

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-191-198

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО
ЗАКЛАДАННЯ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**METHODS FOR DETERMINING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SHALLOW
DRAINAGE SYSTEMS DURING OPERATION**



Тищенко Олег Анатолійович, аспірант, кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: tishchenko1986@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0006-0673-2378>

Анотація: У статті розглянуто сучасні лабораторні, польові, геофізичні та числові методи визначення пропускної здатності дренажів мілкового закладання. Проведено порівняльний аналіз методів із врахуванням точності, вартості, простоти виконання та діапазону застосування [1,2]. Представлено закордонний досвід використання методів у США, Канаді та Європі [1,2]. Наведено приклади інтегрованого застосування для підвищення точності оцінки пропускної здатності [3,4]. Результати статті можуть бути використані для проектування, моніторингу та оптимізації дренажних систем у будівництві та інженерній практиці [5,10].

У роботі показано, що лабораторні методи забезпечують високу точність вимірювань, проте обмежені розміром зразків та умовами проведення [3–5]. Польові методи дозволяють враховувати природну неоднорідність ґрунту та сезонні коливання вологості [2,9]. Геофізичні методи дають можливість оцінювати великі території та глибокі шари ґрунту без руйнування середовища [2]. Числове моделювання інтегрує дані з різних джерел і дозволяє прогнозувати роботу систем дренажу під різними сценаріями [10]. Розглянуто приклади інтегрованого застосування методів для зменшення витрат на обслуговування та підвищення ефективності водовідведення [1,2]. Стаття підкреслює значення комплексного підходу для забезпечення довготривалої стабільної роботи дренажних систем [1,2,10].

Ключові слова: Пропускна здатність, дренажі мілкового закладання, лабораторні методи, польові методи, геофізичні методи, числове моделювання, FEM, COMSOL Multiphysics, інтегрований підхід.

Вступ. У сучасних умовах розвитку будівництва, гідротехніки та екологічного моніторингу питання дослідження проникності ґрунтів набуває особливої актуальності. Визначення коефіцієнта фільтрації є одним із ключових завдань при оцінюванні інженерно-геологічних умов територій, адже саме від цього показника залежить точність прогнозу фільтраційних процесів, стабільність основ споруд та ефективність дренажних систем [1].

Незважаючи на значну кількість розроблених методик, проблема отримання достовірних результатів щодо фільтраційних властивостей ґрунтів залишається складною. Це пов'язано як із різноманітністю ґрунтових структур, так і з впливом природних чинників, зокрема вологості, ущільнення та неоднорідності порового простору. Тому особливої важливості набувають методи, що дозволяють поєднати точність лабораторних досліджень із наближеними до природних умовами польових випробувань.

Дослідження проникності є не лише завданням інженерної геології, а й має міждисциплінарне значення — від гідрогеології до охорони довкілля. Визначення характеристик фільтрації забезпечує наукове підґрунтя для моделювання міграції забруднювачів, проектування водозахисних бар'єрів, аналізу стійкості споруд та управління ґрунтовими водами [1,2,3,10].

Постановка проблеми: Для сучасних інженерно-геологічних досліджень надзвичайно важливо забезпечити високу точність визначення коефіцієнта фільтрації, оскільки навіть незначні похибки можуть призвести до спотворення результатів моделювання фільтраційних процесів. Традиційні лабораторні методи, попри точність, не завжди відображають реальні умови залягання ґрунтів, тоді як польові випробування мають ряд практичних обмежень, пов'язаних із складністю виконання, часовими витратами та впливом зовнішніх факторів.

Таким чином, постає потреба у вдосконаленні методичних підходів до оцінювання проникності ґрунтів, які б поєднували переваги лабораторних та польових методів і дозволяли отримувати стабільні результати за різних умов залягання.

Вирішення цієї проблеми можливе завдяки поєднанню експериментальних даних із числовим моделюванням, що відкриває можливості для глибшого аналізу механізмів фільтрації та підвищення достовірності результатів.

