

## ВІДГУК

на дисертаційну роботу Цветкової Тетяни Павлівни „**Математичне моделювання перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах**”, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Процеси масоперенесення при фільтрації ґрунтових вод на сьогодні вивчені достатньо добре та на основі їх досліджень розвинено теорію вологоперенесення. Дослідження процесів масоперенесення проведені окремо в насичених та ненасичених ґрунтах повного та неповного насичення без урахування процесу вологоперенесення, проте питання впливу вологоперенесення на процес масоперенесення досліджені недостатньо.

Повний опис гідродинамічних процесів вимагає розгляду процесу перенесення солей з урахуванням процесів фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах, що вимагає побудови нелінійних математичних моделей, які б описували ці взаємопов'язані процеси.

Таким чином, великої уваги заслуговує клас задач по математичному та комп'ютерному моделюванню вищевказаних процесів у насичених та ненасичених ґрунтах, а саме задач масоперенесення при фільтрації ґрунтових вод, при розв'язанні яких моделюються процеси поширення забруднень, засолення та очищення родючих ґрунтів, та задач вологоперенесення – моделювання динаміки руху вологи в насичених і ненасичених ґрунтах.

З метою зменшення або уникнення розвитку небезпечних процесів застосовуються гідромеліоративні заходи, які включають створення дренажних систем, за допомогою яких відбувається відведення сольових розчинів та надмірної ґрунтової вологи або, навпаки, нагнітання води. Моделювання процесів, що відбуваються у цих випадках, зокрема дослідження динаміки процесів перенесення солей при фільтрації ґрунтових вод у насичених ґрунтах та вологоперенесення у ненасичених ґрунтових масивах, є важливим при освоєнні засоленних та забруднених ґрунтів, експлуатації гідромеліоративних систем.

Також великої уваги заслуговують питання моделювання гідродинамічних процесів в областях повного та неповного водонасичення внаслідок зміни в часі положення вільної поверхні, яка є внутрішньою межею контакту цих областей в ґрунтових огорожувальних дамбах при роботі гідроакумулюючих електростанцій. Актуальними є ці питання і при роботі відкачувальних або нагнітальних свердловин в результаті.

Тому дисертаційна робота, присвячена розробці математичних та алгоритмічних засобів моделювання взаємозв'язаних процесів перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах, є **актуальною і практично важливою**.

Представлені в дисертаційній роботі результати виконані в рамках трьох науково-дослідних тем Національного університету водного господарства та

природокористування. Зокрема, Цветкова Т.П. побудувала нову математичну модель перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтах, побудувала обчислювальні алгоритми для чисельного розв'язання контактної-крайових задач, розробила комплекс програм для дослідження взаємозв'язаних процесів перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення з рухомою та нерухомою внутрішніми поверхнями контакту насичено-ненасичених ґрунтових середовищ.

Дисертаційна робота виконана в межах напрямку «Раціональне природокористування», зафіксованого як пріоритетний у статті 3 Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» у діючій на теперішній час редакції.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

У дисертаційній роботі Цветкової Т.П. *вперше* побудовано нелінійну математичну модель процесів перенесення солей при фільтрації ґрунтових вод у насичених ґрунтах та вологоперенесення в насичених ґрунтових середовищах.

Розроблена математична модель описує взаємозв'язані гідродинамічні процеси, які проходять у насичених та ненасичених зонах ґрунту з рухомою межею контакту цих областей. Тому математична модель складається з двох систем диференціальних рівнянь з урахуванням залежностей коефіцієнтів рівнянь від концентрації, напорів та осмосу і відповідними крайовими умовами та умовами спряження, заданими на внутрішній межі контакту областей повного та неповного насичення.

На основі побудованої математичної моделі сформульовано контактні-крайові задачі у лінійних та нелінійних випадках, одновимірних та двовимірних постановках. Зокрема, *вперше* узагальнено математичну модель взаємозв'язаних процесів перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах на процес перенесення солей під дією плоско-вертикальної безнапірної стаціонарної фільтрації сольового розчину до горизонтального систематичного дренажу при наявній рухомій та нерухомій вільній поверхні ґрунтових вод.

