

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ. В.М.ГЛУШКОВА

На правах рукопису

СКЛЕПОВА ЛАРИСА ІВАНІВНА

УДК 532. 546.681.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ІСТОТНО
НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

01.05.02 – математичне моделювання та
обчислювальні методи в наукових дослідженнях

Автореферат на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ 1996

AB 35.531

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико - математичних наук,
професор Дейнека В.С.

Науковий консультант: член - кореспондент НАН України,
доктор фізико - математичних наук,
професор Скопечкий В.В.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, Стукало О.С.
кандидат фізико - математичних наук,
Сташкевич В.І.

Провідна організація: Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Захист відбудеться " 16 " вересня 1996р. о 14 год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.39.02
при Інституті кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України
за адресою:
252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному архіві інституту.

Автореферат розісланий " 5 " вересня 1996р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Синявський В.Ф.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00759923 (Z)

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Актуальність теми дослідження. Комп'ютерна сучасність сприяє розвитку засобів автоматизації розрахунків і оптимізації проектів найскладніших інженерних споруд і технічних виробів, дозволяє розв'язувати фундаментальні та прикладні проблеми гідрогеології, гідрології, робити аналіз екологічних наслідків порушень природного режиму землі.

У зв'язку з цим особливо актуальною є проблема розробки нових моделей та методів проведення обчислювального експерименту, базом якого є розв'язування крайових і початково-крайових задач математичної фізики, врахування ступеню впливу на споруди окремих технічно важливих ефектів (стисливість, тріщинуватість, багат шаровість, неоднорідність середовища, нелінійність процесів, необоротність деформацій). Для допомоги досліднику у виборі моделей, методів, формуванні критеріїв, видачі результатів та їх аналізу створюються пакети прикладних програм (ППП) та системи підтримки прийняття рішень (СППР), розробці яких присвячені роботи Глушкова В.М., Єршова А.П., Ільїна В.П., Капітонової Ю.В., Рвачова В.Л., Редька В.Н., Самарського О.А., Сергієнка І.В., Скопечького В.В., Стогнія А.О., Стукала О.С., Юценко К.Л. та ін.

В Інституті кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України розроблена система автоматизації розрахунку і побудови оптимальних конструкцій споруд, дослідження фізико-механічних полів (САРПОК) та її версії.

Особливе місце в них займають моделі і методи розв'язання задач по розрахунку фільтраційних потоків в областях

ЛНБ ім. В. Стефаніва
АН України

складної структури, що містять різного роду вклучення досить малих геометричних розмірів за одним із напрямків.

Методом розв'язання прикладних задач у системі обрано метод скінченних елементів (МСЕ), в якому одним із основних етапів є представлення області у вигляді канонічних підобластей. На даний час відома значна кількість алгоритмів і програм розбиву двох і трьохвимірних областей. Проте програм автоматичного розбиву многозв'язних областей з генерацією подвійної нумерації на ділянках вклучень не існувало. Разом з тим, введення додаткових умов спряження на лініях вклучень вимагає для реалізації схем МСЕ подвійної нумерації вузлів при довільній неоднорідності і орієнтації прошарків.

Мета роботи. Розробити математичні моделі, обчислювальні схеми та модифікувати метод розв'язування задач нелінійної фільтрації та напружено-деформованого стану (НДС) фільтруючих неоднорідних середовищ, які містять тонкі, слабкотривкі прошарки; дослідити вплив цих елементів на НДС існуючих споруд. Розробити програмно-алгоритмічні комплекси для системи САРПОК, у тому числі підсистеми розбиття двохвимірних областей з розрізами, проблемні модулі, модулі графічного відображення та інші.

Наукова новизна роботи.

Розроблені та обґрунтовані математичні моделі нелінійних фізико-механічних процесів в пористих середовищах, що містять тонкі вклучення з характеристиками, які істотно відрізняються від характеристик основного середовища. Вплив таких вклучень враховується умовами спряження.

На класі розривних функцій розроблені алгоритми МСЕ по обчисленню нелінійних процесів фільтрації, НДС та взаємодіючих полів.

Запропоновані, обґрунтовані та апробовані на тестових та практичних задачах модифікації методів ітерування вільної поверхні та суперелементів по обчисленню класів задач механіки суцільного середовища. Позитивні якості запропонованих модифікацій дають змогу розраховувати фізико-механічні поля при значних геометричних розмірах областей з частково невідомою границею. При цьому немає необхідності перерозбиву областей на кожному ітераційному кроці.

Розроблені програмні комплекси триангуляції областей з розрізами, формування матриці жорсткості та інші програмні модулі, які ввійшли в систему автоматичного розрахунку фізико-механічних процесів в пористих середовищах.

Досліджені процеси нелінійної напірної фільтрації в складних інженерних спорудах, що містять слабкотривкі прошарки. Встановлено взаємозв'язок процесів фільтрації з НДС споруд. Досліджений вплив деяких параметрів конструкцій на стійкість реальних гідротехнічних споруд, послаблених слабкотривкими прошарками.