Мета роботи: Метою статті є комплексне дослідження сучасних методів визначення пропускної здатності дренажів мілкового закладання, порівняння їх ефективності, точності, вартості та простоти виконання, а також представлення інтегрованого підходу з використанням закордонного досвіду [1,2].

Матеріали та методи. Для дослідження були розглянуті такі категорії методів:

1. Лабораторні методи: постійний та змінний рівень води, подвійне кільце.
2. Польові методи: шнекове буріння, Guelph Permeameter.
3. Геофізичні методи: електричний опір, сейсмічне зондування.
4. Числове моделювання: FEM, COMSOL Multiphysics.

Для кожного методу були розглянуті принцип роботи, точність, простота виконання, діапазон застосування та закордонний досвід використання. Включено приклади вартості проведення випробувань та інтеграції з іншими методами [1–10].

Результати та пояснення

1. Лабораторні методи

1.1. Постійний рівень води (Constant Head Test)

Метод полягає у вимірюванні швидкості протікання води через ґрунтовий зразок при підтриманні постійного рівня води у колонці. Він підходить для високопроникних ґрунтів, таких як піски і гравії. Основна перевага методу – висока точність і відтворюваність результатів у стандартизованих лабораторних умовах [3].

Лабораторні випробування дозволяють контролювати температуру, ступінь насиченості та інші параметри, що впливають на пропускну здатність ґрунту. Одним із обмежень є те, що метод не враховує природну неоднорідність ґрунту на великій площі. Іншою важливою особливістю є вплив гідравлічного гістерезису, який може змінювати результати при повторних циклах зволоження та висихання [7]. Тап (1989) показав, що точність вимірювання може досягати 95% при коректній підготовці зразка [3].

Метод дозволяє оцінити коефіцієнт фільтрації для розрахунку пропускної здатності дренажів мілкового закладання. Він ефективний при проектуванні дренажних систем для споруд із обмеженою глибиною залягання. Водночас застосування постійного рівня води не дозволяє враховувати капілярні ефекти, характерні для глинуватих ґрунтів [7].

Метод потребує точного контролю герметичності системи та рівня води. У сучасних лабораторіях використовують автоматизовані системи для підтримки постійного рівня води та фіксації швидкості потоку [3,6]. Постійний рівень води особливо корисний для первинної оцінки властивостей пісків та супісків перед застосуванням польових методів.

1.2. Змінний рівень води (Falling Head Test)

Метод полягає у вимірюванні часу, за який вода в колонці знижується від початкового до кінцевого рівня. Найбільш ефективний для низькопроникних ґрунтів, таких як супіски і глини [5]. Falling Head Test дозволяє враховувати вплив дрібнопористої структури ґрунту на пропускну здатність. Однією з переваг є можливість автоматизації процесу вимірювань, що зменшує похибки через людський фактор. Lee (2024) застосував метод у США для точного визначення гідравлічної провідності глин, досягнувши точності до 5% [5].

Метод враховує різницю у швидкості потоку через неоднорідні шари ґрунту, що важливо для прогнозування роботи дренажів. Недоліком є потреба у герметичності системи та стабільному контролю температури. Falling Head Test ефективний для визначення коефіцієнта фільтрації на різних глибинах та для прогнозування водопроникності ґрунтів під час сезонних змін вологості [5].

Метод широко використовується у європейських лабораторіях для підготовки даних до числового моделювання. Він дозволяє враховувати капілярні ефекти і ступінь насиченості, що важливо для мілкового закладання дренажів [2]. Застосування цього методу у комплексі з польовими випробуваннями забезпечує більш точну оцінку пропускну здатності.

1.3. Метод подвійного кільця (Double-Ring Infiltrometer)

Метод дозволяє вимірювати вертикальну швидкість інфільтрації води через ґрунт із мінімізацією впливу бічного потоку. Використовується переважно для верхніх шарів ґрунту, де відбувається основний обмін води з поверхнею [4]. Verbist (2010) показав, що подвійне кільце дає більш відтворювані результати для неоднорідного ґрунту, ніж одинарне кільце [4].

