

ВІДГУК

офіційного опонента

д.т.н., проф. **Бомби Андрія Ярославовича**

на дисертаційну роботу **Мартинюка Петра Миколайовича**

“Математичне моделювання консолідації ґрунтів з урахуванням техногенного впливу та комплексу фізико-хімічних процесів”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

1. Актуальність теми дисертації

Відправною точкою представлених дисертаційних досліджень є процеси в багатофазних пористих середовищах, до яких відносяться ґрунти. Технічними об'єктами досліджень є інженерні гідротехнічні ґрунтові споруди та самі ґрунтові масиви, як основи цивільних та промислових споруд, що попадають в зону впливу техногенних факторів. Причиною виникнення інтересу до процесів, що становлять предмет дисертаційного дослідження є аномальні явища в неоднорідних ґрунтових основах цивільних, промислових та гідротехнічних споруд, які піддаються впливу теплових та хімічних полів. Тобто, в основі досліджень – реальні фізичні явища та процеси. Робота стосується безпеки експлуатації, фільтраційного руйнування, нерівномірних просідань ґрунтових основ, поширення теплових та хімічних полів в насичених пористих середовищах, а тому тема є актуальною, своєчасною та «дозрілою» до вивчення засобами математичного моделювання.

В самій роботі та авторефераті дисертантом наведено детальне обґрунтування актуальності проведених досліджень. Не вдаючись в банальне повторення міркувань та аргументів дисертанта, з якими я в більшості погоджуюсь, від себе, як від офіційного опонента відмічу наступне. В одній із своїх останніх робіт «Математичне моделювання. Ідеї. Методи. Приклади.» (видавництво «Наука», 2001 рік) О. А. Самарський відмітив (див. ст. 23): «Більшість реальних процесів і відповідно математичних моделей є нелінійними. Лінійні моделі відповідають інколи досить частковим випадкам і, як правило, є лише першим наближенням до реальності». П. М. Мартинюк, ніби взявши за основу висловлену тезу, провів її червоною лінією через всю дисертаційну роботу. Побудовані здобувачем математичні моделі є нелінійними і, більше того, описуються крайовими задачами в областях з рухомими межами.

Хоча в дисертаційній роботі основною метою визначена побудова нових математичних моделей та розвиток методології математичного моделювання взаємозв'язаних фізико-хімічних процесів в гетерогенних пористих

середовищах (на прикладі ґрунтів), однак в роботі прослідковується повний цикл математичного моделювання: від її побудови, до дослідження, порівняння отриманих прогнозних результатів з натурними даними і до вдосконалення. Тому актуальність дисертаційного дослідження визначається також розвитком та ефективним використанням відомих числових методів математичної фізики (метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, безсіткові методи) для розв'язування нелінійних крайових задач в областях з рухомими межами.

Також актуальність теми визначає факт її виконання в рамках чотирьох держбюджетних тематик кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування в яких здобувач був виконавцем та співкерівником протягом 2004-2014 р.р. У рамках виконання цих науково-дослідних робіт здобувачем отримано всі результати, які становлять наукову новизну дисертаційного дослідження.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їхня достовірність

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційного дослідження, їх достовірність забезпечується рядом наступних факторів:

1. Основою проведених досліджень є методи теорії рівнянь математичної фізики, механіки ґрунтів, термодинаміки нерівноважних процесів, підземної гідромеханіки, гідродинаміки та ґрунтознавства.
2. Для побудови математичних моделей процесів фільтраційної консолідації, тепло-солепереносу, фільтраційного руйнування гетерогенних пористих середовищ застосовано закони збереження.
3. Числові методи (метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, метод радіальних базисних функцій) використано для відшукування наближених розв'язків відповідних нелінійних крайових задач. Доцільність застосування кожного методу достатньо обґрунтована. При цьому для відшукування скінченноелементних розв'язків крайових задач для рівнянь тепло-масопереносу застосовано стабілізаційну протипотокову схему Петрова-Гальоркіна ґрунтуючись на відомих роботах інших науковців, в тому числі і з когорти Львівської наукової школи прикладної математики.
4. Метод радіальних базисних функцій ґрунтувався на методі колокації в точці. І хоча цей метод дотепер використовувався як правило для наближеного розв'язання лінійних крайових задач, дисертант показав його ефективність і в нелінійних задачах. Недостатність теоретичного обґрунтування точності методу П. М. Мартинюк компенсував числовим

експериментом - порівнянням наближених розв'язків різними числовими методами.

5. Для числового інтегрування застосовано метод квадратурних формул Гауса. Для апроксимації залежності коефіцієнта фільтрації від теплового та сольового стану пористого середовища згідно з експериментальними даними використано метод радіальних базисних функцій та метод найменших квадратів для розв'язування перевизначених систем лінійних алгебричних рівнянь. Також для розв'язування систем лінійних алгебричних рівнянь застосовувались методи Гауса та Крейга. Використано метод лінеаризації за Ньютоном.

