

ВІДГУК

офіційного опонента 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

Актуальність теми дисертації. Для запобігання та прогнозування за-топлення територій, забруднення та засолення ґрунтів, дослідження динаміки переміщення вологи, тощо, необхідні ґрунтовні дослідження процесів перенесення солей, що супроводжуються фільтрацією та вологоперенесенням у насичених та ненасичених ґрунтах. Під час математичного моделювання гідродинамічних процесів важливим є урахування сумісних процесів, які відбуваються у ґрунтовому середовищі. Дослідження взаємозв'язаних процесів дозволяє адекватно описати процес перенесення солей у насичено-ненасичених ґрунтах для вирішення важливих задач підземної гідродинаміки.

З метою уникнення небезпечних ситуацій розробляють гідромеліоративні заходи, які включають створення дренажних систем зволожувального або осушувального типів, що представляють собою систему вертикальних або горизонтальних дрен, розташованих паралельно. Дані системи дренажу забезпечують відведення зайвої води та сольових розчинів з ґрунту або їх нагнітання до необхідної норми. У зв'язку з цим необхідно розробляти математичні моделі перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні, узагальнені на випадок процесу перенесення солей під дією фільтрації сольового розчину до систематичного дренажу, що дозволить уникнути кризових ситуацій та покращити експлуатацію гідромеліоративних систем.

Тому побудова математичних моделей процесу перенесення солей з урахуванням процесів фільтрації сольових розчинів та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах є важливим та актуальним науковим завданням. Отже, дисертаційна робота Цветкової Т.П., в якій запропоновано нові математичні моделі дослідження взаємозв'язаних процесів перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах, є актуальною та важливою.

Дисертаційна робота Цветкової Т.П. виконувалась в рамках науково-дослідних робіт Національного університету водного господарства та природокористування, які мають відповідні номери державної реєстрації: «Математичне та комп'ютерне моделювання впливу природних та техногенних

факторів на стан ґрунтових основ енергетичних об'єктів» (2007-2009 рр., №ДР 0107U004173), «Математичне та комп'ютерне моделювання фізико-хімічних процесів підземної гідродинаміки під впливом природних, техногенних і соціальних факторів» (2010-2012 рр., №ДР 0110U000816), «Математичне та комп'ютерне моделювання фізико-хімічних процесів підземної гідродинаміки під впливом природних, техногенних і соціальних факторів» (2013-2015 рр., №ДР 0113U004052).

Тема дисертаційної роботи відповідає пункту 4 Статті 3 «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року» Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», а саме: «Раціональне природокористування».

Структура та зміст дисертації. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 217 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 209 сторінок, з них 145 сторінок основного тексту.

У **вступі** до дисертації зосереджено увагу на обґрунтуванні актуальності теми роботи, задачах та методах досліджень, науковій новизні результатів. Аргументовано практичне значення вирішення завдання математичного моделювання перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтах, наведено дані про особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, дані про їх апробацію та кількість опублікованих дисертантом праць.

У **першому розділі** здійснено аналіз процесів перенесення солей з урахуванням фільтрації у насичених та вологоперенесенні в ненасичених ґрунтах та вказано на важливість їх дослідження. Проведено огляд існуючих математичних моделей досліджуваних процесів, обґрунтовано актуальність розроблення нових моделей і засобів математичного опису взаємозв'язаних гідродинамічних процесів.

У **другому розділі** дисертаційної роботи розроблено математичну модель перенесення солей з урахуванням процесу вологоперенесення у нелінійному одновимірному випадку; математичну модель перенесення солей при сумісній фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах у лінійному на нелінійному випадках.

Математичні моделі побудовано з використанням підходів механіки пористого середовища, теорій фільтрації та дифузії, аналітичної хімії, які складаються з двох систем диференціальних рівнянь перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення та умов спряження на внутрішній межі контакту областей повного та неповного насичення. На цій основі сформульова-

но відповідні контактні-крайові задачі за початкових і граничних умов першого роду.

Процес масоперенесення в області повного насичення розглянуто з урахуванням фільтрації сольових розчинів, яка відбувається під дією градієнта напору, концентрації солей та осмосу. Тому рівняння математичної моделі враховують залежність коефіцієнта конвективної дифузії, явища осмосу від концентрації сольових розчинів, коефіцієнта фільтрації від концентрації солей та п'єзометричних напорів.