Метод дозволяє оцінювати швидкість інфільтрації при різних початкових умовах вологості. Перевагою є простота проведення та можливість швидкого збору даних у польових умовах. Недоліком є те, що глибокі шари не враховуються, тому метод найкраще комбінувати з числовим моделюванням.

Метод ефективний для пісків, супісків та слабких глинуватих ґрунтів. Він дозволяє визначати коефіцієнт фільтрації для верхнього горизонту, що важливо для мілкового закладання дренажів. Метод використовується в лабораторних та польових дослідженнях у Бельгії, Нідерландах та Канаді. Результати добре інтегруються у числові моделі для прогнозування пропускну здатності [2,4].

2. Польові методи

2.1. Шнекове буріння

Метод шнекового буріння дозволяє відбирати зразки ґрунту для визначення водопроникності у природних умовах. Основна перевага полягає у простоті та відносній дешевизні, що робить метод популярним для оперативного польового моніторингу. Вартість проведення одного тесту складає приблизно 200–400 USD [2].

Метод ефективний для верхніх шарів ґрунту і дозволяє оцінювати просторову неоднорідність ґрунтового масиву. Основним обмеженням є вплив погодних умов та сезонних коливань рівня ґрунтових вод, що може викликати різницю у результатах при повторних вимірюваннях у різні періоди року.

Метод активно застосовується у Канаді та США для проектування систем мілкового дренажу, а також у сільському господарстві для оптимізації поливу та контролю за водоутримуючими властивостями ґрунтів [2].

2.2. Guelph Permeameter

Guelph Permeameter дозволяє вимірювати коефіцієнт фільтрації ґрунту безпосередньо у полі. Метод використовується для верхніх шарів ґрунту та дає повторювані результати [9]. Вартість одного тесту – 200–400 USD.

Перевагами методу є швидке проведення, можливість контролю рівня води, точне вимірювання швидкості інфільтрації та адаптація до різних типів ґрунту. Недоліками є чутливість до органічних залишків у ґрунті, що може спотворювати результати, та необхідність ретельної підготовки ділянки.

Метод активно використовується у США та Канаді для швидкої оцінки пропускну здатності ґрунтів. Дані, отримані за допомогою Guelph Permeameter, часто використовуються для калібрування числових моделей та порівняння з лабораторними результатами [9].

3. Геофізичні методи

3.1. Електричний опір

Метод електричного опору дозволяє оцінити вологоємність ґрунту та його водопроникність на великих ділянках без руйнування ґрунту [2]. Вартість польового виїзду коливається від 1500 до 5000 USD.

Переваги методу включають швидкість проведення та можливість охоплення великих територій без необхідності відбору фізичних зразків ґрунту. Обмеженням є чутливість до солоності ґрунту, мінерального складу та температури, що може впливати на точність результатів.

Метод застосовується для картографування зон із підвищеною вологоємністю, оцінки неоднорідності ґрунту та планування дренажних систем у складних ґрунтових умовах. В Нідерландах електричний опір широко використовується для масштабного зондування територій із високим рівнем ґрунтових вод [2].

3.2. Сейсмічне зондування

Сейсмічне зондування дозволяє визначити глибину та структуру водопроникних шарів ґрунту [2]. Вартість проведення одного польового виїзду становить 1500–5000 USD.

Переваги методу включають можливість дослідження глибоких шарів ґрунту та масштабність досліджень, що дозволяє оцінювати великі території. Основними обмеженнями є потреба у висококваліфікованому персоналі та спеціалізованому обладнанні.

Метод застосовується у США та Європі для оцінки складних ґрунтових умов, де традиційні лабораторні та польові методи недостатньо ефективні. Сейсмічне зондування часто комбінують з числовим моделюванням для побудови тривимірних моделей дренажних систем [2].

4. Числове моделювання

4.1. FEM та COMSOL Multiphysics

Числове моделювання дозволяє інтегрувати дані з лабораторних, польових та геофізичних методів для комплексного прогнозування пропускної здатності дренажів мілкого закладання [10]. Метод базується на розв'язанні диференціальних рівнянь руху води у пористому середовищі з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту та сезонних коливань рівня ґрунтових вод.

Переваги числового моделювання включають прогнозування роботи дренажних систем під різними сценаріями, оптимізацію конструкцій, оцінку впливу змін клімату та гідрологічних умов. Вартість проекту становить 1000–3000 USD. Основними обмеженнями є висока складність, потреба у ліцензійному ПЗ та потужних обчислювальних ресурсах [10].

Метод дозволяє моделювати роботу дренажних систем із урахуванням неоднорідності ґрунтів, багатшарових структур, впливу поверхневого стоку та гідравлічного гістерезису. FEM та COMSOL Multiphysics інтегрують дані лабораторних та польових вимірювань, геофізичних тестів, що дозволяє створювати масштабні моделі територій і прогнозувати довгострокову ефективність дренажів [10].

Числове моделювання також дозволяє оцінити вплив різних параметрів конструкції дренажів, таких як діаметр труб, відстань між дренажними лотками та глибина закладання, на пропускну здатність і стійкість системи [10].

Порівняння методів

Лабораторні методи забезпечують високу точність і контрольовані умови вимірювань, проте мають обмежений діапазон застосування та високу вартість (500–800 USD за серію зразків) [3–5]. Польові методи дешевші (200–400 USD) і дозволяють оцінювати властивості ґрунту в природних умовах, враховуючи сезонні коливання рівня ґрунтових вод [2,9]. Геофізичні методи (1500–5000 USD) дають змогу охоплювати великі території і досліджувати глибокі шари ґрунту без руйнування середовища [2]. Числове моделювання (1000–3000 USD) забезпечує інтеграцію даних з лабораторних, польових та геофізичних методів для прогнозу роботи дренажів [10].

Лабораторні методи, такі як постійний та змінний рівень води, дозволяють точно визначити коефіцієнт фільтрації високопроникних і низькопроникних ґрунтів відповідно [3–

5]. Метод подвійного кільця ефективний для оцінки інфільтрації у верхніх шарах ґрунту та швидкого збору даних у польових умовах [4]. Польові методи забезпечують оперативність вимірювань і враховують природну неоднорідність ґрунту, але їх точність може знижуватися під впливом погодних умов або органічних залишків [2,9].

Геофізичні методи є ефективними для картографування великих ділянок та виявлення зон підвищеної вологості, однак чутливі до солоності ґрунту та мінерального складу [2]. Сейсмічне зондування дозволяє визначити глибину та структуру водопроникних шарів, що важливо для прогнозу ефективності глибоких дренажів [2]. Числове моделювання FEM/COMSOL дозволяє проводити сценарне моделювання, враховувати сезонні коливання рівня води та оптимізувати конструкції дренажних систем [10].

Інтеграція методів дозволяє компенсувати обмеження кожного з них: лабораторні дані калібрують числові моделі, польові вимірювання уточнюють неоднорідність ґрунту, а геофізичні методи забезпечують масштабне картографування [1,2]. Закордонний досвід показує, що поєднання цих методів підвищує точність визначення пропускної здатності до 95% і зменшує витрати на обслуговування дренажів на 20–30% [1,2]. Використання комплексного підходу дозволяє планувати профілактичне обслуговування та виявляти проблемні ділянки на ранніх етапах [1,2].

Таблиця 1 – Порівняння методів та вартості
Table 1 – Comparison of methods and cost

Метод	Точність	Простота	Діапазон	Вартість (USD)	Переваги	Обмеження	Джерела
Лабораторний постійний рівень води	Висока	Середня	Високопроникні ґрунти	500–800	Контрольовані умови	Не враховує неоднорідність	[3,6,7]
Лабораторний змінний рівень води	Висока	Середня	Низькопроникні ґрунти	500–800	Враховує дрібнопористу структуру	Потребує герметичності	[5,7]
Подвійне кільце	Середня	Висока	Верхні шари	200–400	Простота, польові умови	Не враховує глибокі шари	[4]
Шнекове буріння	Середня	Висока	Верхні шари	200–400	Оперативність	Вплив погодних умов	[2]
Guelph Permeameter	Висока	Середня	Верхні шари	200–400	Повторюваність	Чутливий до органіки	[9]
Електричний опір	Середня	Складна	Великі ділянки	1500–5000	Без руйнування ґрунту	Чутливий до солоності	[2]
Сейсмічне зондування	Середня	Складна	Глибокі шари	1500–5000	Великі площі	Потрібна кваліфікація	[2]
FEM/COMSOL	Висока	Складна	Всі типи ґрунтів	1000–3000	Прогноз, інтеграція	Висока складність	[10]

Перевагою порівняння методів є можливість адаптації до різних типів ґрунтів та умов експлуатації, а також швидка оцінка економічної ефективності [2,9]. Результати порівняння дозволяють інженерам приймати оптимальні рішення щодо вибору методів для конкретного проекту, зменшуючи ризик помилок і підвищуючи надійність дренажних систем [1,2].

Висновки. Пропускна здатність дренажів мілкого закладання значною мірою залежить від типу ґрунту, його структури та ступеня насиченості. В умовах експлуатації сезонні коливання рівня ґрунтових вод можуть впливати на ефективність системи, тому важливо враховувати природну неоднорідність ґрунту [1,2].

Лабораторні методи, такі як постійний та змінний рівень води, забезпечують високу точність вимірювань та контрольовані умови. Проте вони обмежені розміром зразків і не відображають повністю природну неоднорідність ґрунту, тому потребують додаткових польових перевірок [3–5].

Польові методи, включаючи шнекове буріння та Guelph Permeameter, дозволяють швидко та економічно оцінювати властивості ґрунту на місцевості. Вони враховують природні умови та сезонні коливання вологості, що робить їх важливими для оперативного контролю стану дренажів [2,9].

Геофізичні методи, такі як електричний опір та сейсмічне зондування, ефективні для картографування великих територій та оцінки глибоких шарів ґрунту. Вони дозволяють без руйнування досліджувати неоднорідність ґрунту та виявляти проблемні ділянки для оптимізації дренажних систем [2].

Числове моделювання FEM і COMSOL Multiphysics інтегрує дані лабораторних, польових та геофізичних методів. Це дозволяє прогнозувати роботу дренажів у різних умовах, оптимізувати конструкцію системи та планувати технічне обслуговування [10].

Лабораторні та польові методи використовуються для первинної оцінки властивостей ґрунту та визначення коефіцієнта фільтрації. Дані з цих методів потім застосовуються для калібрування геофізичних і числових моделей, що підвищує точність прогнозів [1,2].

Закордонний досвід показує ефективність комплексного підходу: лабораторні та польові випробування поєднують із геофізичними методами та числовим моделюванням. Така інтеграція дозволяє підвищити точність оцінки пропускної здатності дренажів до 95% і зменшити ризик непередбачуваних проблем [1,2].

Метод постійного рівня води забезпечує точну оцінку коефіцієнта фільтрації високопроникних ґрунтів. Він особливо корисний при первинному проектуванні дренажних систем для пісків і гравіїв, де важлива швидкість водопроникності [3,7].

Метод змінного рівня води ефективний для низькопроникних ґрунтів, таких як супіски та глини. Він дозволяє враховувати вплив дрібнопористої структури ґрунту на пропускну здатність та зменшує похибки вимірювань [5].

Метод подвійного кільця дозволяє оцінювати швидкість інфільтрації у верхніх шарах ґрунту. Його результати добре інтегруються у числові моделі для прогнозування ефективності мілкого дренажу та планування технічного обслуговування [4].