Контактні-крайові задачі, що описують дані процеси, *вперше* розглянуті у випадках відведення сольових розчинів з ґрунтового середовища або нагнітання води за допомогою дренажних систем. Досліджувані області мають криволінійні та рухомі межі, що ускладнює знаходження наближених розв'язків в таких областях.

Для знаходження чисельних розв'язків розглянутих задач *вперше* модифіковано методи скінченних різниць з використанням чисельних методів конформних відображень на випадок розв'язування нелінійних контактних-крайових задач.

У сформульованих контактних-крайових задачах враховано явище осмосу та *вперше* досліджено його вплив на процес розподілу напорів та концентрації сольових розчинів в області насичено-ненасиченого ґрунту. На основі чого встановлено *нові* закономірності процесу перенесення солей при вологоперенесенні та осмосі у ненасичених ґрунтах, при фільтрації сольових розчинів до горизонтального систематичного дренажу та вологоперенесенні у

насичено-ненасичених ґрунтах за наявної рухомої або нерухомої внутрішніх поверхонь контакту ґрунтових масивів.

Т.П. Цветковою була проведена програмна реалізація розроблених методів чисельних розрахунків та за допомогою розробленого програмного забезпечення проведено чисельні експерименти, які показали, що сумісне урахування процесів фільтрації та вологоперенесення значно впливає на процес розподілу концентрації сольових розчинів в насичено-ненасиченому ґрунті та дозволяє адекватно дослідити протікання гідродинамічних процесів. Встановлено рух вільної поверхні вниз на глибину до 15% під дією фільтраційного потоку. Під дією нестационарної фільтрації сольових розчинів та вологоперенесення з урахуванням осмотичних явищ вільна поверхня рухається вниз і її положення змінилося на 40%, що потрібно враховувати під час експлуатації гідромеліоративних систем. Встановлено зростання напорів та розподілу концентрації солей при нестационарній фільтрації ґрунтових вод, що приводить до інтенсивнішого очищення ґрунтових масивів з часом.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуто процеси перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у ненасичених та насичених ґрунтах та відзначена важливість проведення досліджень щодо розвинення апарату їх математичного моделювання. Проведено огляд існуючих математичних моделей, обґрунтовано актуальність побудови нових моделей і засобів математичного опису гідродинамічних процесів у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах.

У **другому розділі** побудовано одновимірні математичні моделі:

- перенесення солей з урахуванням процесу вологоперенесення у нелінійному випадку;

- взаємозв'язаних процесів перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах у лінійному та нелінійному випадках.

Побудова першої моделі обумовлена тим, що процес солеперенесення раніше розглядався без урахування вологоперенесення у ненасичених ґрунтах.

Друга математична модель описана двома системами диференціальних рівнянь з відповідними крайовими умовами, заданими на межах областей повного, неповного насичення та внутрішній межі контакту цих областей.

Обидві математичні моделі враховують явище осмосу, а коефіцієнти рівнянь є функціональними залежностями, що дозволяє більш адекватно описати процеси, що ними описуються.

На основі цих моделей сформульовано крайову та контактну-крайові задачі, розв'язок яких знайдено відповідним чином модифікованим методом скінченних різниць.

У розділі наводяться результати експериментів на основі розроблених й програмно реалізованих обчислювальних методів та аналіз їх результатів.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи здійснено математичне моделювання процесу перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтах у двовимірному випадку.

На основі розробленої математичної моделі сформульовано контактну-

крайові задачі перенесення солей з урахуванням процесів фільтрації ґрунтових вод до системи горизонтальних дрен та вологоперенесення у насичено-ненасиченому ґрунтовому середовищі при наявній вільній поверхні ґрунтових вод, яка є рухомою або нерухомою. За допомогою дренажної системи відбувається відведення сольових розчинів з пористого середовища або нагнітання рідини, чим зумовлене дослідження протікання процесу солеперенесення у випадках осушення та зволоження ґрунту. Оскільки представлена система дренажу є симетричною, тому розглянуто її виділений фрагмент, який складається з областей повного та неповного насичення, на межі яких задана вільна поверхня рівня ґрунтових вод.

