

ВІДГУК

на дисертаційну роботу Мічути Ольги Романівни «*Математичне моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії*», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертації. При будівництві нових споруд, експлуатації промислових та цивільних об'єктів або їх реконструкції виникає необхідність прогнозування стійкості споруд та безпеки їх функціонування особливо під дією агресивних техногенних чинників. Комплекс несприятливих факторів, які впливають на утримувальну здатність та довговічність будівель, викликають великі і часто нерівномірні осідання фундаментів. Зокрема, біля великих підприємств створюються сховища хімічних відходів, які містять висококонцентровані розчини солей в рідкому вигляді, або сховища твердих відходів. При потраплянні в ґрунт ці відходи можуть взаємодіяти з солями, що знаходяться в ньому, розчиняючи їх або змінюючи їх концентрацію. Наслідком таких процесів можуть стати додаткові просідання (або набухання) ґрунту, і в результаті спричиняють аварійні стани, аж до повного руйнування будівель. При цьому засолені ґрунти мають характерну здатність до різкого зниження міцності структурних зв'язків між частинками в умовах зміни температурного режиму, особливо різкому, швидкого навантаження або тривалої вібрації. Це, в свою чергу, сприяє появі та розвитку неприпустимих для споруд деформацій. Тому розв'язання проблеми математичного моделювання та кількісного дослідження впливу хімічної суфозії на процеси фільтраційної консолідації у пористих тілах є важливим і сьогоденним завданням при вирішенні задач безпечної та довговічної експлуатації промислових об'єктів, ефективності роботи і надійності інженерних захисних споруд. Такі математичні моделі, як правило, будуються на основі загальних положень механіки суцільного середовища, механіки ґрунтів, термодинаміки нерівноважних процесів, фізичної хімії тощо і повинні з достатньою повнотою враховувати структурні властивості середовища. Середовища, в яких відбуваються процеси фільтраційної консолідації зазвичай є сильно неоднорідними, багатокомпонентними і пористими.

Тому математичний опис процесів фільтраційної консолідації ґрунтів, що супроводжуються хімічною суфозією компонент порового розчину, відноситься до актуальних проблем математичного моделювання.

Дисертаційна робота Мічути О.Р. виконана в рамках таких науково-дослідних робіт Національного університету водного господарства та природокористування МОН України, які мають відповідні номери державної реєстрації.

рації: «Математичне та комп'ютерне моделювання фізико-хімічних процесів підземної гідромеханіки під впливом природних, техногенних і соціальних факторів» (№ ДР 0110U000816), «Математичне та комп'ютерне моделювання нелінійних фізико-хімічних процесів гідромеханіки в багатокомпонентних середовищах пористої та нанопористої структури» (№ ДР 0113U004052), що підтверджено відповідним актом, наданим у додатках до дисертації.

Тема дисертаційної роботи відповідає такому напрямку з Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року: Технології моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища.

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 188 назв та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 175 сторінок, з них 143 сторінки основного тексту.

У **вступі** до дисертації зосереджено увагу на обґрунтуванні актуальності теми роботи, завданнях та методах досліджень. Аргументовано практичне значення вирішення задачі математичного моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії, наведені дані про особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, кількість публікацій.

У **першому** розділі проведено аналіз об'єкту досліджень, сучасних підходів вивчення цих об'єктів та перспективи їх розвитку. Визначено задачі та місце дисертаційних досліджень.

У **другому розділі** дисертаційної роботи сформульовано нову математичну модель фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокомпонентного за своїм хімічним складом порового розчину. Досліджуваний ґрунт вважався двофазним, в якому багатокомпонентний хімічний розчин перебуває в рідкому (у вигляді розчину) та твердому (у вигляді кристалів солей) станах. Запропоновано та обґрунтовано крайові умови. Також сформульована та обґрунтована кінематична гранична умова на верхній рухомій межі ґрунту з урахуванням розчинення та кристалізації солей.