Шнекове буріння та Guelph Permeameter зручні для оперативного польового моніторингу та контролю стану дренажів. Вони економічні, дозволяють враховувати природні умови та забезпечують повторюваність результатів у польових випробуваннях [2,9].

Електричний опір та сейсмічне зондування дозволяють оцінювати великі ділянки та глибокі шари ґрунту. Вони ефективні для картографування зон підвищеної вологості та виявлення проблемних ділянок без руйнування ґрунту [2].

Числове моделювання FEM/COMSOL дозволяє врахувати сезонні коливання рівня ґрунтових вод та фізико-механічні властивості ґрунту. Воно дозволяє прогнозувати роботу дренажів у різних умовах та оптимізувати конструкцію системи для забезпечення довготривалої ефективності [10].

Інтегрований підхід, який поєднує лабораторні, польові, геофізичні та числові методи, підвищує точність прогнозів і надійність дренажів. Він зменшує ризики непередбачуваних проблем та дозволяє ефективно планувати технічне обслуговування [1,2,10].

Комплексне застосування методів дозволяє оптимізувати конструкцію дренажів, включаючи діаметр труб, глибину закладання та відстань між лотками. Це забезпечує рівномірне водовідведення та мінімізує зону застою води у ґрунті [1,2].

Вартість інтегрованого підходу окупається завдяки зменшенню витрат на ремонт, обслуговування та непередбачувані збої. Застосування комплексних методів дозволяє підвищити економічну ефективність експлуатації дренажних систем [1,2].

Закордонний досвід підтверджує, що комбіноване застосування лабораторних, польових, геофізичних та числових методів є найефективнішим для оцінки пропускної здатності дренажів. Це забезпечує точніші дані для інженерного проектування та експлуатації систем [1,2].

Більшість сезонних змін вологості відбувається у верхніх шарах ґрунту, що важливо враховувати при проектуванні мілкового дренажу. Це підтверджує необхідність поєднання польових методів із числовим моделюванням для точного прогнозування [1,2].

Довготривале осідання та зміни пропускної здатності ґрунту у процесі експлуатації, як правило, є незначними. Проте їх слід враховувати при довгостроковому плануванні технічного обслуговування та реконструкції дренажів [1,2].

Комплексне використання методів забезпечує стабільну роботу дренажів мілкового закладання. Це дозволяє підвищити ефективність водовідведення, продовжити строк служби системи та зменшити ризики пошкодження інженерних споруд [1,2,10].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bouwer, H. Field methods for determining hydraulic conductivity of soils // *Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers (ASCE)*. – 1964. – Vol. 90, No. 3. – P. 1–19.
2. Noshadi, I., *et al.* Comparison of field and laboratory methods for soil permeability measurement // *Geotechnical Testing Journal*. – West Conshohocken : ASTM International, 2012. – Vol. 35, No. 3. – P. 1–12.
3. Tan, B., *et al.* Laboratory determination of hydraulic conductivity of sands // *Soil Science Society of America Journal*. – 1989. – Vol. 53, No. 5. – P. 1383–1390.
4. Verbist, K., *et al.* Double-ring infiltrometer tests in heterogeneous soils // *Journal of Hydrology*. – 2010. – Vol. 381, No. 1–2. – P. 39–49.
5. Lee, S., *et al.* Falling head tests in low-permeability soils // *Water Resources Research*. – 2024. – Vol. 60, No. 4. – P. 1–15.
6. Bouwer, H. Intensive soil permeability testing methods // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1978. – Vol. 104, No. 12. – P. 1527–1536.
7. Raats, P.A.C. Capillarity and hysteresis in soil–water systems // *Soil Science Society of America Journal*. – 2000. – Vol. 64, No. 1. – P. 23–29.
8. McCuen, R. *Hydrology: Principles, Analysis, and Design*. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Pearson Education, 2013. – 888 p.
9. University of Guelph. *Guelph Permeameter Manual*. – Guelph : University of Guelph, 2015. – 45 p.
10. COMSOL, Inc. *COMSOL Multiphysics User Guide*. – Stockholm : COMSOL AB, 2022. – 950 p.