Виділена область має криволінійні межі, а положення вільної поверхні уточнюється в процесі розв'язування задачі. Для знаходження розв'язку поставленої контактної-крайової задачі використано метод скінченних різниць з використанням методу чисельних конформних відображень. Зокрема, чисельний розв'язок задачі фільтрації сольових розчинів знайдено ітераційним методом Гауса-Зейделя, а солеперенесення та вологоперенесення знайдено за локально-одновимірним методом О.А. Самарського з використанням монотонних різницевоїх схем та методу прогонки, які було модифіковано на випадок розв'язання нелінійних крайових задач в областях повного та неповного насичення.

Розроблені різницеві схеми та обчислювальні алгоритми розв'язування задач були програмно реалізовані й на їх основі було проведено моделювання процесу масоперенесення при фільтрації сольових розчинів до дрени в області повного насичення та вологоперенесення в області неповного насичення, процесу солеперенесення в насичено-ненасиченій області.

В результаті проведення серій чисельних експериментів встановлено рух вільної поверхні донизу під дією фільтраційного потоку зі зростанням часу, що зумовлює перерозподіл напорів та концентрації сольових розчинів. За результатами аналізу отриманих розв'язків зроблено висновок стосовно того, що з урахуванням нестационарної фільтрації п'єзометричні напори зростають інтенсивніше й це призводить до більш швидкого вимивання сольових розчинів з пористого середовища.

У розділі також наводяться дані чисельних експериментів за різних значень вхідних даних на основі яких робиться висновок про важливість урахування залежностей параметрів фільтраційного потоку та вологоперенесення від їх фізико-хімічних властивостей та властивостей ґрунтового середовища.

**Зміст дисертації** у повній мірі відображає мету роботи та основні поставлені задачі для досягнення цієї мети.

**Достовірність одержаних результатів, обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації**, забезпечується за рахунок строгих теоретичних викладок, зокрема, при побудові математичних моделей контактної-крайових задач; коректності постановок розглянутих у роботі контактної-крайових задач; використання при цьому апробованих

методів математичної фізики, підходів механіки пористого середовища, теорій дифузії та фільтрації, аналітичної хімії, теорії диференціальних рівнянь, а також за рахунок узгодження окремих результатів з відомими у літературі теоретичними та експериментальними даними.

Розроблені автором обчислювальні алгоритми базуються на обґрунтованих методах математичної фізики, теорії диференціальних рівнянь, чисельних методах та реалізовані за допомогою сучасних засобах обчислювальної техніки.

Обґрунтованість наукових положень, результатів та висновків дисертації забезпечується також апробацією результатів дослідження на 16 міжнародних та вітчизняних наукових конференціях, 4 наукових семінарах ВНЗ України, де робота доповідалась у повному обсязі. Основні результати, отримані у роботі, безпосередньо застосовані на практиці, що засвідчено довідками про використання результатів дисертаційної роботи.

### **Повнота викладу основних результатів у опублікованих матеріалах.**

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 25 наукових працях, що включають 9 статей, з яких 1 у науковому виданні, що входить до наукометричних баз SCOPUS, Inspec, Google Scholar та ін., 8 статей у наукових фахових виданнях з технічних наук; 16 – матеріалів міжнародних і вітчизняних конференцій. Без співавторів опубліковано 1 роботу.

Аналіз опублікованих автором наукових праць показав, що в них достатньо повно викладено основні результати, отримані у дисертації. Кількість публікацій та їх рівень відповідають встановленим вимогам.