Нелінійна математична модель процесу перенесення солей при вологоперенесенні у ненасичених ґрунтах складається із взаємозв'язаних диференціальних рівнянь масоперенесення, вологоперенесення та швидкості вологоперенесення, в яких враховано залежності коефіцієнта конвективної дифузії, осмосу від концентрації солей, коефіцієнта фільтрації та швидкості вологоперенесення від напору та концентрації солей, коефіцієнта вологоємності від напору вологи. На межі контакту областей повного та неповного насичення задані незалежні умови спряження для напорів, концентрації та потоків солей. Врахування функціональних залежностей у рівняннях математичної моделі дозволяє адекватно описати процес перенесення солей в насичено-ненасичених ґрунтах для вирішення важливих задач підземної гідродинаміки.

Чисельний розв'язок поставлених контактних-крайових задач знайдено методом скінченних різниць. Наближений розв'язок задач фільтрації та вологоперенесення знайдено з використанням неявної різницевої схеми, перенесення солей – монотонної різницевої схеми, які модифіковано на випадок розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь. В результаті програмної реалізації розроблених обчислювальних алгоритмів отримано розподіли концентрації солей, п'єзометричних напорів та напорів вологи в області насичено-ненасиченого ґрунту, встановлено вплив осмосу на процес розподілу напорів та концентрації сольових розчинів. Виявлено зростання напорів та концентрації солей з урахуванням осмотичних явищ – величина впливу пропорційна вибору коефіцієнта осмосу або осмотичної функції. Зроблено аналіз залежностей отриманих результатів чисельних експериментів за різних значень вхідних даних пористості ґрунту, коефіцієнтів конвективної дифузії, масообміну та фільтрації. Встановлено незначний вплив осмосу на процес солеперенесення для лінійного випадку у порівнянні з нелінійним, що потрібно враховувати при побудові математичних моделей взаємозв'язаних процесів.

Третій розділ присвячений математичному та комп'ютерному моделюванню процесу перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні в насичено-ненасичених ґрунтах у двовимірному нелінійному випадку.

Розроблену у Розділі 2 математичну модель узагальнено на випадок контактно-крайових задач плоско-вертикальної безнапірної стаціонарної фільтрації сольового розчину до горизонтального систематичного дренажу за наявної рухомої або нерухомої вільної поверхні ґрунтових вод. Під дією систематичного дренажу відбувається відведення сольових розчинів у ґрунтове середовище або їх нагнітання, тому процес перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні розглянуто у випадках осушення та зволоження насичено-ненасиченого ґрунту.

Досліджувана область має криволінійні межі, тому для чисельного розв'язування сформульованої контактно-крайової задачі використано метод скінченних різниць із застосуванням чисельного методу конформних відображень. Область, що відображається, складається з двох криволінійних чотирикутників, які відповідають областям повного та неповного насичення, зі спільною невідомою межею (внутрішньою межею контакту областей), яка знайдена в процесі розв'язування задачі. У результаті задачі перенесення солей в областях повного та неповного насичення перетворено до нових змінних комплексної області. Чисельний розв'язок задачі фільтрації сольових розчинів знайдено ітераційним методом Гауса-Зейделя, перенесення солей в областях повного та неповного насичення і вологоперенесення отримано за модифікованим локально-одновимірним методом О.А.Самарського для випадку розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь з використанням побудованих монотонних різницевих схем та методу прогонки.

На цій основі створено відповідні програмні модулі побудови конформних різницевих сіток фільтраційного потоку та потоку вологи областей повного і неповного насичення, реалізовано спільну конформну різницеву сітку області насичено-ненасиченого ґрунту. В результаті математичного та комп'ютерного моделювання проведено дослідження протікання процесу перенесення солей з урахуванням фільтрації та вологоперенесення у випадках зрошення та осушення насичено-ненасиченого ґрунтового середовища. Встановлено, що під дією фільтраційного потоку та зі зростанням часу вільна поверхня рухається вниз. Зміна її положення може складати 13-15%, що зумовлює перерозподіл напорів та концентрації сольових розчинів. Показано, що при врахуванні нестационарної фільтрації напори рідини зростають інтенсивніше, що призводить до більш швидкого вимивання сольових розчинів з пористого середовища; під дією фільтраційних процесів вільна поверхня рухається вниз і її положення змінюється до 40%, що необхідно враховувати при експлуатації гідромеліоративних систем.