В **третьому** розділі проведено математичне моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням їх засоленості та впливу хімічної суфозії. Для визначення величини просідань використано узагальнену кінематичну умову на верхній рухомій межі масиву ґрунту, в якій враховано вплив хімічної суфозії. Числовий розв'язок відповідних одно-, дво- та тривимірної нелінійних крайових задач для систем параболічних рівнянь, що доповнені рівняннями кінетики масообмінних процесів,

знайдено безсітковим методом радіальних базисних функцій. Проведено ряд числових експериментів та здійснено їх аналіз. Зокрема, досліджено частковий випадок фільтраційної консолідації шару засоленого глинистого ґрунту з урахуванням ряду факторів. Наприклад, порівнюючи розподіл надлишкових напорів при врахуванні таких факторів, як просідання та засоленість ґрунту напори розсіюються повільніше у випадку засоленого ґрунту, ніж у випадку незасоленого. Також зазначено, що урахування наявності солей в рідкій та твердій фазах уповільнює розсіювання надлишкових напорів. ті фільтрації (величини просідань складають 36,3 см та 20,4 см відповідно). Отримані в дисертаційній роботі результати підтвердили висновки інших дослідників, що в процесі тривалої фільтраційної консолідації і наявності хімічної суфозії здійснюється значне вилуговання сольового комплексу, внаслідок чого відбувається суфозійне осідання поверхні ґрунту і можуть виникати значні деформації будівель, що розміщені на них.

У **четвертому** розділі проведено математичне і комп'ютерне моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокомпонентного хімічного розчину. Для визначення величини просідань верхньої рухомої межі ґрунту використано кінематичну граничну умову, в якій враховано вплив багатокомпонентного хімічного розчину та хімічної суфозії. Числовий розв'язок відповідних одно-, дво- та тривимірної нелінійних крайових задач також знайдено безсітковим методом радіальних базисних функцій. Проведено ряд числових експериментів та проаналізовано отримані результати. Зокрема, досліджено частковий випадок фільтраційної консолідації загіпсованих ґрунтів при надходженні в них розчину кам'яної солі. Враховано залежність концентрації граничного насичення гіпсу від концентрації розчину кам'яної солі та температури. При урахуванні вказаного фактору збільшується величина просідань верхньої рухомої межі досліджуваного масиву ґрунту. Результати, які підтверджують вищесформульовані висновки, отримані і при дослідженні фільтраційної консолідації греблі побудованої із загіпсованих ґрунтів в якості греблі-огороджувача хвостосховища рідких хімічних відходів.

У додатках подано довідки про використання результатів дисертаційного дослідження.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, визначається відповідністю їх сучасним теоретичним уявленням про процеси фільтрації, тепломасоперенесення, механічні процеси у пористих середовищах, кінетику гетерогенного масообміну в багатокомпо-

нентних пористих середовищах, а також результатам експериментальних досліджень. Зокрема, при побудові математичної моделі фільтраційної консолідації загіпсованих ґрунтів при фільтрації в них багатокомпонентних рідких або твердих хімічних розчинів автор використала апробовані модель Флоріна, закон Дарсі-Герсеванова, рівняння нерозривності рідкої та твердої фаз ґрунту з урахуванням зміни концентрації солей у відповідній фазі, принцип гідроємності Герсеванова, компресійну залежність у вигляді спрямленого відрізка компресійної кривої. На основі цих положень отримано повну систему рівнянь моделі, яка також містить рівняння масоперенесення солей у пористому середовищі з урахуванням масообміну між фазами, розчинення та випадання розчинених субстанцій в осад, а також рівняння теплопровідності у пористому середовищі.

При дослідженні впливу хімічної суфозії та багатокомпонентних хімічних розчинів на просідання верхньої межі ґрунту для побудови розв'язків поставлених крайових задач фільтраційної консолідації засоленого ґрунту під впливом миттєво прикладеного зовнішнього навантаження автор спирається на обґрунтовані числові методи, зокрема, проекційний безсітковий метод колокації в точці з використанням радіальних базисних функцій, лінеаризованої повністю неявної різницевої схеми, лінеаризації за Ньютоном, модифікований метод Гауса, метод найменших квадратів, а також квадратурні формули для обчислення інтегралів.