### **Практична цінність отриманих у роботі результатів.**

Отримані у дисертаційній роботі обчислювальні алгоритми стали основою для створення програмного комплексу, призначеного для чисельного моделювання процесу перенесення солей з урахуванням фільтрації ґрунтових вод у насичених та вологоперенесенні у ненасичених ґрунтах, проведення досліджень протікання цих процесів у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах для прогнозування та оцінки стану засолення сільськогосподарських земель, поширення фронту забруднень ґрунтових вод, встановлення рівня вологості ґрунту з метою запобігання підтоплення територій.

Впровадження отриманих практичних результатів дисертаційної роботи здійснено Рівненським обласним управлінням водних ресурсів при складанні завдань на проектування та будівництво меліоративних систем.

Викладені в дисертаційній роботі дослідження використано при підготовці спецкурсів з дисциплін «Чисельні методи математичної фізики», «Теорія систем та математичне моделювання» для студентів Національного університету водного господарства та природокористування МОН України за спеціальністю «Прикладна математика».

Результати використання дисертаційних досліджень підтверджено довідками про впровадження, які наведено у додатках до дисертації.

### **Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів.**

Розроблені математичні моделі процесу солеперенесення з урахуванням процесів фільтрації та вологоперенесення дозволяють провести комплексне дослідження даних взаємозв'язаних процесів одночасно у насичених та ненасичених областях, що розширює клас розв'язуваних контактено-крайових задач математичної фізики.

Побудову обчислювальних алгоритмів розв'язування задач здійснено за допомогою чисельних методів математичної фізики шляхом їх адаптації до розв'язування нелінійних контактено-крайових задач, які реалізовано за допомогою сучасних обчислювальних засобів, що є важливим внеском у розвиток сучасних чисельних методів.

Результати та висновки дисертаційної роботи **доцільно використати** для дослідження динаміки протікання процесу перенесення солей у насичених та ненасичених ґрунтах для прогнозування та оцінки стану засолення ґрунтів, забруднення ґрунтових вод, для запобігання підтоплення територій, при будівництві та експлуатації гідромеліоративних систем.

### **Відповідність дисертації та автореферату встановленим вимогам.**

Дисертаційна робота Цветкової Т.П. відповідає вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а також паспорту спеціальності «Математичне моделювання та обчислювальні методи» (технічні науки), а саме напрямкам “Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів досліджуваних об'єктів”, “Розвиток, ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження...”.

**Автореферат** відповідає змісту дисертації і відображає отримані в ній основні наукові результати та висновки.

Дисертаційна робота та автореферат написані грамотно, послідовно та мають завершену логічну структуру. Стиль викладення наукових положень та отриманих результатів забезпечує доступність їх сприйняття.

### **Зауваження до дисертаційної роботи:**

1) при описі обчислювальних експериментів не вказано, які ґрунти розглядаються й за текстом роботи важко визначити відповідність використаних значень коефіцієнтів математичних моделей фізичним об'єктам та процесам;

2) у роботі не наведено обґрунтування стосовно вибору чисельних методів розв'язання задач моделювання процесу перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтах у двовимірному випадку (розділ 3);

3) робота містить недостатньо повний опис програмної реалізації розроблених чисельних алгоритмів;

4) графічне представлення результатів математичного моделювання містить недоліки, що ускладнюють його сприйняття.

Наведені зауваження мають рекомендаційний характер і не впливають на позитивну оцінку наукової та практичної цінності роботи.

### Висновок

Подана до захисту дисертація є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності дозволяють вирішити наукове завдання математичного моделювання перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах.

Автореферат оформлений згідно з діючими вимогами МОН України та відповідає змісту дисертації. Робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

За актуальністю теми, обсягом і рівнем проведених досліджень, науковою новизною та практичною цінністю одержаних результатів дисертаційна робота *Цветкової Тетяни Павлівни «Математичне моделювання перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах»* відповідає встановленим вимогам щодо кандидатських дисертацій, у тому числі п. 11 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор за проведені дослідження заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,  
старший науковий співробітник  
Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова  
НАН України,  
кандидат технічних наук



В.О. Богаєнко