

## ВІДГУК офіційного опонента

на дисертаційну роботу *Жуковської Наталії Анатоліївни* «**Математичне моделювання впливу тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів на деформаційні процеси ґрунтових масивів**», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Актуальність теми дисертації.** При проектуванні гідротехнічних, енергетичних об'єктів та споруд цивільного будівництва особлива увага приділяється дослідженню напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтових масивів і основ. НДС ґрунтових масивів і основ значно залежить від фізико-механічних характеристик ґрунтів, гідрогеологічних умов та типу навантажень, зокрема: фільтрації підземних вод, тепло-масоперенесення розчинених речовин фільтраційними потоками, наявності та зміни положення вільної поверхні та ін.

Суттєві зміни НДС можуть викликати зміну ґрунтового профілю масиву, а відповідно – призвести до осідання земної поверхні та виникнення аварійних ситуацій. З метою попередження таких ситуацій використовують один із методів прогнозування перебігу реальних процесів – математичне моделювання, який передбачає побудову адекватних математичних моделей, їх верифікацію та подальше удосконалення.

Математичне моделювання вищеописаних процесів у порівнянні з практичними інженерними експериментами є менш трудомістким і дорогим, а тому одним із доступних методів, а в деяких випадках і єдиним методом дослідження актуальних наукових та інженерних проблем у даній галузі.

Побудовані здобувачем математичні моделі є нелінійними та описуються крайовими задачами в областях з криволінійними (рухомими або нерухомими) межами, розв'язання яких потребує використання чисельних методів та їх адаптації до розв'язання поставлених крайових задач.

Тому тема дисертаційної роботи Жуковської Н. А. безумовно є актуальною.

За своїм науковим спрямуванням дисертаційна робота відповідає програмам і планам наукових досліджень Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне), що виконувались в рамках держбюджетних науково-дослідних роботах МОН України, зокрема за темами «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). У рамках виконання цих робіт здобувач була виконавцем та отримала всі результати, які становлять наукову новизну дисертаційного дослідження.

**Структура та зміст дисертації.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 202 найменувань та додатків. Обсяг роботи становить 229 сторінок, в тому числі основного тексту 160 сторінок.

У *вступі* висвітлено обґрунтування актуальності теми роботи, мету, задачі та методи досліджень, визначено об'єкт і предмет досліджень, окреслено наукову новизну та практичне значення вирішення завдання математичного моделювання деформаційних процесів з урахуванням впливу тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів, відображено зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, наведено дані про апробацію результатів, особистий внесок здобувача, кількість опублікованих дисертантом праць.

У *першому розділі* дисертаційної роботи проведено огляд літератури з питань дослідження деформаційних процесів у ґрунтових середовищах, а також розглянуто деформаційні характеристики та основні співвідношення, що описують НДС, фізичні та фізико-хімічні процеси, які відбуваються в ґрунтах. Виведено диференціальні рівняння рівноваги в формі Ламе для зміщень з урахуванням тепло-масоперенесення та залежностей коефіцієнтів Ламе від концентрації сольового розчину і температури. Наведено основні диференціальні рівняння та додаткові умови, що описують НДС ґрунтових масивів і основ з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів, а також деякі експериментальні дослідження впливу концентрації сольових розчинів та температури на фільтраційні й деформаційні властивості ґрунту.

*Другий розділ* присвячено математичному моделюванню впливу тепло-масоперенесення на НДС водонасиченого ґрунтового масиву з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів. Зокрема, сформульовано постановки задач в одно- та двовимірному випадках, побудовано відповідні математичні моделі у нелінійній постановці. Для чисельного розв'язання поставлених крайових задач використано метод скінченних різниць. Отримано граничні умови в зміщеннях на границях водних басейнів для двовимірного випадку. Наведено результати чисельних експериментів у виглядів графіків. Показано, що тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів змінює картину НДС ґрунтового масиву як в одно-, так і у двовимірному випадках. Зокрема, значення зміщень, нормальних та дотичних деформацій і напружень з урахуванням тепло-масоперенесення можуть змінюватись у декілька разів у порівнянні з випадком без врахування тепло-масоперенесення.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи сформульовано постановки та побудовано відповідні математичні моделі НДС ґрунтового масиву з вільною поверхнею ґрунтових вод при наявності процесів тепло-масоперенесення в одно- та двовимірному випадках. Отримано умови спряження ідеального контакту на межі областей в зміщеннях. Для чисельного розв'язання поставлених даних крайових задач використано метод скінченних різниць.