Програмне забезпечення створено на основі розроблених алгоритмів для розв'язування крайових задач фільтраційної консолідації з урахуванням впливу процесів тепломасоперенесення одно- та багатокомпонентних розчинів і хімічної суфозії в областях з вільними межами. За допомогою даного програмного забезпечення досліджувались процеси фільтраційної консолідації загіпсованих ґрунтів з урахуванням хімічної суфозії при надходженні в ґрунт води та розчину кам'яної солі.

Обґрунтованість наукових положень, результатів та висновків дисертації забезпечується також апробацією результатів дослідження на наукових конференціях, конгресах і семінарах.

Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій. Достовірність отриманих автором результатів, висновків і рекомендацій забезпечується застосуванням сучасних методів математичного моделювання, фізичною і математичною коректністю постановок 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 фізико-хімічним процесам та адаптовано-

го безсіткового методу радіальних базисних функцій розв'язування відповідних нелінійних задач математичної фізики Стефанівського типу.

Новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розв'язано нову наукову задачу математичного моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокomпонентних хімічних розчинів при проходженні гетерогенних процесів розчинення-кристалізації та залежності концентрації граничного від теплового стану і хімічного складу порового розчину.

Для математичного опису взаємозв'язаних механічних, фільтраційних, теплових і масообмінних процесів у багатокomпонентних пористих тілах з рухомою межею побудовано нову математичну модель, яка містить рівняння масоперенесення в рідкій фазі пористого середовища, рівняння теплопровідності, рівняння масообмінних процесів між рідкою та твердою фазами, а також кінематичну граничну умову на верхній рухомій межі області, яка вперше отримана з урахуванням просідань за рахунок хімічної суфозії.

Для кількісного опису процесів фільтраційної консолідації та хімічної суфозії в пористих середовищах з урахуванням залежності параметрів фільтрації та масоперенесення від фізико-механічних властивостей ґрунту та багатокomпонентного хімічного складу порової рідини, які можуть впливати на динаміку процесів хімічної суфозії, вперше розвинено нелінійну математичну модель, яка враховує залежності концентрації граничного насичення одних хімічних речовин від наявності інших компонент та температури.

На основі розроблених математичних моделей сформульовано нові нелінійні крайові задачі для систем параболічних рівнянь, що містять співвідношення щодо кінетики масообмінних процесів. Для побудови розв'язків крайових задач фільтраційної консолідації в областях з рухомими межами адаптовано метод колокації в точці з використанням радіальних базисних функцій та розвинуто нові алгоритми, які реалізовані в пакеті програм для чисельного розв'язування відповідних задач.

Встановлено нові закономірності процесів фільтраційної консолідації в тілах з вільною навантаженою поверхнею, які супроводжуються хімічною суфозією або тепломасоперенесенням багатокomпонентних розчинів.

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

Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів полягає у тому, що побудовані нові нелінійні математичні моделі взаємозв'язаних фізико-хімічних процесів дозволяють розширити клас розв'язуваних задач в багатокomпонентних пористих середовищах та є ефективним матема-

тичним описом досліджувальних об'єктів. Отримані модельні співвідношення дають можливість якісно та кількісно описувати характерні особливості процесів фільтраційної консолідації в пористих середовищах при явному врахуванні руху навантаженої поверхні та масообміну між фазами.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено створенням за допомогою сучасних методів та технологій програмного комплексу для ефективного розрахунку навантаженої рухомої поверхні ґрунту при протіканні зв'язаних процесів фільтрації багатокomпонентних рідких або твердих розчинів, теплопровідності і хімічної суфозії, а також використанням цього комплексу Рівненським обласним управлінням водних ресурсів для розв'язування прикладної задачі оцінки виникнення загрози руйнування ґрунтової греблі, що оточує Басівкутське водосховище, в наслідок хімічної суфозії.