Позитивною з точки зору обґрунтованості та достовірності наукових результатів дисертаційного дослідження є їх апробація на 19-ти міжнародних та вітчизняних наукових конференціях, висвітлення основних положень дисертації на міжкафедральному науковому семінарі факультету прикладної математики та інформатики Львівського національного університету імені Івана Франка, м. Львів; на розширеному науковому семінарі кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ; на розширеному науковому семінарі Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, м. Львів; на розширеному науковому семінарі відділу чисельних методів та комп'ютерного моделювання Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України; на розширеному науковому семінарі кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне.

3. Наукова новизна дисертаційної роботи

Отримані в дисертаційній роботі результати є **новими**.

В дисертаційному дослідженні вперше побудовано математичні моделі фізико-хімічних процесів в гетерогенних пористих середовищах з урахуванням їх топологічної складності. Побудовані математичні моделі фактично поглиблюють та розширюють здобутки в напрямку методики математичного моделювання взаємозв'язаних процесів і описуються нелінійними крайовими задачами для систем диференціальних рівнянь в частинних похідних.

Вперше побудовано математичну модель фільтраційної консолідації ґрунту з урахуванням можливості його фільтраційного руйнування – наявності та поширення зони контактної розмиву, наявності зосереджених шляхів фільтрації, можливості багатофракційної контактної суфозії, а також з урахуванням впливу тепло-солепереносу. У раніше відомих математичних

моделях фільтраційної консолідації (і в кандидатській дисертації автора в тому числі) враховувався вплив лише солепереносу через фактори залежності коефіцієнта фільтрації від концентрації порового сольового розчину та через явища хімічного осмосу. Комплексний вплив теплового та хімічного станів пористого середовища до цього враховано не було. Зважаючи на нелінійність залежності коефіцієнта фільтрації від температури та концентрації солей, наявності та урахування явищ термодифузії, хімічного та термічного осмосів, і як підтверджено результатами числових експериментів здобувача, комплексний вплив тепло-солепереносу на розподіл надлишкових напорів в ґрунті не можна подати у вигляді суперпозиції впливів кожного окремо взятого фактору. Математичних моделей взаємозв'язаних процесів фільтраційної консолідації, фільтраційного руйнування та тепло-солепереносу в пористих середовищах до цього часу побудовано не було.

Фізично процес консолідації (або набухання) загалом і фільтраційної консолідації зокрема супроводжується просіданням (підняттям) верхньої межі масиву ґрунту. Однак, у відомих до цього часу математичних моделях фільтраційної консолідації ґрунтів цим явищем нехтували. Урахування вказаного явища при математичному моделюванні процесів консолідації ґрунтів вимагає задання на рухомій межі кінематичної граничної умови і дослідження відповідних крайових задач в областях з рухомими межами. В дисертаційній роботі вперше враховано явище просідання поверхні масиву ґрунту при дослідженні процесів його фільтраційної консолідації. Урахування вказаного явища вимагає виведення кінематичної граничної умови на рухомій межі ґрунту, що також вперше зроблено в дисертаційному дослідженні.

Вперше враховано явище термічного розширення фаз ґрунту в рівняннях нерозривності при побудові математичних моделей фільтраційної консолідації пористого середовища. До цього при математичному моделюванні цих процесів вказаних явищ не враховувалося, оскільки в принципі не враховувався вплив неізотермічних умов.

Також набув подальшого розвитку підхід щодо урахування наявності солей в рідкій та твердій фазах в рівняннях нерозривності при виведенні рівняння фільтраційної консолідації. Вперше наявність солей в рідкій фазі при виведенні відповідного рівняння нерозривності теоретично враховано М. М. Веригінін, однак в практичних задачах цим впливом нехтувалось.

Дістало подальшого розвитку дослідження процесів фільтраційної консолідації неоднорідних ґрунтів. Зокрема, враховано вплив тепло-солепереносу при дослідженні консолідації шаруватих ґрунтів (природна неоднорідність або випадок поступового зведення ґрунтової споруди). Перші постановки таких задач в механіці ґрунтів зроблені ще В. А. Флорінін, однак в його роботах та роботах його наступників не враховувався вплив тепло-солепереносу. При проведенні робіт в даному напрямку використано класичні

результати І. І. Ляшка, В. С. Дейнеки, В. В. Скопецького, І. В. Сергієнка з математичного моделювання процесів в неоднорідних середовищах.

В дисертаційній роботі досліджені процеси фільтраційної консолідації ґрунтів з тонкими напівпроникними включеннями (включення із природних ґрунтів, які мають властивості напівпроникних мембран). Запропоновано в умову спряження неідеального контакту для концентрації порового сольового розчину на даному включенні внести «поправочний» коефіцієнт, який з фізичної точки зору означає ступінь ідеальності напівпроникного включення.

Також вперше в математичних моделях фільтраційної консолідації неоднорідних ґрунтів розглянуто явище контактної багатofракційної суфозії – коли суфозійні частинки з одного типу ґрунту через межу контакту можуть виноситись фільтраційним потоком в пори ґрунту іншого типу. Вперше в кінематичній граничній умові враховано ефект просідання верхньої межі ґрунту не лише за рахунок процесів консолідації, але і процесів контактної суфозії. До цього часу в науковій літературі математичних моделей таких взаємопов'язаних і взаємозалежних процесів побудовано не було.

4. Повнота викладу в опублікованих працях

За темою дисертації опубліковано більше 70-ти наукових праць. Серед них 2 монографії; 49 статей, з яких 6 у закордонних наукових виданнях, що входять до наукометричних баз (Scopus, MathSciNet, zbMATH, РИНЦ(eLibrary.ru), Math-Net.ru), 22 статті у наукових фахових виданнях з технічних наук, 7 статей у наукових фахових виданнях з фізико-математичних наук; 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

У здобувача є шість робіт у виданнях, що належать до відомих світових наукометричних баз даних (три – в Московському журналі «Математическое моделирование», дві – в перекладі журналу «Математичні методи та фізико-механічні поля», одна публікація в електронному журналі «Сибирские электронные математические известия»). Є 7 одноосібних робіт (з них 5 у фахових виданнях за даною спеціальністю, інші – у суміжних фахових виданнях). Більшість робіт – у співавторстві з науковим консультантом А. П. Власюком, аспірантами та студентами.

5. Відображення в докторській дисертації положень, які виносились на захист кандидатської дисертації

Наукові положення та результати, які виносились на захист кандидатської дисертації «Математичне моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням переносу солей», частково висвітлюються в оглядовій частині представленої дисертаційної роботи, зокрема, при висвітленні здобутків щодо математичного моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу переносу солей. Жодне з положень

та результатів, які виносилися на захист кандидатської дисертації, не винесені здобувачем на захист докторської дисертації.

6. Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів

Основним науковим результатом дисертаційного дослідження є побудова нових математичних моделей фільтраційної консолідації та фільтраційного руйнування гетерогенних пористих середовищ з урахуванням дії одночасно функціонуючих фізичних процесів тепло-солепереносу, гетерогенних хімічних масообмінних процесів, фізичних процесів просідання та розмиву ґрунту, багатофракційної контактної суфозії, чим враховано топологічну складність досліджуваних об'єктів.

Сформульовані та обґрунтовані кінематичні граничні умови: в задачах консолідації на рухомих межах гетерогенного пористого середовища у випадку урахування в математичних моделях та для прогнозування величини просідань (набухань); на межі розмиву пористого середовища фільтраційним потоком для прогнозування величини зони розмиву та її еволюції в часі при дослідженнях взаємозв'язаних процесів фільтраційної консолідації та контактної розмиву; на рухомих межах у випадку дослідження взаємозв'язаних процесів фільтраційної консолідації та багатофракційної контактної суфозії. Цим зроблено вагомий внесок в розвиток теорії крайових задач в областях з рухомими межами.

Розвинуто та ефективно використано відомі числові методи (метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, безсітковий метод радіальних базисних функцій), а також розроблено обчислювальні алгоритми та розрахункові схеми наближеного розв'язання нелінійних задач фільтраційної консолідації та фільтраційного руйнування ґрунтів в умовах впливу техногенних факторів. Це важливо з точки зору розвитку та розробки науково обґрунтованих наближених методів розв'язування нелінійних крайових задач в областях з рухомими межами.

7. Практична цінність отриманих в роботі результатів

В якості практичного застосування досліджено вплив техногенних факторів на швидкості зсувних зміщень ґрунтів, базуючись на математичній моделі фільтраційної консолідації. При цьому ідею визначення швидкості зсувних зміщень з використанням математичної моделі фільтраційної консолідації ґрунтів взято з робіт М. А. Цитовича, З. Г. Тер-Мартиросяна та А. Б. Лейкам. Однак, в роботах вказаних авторів в якості порової рідини розглядалась чиста вода і знехтувано неізотермічними умовами.

Проведені в дисертаційній роботі дослідження можуть бути використані при зведенні будівель, енергетичних та гідротехнічних об'єктів, а також при

розрахунку стійкості ґрунтових споруд і для прогнозування величини та швидкості осідань основ будівель в умовах фільтрації сольових розчинів в неізотермічних умовах та факторів контактного розмиву і контактної суфозії.

Проведені розрахунки дають змогу уточнити прогнозні характеристики протікання процесу фільтраційної консолідації ґрунтових об'єктів у випадку промислових або природних забруднень ґрунтових вод (включно із засоленістю самих ґрунтів), а також при впливі теплових полів (захоронені промислові відходи; фундаменти промислових споруд; сезонні коливання температури; дамби водойм-охолоджувачів атомних електростанцій).

На основі побудованої математичної моделі розроблений програмний комплекс, який використаний в практично важливих задачах, що підтверджено актами впровадження.

Також результати наукових досліджень використано в навчальному процесі при виконанні кваліфікаційних, дипломних та магістерських робіт студентами напряму підготовки і спеціальності «Прикладна математика» та відображено в робочих програмах ряду курсів та спецкурсів.

8. Зауваження щодо змісту роботи

Зауваження, пропозиції та побажання щодо роботи:

1. Дисертаційна робота містить велику кількість рисунків. Якби на більшості рисунків окрім поверхонь, що характеризують рівні тих чи інших невідомих функцій, фігурували б ще й області їх задання, то ефект їх (рисунків) інформативності був би значно кращим. Дисертанту варто було б приділити більше уваги цій стороні оформлення дисертаційної роботи.
2. В дисертаційній роботі серед математичних моделей масообмінних процесів увагу акцентовано лише на випадках поверхневого та об'ємного забруднення (засолення), хоча в науковій літературі такого роду математичних моделей (що враховують сорбцію, десорбцію тощо) побудовано більше. Доцільно було б (хоча б в загальних рисах) висловитись, чи розроблена методологія (алгоритми) переноситься на інші випадки.
3. В роботі значна увага приділена впливу теплового режиму на процеси фільтраційної консолідації та фільтраційного руйнування ґрунтів. Однак, аналізуючи вхідні параметри числових експериментів видно, що вплив температури обмежувався лише її додатними значеннями. Зрозуміло, що розгляд процесів при від'ємних температурах внесе суттєві відмінності, зокрема, в постановки крайових задач, адже доведеться розглядати області промерзання. В роботі цей випадок не розглядався. Це обмеження є суттєвим?

4. В дисертаційну роботу не включені відомі дослідження здобувача з комплексного методу граничних елементів в крайових задачах для параболічних рівнянь (стаття у «Віснику Київського ун-ту. Серія фізико-математичні науки», 2005, вип. 2); з математичного моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням явищ термоповзучості скелету пористого середовища (стаття у «Наукових записках НаУКМА. Серія фізико-математичні науки», 2007, т. 61); з дослідження існування та єдності розв'язку задачі з вільною межею в теорії фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу техногенних факторів (стаття в «Українському математичному віснику», 20014, №4); з теоретичного дослідження точності скінченноелементних розв'язків нелінійних крайових задач для систем параболічних рівнянь. Чому це не зроблено?

5. Деякі терміни (висловлення) допускають неоднозначність, наприклад, під терміном «задача» автор в одних місцях розуміє фізико-технічну проблему, що вивчається, а в інших – математичну задачу того чи іншого роду (яка безумовно не співпадає, є вужчою, в порівнянні з вихідною фізико-технічною задачею). Або ж вживається вузький термін «консолідація», хоча цей термін є вживаним не тільки в механіці ґрунтів, але й в геології, фізиці, навіть соціології, юриспруденції тощо.

Висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

9. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота Мартинюка П. М. «Математичне моделювання консолідації ґрунтів з урахуванням техногенного впливу та комплексу фізико-хімічних процесів» є актуальною завершеною науковою працею, в якій розв'язана важлива науково-технічна проблема математичного моделювання взаємозв'язаних фізико-хімічних та техногенних процесів фільтраційної консолідації, тепло-масопереносу, фільтраційного руйнування в гетерогенних пористих середовищах, зокрема контактного розмиву, наявності зосереджених шляхів фільтрації та контактної багатофракційної суфозії в ґрунтових гідротехнічних спорудах, явищ просідань ґрунтових основ цивільних і промислових об'єктів.

Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

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. «Клубок» наукових результатів, розв'язаний в дисертаційному дослідженні відповідає докторському рівню.

За актуальністю, рівнем та обсягом досліджень, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота «Математичне моделювання консолідації ґрунтів з урахуванням техногенного впливу та комплексу фізико-хімічних процесів» відповідає вимогам п.10, п.12, п.13 і п.14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, які ставляться до докторських дисертацій, а її автор Мартинюк Петро Миколайович заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри інформатики
і прикладної математики
Рівненського державного гуманітарного
університету МОН України,
доктор технічних наук, професор

А.Я.Бомба