Проведені чисельні експерименти за різних значень вхідних даних виявили важливість урахування залежностей параметрів фільтраційного потоку та вологоперенесення від їх фізико-хімічних властивостей та властивостей

грунтового середовища, на їх основі встановлено закономірності взаємозв'язаних процесів перенесення сольових розчинів, вологоперенесення у ненасичених ґрунтах, процесів фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах з вільною поверхнею ґрунтових вод.

У **додатках** подано довідки про використання результатів дисертаційного дослідження.

Достовірність одержаних результатів, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується застосуванням сучасних методів математичного моделювання, фізичною і математичною коректністю постановок контактної-крайових задач та строгим обґрунтуванням побудови розв'язків, несуперечністю одержаних результатів відомим теоретичним результатам, а також їх відповідністю даним фізичних експериментів, що підтверджує адекватність запропонованих математичних моделей досліджуваним фізичним процесам. Зокрема, при побудові математичної моделі процесів перенесення солей при фільтрації та вологоперенесення у насичених та ненасичених ґрунтах використано підходи механіки пористого середовища, теорій фільтрації та дифузії, аналітичної хімії. При побудові обчислювальних алгоритмів знаходження розв'язків поставлених задач автор спирався на обґрунтовані методи математичної фізики, теорії диференціальних рівнянь та чисельних методів, методу конформних відображень.

Про обґрунтованість та достовірність отриманих результатів також свідчить їх опублікування у фахових рецензованих виданнях та апробація на наукових конференціях, симпозіумах та семінарах.

Новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розв'язано нове наукове завдання математичного моделювання перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах.

Для математичного опису процесів перенесення солей з урахуванням фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах побудовано нову математичну модель, яка містить дві системи диференціальних рівнянь у часткових похідних та умови, задані на внутрішній межі контакту областей повного та неповного насичення, яка у свою чергу може бути рухомою або нерухомою. На основі запропонованої та обґрунтованої математичної моделі сформульовано нові крайові задачі в одновимірних та двовимірних випадках.

Побудовану математичну модель взаємозв'язаних процесів перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах узагальнено на випадки осушення та зволоження насичено-

ненасичених ґрунтових масивів під дією горизонтального систематичного дренажу при наявній рухомій вільній поверхній ґрунтових вод.

Для знаходження чисельних розв'язків сформульованих контактнокрайових задач вперше модифіковано чисельні методи скінченних різниць з використанням методу конформних відображень для розв'язання нелінійних контактнокрайових задач перенесення солей, фільтрації та вологоперенесення в областях з криволінійними межами, за наявної рухомої або нерухомої внутрішньої поверхні контакту. Розроблені обчислювальні алгоритми реалізовані за допомогою комплексу програм, на основі якого встановлено нові закономірності процесу перенесення солей при вологоперенесенні та осмосі у ненасичених ґрунтах, що супроводжується процесами фільтрації і вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах за наявної рухомої або нерухомої внутрішніх поверхонь контакту ґрунтових масивів, що містять дренаж.

Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи та основні поставлені задачі для досягнення мети.

Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів полягає у тому, що побудовані нові нелінійні математичні моделі перенесення солей з урахуванням процесів фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтах дозволяють розширити клас розв'язуваних задач та є ефективним математичним описом досліджуваних об'єктів. Модифікація чисельних методів скінченних різниць з використанням чисельних методів конформних відображень для розв'язання нелінійних контактнокрайових задач є важливим внеском у розвиток сучасних чисельних методів.

Практична цінність одержаних результатів полягає в дослідженні процесу перенесення солей з урахуванням фільтрації та вологоперенесення у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах, що може бути використано для мінімізації ризиків та запобігання підтоплення територій, прогнозування засолення ґрунтів та поширення забруднень ґрунтових вод, а також при проектуванні та експлуатації гідромеліоративних систем. На основі запропонованих моделей та обґрунтованої модифікації чисельних методів побудовано відповідні алгоритми та розроблено програмний комплекс, який призначений для чисельного розв'язування поставлених контактнокрайових задач та проведення якісного і кількісного аналізу протікання взаємозв'язаних гідродинамічних процесів.

Результати проведених у дисертаційній роботі досліджень впроваджено при складанні завдань на проектування та будівництво меліоративних систем Рівненським обласним управлінням водних ресурсів.