У даному розділі також розглянуто двовимірні задачі математичного моделювання НДС фільтруючої основи ґрунтової греблі з вільною поверхнею та НДС ґрунтового масиву внаслідок утворення депресійної лунки під впливом

тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів. Чисельний розв'язок даних крайових задач знайдено методом скінченних різниць з використанням чисельних конформних відображень в оберненій постановці. Математичні моделі поставлених крайових задач сформульовано в комплексній площині та побудовано чисельні конформні відображення областей фізичних площин на параметричні прямокутники комплексних площин. Проведено серію чисельних експериментів, основні результати яких наведено у вигляді табличних даних та графіків. Показано, що наявність вільної поверхні, що розділяє ґрунтовий масив на область водонасиченого ґрунту та область ґрунту, що знаходиться у природному стані і процесів тепло-масоперенесення значно впливають на деформаційні явища в ґрунтових масивах.

*Четвертий розділ* присвячено математичному моделюванню НДС багат шарового ґрунтового масиву з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів за наявності вільної поверхні. Сформульовано постановки задач та побудовано відповідні математичні моделі в одно- та двовимірному випадках. Ґрунтовий масив складається із багатьох шарів, кожен з яких має різні механічні та фізико-хімічні властивості. Вільна поверхня розділяє ґрунтовий масив на області водонасичених шарів та шарів ґрунту в природному стані. В результаті чисельного розв'язання поставлених крайових задач знайдено зміщення, нормальні та дотичні напруження і деформації та показано, що найбільших значень зміщення, напруження та деформації досягають у водонасичених шарах ґрунтового масиву, де наявний фільтраційний потік та тепло-масоперенесення.

У **додатках** подано довідки про використання результатів дисертаційного дослідження, короткий опис програмного комплексу для розв'язання задач НДС ґрунтових масивів і основ з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів, алгоритми чисельного розв'язання двовимірних задач НДС ґрунтового масиву та багат шарового ґрунтового масиву при наявності вільної поверхні, а також деякі результати аналітичного та чисельного розв'язання поставлених крайових задач у вигляді табличних, графічних даних та аналіз отриманих результатів.

**Достовірність одержаних результатів, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечується коректним застосуванням сучасних методів математичного моделювання, теоретично обґрунтованих та апробованих методів математичної фізики та обчислювальної математики, коректною фізичною інтерпретацією отриманих результатів, узгодженням окремих результатів досліджень з відомими з літературних джерел тестовими прикладами.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, визначається, також, відповідністю їх сучасним теоретичним уявленням про деформаційні процеси, процеси тепло-масоперенесення та фільтрації підземних вод. При побудові нових математичних моделей НДС ґрунтових масивів і основ з урахуванням зміни їх гідрогеологічних умов та дії техногенних факторів використано підходи механіки суцільного середовища, зокрема механіки деформівного тіла та

механіки пористого середовища, теорії термопружності, фільтрації та тепло-масоперенесення.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується також їх апробацією на наукових конференціях та семінарах, опублікуванню 9 статей у фахових виданнях з технічних наук, зокрема у такому відомому журналі, як «Инженерно-физический журнал» (англомовний переклад: «Journal of Engineering Physics and Thermophysics»).

**Наукова новизна** одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

1. Вперше побудовано математичні моделі НДС ґрунтових масивів і основ у нелінійній постановці з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів в неізотермічних умовах, залежностей коефіцієнтів Ламе і модуля Юнга від концентрації сольових розчинів та температури. При цьому побудовано відповідні математичні моделі з урахуванням вищеописаних факторів в одно- та двовимірному випадках для водонасиченого ґрунтового масиву, ґрунтового масиву при наявності рівня ґрунтових вод, ґрунтового масиву та основи ґрунтової греблі з вільною поверхнею, ґрунтового масиву внаслідок утворення депресійної лунки та багат шарового ґрунтового масиву з різними фізико-хімічними та механічними властивостями його шарів.