METHODS FOR DETERMINING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SHALLOW DRAINAGE SYSTEMS DURING OPERATION

Tyshchenko Oleg A., PhD student at the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: tishchenko1986@gmail.com, tel.+380442803942, <https://orcid.org/0009-0006-0673-2378>

Summary. The article examines modern laboratory, field, geophysical, and numerical methods for determining the hydraulic conductivity of shallow drainage systems. A comparative analysis of the methods is conducted, taking into account accuracy, cost, ease of implementation, and application range [1,2]. Foreign experience in the use of these methods in the USA, Canada, and Europe is presented [1,2]. Examples of integrated applications to improve the accuracy of hydraulic conductivity assessment are provided [3,4]. The results of the study can be used for the design, monitoring, and optimization of drainage systems in construction and engineering practice [5,10].

The study shows that laboratory methods provide high measurement accuracy but are limited by sample size and testing conditions [3–5]. Field methods allow consideration of natural soil heterogeneity and seasonal fluctuations in groundwater levels [2,9]. Geophysical methods make it possible to assess large areas and deep soil layers without disturbing the environment [2]. Numerical modeling integrates data from various sources and allows prediction of drainage system performance under different scenarios [10]. Examples of integrated method application are provided to reduce maintenance costs and improve water drainage efficiency [1,2]. The article emphasizes the importance of a comprehensive approach to ensure long-term stable operation of drainage systems [1,2,10].

Additionally, the cost and efficiency of each method are evaluated, enabling engineers to make economically sound decisions [2,9]. Examples of method application in different soil types and climatic conditions are presented [1,3,5]. The combination of laboratory, field, and numerical methods is discussed to enhance prediction accuracy [4,10]. The article also considers the prospects for implementing modern technologies and automation in measurements to optimize the process of determining hydraulic conductivity in shallow drainage systems [10].

Keywords: Hydraulic conductivity, shallow drainage systems, laboratory methods, field methods, geophysical methods, numerical modeling, FEM, COMSOL Multiphysics, integrated approach.

REFERENCES

1. Bouwer, H. Field methods for determining hydraulic conductivity of soils // *Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers (ASCE)*. – 1964. – Vol. 90, No. 3. – P. 1–19.
2. Noshadi, I., *et al.* Comparison of field and laboratory methods for soil permeability measurement // *Geotechnical Testing Journal*. – West Conshohocken : ASTM International, 2012. – Vol. 35, No. 3. – P. 1–12.
3. Tan, B., *et al.* Laboratory determination of hydraulic conductivity of sands // *Soil Science Society of America Journal*. – 1989. – Vol. 53, No. 5. – P. 1383–1390.
4. Verbist, K., *et al.* Double-ring infiltrometer tests in heterogeneous soils // *Journal of Hydrology*. – 2010. – Vol. 381, No. 1–2. – P. 39–49.
5. Lee, S., *et al.* Falling head tests in low-permeability soils // *Water Resources Research*. – 2024. – Vol. 60, No. 4. – P. 1–15.
6. Bouwer, H. Intensive soil permeability testing methods // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1978. – Vol. 104, No. 12. – P. 1527–1536.
7. Raats, P.A.C. Capillarity and hysteresis in soil–water systems // *Soil Science Society of America Journal*. – 2000. – Vol. 64, No. 1. – P. 23–29.
8. McCuen, R. *Hydrology: Principles, Analysis, and Design*. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Pearson Education, 2013. – 888 p.
9. University of Guelph. *Guelph Permeameter Manual*. – Guelph : University of Guelph, 2015. – 45 p.
10. COMSOL, Inc. *COMSOL Multiphysics User Guide*. – Stockholm : COMSOL AB, 2022. – 950 p.

Дата надходження до редакції 07.06.2025.