень публікацій відповідають вимогам щодо повного оприлюднення результатів дисертаційного дослідження.

Особистий внесок здобувача

Основні наукові результати, що виносяться на захист, – просторово-часова функція джерела зволоження, аналітичні розв'язки, калібрування ефективних коефіцієнтів дифузивності, числові розрахунки напружено-деформованого стану та методика багатокритеріального вибору – з аналізу наданих матеріалів отримано здобувачем особисто. У публікаціях, підготовлених у співавторстві з науковим керівником та іншими співробітниками кафедри, особистий внесок здобувача чітко простежується і полягає у виконанні розрахунків, обробці експериментальних даних та формулюванні висновків.

Зауваження та побажання до дисертаційної роботи

1. Прийнята в другому розділі модель зі сталим ефективним коефіцієнтом дифузивності $Deff$ є спрощеним інженерним представленням нелінійного процесу перенесення вологи у ненасиченому ґрунті. Бажано було б чіткіше обґрунтувати межі застосовності такого спрощення, зокрема для ґрунтів із вираженою нелінійністю кривої вологопровідності, а також описати порядок вибору форми та параметрів функції $p(z)$ для різних типів ґрунтів.

2. У другому розділі калібрування D_{eff} виконано для трьох видів ґрунтів (пісок, супісок, суглинок), однак не наведено супровідних характеристик випробуваних зразків – гранулометричного складу, щільності скелета ґрунту, коефіцієнта пористості, – необхідних для відтворюваності результатів калібрування іншими дослідниками.

3. Критичний ступінь водонасичення ґрунту $S_{r,кр} \approx 0,80$ прийнято як узагальнене значення для розрахунків. Це значення може залежати від гранулометричного складу, числа пластичності, щільності, структури та мінералогічного складу ґрунту, а також від прийнятого критерію критичного стану. Доцільно пояснити, яким чином прийняте узагальнене значення було пов'язане з вологісними станами та фізико-механічними характеристиками ґрунтів, використаними у скінченно-елементних моделях третього розділу.

4. У роботі не розглянуто вплив сезонного промерзання та відтавання ґрунтів земляного полотна на процес інфільтраційного зволоження, що є суттєвим фактором для дорожньо-кліматичних умов більшості регіонів України в осінньо-весняний період.

5. Не висвітлено питання можливої анізотропії фільтраційних властивостей ущільненого ґрунту земляного полотна (відмінність коефіцієнтів фільтрації/дифузивності за вертикальним і горизонтальним напрямками), яка може впливати на реальну картину поширення вологи, особливо в зоні бокового зволоження під водотривким покриттям.

6. У разі близького рівня ґрунтових вод нижня крайова умова може істотно відрізнятися від прийнятої у роботі.

7. У третьому розділі не зазначено, за якими нормативними методами визначено фізико-механічні характеристики семи досліджених видів ґрунтів, використані як вихідні дані для моделювання в ЛПРА-САПР, а також яким чином враховано зміну щільності ґрунту в процесі ущільнення при будівництві земляного полотна.

8. Верифікація за трьома укрупненими видами ґрунтів є достатньою для первинної перевірки. Для подальшого методичного або нормативного

впровадження запропонованого підходу необхідне формування ширшої бази параметрів для різних типів і станів ґрунтів.

9. У подальших дослідженнях доцільно встановити залежність калібрувальних параметрів від гранулометричного складу, числа пластичності та коефіцієнта ущільнення.

Наведені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер, не ставлять під сумнів достовірність основних наукових результатів і не знижують загальної наукової та практичної цінності дисертаційної роботи.

Загальний висновок та оцінка дисертаційної роботи

Представлені матеріали дисертаційної роботи Касая Костянтина Івановича на тему «Удосконалення методу розрахунку інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна автомобільних доріг» дозволяють зробити висновок про те, що робота є завершеним науковим дослідженням, спрямованим на вирішення актуальної задачі в галузі будівництва та цивільної інженерії, виконана з використанням сучасних методів досліджень, містить цілу низку нових наукових результатів, що мають, як наукову, так і практичну цінність.

У дисертаційній роботі вирішено важливу та актуальну науково-прикладну задачу удосконалення методу прогнозування інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна автомобільних доріг від дії атмосферних опадів.

Важливо відзначити, що робота виконана на високому науковому рівні, має чітку структуру та логічну послідовність викладу матеріалу. Термінологія, що застосовується в роботі, є загальноприйнятною, виклад результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків та рекомендацій здійснено у стилі, що забезпечує їхню зрозумілість та зручність для практичного застосування. Автор продемонстрував здатність до самостійного наукового пошуку, аналізу складних науково-технічних проблем, а також розробки інноваційних рішень. Дослідження містить оригінальні результати автора, з належним посиланням на роботи інших науковців.

Основні висновки дисертації опубліковані у фахових наукових виданнях та пройшли необхідну апробацію. Практична значущість розробок полягає в можливості їх застосування різними установами та підприємствами у сфері проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг.

Дисертаційна робота Касая Костянтина Івановича на тему «Удосконалення методу розрахунку інфільтраційного зволоження робочого шару земляного полотна автомобільних доріг» та представлені до розгляду публікації задовольняють вимогам п. 6–9 Постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022 р.).

Враховуючи актуальність дослідження, його наукову та практичну цінність, вважаю, що дисертація відповідає всім формальним вимогам, а її автор, Касай Костянтин Іванович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувача кафедри автомобільних доріг,
основ і фундаментів Національного університету
водного господарства та природокористування  Микола КУЗЛО

Підпис докт. техн. наук, професора Миколи Кузло
засвідчую:

Вчений секретар Національного університету
водного господарства та природокористування



 Зоя Сасюк