2. На основі узагальнення закону Гука вперше виведено систему рівнянь рівноваги в формі Ламе для зміщень ґрунту, а також отримано граничні умови та умови спряження для зміщень і напружень з урахуванням впливу теплового та хімічного станів ґрунтового середовища та залежностей коефіцієнтів Ламе та модуля Юнга від концентрації сольових розчинів та температури.

3. Вперше розв'язано задачі моделювання НДС фільтруючої основи ґрунтової греблі з вільною поверхнею у двовимірній постановці та задачі дослідження НДС ґрунтового масиву внаслідок утворення депресійної лунки під впливом тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів.

4. Вперше теоретично досліджено особливості НДС багат шарового ґрунтового масиву (у випадку різних фізико-хімічних та механічних властивостей шарів) з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів за умови наявності вільної поверхні.

5. Для чисельного розв'язання поставлених крайових задач адаптовано метод скінченних різниць, чисельний метод конформних відображень, ітераційний метод Гауса-Зейделя для чисельного розв'язання системи рівнянь рівноваги в формі Ламе для зміщень ґрунту.

Крім того, новими є створений дисертантом програмний комплекс для розрахунку НДС ґрунтових масивів і основ з урахуванням тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів та алгоритми чисельного розв'язання двовимірних задач НДС ґрунтового масиву та багат шарового ґрунтового масиву при наявності вільної поверхні.

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

Дисертаційна робота стосується розробки засобів математичного моделювання процесів – напружено-деформованого стану ґрунтових масивів і

основ з урахуванням фізико-хімічних перетворень, дії техногенних факторів та зміні гідрогеологічних умов. Зокрема, враховано процеси тепло-масоперенесення та фільтрації сольових розчинів у неізотермічних умовах у ґрунтових масивах і основах, наявність вільної поверхні та областей ґрунту з різними механічними та фізико-хімічними властивостями в кожній з областей.

В роботі розвинуто чисельні методи скінченних різниць і конформних відображень для розв'язання крайових задач з нелінійними рівняннями параболічного типу, що містять першу похідну, систем рівнянь рівноваги в формі Ламе для зміщень ґрунту, складених областей з криволінійними (фіксованими та вільними) межами.

Отримані результати сприятимуть подальшому науковому розвитку в галузі математичного моделювання деформаційних процесів та процесів переносу в насичених геопористих середовищах.

### **Практична цінність одержаних результатів.**

Практична цінність одержаних у роботі результатів підтверджена довідками про їхнє використання, зокрема в практиці роботи гідротехнічного цеху при експлуатації ґрунтової греблі ставка-охолоджувача Хмельницької АЕС, а також у навчальному процесі при виконанні кваліфікаційних, дипломних та магістерських робіт студентами за галуззю знань 0403 «Системні науки та кібернетика» спеціальності «Прикладна математика» освітньо-кваліфікаційних рівнів бакалавр, спеціаліст та магістр Національного університету водного господарства та природокористування МОН України, при підготовці та читанні ряду тем з дисциплін «Теорія систем та математичне моделювання», «Математичне і комп'ютерне моделювання природних і техногенних процесів».

Результати дисертаційної роботи доцільно використати при проектуванні, будівництві та подальшій експлуатації споруд цивільного будівництва, гідротехнічних та енергетичних об'єктів з метою попередження та уникнення аварійних ситуацій, прогнозування осідання земної поверхні, несучої здатності ґрунтових масивів, стійкості та надійності ґрунтових основ споруд.

### **Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях.**

Результати дисертації опубліковані в 29 наукових працях, серед яких 9 статей, з них 1 стаття у науковому виданні, яке входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, INSPEC, Google Scholar та ін., 8 статей у фахових виданнях з технічних наук, 20 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, 1 статтю опубліковано без співавторів. Кількість публікацій та їх рівень відповідають встановленим вимогам.

### **Відповідність автореферату змісту дисертації.**

Викладені в авторефераті актуальність теми, мета і завдання дослідження, наукова новизна одержаних результатів та їхнє практичне значення, короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Особистий внесок



здобувача в спільних публікаціях відображено в авторефераті та дисертації. Основні наукові результати, які викладені в спільних публікаціях, отримані дисертантом самостійно. Автореферат оформлений згідно з вимогами МОН України.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам.**

Дисертація Жуковської Н. А. відповідає діючим вимогам МОН України щодо оформлення дисертаційних робіт. Робота написана грамотно, послідовно та має завершену логічну структуру. Стиль викладення наукових положень та отриманих результатів забезпечує доступність їх сприйняття.

#### **Відповідність дисертації паспорту спеціальності.**

Подана до захисту дисертаційна робота Жуковської Н. А. відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки), а саме напрямкам досліджень: “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 ...”.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В роботі описано математичні моделі НДС ґрунтових масивів і основ (зокрема виведено рівняння рівноваги в формі Ламе для зміщень ґрунту) з урахуванням залежностей коефіцієнтів Ламе від концентрації сольових розчинів та температури, однак в чисельних експериментах враховано залежності зазначених коефіцієнтів лише від концентрації сольових розчинів, а залежності їх від температури відсутні. Варто було б дати додаткові пояснення в тексті роботи щодо мотивів не врахування в розрахунках залежності вказаних коефіцієнтів від температури.

2. Для переконливого твердження щодо наявності достатнього ступеня достовірності та надійності використаних у розрахунках формул поліноміальної апроксимації коефіцієнтів Ламе (як функцій концентрації сольового розчину) одного лише посилання на статтю М.Т. Кузла, І.А. Філатової (стор. 49 дисертації) очевидно замало і необхідне додаткове дослідження.

3. В дисертаційній роботі відсутнє теоретичне обґрунтування використаних чисельних алгоритмів наближеного розв’язання поставлених нелінійних крайових задач, зокрема не висвітлено питання встановлення оцінок збіжності описаних ітераційних процедур, визначення апріорних оцінок похибок, обґрунтування коректності застосовуваних чисельних методів, встановлення функціональних класів у яких шукаються розв’язки розглянутих задач та ін.

4. Перелік літературних джерел у дисертації опрацьований недостатньо. Зв'язані задачі теорії термо-поро-пружності та хімічного осмосу в насичених пористих середовищах на даний час активно досліджуються в англомовній науковій періодиці (досить відомі роботи A. Diek, L. White, J.-C. Roegiers, K. Bratko, F. Chang, X. Zhou, A. Ghassemi та ін.), однак зазначені автори дисертантом не цитуються.

Вказані вище зауваження суттєво не знижують загальної *позитивної оцінки* дисертації та її *високої якості в цілому*.

### **Висновок про відповідність дисертації вимогам ВАК України.**

Подана до захисту дисертаційна робота Жуковської Н. А. «Математичне моделювання впливу тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів на деформаційні процеси ґрунтових масивів» є оригінальним і завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язана важлива науково-технічна задача математичного моделювання напружено-деформованого стану ґрунтових масивів і основ у нелінійній постановці з урахуванням процесів тепло-масоперенесення при фільтрації сольових розчинів в неізотермічних умовах та залежності коефіцієнтів фільтрації, Ламе, модуля Юнга від концентрації сольових розчинів і температури, при наявності вільної поверхні, багат шарового ґрунтового масиву з різними фізико-хімічними та механічними властивостями шарів, а також розвинуто числові методики одержання наближених розв'язків відповідних нелінійних крайових задач в одно- та двовимірному випадках.

Результати роботи є новими та достатньо апробованими, зокрема доповідались на вітчизняних та міжнародних конференціях, наукових семінарах. Аналіз публікацій дисертанта показує, що основні результати дисертації отримано автором самостійно. Автореферат адекватно відображає зміст роботи.

За актуальністю теми, рівнем та обсягом виконаних досліджень, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота повністю 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», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Жуковська Наталія Анатоліївна заслуговує присвоєння їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
Інституту кібернетики  
імені В. М. Глушкова НАН України  
« 08 » \_\_\_\_\_ 06 \_\_\_\_\_ 2016 р.



В. М. Булавацький