Теоретичні та практичні результати проведених дисертаційних досліджень впроваджено в навчальному процесі при підготовці спецкурсів «Чи-

сельні методи математичної фізики», «Теорія систем та математичне моделювання» для студентів Національного університету водного господарства та природокористування МОН України за спеціальністю «Прикладна математика».

Результати впровадження та застосування розроблених математичних моделей та чисельних методів підтверджено довідками про впровадження, які подані у додатках до дисертації.

Рекомендації щодо використання результатів дисертації. Побудовані математичні моделі доцільно використовувати при проектуванні та будівництві дренажних, зрошувальних, осушувальних систем, для прогнозування поширення забруднень ґрунтових вод, засолення родючих ґрунтів та підтоплення територій.

За допомогою модифікованих чисельних методів скінченних різниць з використанням методів конформних відображень розроблені обчислювальні алгоритми розв'язування нелінійних крайових задач в областях з криволінійними межами, що дозволяє адаптувати дані алгоритми до розв'язування крайових задач в областях складної геометричної форми з рухомими межами.

Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи достатньо повно відображені у 25 наукових працях, серед яких 9 статей у фахових виданнях з технічних наук, зокрема, у журналі “Инженерно-физический журнал” (індексується у наукометричних базах даних SCOPUS, Inspec, Google Scholar та ін.), журналах “Вісник Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка”, “Вісник ТНТУ”, “Математичне та комп'ютерне моделювання”, “Вісник НУВГП”, 16 матеріалів конференцій, 1 – одноосібна.

Відповідність автореферату змісту дисертації. Викладені в авторефераті актуальність теми, мета і задачі дослідження, наукова новизна одержаних результатів та їхня практична цінність, особистий внесок дисертанта, короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Автореферат оформлений згідно з вимогами МОН України.

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Дисертація Цветкової Т.П. відповідає діючим вимогам МОН України щодо оформлення дисертаційних робіт. Робота написана грамотно, хорошою літературною мовою, викладення лаконічні, чіткі і достатні для повного розуміння. Однак є деякі помилки і неузгодженості. Кількість їх незначна, і вони не впливають на правильне розуміння тексту дисертації.

Відповідність дисертації паспорту спеціальності. Подана до захисту дисертаційна робота Цветкової Т.П. відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки), а саме напрямкам “Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, процесів, об’єктів та систем на основі формалізації дії фізичних законів, виведення рівнянь та логічних співвідношень, що адекватно описують динаміку процесів з урахуванням топологічної складності досліджуваних об’єктів ...”, “Розвиток та ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження ...”, “В тому числі, модифікація та спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності ...”.

По суті дисертаційної роботи можна зробити такі **зауваження**.

1. В роботі не визначена область застосовності розроблених математичних моделей та модифікації чисельних методів. Тому не зрозуміло, чи можна їх застосовувати до інших задач, наприклад, коли в одній з контактуючих областей масоперенесення відбувається за конвективним і дифузійним механізмами міграції, а в іншій – лише дифузійним шляхом.

2. З термодинаміки нерівноважних процесів випливає, що на границях контакту областей реалізується рівність відповідних хімічних потенціалів, що призводить до неідеальних умов контакту на концентрацію. Тобто відбувається стрибок концентрації солі на границі насичених і ненасичених областей. В той же час в роботі розглядаються лише ідеальні умови контакту.

3. У дисертації не сказано про стійкість побудованих різницевих схем, а лише про стійкість методу прогонки.

Зроблені зауваження не мають істотного впливу на загальне позитивне оцінювання роботи.

ВИСНОВОК. Дисертаційна робота Цветкової Т.П. «Математичне моделювання перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтових середовищах» є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові наукові результати, що дозволяють вирішити актуальну науково-прикладну задачу моделювання процесу перенесення солей при фільтрації та вологоперенесенні у насичено-ненасичених ґрунтах.

Результати роботи є новими, вони доповідались на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях. Результати досліджень достатньо повно опубліковані у працях дисертанта. Автореферат адекватно відображає зміст роботи.

Робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а також вимогам, які висуваються до

кандидатських дисертацій, зокрема, п. 11 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", а її автор Цветкова Тетяна Павлівна за проведені дослідження заслуговує присвоєння їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,

Завідувач відділом математичного моделювання нерівноважних процесів
Центру математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
імені Я.С. Підстригача НАН України,
доктор технічних наук, професор

О. Ю. Чернуха

Підпис О.Ю. Чернухи засвідчую:

всіми секретар  *Ленка* (Т.М. Ленка)