Результати проведених у дисертаційній роботі досліджень використані при підготовці студентів за напрямками 6.040301 «Прикладна математика» (бакалавр), 7.04030101, 8.04030101 «Прикладна математика» (спеціаліст, магістр), для викладання дисциплін «Теорія систем та математичне моделювання», «Математичне і кмп'ютерне моделювання природних та техногенних процесів», «Чисельні методи прикладної математики».

Результати впровадження та застосування розроблених математичних моделей, адаптації числових методів та розвинення алгоритмів, а також програмного комплексу підтверджено двома довідками про впровадження, які подані у додатках до дисертації.

Рекомендації щодо використання результатів дисертації.

Проведені в дисертаційній роботі дослідження з розрахунку консолідації ґрунту під фундаментами будівель за надходження в ґрунт води або сольових розчинів можуть бути використані при проектуванні та будівництві промислових споруд хімічного виробництва та інших будівель, які попадають в зону загіпсованих або засолених ґрунтів, особливо за ймовірного створення у безпосередній близькості сховища відходів хімічного виробництва; при прогнозуванні надійності та довговічності діючих виробництв зі значним техногенним навантаженням на довкілля, розташовані на засолених ґрунтах.

Розроблені програми дозволяють ефективно обчислювати та візуально спостерігати динаміку просідання ґрунту під фундаментом будівлі під впливом зовнішнього навантаження, зміни температурних режимів за надходження у середовище багатокomпонентних розчинів.

Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи відображені у 22 наукових працях, серед яких 13 статей, у тому числі 9 публікацій у фахових

виданнях з технічних наук, 2 – у закордонних виданнях, до входять до наукометричних баз, а також 2 статті у наукових фахових виданнях з фізико-математичних наук, 1 авторське право на комп'ютерну програму, 8 – матеріали конференцій, 3 – одноосібних.

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

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Дисертаційна робота Мічути О.Р. відповідає діючим вимогам МОН України і паспорту спеціальності “Математичне моделювання та обчислювальні методи” (технічні науки), а саме напряду “Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів досліджувальних об'єктів. Зокрема: отримання принципово нових (нетрадиційних) видів математичних моделей, еквівалентні та апроксимаційні методи перетворення і модифікації (лінеаризація, дискретизація тощо), оцінки, ідентифікація та оптимізація математичних моделей, методи теорії подібності й аналізу розмірностей.”

Оформлення дисертації відповідає вимогам, що пред'являються до дисертаційних робіт. Дисертація написана 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.

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

1. В роботі використовується, але не визначено, що таке «граничне насичення».

2. Розглянуто лише один модельний варіант для масообмінних процесів. В той же час з наукової літератури відомо, що є декілька таких співвідношень. В дисертаційній роботі варто було б дослідити інші типи масообмінних процесів.

3. Актуальність та новизну роботи дещо обмежує конкретизація напрямку досліджень фільтраційної консолідації ґрунтів. Адже процеси фільтрації багатокомпонентних хімічних розчинів в пористих середовищах теж можуть супроводжуватись хімічною суфозією.

4. Зауваження щодо орфографічних помилок: потрібно вживати «двофазний» замість «двохфазний», «згідно з чимось» замість «згідно

чогось», «оскільки» замість «так як».

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

Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України

Подана до захисту дисертація є завершеним науковим дослідженням, в якому побудовані нові математичні моделі взаємозв'язаних процесів фільтраційної консолідації та хімічної суфозії в пористих середовищах. В цілому вирішено актуальну наукову задачу математичного моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокomпонентних хімічних розчинів при проходженні гетерогенних процесів розчинення-кристалізації та залежності концентрації граничного насичення від теплового стану і хімічного складу порового розчину.

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

За актуальністю, рівнем та обсягом досліджень, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота “Математичне моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії” відповідає вимогам п. 13, 14 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою КМ України № 567 від 4 липня 2013 р., які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор Мічута Ольга Романівна 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 ім. Я. С. Підстригача НАН України,
доктор технічних наук, професор

О.Ю.Чернуха

Підпис О.Ю.Чернухи засвідчую: