

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ІВАНА ПУЛЮЯ

МІЧУТА ОЛЬГА РОМАНІВНА

УДК 517.958:536.72

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ КОНСОЛІДАЦІЇ
ГРУНТІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ХІМІЧНОЇ СУФОЗІЇ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України, м. Рівне.

Науковий керівник: **Мартинюк Петро Миколайович**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний університет водного господарства та природокористування, доцент кафедри прикладної математики, м. Рівне.

Офіційні опоненти: **Чернуха Ольга Юріївна**, доктор технічних наук, професор, Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, завідувач відділу математичного моделювання нерівноважних процесів, м. Львів;

Богаєнко Всеволод Олександрович, кандидат технічних наук, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, старший науковий співробітник відділу математичних систем моделювання проблем екології та енергетики, м. Київ.

Захист відбудеться 28 листопада 2014 року о ___ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий “ _____ ” _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток промислового виробництва зумовлює зростаючий техногенний вплив на навколишнє середовище. 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. Взаємодія може проявлятися в двох аспектах. По-перше, це хімічні реакції, які приводять до утворення інших, раніше відсутніх в ґрунті, хімічних сполук. По-друге, надходження в порову рідину ґрунту сторонніх хімічних речовин призводить до зміни концентрацій граничного насичення вже присутніх елементів солей. В результаті вони можуть додатково розчинятися або випадати в осад. Наслідком таких процесів можуть стати додаткові просідання (або набухання) ґрунту, і, як результат, спричиняють аварійні стани, аж до повного руйнування будівель. Тому при проектуванні промислових підприємств потрібно враховувати всі властивості ґрунту даної місцевості, особливо якщо він засолений.

Фільтраційна консолідація ґрунту пов'язана з двома взаємопов'язаними процесами. Перший – ущільнення ґрунту під впливом зовнішніх навантажень або власної ваги. Ущільнення, в силу різних причин, можуть бути нерівномірними. А тому із консолідацією ґрунту нерозривно пов'язана задача стійкості зведених споруд та безпеки експлуатації ґрунтових гребель. Другий процес – фільтрація порової рідини. Якщо ґрунт насичений деякою поровою рідиною, то прикладені навантаження спричиняють появу надлишкових напорів в цій рідині. При цьому описати динаміку просідання ґрунтового масиву можна через динаміку зміни надлишкових напорів в порах ґрунту. Таким чином математична модель процесу фільтраційної консолідації своєю основною складовою містить рівняння в частинних похідних (як правило, параболічного типу), в якому невідомою є функція надлишкових напорів.

В математичних моделях фільтраційної консолідації, як правило, в якості порової рідини розглядається однокомпонентний хімічний розчин. Проте в природних умовах поровий розчин є багатоконпонентним. Прикладом може бути загіпсований ґрунт, в пори якого починає надходити інший сольовий розчин в результаті аварії на хімічному підприємстві або як результат неконтрольованого витоку. В останні роки дослідження загіпсованих та засолених ґрунтів набувають особливого значення для оцінки екологічної безпеки людської діяльності і розробки ефективних методів захисту, які б зменшили кількість аварій, виникаючих внаслідок деформацій будівель. Такі деформації на загіпсованих та засолених ґрунтах зумовлені в основному просіданням від зміни властивостей засоленого ґрунту в результаті зволоження та розчинення гіпсу, а також в результаті техногенного впливу. Загіпсовані та засолені ґрунти є структурно нестійкими. Моделювання поведінки таких ґрунтів має свої особливості. Основна – це необхідність урахування розчинення гіпсу (хімічної суфозії) в процесі будівництва та експлуатації споруд на такого типу ґрунтах. Дослідження поведінки даних ґрунтів проводилося на рівні натурних експериментів, що є досить затратно по часу і коштах. Один із способів зменшення затрат – комп'ютерне моделювання. Однак зв'язаних процесів фільтраційної консолідації та хімічної суфозії до цього часу не розглядалося.

Тому побудова нових математичних моделей процесів фільтраційної консолідації пористих середовищ (на прикладі ґрунтів) з урахуванням впливу хімічної суфозії, розвиток та ефективне використання числових схем розв'язування відповідних крайових задач відноситься до важливих і актуальних задач математичного моделювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках планів наукових досліджень Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП). Результати дисертаційної роботи отримані в рамках науково-дослідних тем, в яких здобувач була виконавцем: «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 науково-дослідних робіт автором проведено математичне моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії та багатокомпонентності порового розчину.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є математичне моделювання процесів фільтраційної консолідації пористих середовищ (на прикладі ґрунтів) з урахуванням впливу багатокомпонентних хімічних розчинів, знаходження числових розв'язків відповідних нелінійних крайових задач в областях з рухомими межами та встановлення закономірностей впливу хімічної суфозії на фільтраційну консолідацію загіпсованих ґрунтів. Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання дослідження:

- на основі аналізу літературних джерел встановити залежність концентрації граничного насичення одних хімічних речовин від температури порової рідини та присутності в поровій рідині ґрунту інших хімічних речовин;
- розробити нову математичну модель процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу розчинів хімічної суфозії та багатокомпонентності порового розчину;
- отримати кінематичну граничну умову для прогнозування динаміки просідань верхньої рухомої межі ґрунту з урахуванням впливу хімічної суфозії;
- адаптувати для ефективного використання безсітковий метод радіальних базисних функцій для знаходження наближених розв'язків відповідних нелінійних крайових задач Стефанівського типу;
- розробити алгоритми числового розв'язання крайових задач, сформульованих на основі побудованої математичної моделі, створити відповідну програмну реалізацію розроблених алгоритмів та провести серію числових експериментів;
- встановити закономірності протікання процесів консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії та багатокомпонентних хімічних розчинів на основі аналізу проведених числових експериментів.

Об'єкт дослідження - процеси фільтраційної консолідації пористих середовищ (ґрунтів) з урахуванням впливу багатокомпонентних хімічних розчинів та гетерогенних масообмінних процесів.

Предмет дослідження – математичні моделі фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокomпонентних сольових розчинів та хімічної суфозії, яка є наслідком надходження в порову рідину агресивних хімічних речовин, що сприяють інтенсивному розчиненню присутніх у ґрунті солей.

Методи дослідження. Для побудови математичних моделей використано підходи механіки пористого середовища, теорії фільтрації та теорії тепло-масопереносу. Для відшукування наближених розв'язків крайових задач використано метод радіальних базисних функцій, який ґрунтується на методі колокації в точці. Для розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь використано методи Гауса та найменших квадратів. Застосовано метод Ньютона, як один із способів лінеаризації нелінійних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше сформовано нелінійну математичну модель хімічної суфозії в ґрунтах шляхом урахування агресивної дії зовнішніх впливів (температура, надходження в ґрунт хімічних розчинів), що призводить до прискорення розчинення хімічних компонентів в самому ґрунті.
- вперше побудовано нелінійну математичну модель взаємозв'язаних процесів фільтраційної консолідації та хімічної суфозії в пористих середовищах з урахуванням залежності концентрації граничного насичення одних хімічних речовин від присутності в поровій рідині інших хімічних речовин та температури, а також залежності коефіцієнта фільтрації від концентрації солей в твердій фазі.
- вдосконалено кінематичну граничну умову на верхній рухомій межі ґрунту шляхом урахування величини просідань за рахунок хімічної суфозії.
- вперше досліджено можливість застосування безсіткового методу радіальних базисних функцій для знаходження розв'язків нелінійних крайових задач фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії та багатокomпонентності хімічного складу порового розчину.

Практичне значення одержаних результатів. Проведені в дисертаційній роботі дослідження можуть бути використані при проектуванні будівель, енергетичних та гідротехнічних об'єктів, а також при розрахунку стійкості ґрунтових споруд і прогнозуванні осідань основ будівель при проектуванні промислових підприємств (відповідно до ДБН А.2.1-1-2008, п. 3.2.6.6.4), сховищ відходів хімічних виробництв в районах розповсюдження загіпсованих ґрунтів.

Результати дисертації впроваджено в процесі досліджень можливості виникнення загрози руйнування ґрунтової греблі, що оточує Басівкутське водосховище (м. Рівне), внаслідок хімічної суфозії. Дане дослідження проводилося спільно з Рівненським обласним управлінням водних ресурсів.

Одержані в дисертаційній роботі результати впроваджені в навчальному процесі при підготовці спецкурсів «Математичне і комп'ютерне моделювання природних та техногенних процесів», «Чисельні методи прикладної математики» для студентів Національного університету водного господарства та природокористування МОН України за спеціальністю «Прикладна математика».

Особистий внесок здобувача. Всі теоретичні та прикладні результати, що складають зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: теоретичне дослідження

експериментальних даних щодо залежності концентрації граничного насичення від температури [11, 12, 15, 16], побудова нелінійної математичної моделі фільтраційної консолідації ґрунту з урахуванням процесів хімічної суфозії [5, 17, 18], побудова нелінійної математичної моделі фільтраційної консолідації ґрунту з урахуванням багатокомпонентності хімічного складу порового розчину [7, 13, 19], дослідження можливості застосування безсіткового методу радіальних базисних функцій для знаходження розв'язків відповідних нелінійних крайових задач в областях з рухомими межами та розробка обчислювального алгоритму [3, 8, 13, 20], розробка програмного забезпечення для числового розв'язання відповідних крайових задач [1, 2, 9, 21], проведення числових експериментів та аналіз отриманих результатів, [4, 14, 22], розробка модулів програм для дослідження фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії, які увійшли у програмний комплекс «Фільтраційна консолідація ґрунтів з урахуванням впливу техногенних факторів» [14].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались й обговорювались на міжнародних та вітчизняних конференціях: 17-й, 18-й міжнародних конференціях «Прийняття рішень в умовах невизначеності» (м. Східниця, травень 2011; м. Ялта, вересень 2011р.); 15-18-й всеукраїнських наукових конференціях «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики» (м. Львів, 2008-2012); Всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (м. Рівне, 2013); науково-практичних конференціях Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне, 2008-2012р.р.

В повному обсязі робота доповідалася на семінарі кафедри прикладної математики Львівського національного університету імені Івана Франка, на розширеному науковому семінарі кафедри інформатики та прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету, на науковому семінарі «Математичне моделювання та обчислювальні методи» в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 22 наукові праці, у тому числі: 13 статей, з них 2 у зарубіжних наукових виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus [1] та РИНЦ [2], 9 статей у наукових фахових виданнях з технічних наук [3-7, 10-13], 2 статті у наукових фахових виданнях з фізико-математичних наук [8, 9], 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір [14], 8 публікацій в матеріалах міжнародних та національних конференцій [15-22], 3 праці опубліковано без співавторів [5, 9, 21].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 188 найменувань на 20 сторінках, додатків на 11 сторінках. Обсяг роботи становить 175 сторінок, в тому числі основного тексту 143 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення дослідження, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі викладено огляд та проведено аналіз літератури за темою дисертації, визначено місце досліджень, наведених у роботі, у розв'язанні науково-технічного завдання розробки нових математичних моделей фільтраційної консолідації пористих середовищ (грунтів) з урахуванням багатокомпонентності порового хімічного розчину та гетерогенних масообмінних процесів.

Класична фільтраційна теорія консолідації ґрунтів досить повно описана в роботах М. Ю. Абелєва, М. М. Герсєванова, Л. В. Горєлика, В. С. Дєйнеки, М. Р. Петрика, К. Терцагі, З. Г. Тер-Мартиросяна, М. О. Цитовича, В. А. Флоріна та ін. У роботах А. П. Власюка, О. В. Жеребятєєва, П. М. Мартинюка, В. М. Булавацького, О. П. Остапчук, В. В. Скопєцького, О. М. Степанченко класичні математичні моделі фільтраційної консолідації доповнені та вдосконалені шляхом урахування впливу змінного поля концентрації солей у поровому розчині. При цьому в роботах А. П. Власюка, П. М. Мартинюка розглянуто відповідні крайові задачі в змінних областях. Для врахування ефекту просідання поверхні ґрунту в процесі консолідації П. М. Мартинюком вперше виведено кінематичну граничну умову. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів масопереносу в пористих середовищах досліджено в працях А. Я. Бомби, М. М. Веригіна, А. П. Власюка, В. І. Лаврика, І. І. Ляшка, С. І. Ляшка, Є. Я. Чаплі, О. Ю. Чернухи та інших вчених. Однак у цих роботах в якості порової рідини розглядався однокомпонентний сольовий розчин. Проте в природних умовах поровий розчин є багатокомпонентним. Прикладом є загіпсований ґрунт, в пори якого починає надходити інший сольовий розчин в результаті аварії на хімічному підприємстві, або як результат неконтрольованого витоку.

Розгляд вказаних задач вимагає дослідження випадку, коли поровий розчин є багатокомпонентним за своїм хімічним складом. Моделюванням процесів масопереносу в пористих середовищах, в яких враховується вплив багатокомпонентних хімічних розчинів при наявності як гомогенних, так і гетерогенних реакцій займалися такі вчені, як В. О. Богаєнко, Д. А. Воронков, Е. Н. Коржов, М. Г. Храменков, Azimi G., Daichao Sheng та ін. Класифікацію масообмінних процесів досить повно описано в працях М. М. Веригіна. Однією з основних проблем при математичному моделюванні масопереносу багатокомпонентних хімічних розчинів є залежність параметрів масообміну одних речовин від присутності в поровій рідині інших хімічних речовин. Так, за даними Л. Лукнера, В. М. Шестакова концентрація граничного насичення гіпсу може зростати в кілька разів у випадку наявності в поровій рідині солей магнію або натрію.

Отже, математичне моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії та багатокомпонентності хімічного складу порового розчину відноситься до важливих задач сьогодення.

У другому розділі вдосконалено математичні моделі фільтраційної консолідації ґрунтів при фільтрації в них багатокомпонентних хімічних розчинів та наявності гетерогенних масообмінних процесів між рідкою та твердою фазами.

Основне рівняння фільтраційної консолідації ґрунту без врахування початкового градієнта напору отримано, ґрунтуючись на наступних залежностях:

- рівняння нерозривності рідкої фази ґрунту із врахуванням зміни концентрації солей в поровій рідині

$$\operatorname{div}(\rho_p \mathbf{u}) + \frac{\partial \left(\sigma \rho_p \left(1 - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \frac{c_i}{\rho_i} \right) \right)}{\partial t} = 0; \quad (1)$$

- рівняння нерозривності твердої фази ґрунту із врахуванням зміни концентрації солей в твердій фазі

$$\operatorname{div}(\rho_T \mathbf{v}) + \frac{\partial \left(\sigma_m \rho_T - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \frac{\rho_T N_i}{\rho_i} \right)}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

- узагальнений закон Дарсі-Герсеванова на випадок руху n -компонентних хімічних розчинів для двофазного ґрунту

$$\mathbf{u} - e\mathbf{v} = -\mathbf{K}_h(\mathbf{c}, \mathbf{N}, T) \nabla h + \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_{c_i} \nabla c_i + \mathbf{v}_T \nabla T, \quad (3)$$

де $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ - вектор швидкості фільтрації; σ - об'єм порової рідини в одиниці об'єму ґрунту (для двофазного ґрунту – пористість); σ_m - об'єм, який займають тверді частинки в одиниці об'єму ґрунту; e - коефіцієнт пористості; $c_i, N_i, i = \overline{1, n}$ - концентрації хімічних речовин в рідкій та твердій фазах; h - надлишковий напір; $\rho_i, i = \overline{1, n}$ - густини хімічних речовин в твердій фазі; ρ_T - густина твердих частинок ґрунту; ρ_p - густина порової рідини; $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$ – вектор швидкості руху твердих частинок ґрунту; $\mathbf{K}_h(\mathbf{c}, \mathbf{N}, T)$ - коефіцієнт (тензор) фільтрації, що залежить від векторів концентрації солей $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, $\mathbf{N} = (N_1, N_2, \dots, N_n)$ та температури T ; $\mathbf{v}_{c_i}, \mathbf{v}_T, i = \overline{1, n}$ - коефіцієнти (тензори) хімічного та термічного осмосів; $\varepsilon_i, i = \overline{1, n}$ – параметри, що набувають значення 0, якщо наявність солей не враховується і 1, якщо наявність солей враховується (введені для зручності); ∇ - оператор Гамільтона.

Враховуючи узагальнений закон Дарсі-Герсеванова (3) та рівняння нерозривності (1), (2), отримаємо рівняння консолідації ґрунту:

$$\frac{(1+e)(1+(R-1)\xi)}{R\gamma a} \left(\operatorname{div}(\mathbf{K}_h(\mathbf{c}, \mathbf{N}, T) \nabla h) - \sum_{i=1}^n \operatorname{div}(\mathbf{v}_{c_i} \nabla c_i) - \operatorname{div}(\mathbf{v}_T \nabla T) \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i (1+e)(1+(R-1)\xi)}{R\gamma \rho_i a} \left(\sigma \frac{\partial c_i}{\partial t} - e \frac{\partial N_i}{\partial t} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (4)$$

де a - коефіцієнт стисливості ґрунту; ξ - коефіцієнт бічного тиску ґрунту; R - вимірність задачі ($R = \overline{1, 3}$); γ - питома вага сольового розчину; t - час.

Рівняння консолідації (4) містить невідомі функції $c_i(\mathbf{X}, t), N_i(\mathbf{X}, t), i = \overline{1, n}$ - концентрації солей у поровому розчині ґрунту, який консолідується. Тому для замикання системи рівнянь крім даних рівнянь математична модель повинна містити рівняння масопереносу n -компонентного хімічного розчину в рідкій фазі, рівняння теплопереносу, а також рівняння кінетики масообміну

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\gamma_i (C_i^{(\max)}(\mathbf{c}, T) - c_i) N_i^{\alpha_i}, \quad \mathbf{X} \in \overline{\Omega}, \quad i = \overline{1, n}, \quad t > 0,$$

де $\gamma_i, i = \overline{1, n}$ - коефіцієнт швидкості масообміну; $C_i^{(\max)}, i = \overline{1, n}$ - концентрація граничного насичення солей в рідкій фазі, яка в загальному випадку залежить від температури та концентрацій інших хімічних елементів; $\alpha_i, i = \overline{1, n}$ - показники степенів, які визначаються експериментальним шляхом і залежать від характеру засоленості породи. Для об'ємного засолення ґрунту, при якому солі у вигляді кристаликів дискретно розсіяні в об'ємі ґрунту, $\alpha_i = 1/2, i = \overline{1, n}$.

Задача консолідації ґрунту пов'язана з його ущільненням, а отже – із просіданням. Враховуючи хімічну суфозію, а саме – розчинення та випадання солей в осад із-за змінності їх концентрації граничного насичення, вдосконалено кінематичну граничну умову на рухомій верхній межі ґрунту

$$\frac{dl(\mathbf{X}^*, t)}{dt} = - \int_{l(\mathbf{X}^*, t)}^{L(\mathbf{X}^*)} \frac{1}{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\rho_i} (1+e)\right) (1+e)} \left(\frac{R\gamma\alpha}{1+(R-1)\xi} \frac{\partial h}{\partial t} - (1+e) \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{\gamma_i}{\rho_i} (C_i^{(\max)}(\mathbf{c}, T) - c_i) N_i^{\alpha_i} \right) \right) dz.$$

Тут $\mathbf{X}^* = (x, y)$; $L(\mathbf{X}^*)$ - нижня нерухома межа ґрунту; $l(\mathbf{X}^*, t)$ - верхня рухома межа ґрунту.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню консолідації ґрунтів з урахуванням їх засоленості та хімічної суфозії. Розв'язання такої задачі з урахуванням впливу однокомпонентного сольового розчину спричинено необхідністю дослідження впливу хімічної суфозії на просідання верхньої межі масиву засоленого ґрунту (рис. 1).

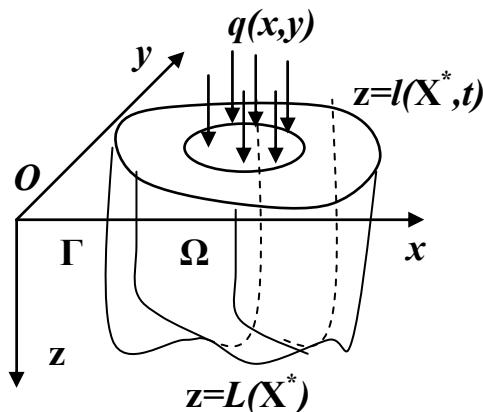


Рис. 1. Фільтраційна консолідація засоленого масиву ґрунту

Враховуючи всі міркування другого розділу, нелінійна нестационарна задача фільтраційної консолідації масиву засоленого ґрунту в обмеженій області Ω з межею Γ під впливом миттєво прикладеного незмінного у часі зовнішнього навантаження має вигляд:

$$\frac{(1+e)(1+(R-1)\xi)}{R\gamma a} [\nabla \cdot (\mathbf{K}_h(c, T, N) \nabla h - \mathbf{v}_c \nabla c - \mathbf{v}_T \nabla T)] +$$

$$+ \frac{\varepsilon(1+e)(1+(R-1)\xi)}{R\gamma\rho_1 a} \left(\frac{\partial(\sigma c)}{\partial t} - e \frac{\partial N}{\partial t} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla c) + \nabla \cdot (\mathbf{D}_T \nabla T) - (\mathbf{u}, \nabla c) = \sigma \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial t}, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho c_p (\mathbf{u}, \nabla T) = c_T \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \mathbf{X} \in \Omega, \quad t > 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\gamma_1 (C_1^{(\max)} - c) N^\alpha, \quad \mathbf{X} \in \bar{\Omega}, \quad t > 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{u} = e \cdot \mathbf{v} - \mathbf{K}_h(c, T, N) \nabla h + \mathbf{v}_c \nabla c + \mathbf{v}_T \nabla T. \quad (9)$$

Дана задача (5)-(9) доповнюється наступними початковими (10) та граничними (11)-(13) умовами:

$$h(\mathbf{X}, 0) = H_0(\mathbf{X}), \quad c(\mathbf{X}, 0) = C_0(\mathbf{X}), \quad T(\mathbf{X}, 0) = T_0(\mathbf{X}), \quad N(\mathbf{X}, 0) = N_0(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in \bar{\Omega}, \quad (10)$$

$$h(\mathbf{X}, t)|_{\Gamma_1^{(h)}} = H_1(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in \Gamma_1^{(h)}, \quad (\mathbf{u}, \mathbf{n})|_{\Gamma_2^{(h)}} = 0, \quad \mathbf{X} \in \Gamma_2^{(h)}, \quad t > 0, \quad (11)$$

$$c(\mathbf{X}, t)|_{\Gamma_1^{(c)}} = C_1(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in \Gamma_1^{(c)}, \quad (\mathbf{q}_s, \mathbf{n})|_{\Gamma_2^{(c)}} = 0, \quad \mathbf{X} \in \Gamma_2^{(c)}, \quad t > 0, \quad (12)$$

$$T(\mathbf{X}, t)|_{\Gamma_1^{(T)}} = T_1(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in \Gamma_1^{(T)}, \quad (\mathbf{q}_T, \mathbf{n})|_{\Gamma_2^{(T)}} = 0, \quad \mathbf{X} \in \Gamma_2^{(T)}, \quad t > 0. \quad (13)$$

На верхній рухомій межі ґрунту задається кінематична гранична з врахуванням хімічної суфозії (вважається, що просідання відбувається вертикально):

$$\frac{dl(\mathbf{X}^*, t)}{dt} = - \int_{l(\mathbf{X}^*, t)}^{L(\mathbf{X}^*)} \frac{1}{(\rho_1 - (1+e)N)(1+e)} \left(\frac{R\gamma\rho_1 a}{1+(R-1)\xi} \frac{\partial h}{\partial t} - \gamma_1(1+e)(C_1^{(\max)} - c)N^\alpha \right) dx, \quad t > 0. \quad (14)$$

Тут $\mathbf{X} = (x, y, z)$, $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$, $t \in [0; t_0]$, $\Gamma_1^{(h)} \cup \Gamma_2^{(h)} = \Gamma$ - межа області Ω ($\Gamma_1^{(h)} \cap \Gamma_2^{(h)} = \emptyset$); \mathbf{n} - вектор напрямних косинусів зовнішньої нормалі до межі Γ ; $H_0(x), C_0(x), N_0(x), T_0(x), H_1(x), C_1(x), T_1(x)$ - задані функції; $D_i, i = \overline{1, n}$ - коефіцієнти хімічної дифузії; $D_T^{(i)}, i = \overline{1, n}$ - коефіцієнти термічної дифузії; λ - коефіцієнт теплопровідності вологого ґрунту; c_p - питома теплоємність порового сольового розчину; c_T - об'ємна теплоємність ґрунту.

Числовий розв'язок крайової задачі (5)–(14) знайдено безсітковим методом радіальних базисних функцій (РБФ). Виберемо вузлові точки $\mathbf{X}_j = (x_j^{(x)}, y_j^{(y)}, z_j^{(z)})$, $j = \overline{1, m}$ в області Ω . Значення невідомих функцій крайової задачі (5)–(14) знайдено за наближеними формулами

$$h(\mathbf{X}, t) \approx \sum_{j=1}^m h_j(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_h), \quad c(\mathbf{X}, t) \approx \sum_{j=1}^m c_j(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_c),$$

$$T(\mathbf{X}, t) \approx \sum_{j=1}^m T_j(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_T), \quad N(\mathbf{X}, t) \approx \sum_{j=1}^m N_j(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_N), \quad (15)$$

де $\varepsilon_h > 0, \varepsilon_c > 0, \varepsilon_T > 0, \varepsilon_N > 0$ - параметри форми базисної функції; $\varphi_j(r_j, \varepsilon)$ - радіальні базисні функції; $h_j(t), c_j(t), N_j(t), T_j(t)$ - невідомі коефіцієнти, які залежать від часу, $r_j = \sqrt{(x - x_j^{(x)})^2 + (y - y_j^{(x)})^2 + (z - z_j^{(x)})^2}$, $j = \overline{1, m}$.

Виберемо в замикання $\overline{\Omega}$ області Ω колокаційні точки $\mathbf{Y}_i = (x_i^{(y)}, y_i^{(y)}, z_i^{(y)})$, $i = \overline{1, M}$, причому $m \leq M$. Введемо множини $\omega = \{i : \mathbf{Y}_i \in \Omega\}$, $\gamma_1^{(h)} = \{i : \mathbf{Y}_i \in \Gamma_1^{(h)}\}$, $\gamma_2^{(h)} = \{i : \mathbf{Y}_i \in \Gamma_2^{(h)}\}$. Аналогічно визначаємо множини номерів колокаційних точок для інших невідомих функцій. Введемо позначення

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i^{(y)} - x_j^{(x)})^2 + (y_i^{(y)} - y_j^{(x)})^2 + (z_i^{(y)} - z_j^{(x)})^2}, \quad j = \overline{1, m}, i = \overline{1, M}.$$

Підставляючи (15) в рівняння (5)–(9), початкові умови (10) та граничні умови (11)–(14), використовуючи метод колокації в точці, отримаємо задачу Коші для системи нелінійних диференціальних рівнянь відносно векторів невідомих функцій $\mathbf{H}(t) = \{h_j(t)\}_{j=1}^m$, $\mathbf{C}(t) = \{c_j(t)\}_{j=1}^m$, $\mathbf{N}(t) = \{N_j(t)\}_{j=1}^m$, $\mathbf{T}(t) = \{T_j(t)\}_{j=1}^m$ у вигляді:

$$\mathbf{M}^{(1)} \frac{d\mathbf{H}(t)}{dt} + \mathbf{L}^{(1)}(\mathbf{C}(t), \mathbf{N}(t), \mathbf{T}(t))\mathbf{H}(t) = \mathbf{K}^{(1)} \frac{d\mathbf{N}(t)}{dt} + \mathbf{A}^{(1)} \frac{d\mathbf{C}(t)}{dt} + \mathbf{A}'^{(1)}\mathbf{C}(t) + \mathbf{E}'^{(1)}\mathbf{T}(t) + \mathbf{F}^{(1)}, \quad (16)$$

$$\mathbf{M}^{(2)} \frac{d\mathbf{C}(t)}{dt} + \mathbf{L}^{(2)}(\mathbf{C}(t), \mathbf{N}(t), \mathbf{T}(t))\mathbf{C}(t) = \mathbf{K}^{(2)} \frac{d\mathbf{N}(t)}{dt} + \mathbf{E}'^{(2)}\mathbf{T}(t) + \mathbf{F}^{(2)}, \quad (17)$$

$$\mathbf{M}^{(3)} \frac{d\mathbf{T}(t)}{dt} + \mathbf{L}^{(3)}(\mathbf{C}(t), \mathbf{N}(t), \mathbf{T}(t))\mathbf{T}(t) = \mathbf{F}^{(3)}, \quad (18)$$

$$\mathbf{M}^{(4)} \frac{d\mathbf{N}(t)}{dt} = \mathbf{L}^{(4)}(\mathbf{C}(t), \mathbf{N}^a(t)), \quad (19)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}^{(1)}\mathbf{H}_0(t) = \tilde{\mathbf{F}}^{(1)}, \quad \tilde{\mathbf{M}}^{(2)}\mathbf{C}_0(t) = \tilde{\mathbf{F}}^{(2)}, \quad \tilde{\mathbf{M}}^{(3)}\mathbf{T}_0(t) = \tilde{\mathbf{F}}^{(3)}, \quad \tilde{\mathbf{M}}^{(4)}\mathbf{N}_0(t) = \tilde{\mathbf{F}}^{(4)}, \quad (20)$$

де $\mathbf{M}^{(k)} = \{m_{ij}^{(k)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $\tilde{\mathbf{M}}^{(k)} = \{\tilde{m}_{ij}^{(k)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $\tilde{\mathbf{F}}^{(k)} = \{\tilde{f}_i^{(k)}\}_{i=1}^M$, $k = \overline{1, 4}$, $\mathbf{L}^{(k)} = \{l_{ij}^{(k)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $k = \overline{1, 3}$, $\mathbf{L}^{(4)} = \{l_i^{(4)}\}_{i=1}^M$, $\mathbf{A}'^{(1)} = \{a'_{ij}{}^{(1)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $\mathbf{A}^{(1)} = \{a_{ij}^{(1)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $\mathbf{E}'^{(k)} = \{e'_{ij}{}^{(k)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $\mathbf{K}^{(k)} = \{k_{ij}^{(k)}\}_{i=1, j=1}^{M, m}$, $k = \overline{1, 2}$, $\mathbf{F}^{(k)} = \{f_i^{(k)}\}_{i=1}^M$, $k = \overline{1, 3}$.

Елементи матриць для рівняння (16) отримані у вигляді

$$l_{ij}^{(1)} = \begin{cases} \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a} \nabla \cdot (\mathbf{K}_h(c, N, T) \nabla \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_h)), & i \in \omega, \\ (\mathbf{K}_h(c, N, T) \nabla \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_h), \mathbf{n}), & i \in \gamma_2^h, \\ \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_h), & i \in \gamma_1^h; \end{cases}$$

$$a'_{ij}{}^{(1)} = \begin{cases} \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a} \nabla \cdot (\mathbf{v}_c \nabla \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_c)), & i \in \omega, \\ (\mathbf{v}_c \nabla \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_c), \mathbf{n}), & i \in \gamma_2^c, \\ 0, & i \notin \omega \cup \gamma_2^c; \end{cases}$$

$$k_{ij}^{(1)} = \begin{cases} \frac{\varepsilon e(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma\rho_1 a} \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_N), & i \in \omega, \\ 0, & i \notin \omega; \end{cases} \quad a_{ij}^{(1)} = \begin{cases} -\frac{\varepsilon\sigma(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma\rho_1 a} \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_C), & i \in \omega, \\ 0, & i \notin \omega; \end{cases}$$

$$e'_{ij} = \begin{cases} \frac{(1+e)(1+2\xi)}{3\gamma a} \nabla \cdot (\mathbf{v}_T \nabla \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_T)), & i \in \omega, \\ (\mathbf{v}_T \nabla \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_T), \mathbf{n}), & i \in \gamma_2^T, \\ 0, & i \notin \omega \cup \gamma_2^T. \end{cases}$$

Елементи матриць для рівнянь (17)-(20) одержані в аналогічній формі.

Для знаходження числового розв'язку задачі Коші (16)–(20) часовий відрізок $[0, t_0]$ вкрито рівномірною сіткою з кроком τ . Для дискретизації рівнянь (16)-(18) за часом використано лінеаризовану повністю неявну різницеву схему. Для дискретизації рівняння (19) за часом використано лінеаризацію за Ньютоном. Для розв'язування перевизначених систем лінійних алгебраїчних рівнянь використовувався метод найменших квадратів з подальшим застосуванням методу Гауса. Також на кожному часовому шарі для уточнення координат вузлових та колокаційних точок використано кінематичну умову (14).

В якості одного з числових експериментів досліджено тривимірну задачу фільтраційної консолідації масиву засоленого глинистого ґрунту форми прямокутного паралелепіпеда з довжиною ребер 22 м , 22 м , 11 м . Коефіцієнт фільтрації покладался залежним від концентрації солей у твердій та рідкій фазах і температури згідно з формулою

$$K_h(c, T, N) = k_0(c, T) e^{-\chi \frac{N}{N_{\max}}}. \quad (21)$$

Тут $k_0(c, T)$ - коефіцієнт фільтрації незасоленого ґрунту ($N(\mathbf{X}, t) \equiv 0$), який апроксимувався методом РБФ згідно з відомими експериментальними даними. Коефіцієнт фільтрації чистої води прийнято $0,002 \text{ м / доба}$, а також

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.4, \quad e = 0.7, \quad \alpha = 0.5, \quad a = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{Н}, \quad \rho_1 = 2000 \text{ кг / м}^3, \\ C_1^{(max)} &= 350 \text{ г / л}, \quad D = 0.02 \text{ м}^2 / \text{доба}, \quad \gamma = 10^4 \text{ кг / (м}^2 \cdot \text{доба}^2), \\ \gamma_1 &= 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ доба}^{-1}, \quad v_c = 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^5 / (\text{кг} \cdot \text{доба}), \quad T_2(t) = 17 + 13 \cos\left(\frac{\pi t}{180}\right), \end{aligned}$$

$$N_0(\mathbf{X}) = 240 \left(-\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{x}{l} \right) + 40, \quad C_0(\mathbf{X}) = \begin{cases} C_1^{(max)}, & p = 0, \\ C_0, & p \neq 0; \end{cases} \quad T_0(\mathbf{X}) = \begin{cases} 50^\circ \text{C}, & p = 0, \\ 4^\circ \text{C}, & p \neq 0. \end{cases}$$

Область прикладеного навантаження – це квадрат зі сторонами, паралельними відповідним осям координат при $x \in [6, 16]$ та $y \in [6, 16]$. Інтенсивність навантаження $q = 20 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2 \text{ доба}^2$. Кількість вузлових точок вибрано 216, а колокаційних – 1728. Крок за часом $\tau = 30 \text{ діб}$, кількість часових проміжків 36. В якості РБФ використовувалась мультіквадратична радіальна базисна функція $\varphi(r) = \sqrt{1 + (r\bar{\varepsilon})^2}$. Параметр форми $\bar{\varepsilon}$ становив 1 для всіх невідомих функцій.

У результаті комп'ютерного експерименту встановлено, що просідання за рахунок хімічної суфозії (53,4 % від загальної величини просідання) є більшим, ніж просідання за рахунок зміни надлишкових напорів (46,6 % від загальної величини просідання).

Четвертий розділ присвячений математичному моделюванню процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокомпонентних хімічних розчинів.

Розглянуто R -вимірну ($R = \overline{1,3}$) задачу фільтраційної консолідації масиву ґрунту в області Ω з межею Γ під впливом миттєво прикладеного незмінного у часі зовнішнього навантаження. Ґрунт містить в своєму складі різні хімічні речовини, і поровий розчин є n -компонентний. Таким чином можуть бути змодельовані кілька ситуацій: 1) прикладене навантаження на ґрунт – це цех хімічного виробництва, під фундамент якого і потрапляють хімічні речовини; 2) атмосферні опади після викиду в повітря шкідливих речовин; 3) техногенна аварія, яка призводить до потраплення в ґрунт хімічних речовин в рідкій фазі; 4) хвостосховище рідких відходів хімічного виробництва, які контактують із загіпсованим ґрунтом тіла ґрунтової греблі, що перебуває у стані фільтраційної консолідації.

Нелінійну крайову задачу консолідації ґрунту з урахуванням впливу n -компонентного хімічного розчину в загальному випадку можна задачею подати у вигляді:

$$\frac{(1+e)(1+(R-1)\xi)}{R\gamma a} \times \nabla \cdot \left[\left(\mathbf{K}(\mathbf{c}, \mathbf{N}, T) \nabla h - \sum_{i=1}^n v_{c_i} \nabla c_i - v_T \nabla T \right) \right] + \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon(1+e)(1+(R-1)\xi)}{R\gamma\rho_i a} \left(\sigma \frac{\partial c_i}{\partial t} - e \frac{\partial N_i}{\partial t} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (22)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{D}_i \nabla c_i) + \nabla \cdot (\mathbf{D}_T \nabla T) - (\mathbf{u}, \nabla c_i) = \sigma \frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial t}, i = \overline{1, n}, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\gamma_i (C_i^{(\max)}(\mathbf{c}, T) - c_i) N_i^{\alpha_i}, i = \overline{1, n}, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (24)$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho c_p (\mathbf{u}, \nabla T) = c_T \frac{\partial T}{\partial t}, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (25)$$

$$\mathbf{u} - e\mathbf{v} = -\mathbf{K}(\mathbf{c}, \mathbf{N}, T) \nabla h + \sum_{i=1}^n v_{c_i} \nabla c_i + v_T \nabla T, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (26)$$

Дана задача (22)-(26) доповнюється наступними початковими (27) та граничними (28) умовами:

$$h(\mathbf{X}, 0) = H_0(\mathbf{X}), \quad c_i(\mathbf{X}, 0) = C_i^{(0)}(\mathbf{X}), \quad N_i(\mathbf{X}, 0) = N_i^{(0)}(\mathbf{X}), i = \overline{1, n}, \quad (27)$$

$$T(\mathbf{X}, 0) = T_0(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in \overline{\Omega},$$

$$h(\mathbf{X}, t) \Big|_{\Gamma_1^{(h)}} = H_1(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in \Gamma_1^{(h)}, \quad (\mathbf{u}, \mathbf{n}) \Big|_{\Gamma_2^{(h)}} = 0, \quad \mathbf{X} \in \Gamma_2^{(h)},$$

$$c_i(\mathbf{X}, t) \Big|_{\Gamma_1^{(c)}} = C_i^{(1)}(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in \Gamma_1^{(c)}, \quad (\mathbf{q}_i, \mathbf{n}) \Big|_{\Gamma_2^{(c)}} = 0, \quad \mathbf{X} \in \Gamma_2^{(c)}, i = \overline{1, n}, \quad (28)$$

$$T(\mathbf{X}, t) \Big|_{\Gamma_1^{(T)}} = T_1(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in \Gamma_1^{(T)}, \quad (\mathbf{q}_T, \mathbf{n}) \Big|_{\Gamma_2^{(T)}} = 0, \quad \mathbf{X} \in \Gamma_2^{(T)}.$$

На верхній рухомій межі ґрунту задається кінематична гранична (29) з врахуванням хімічної суфозії та багатокомпонентності хімічного складу порового розчину (вважається, що просідання відбувається вертикально):

$$\frac{dL(\mathbf{X}^*, t)}{dt} = - \int_{l(\mathbf{X}^*, t)}^{L(\mathbf{X}^*)} \frac{1}{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} N_i(t)(1+e)\right)(1+e)} \left(\frac{(R-1)\gamma a}{1+\xi} \frac{\partial h}{\partial t} - (1+e)^2 \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\rho_i} (C_i^{(max)}(\mathbf{c}, T) - c_i) N_i^{\alpha_i} \right) dx. \quad (29)$$

Числові розв'язки крайової задачі (22)–(29) знайдено безсітковим методом радіальних базисних функцій у вигляді

$$\begin{aligned} h(\mathbf{X}, t) &\approx \sum_{j=1}^m h_j(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_h), & c_i(\mathbf{X}, t) &\approx \sum_{j=1}^m c_{ij}(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_{c_i}), \\ N_i(\mathbf{X}, t) &\approx \sum_{j=1}^m N_{ij}(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_{N_i}), & T(\mathbf{X}, t) &\approx \sum_{j=1}^m T_j(t) \varphi_j(r_j, \varepsilon_T), \end{aligned} \quad (30)$$

де $\varepsilon_h, \varepsilon_{c_i}, \varepsilon_{N_i}, \varepsilon_T, i = \overline{1, n}$ – параметри форми базисної функції; $\varphi_j(r_j, \varepsilon)$ – радіальні базисні функції; $h_j(t), c_{ij}(t), N_{ij}(t), T_j(t), i = \overline{1, n}$ – невідомі коефіцієнти є функціями часу. Для відшукування невідомих коефіцієнтів використовувався метод колокації в точці з використанням базисних радіальних функцій. Також на кожному часовому шарі перераховувались координати вузлових та колокаційних точок шляхом дискретизації умови (29)

$$\begin{aligned} \frac{z_j^{(s+1)} - z_j^{(s)}}{\tau} &= - \int_{l^{(s)}(\mathbf{X}^*, t)}^{L(\mathbf{X}^*)} \frac{1}{\left(1 - (1+e) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^m N_{ij}^{(s+1)} \varphi_j(r_{kj}, \varepsilon_{N_i})\right)(1+e)} \times \\ &\times \left(\frac{3\gamma a}{1+2\xi} \left(\sum_{j=1}^m \frac{h_j^{(s+1)} - h_j^{(s)}}{\tau} \varphi_j(r_{kj}, \varepsilon_h) \right) - \right. \\ &\left. - (1+e) \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\rho_i} \left(C_i^{(max)}(\mathbf{c}, T) - \sum_{j=1}^m c_j^{(s+1)} \varphi_j(r_{kj}, \varepsilon_{c_i}) \right) \left(\sum_{j=1}^m N_{ij}^{(s+1)} \varphi_j(r_{ij}, \varepsilon_{N_i}) \right)^{\alpha_i} \right) dz, s = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Тут s - номер часового шару.

На основі запропонованої математичної моделі розглянуто просторову задачу фільтраційної консолідації масиву загіпсованого ґрунту форми прямокутного паралелепіпеда з довжиною ребер 24 м, 24 м, 10 м. Ґрунт вважається однорідним та ізотропним за своїми характеристиками.

Нехай $c_1(\mathbf{X}, t), N_1(\mathbf{X}, t)$ - концентрації кам'яної солі NaCl, яка починає надходити в ґрунт з фундаменту споруди; $c_2(\mathbf{X}, t), N_2(\mathbf{X}, t)$ - концентрації гіпсу. При цьому прийнято

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.4, \quad e = 0.7, \quad \alpha_1 = 0.5, \quad \alpha_2 = 0.5, \quad a = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{H}, \quad C_1^{(max)} = 350 \text{ г/л}, \\ D_1 &= 0.02 \text{ м}^2/\text{доба}, \quad D_2 = 0.02 \text{ м}^2/\text{доба}, \quad \gamma_1 = 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ доба}^{-1}, \quad \gamma_2 = 0 \text{ доба}^{-1}, \\ v_{c_2} &= 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^5/(\text{кг} \cdot \text{доба}), \quad v_{c_1} = 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^5/(\text{кг} \cdot \text{доба}), \quad C_1(t) = C_1^{(max)}, \quad \xi = 0.75. \end{aligned}$$

Коефіцієнт фільтрації чистої води $0,001 м/доба$. При апроксимації залежності

$K_h(C_1, N_2, T) = k_0(C_1, T) e^{-\chi \frac{N_2}{N_2^{(max)}}}$ використовувався метод РБФ з експериментальними даними для $k_0(C_1, T)$.

Початкова кількість гіпсу в твердій фазі обчислювалось за формулою $N_1^{(0)} = \frac{m_g}{100} \rho_g$, де m_g - загіпсованість ґрунту, ρ_g - густина гіпсу. Кількість вузлових і колокаційних точок прийнято 2744. Крок по часу $\tau = 10$ діб. Параметр форми при використанні мультиквадратичної РБФ для невідомих функцій становив 2.5.

Концентрація граничного насичення гіпсу $C_2^{(max)}(C_1, T)$ приймалася залежною від концентрації солі та температури за відомими даними.

У таблиці 1 наведено розрахункові дані величини просідань верхньої межі ґрунту при різних значеннях тиску та загіпсованості ґрунту.

Таблиця 1.

Величина просідань точки $x = 12 м, y = 12 м$ верхньої межі ґрунту на момент часу 300 діб

№	Параметри	Величина просідань загіпсованого ґрунту при $C_2^{(max)} = C_2^{(max)}(C_1, T)$	Величина просідань загіпсованого ґрунту при $C_2^{(max)} = const$	Збільшення просідань при $C_2^{(max)} = C_2^{(max)}(C_1, T)$ в порівнянні $C_2^{(max)} = const$
1	$m_g = 10\%$, $q = 20 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2 \text{ доба}^2$	18,31 см	17,59 см	4,09 %
2	$m_g = 10\%$, $q = 0 \text{ кг/м}^2 \text{ доба}^2$	1,08 см	0,31 см	248,39 %
3	$m_g = 30\%$, $q = 20 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2 \text{ доба}^2$	27,69 см	26,59 см	4,14 %
4	$m_g = 30\%$, $q = 0 \text{ кг/м}^2 \text{ доба}^2$	1,52 см	0,36 см	322,22 %

За результатами числових розрахунків показано, що урахування залежності концентрації граничного насичення гіпсу призводить до збільшення величини просідання верхньої межі масиву ґрунту (стовпець табл. 1, в якому наведено відносне збільшення просідання у відсотках). Збільшення загіпсованості ґрунту призводить до збільшення просідання ґрунту. Також зауважимо, що просідання в результаті розчинення гіпсу і урахування залежності $C_2^{(max)} = C_2^{(max)}(C_1, T)$ збільшується від 0,36 см до 1,52 см (на 322,22 %). Тобто, якщо процес консолідації ґрунту під фундаментом цеху хімічного виробництва завершився, але в ґрунт починає надходити не вода, а сольовий розчин, то виникають додаткові нерівномірні просідання.

Також в четвертому розділі побудовано та досліджено нелінійну крайову задачу фільтраційної консолідації тіла ґрунтової греблі з урахуванням впливу багатокомпонентних сольових розчинів.

Числові експерименти проводилися для задачі фільтраційної консолідації загіпсованої ґрунтової греблі ($c_2(\mathbf{X},t)$, $N_2(\mathbf{X},t)$ - концентрації гіпсу) з профілем рівносторонньої трапеції висотою 30 м з довжинами верхньої та нижньої основ 80 м та 20 м відповідно. Прийнято, що у верхньому б'єфі знаходиться концентрований сольовий розчин з концентрацією граничного насичення 160 г/літр ($c_1(\mathbf{X},t)$, $N_1(\mathbf{X},t)$ - концентрації звичайної кам'яної солі NaCl).

Для апроксимації залежності $K_h(C_1, N_2, T)$ та $C_2^{(\max)}(C_1, T)$ використаний вищенаведений підхід. Процес досліджувався протягом 360 діб, з кроком за часом 10 діб. На рис. 2-5 наведено характерні розподіли надлишкових напорів та концентрацій солей в рідкій фазі.

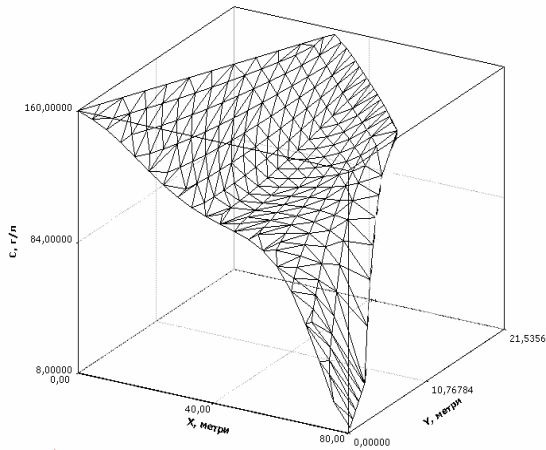


Рис. 2. Розподіл концентрації солі в рідкій фазі

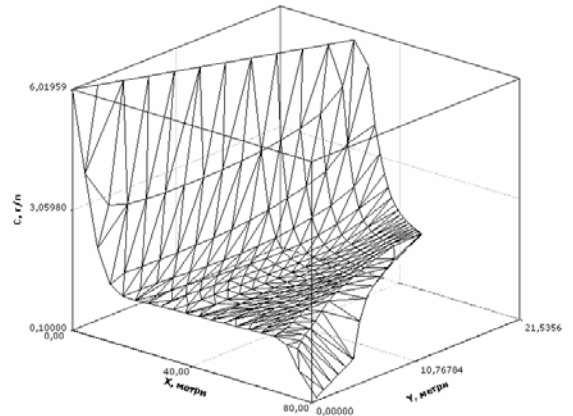


Рис. 3. Розподіл концентрації гіпсу в рідкій фазі з урахуванням залежності $C_2^{(\max)} = C_2^{(\max)}(C_1, T)$

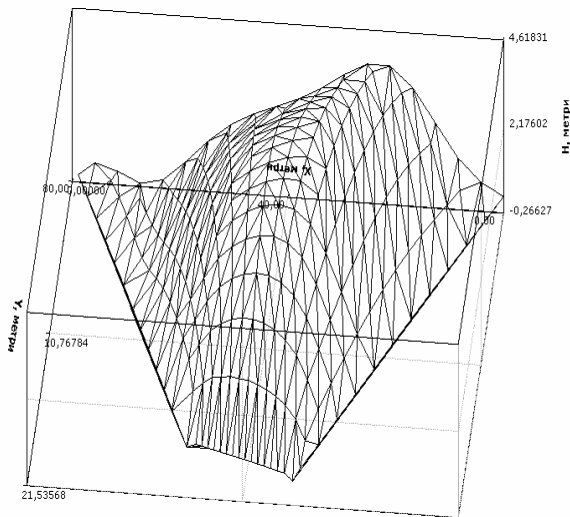


Рис. 4. Різниця розподілу напорів з урахуванням наявності солі і чистою водою

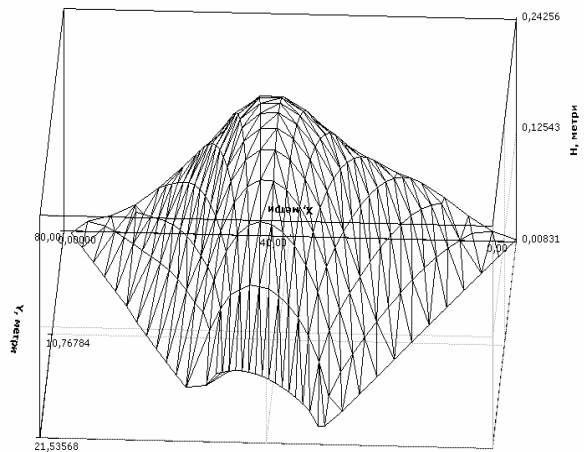


Рис. 5. Різниця розподілу напорів з урахуванням наявності гіпсу і без нього

За результатами числового аналізу встановлено, що наявність гіпсу (рис. 5) не має значного впливу на розподіл надлишкових напорів, оскільки його концентрація в рідкій фазі є дуже малою в порівнянні з концентрацією солі. Проте наявність у розчині солі (рис. 4) здійснює значний вплив на розподіл поля надлишкових напорів

в тілі греблі (максимальна різниця напорів близько 4.62 м). При наявності солі надлишкові напори розсіюються повільніше.

В табл. 2 показано величину просідання верхньої межі ґрунту за рахунок зміни напорів і концентрації солей.

Таблиця 2.

Просідання верхньої межі ґрунту в сантиметрах при відсутності початкових надлишкових напорів

X, м	31,17	33,52	35,88	38,23	40,58	42,94	45,2	47,64	50
З врахуванням солі і гіпсу $C_2^{(\max)} = C_2^{(\max)}(C_1, T)$									
H	9,06	9,3	9,31	9,17	8,93	8,58	8,15	7,57	6,82
C_1+C_2	-17,47	-18,99	-19,92	-20,55	-20,86	-21,01	-21,06	-21,02	-21,04
Сума	-8,41	-9,69	-10,61	-11,38	-11,93	-12,43	-12,91	-13,45	-14,22
З врахуванням солі і гіпсу $C_2^{(\max)} = const$									
H	9,07	9,31	9,32	9,19	8,94	8,6	8,17	7,58	6,83
C_1+C_2	-16,67	-18,17	-19,11	-19,76	-20,08	-20,24	-20,28	-20,25	-20,27
Сума	-7,6	-8,86	-9,79	-10,57	-11,14	-11,64	-12,11	-12,67	-13,44
%	9,63%	8,57%	7,73%	7,12%	6,62%	6,36%	6,2%	5,8%	5,49%

Тут “H” – просідання за рахунок зміни напорів; “ C_1+C_2 ” – просідання за рахунок зміни концентрації солі та гіпсу; “сума” – сумарне просідання; “%” – різниця між просіданнями ґрунту з урахуванням залежності $C_2^{(\max)} = C_2^{(\max)}(C_1, T)$ і константою $C_2^{(\max)} = const$ у відсотках. Причому знак “-” означає просідання, а “+” – набухання ґрунту.

При наявності солі та гіпсу відбувається сумарно більше просідання верхньої межі греблі, аніж у інших випадках (табл. 2). У випадку врахування впливу хімічних речовин напори в тілі греблі значно змінюються і відбувається набухання (рядок “H”, табл. 2). Але це набухання компенсується просіданнями за рахунок розчинення гіпсу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому розв’язано важливу науково-технічну задачу математичного моделювання процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатоконпонентних хімічних розчинів при проходженні гетерогенних процесів розчинення-кристалізації та залежності концентрації граничного насичення від теплового стану і хімічного складу порового розчину. При цьому отримано такі основні результати та висновки:

1. Вперше сформовано нелінійну математичну модель фільтраційної консолідації ґрунтів шляхом урахування впливу хімічної суфозії, кінетики гетерогенних масообмінних процесів, комплексного урахування залежності концентрації граничного насичення одних хімічних речовин від присутності в поровій рідині інших хімічних речовин та залежності коефіцієнта фільтрації від концентрації солей у рідкій і твердій фазах. Встановлено, що врахування залежності коефіцієнта

фільтрації від концентрації солей в рідкій і твердій фазі сповільнює процес розсіювання надлишкових напорів в ґрунті, що, в свою чергу, веде до збільшення часу його стабілізації.

2. Вдосконалено кінематичну граничну умову на верхній рухомій межі масиву ґрунту шляхом урахування кінетики масообмінних процесів, і як частковий випадок, хімічної суфозії. Це дало можливість уточнення прогнозних даних щодо величини вертикальних просідань верхньої рухомої межі ґрунту завдяки врахуванню процесів розчинення та кристалізації, а також впливу хімічної суфозії на 53,4%.

3. Вперше досліджено можливість застосування безсіткового методу радіальних базисних функцій до класу крайових задач в областях з рухомими межами. Отримано наближені розв'язки відповідних нелінійних крайових задач в одно-, дво- та тривимірному випадку.

4. Досліджено практично важливі випадки фільтраційної консолідації загіпсованих ґрунтів з урахуванням хімічної суфозії при надходженні в ґрунт чистої води або розчину звичайної кам'яної солі. Встановлена необхідність урахування хімічної суфозії при дослідженні консолідації вказаного типу ґрунтів оскільки це призводить до підвищення точності прогнозних даних щодо величини просідань до 74%. У випадку, якщо загіпсований ґрунт вже перебуває в стабілізованому стані, то надходження в нього не чистої води, а розчину кам'яної солі приводить до інтенсифікації розчинення гіпсу і, як результат, до нових просідань поверхні ґрунту за рахунок хімічної суфозії. Величина просідань зростає до 200-300% в порівнянні з просіданнями при розгляді в якості порової рідини чистої води. Результати, які підтверджують сформульовані висновки, отримані і при дослідженні фільтраційної консолідації греблі, побудованої із загіпсованих ґрунтів, в якості греблі-огорожувача хвостосховища рідких хімічних відходів.

5. Практичне значення дисертаційної роботи полягає в наступному: результати дисертації впроваджено в процесі досліджень можливості виникнення загрози руйнування ґрунтової греблі, що оточує Басівкутське водосховище (м. Рівне), внаслідок хімічної суфозії. Дане дослідження проводилося спільно з Рівненським обласним управлінням водних ресурсів. Одержані в дисертаційній роботі результати впроваджені в навчальному процесі при підготовці спецкурсів «Математичне і комп'ютерне моделювання природних та техногенних процесів», «Чисельні методи прикладної математики» для студентів Національного університету водного господарства та природокористування МОН України за спеціальністю «Прикладна математика».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Vlasyuk A. P.* Numerical solution of a one-dimensional problem of filtration consolidation of saline soils in a nonisothermal regime / *A. P. Vlasyuk, P. M. Martinyuk, O. R. Fursovych* // *Journal of Mathematical Sciences.* – 2009. – Vol. 160, № 4. – Pp.525-535.
2. *Мичута О. Р.* Математическое моделирование влияния химической суффозии на фильтрационную консолидацию засоленных грунтов в неизотермических условиях / *О. Р. Мичута, А. П. Власюк, П. Н. Мартинюк* // *Математическое моделирование.* – 2013. –Т. 25, № 2. - С. 3-18.

3. *Власюк А. П.* Числове розв'язання одновимірної задачі фільтраційної консолідації засо-
лених ґрунтів в неізотермічному режимі / *А. П. Власюк, П. М. Мартинюк,
О. Р. Фурсович* // Матем. методи та фіз.-механ. поля. – 2008. – Том 51, № 1 - С. 197-204.
4. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання впливу хімічної суфозії на фільтраційну кон-
солідацію засолених ґрунтів в неізотермічних умовах в двовимірному випадку /
О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Тараса
Шевченка. Сер. фіз.-матем. науки. – 2011. – Вип. 4. – С. 169-175.
5. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання впливу багатокомпонентних хімічних розчи-
нів та неізотермічних умов на процеси консолідації ґрунтів в двовимірному випадку /
О. Р. Мічута // Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер. технічні науки. – 2012.
– Вип. 6. – С. 143-153.
6. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання впливу багатокомпонентних хімічних розчи-
нів та неізотермічних умов на фільтраційну консолідацію тіла ґрунтової греблі /
О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Тараса
Шевченка. Сер. фіз.-матем. науки. – 2012. – Вип. 3. – С. 209-215.
7. *Мічута О. Р.* R-вимірна задача впливу багатокомпонентних хімічних розчинів на про-
цеси фільтраційної консолідації ґрунтів / *О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк*
// Вісник Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Сер. фіз.-матем. науки. – 2013. –
Вип. 2. – С. 196-204.
8. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання впливу хімічної суфозії та неізотермічних
умов на фільтраційну консолідацію засолених ґрунтів в тривимірному випадку /
О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк // Таврійський вісник інформатики та
математики. – 2012. – Вип. 2. – С. 64-73.
9. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання консолідації ґрунтів з врахуванням не ізотер-
мічних умов та впливу багатокомпонентних хімічних розчинів в одновимірному
випадку / *О. Р. Мічута* // Наукові записки НаУКМА. Сер. комп. науки. – 2012. – Том
138. – С. 100-105.
10. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання фільтраційної консолідації засолених ґрунтів
при залежності концентрації граничного насичення від температури / *О. Р. Мічута,
А. П. Власюк, П. М. Мартинюк* // Вісник НУВГП. Сер. технічні науки. – 2010. –
Вип. 4 (52). – С. 194-201.
11. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання консолідації загіпсованих ґрунтів із врахуван-
ням впливу сольового розчину в неізотермічних умовах в одновимірному випадку /
О. Р. Мічута, О. В. Валькова // Вісник НУВГП. Сер. технічні науки. – 2011. –
Вип. 3 (55). – С. 129-136.
12. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання взаємовпливів фільтраційних, теплових та ба-
гатокомпонентних хімічних полів в деформівному масиві ґрунту. I. Математична
модель та чисельне розв'язання / *О. Р. Мічута, П. М. Мартинюк* // Вісник НУВГП. Сер.
технічні науки. – 2012. – Вип. 2 (58). – С. 189-197.
13. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання взаємовпливів фільтраційних, теплових та ба-
гатокомпонентних хімічних полів в деформівному масиві ґрунту. II. Результати
чисельних експериментів / *О. Р. Мічута, П. М. Мартинюк* // Вісник НУВГП. Сер.
технічні науки. – 2012. – Вип. 2 (58). – С. 198-203.
14. *Мартинюк П. М.* Авторське право на комп'ютерну програму «Комплекс комп'ютерних
програм «Фільтраційна консолідація ґрунтів з урахуванням впливу техногенних
факторів»» / *П. М. Мартинюк, О. Р. Мічута* // Свідоцтво про реєстрацію авторського
права на твір №51618 від 08.10.2013р.

15. *Власюк А. П.* Про одну задачу фільтраційної консолідації масиву ґрунту з глинистим включенням за наявності тепло-масопереносу / *А. П. Власюк, П. М. Мартинюк, О. Р. Мічута* // Тези XV Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики». – Львів : Вид-во ЛНУ, 2008. – С. 51.
16. *Власюк А. П.* Про одну задачу фільтраційної консолідації засоленого масиву ґрунту при урахуванні залежності параметрів фільтрації та масообміну від температури / *А. П. Власюк, П. М. Мартинюк, О. Р. Мічута* // Тези XVI Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики». – Львів : Вид-во ЛНУ, 2008. – С. 149.
17. *Мічута О. Р.* Математичне моделювання впливу хімічної суфозії та температури на консолідацію засолених ґрунтів в тривимірному випадку / *О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк* // Тези XVII Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики». – Львів : Вид-во ЛНУ, 2011. - С.76.
18. *Мічута О. Р.* Про одну задачу фільтраційної консолідації засолених ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії в неізотермічних умовах ґрунтів / *О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк* // Тези XVII Міжнародної наукової конференції «Прийняття рішень в умовах невизначеності». – Східниця, 2011. – С. 138-140.
19. *Власюк А. П.* Про одну задачу консолідації ґрунтів із врахуванням впливу багатокомпонентних сольових розчинів в неізотермічних умовах ґрунтів / *А. П. Власюк, П. М. Мартинюк, О. Р. Мічута* // Тези XIX Міжнародної наукової конференції «Прийняття рішень в умовах невизначеності». – Ялта, 2011. - С.107.
20. *Мічута О. Р.* Про вплив багатокомпонентних хімічних розчинів та неізотермічних умов на фільтраційну консолідацію тіла ґрунтової греблі ґрунтів / *О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк* // Тези XVIII Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики». – Львів : Вид-во ЛНУ, 2012. – С.118.
21. *Мічута О. Р.* Про одну задачу консолідації ґрунтів із врахуванням впливу багатокомпонентних сольових розчинів в неізотермічних умовах ґрунтів / *О. Р. Мічута* // Тези Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів». – Рівне : НУВГП, 2013. - С.107.
22. *Мічута О. Р.* Про математичну модель загальної задачі впливу багатокомпонентних хімічних розчинів на процеси фільтраційної консолідації ґрунтів / *О. Р. Мічута, А. П. Власюк, П. М. Мартинюк* // Тези XIX Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики». – Львів : Вид-во ЛНУ, 2013. – С.55-56.

АНОТАЦІЇ

Мічута О.Р. Математичне моделювання фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу розчинів хімічної суфозії. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільській національній технічній університет імені Івана Пулюя МОН України, Тернопіль, 2014.

Дисертація присвячена розробці нових математичних моделей процесів фільтраційної консолідації ґрунтів з урахуванням впливу багатокомпонентних хімічних розчинів та хімічної суфозії.

На основі аналізу літературних джерел вдосконалено існуючі математичні моделі задач фільтраційної консолідації ґрунтів щодо урахування впливу хімічної суфозії та багатокомпонентних хімічних розчинів. Враховано залежність концентрації граничного насичення одних хімічних речовин від присутності в поровій рідині інших хімічних речовин. Вдосконалено кінематичну граничну умову на верхній рухомій межі ґрунту шляхом урахування хімічної суфозії. Адаптовано безсітковий метод радіальних базисних функцій для знаходження наближеного розв'язку відповідних крайових задач. Розроблено алгоритми, створено відповідну програмну реалізацію розроблених алгоритмів та проведено серію числових експериментів. Виявлено закономірності протікання процесів консолідації ґрунтів з урахуванням впливу хімічної суфозії та багатокомпонентних хімічних розчинів на основі аналізу проведених числових експериментів.

Ключові слова: математичне моделювання, фільтраційна консолідація, хімічна суфозія, просідання, безсітковий метод радіальних базисних функцій.

Мичута О. Р. Математическое моделирование фильтрационной консолидации грунтов с учетом влияния химической суффозии. – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя МОН Украины, Тернополь, 2014.

Диссертация посвящена разработке новых математических моделей фильтрационной консолидации грунтов с учетом влияния многокомпонентных химических растворов и химической суффозии.

Посредством анализа литературных источников усовершенствованы существующие математические модели фильтрационной консолидации грунтов, а именно учтены влияние на вышеприведенные процессы многокомпонентности химического состава порового раствора, кинетики массообменных процессов, зависимость концентрации предельного насыщения одних химических веществ от присутствия в поровой жидкости других химических веществ и температуры, зависимости коэффициента фильтрации от концентрации солей в жидкой и твердой фазе пористой среды. Частным случаем учтенных факторов являются процессы химической суффозии загипсованных и засоленных грунтов в результате фильтрации как чистой воды, так и других химических растворов. Усовершенствовано кинематическое граничное условие на верхней подвижной границе ґрунта в плане учета химической суффозии и многокомпонентности химического состава порового раствора. Обосновано применение бессеточного метода радиальных базисных функций к данному классу нелинейных краевых задач. В общем случае математические модели фильтрационной консолидации грунтов с учетом влияния многокомпонентных химических растворов и химической суффозии описываются краевыми задачами в областях с подвижными границами. Поэтому с

точки зрения переформатирования расчетной сетки, на которой проводится дискретизация исходных дифференциальных уравнений и зависимостей, наибольшими преимуществами владеют бессеточные методы. Особенно это касается пространственных краевых задач, численные решения которых также найдены в диссертационной работе. Разработаны алгоритмы, создана соответствующая программная реализация разработанных алгоритмов и выполнена серия численных экспериментов. Анализируя их результаты, выявлены закономерности протекания процессов консолидации грунтов с учетом влияния многокомпонентных химических растворов. Учет зависимости коэффициента фильтрации от концентрации солей в жидкой и твердой фазе замедляет процесс рассеяния избыточных напоров в грунте, что, в свою очередь, ведет к увеличению времени его стабилизации. Учет влияния кинетики массообменных процессов и, как частного случая, химической суффозии дал возможность уточнения прогнозных результатов относительно величины вертикальных осадок верхней подвижной границы грунта.

Ключевые слова: математическое моделирование, фильтрационная консолидация, химическая суффозия, проседание, бессеточный метод радиальных базисных функций.

Michuta O. R. Mathematical modelling of filtration consolidation of soils with taking into account influence of chemical suffusion. - Manuscript.

The thesis for a Technical Sciences Candidate Degree on specialty 01.05.02 - mathematical modelling and computational methods. - Ternopil National Technical University of the name of Ivan Puliui of Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2014.

The thesis is devoted to the development of new mathematical models of the processes of filtration consolidation of soil with the influence of chemical suffusion and multicomponent chemical solutions and chemical suffusion.

Based on the analysis of existing literature improved mathematical model of the filtration consolidation of soils on the impact of chemical suffusion and multicomponent chemical solutions. Considered the concentration dependence of the saturation limit of some chemicals on the presence of pore fluids other chemicals and temperature. Displaying kinematic boundary condition on the upper boundary moving ground based chemical suffusion. Adapted meshless radial basis function method for finding the approximate solution of the corresponding boundary value problems. The algorithms were created corresponding software implementation of the developed algorithms and conducted a series of numerical experiments. The regularities of processes of consolidation of soil with the influence of chemical suffusion and multicomponent chemical solutions based on the analysis carried out numerical experiments.

Keywords: mathematical modelling, consolidation filtration, chemical suffusion, subsidence, meshless radial basis function method.