Достовірність одержаних результатів забезпечується порівнянням розрахунків з відомими точними тестовими результатами і розрахунками інших авторів. Доцільність запропонованих методів дослідження процесів в неоднорідних середовищах підтверджено розв'язуванням ряду практичних задач.

Методи дослідження. В роботі використані методи математичного і функціонального аналізу, оптимізації, теорії диференціальних рівнянь, обчислювальної математики, математичного моделювання.

Практичне значення. Запропонований модифікований метод ітерування вільної поверхні, програмний комплекс ПАРОР, створене алгоритмічне и програмне забезпечення використовуються при розв'язуванні практичних задач в рамках системи САРПОК. Теоретичні та прикладні результати дисертації використовуються в інституті "Гідропроєкт" в м.Харкові, Сибірському інституті ВНДІГ ім. Веденеєва в Красноярську.

Публікації та апробації роботи. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях, радах, наукових семінарах: Всесоюзній науковій конференції "Класичні і неklasичні крайові задачі для диференціальних рівнянь с частинними похідними, спеціальні функції, інтегральні рівняння та їх застосування" (Куйбишев, 1987), Республіканському науково-технічному семінарі "Крайові задачі фільтрації ґрунтових вод" (Казань, 1988), "Всесоюзній конференції по будівництву гідротехнічних споруд в районах вічної мерзлоти" (Москва, 1986), Всесоюзній конференції "Питання економіки та організації інформаційних технологій" (Гомель, 1991), Конференції по гідротехніці "Розрахункові граничні стани бетонних, залізобетонних конструкцій енергетичних споруд" (С.-Петербург, 1991), Науковому семінарі відділу " Автоматизація проблемних задач САПР" (Інститут математичних машин та систем НАНУ, Київ, 1990), Науковому семінарі відділу "Математичні системи моделювання проблем екології та енергетики" (Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАНУ, Київ, 1996).

Основні результати за темою дисертації опубліковані в 9 друкованих роботах.

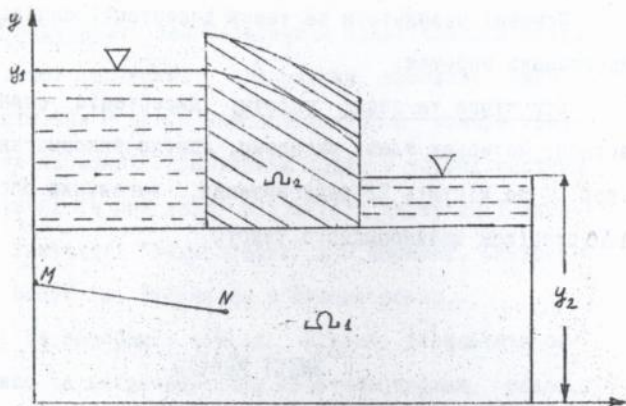
Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, висновку, списку використаної літератури, що містить 52 найменування, загальний обсяг складає 136 сторінок машинописного тексту.

ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Аналізується стан проблеми, обґрунтовується актуальність теми, практична і теоретична цінність досліджуваної тематики, виділені основні задачі і мета дослідження. Сформульовано основні наукові положення, що виносяться до захисту, наведена коротка анотація дисертації по главах.

ГЛАВА 1. ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ В ГРУНТОВИХ СПОРУДАХ

Глава присвячена математичному моделюванню процесів напірної та безнапірної нелінійної фільтрації (мал 1.) в середовищах, що містять різного роду слабкотривкі прошарки. В гідротехнічних об'єктах ними можуть бути протифільтраційні стінки, екрани, шпунти або слабкопроникні прошарки глин, мергелів природного походження. Незважаючи на невелику товщину, такі прошарки істотно впливають на основні параметри фільтраційного поля.



мал. 1.

Вплив довільно розмічених і слабопроникних проварків на фільтраційний потік передбачається описувати умовами що відображають неперервність потоку і його пропорційність скачку п'езометричного напору на даному вклученні (умова неідеального контакту),

$$\left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) \right] = 0, (x, y) \in MN,$$

$$\left\{ K_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) \right\}^{\pm} = \frac{K_0}{d} [h], (x, y) \in MN,$$

де $[\cdot]$ - скачок функції на MN , h - п'езометричний напір, \vec{V} - швидкість течії, K_x, K_y - коефіцієнти фільтрації з традиційними нелінійними умовами, K_0 - коефіцієнт фільтрації проварка MN товщиною d .

Тут вважається $\operatorname{div} \vec{V} = 0, (x, y) \in \Omega_i, i = \overline{1, n},$

$$\vec{V} = -\kappa(\vec{V}) \operatorname{grad} h, (x, y) \in \Omega_i, i = \overline{1, n}.$$

Виконано моделювання двох класів задач (в кам'яно-земляних та гравітаційних греблях) нелінійних процесів фільтрації, сформульовані класичні та узагальнені розв'язки задач, побудовані обчислювальні алгоритми їх чисельного розрахунку.

Далі побудований обчислювальний алгоритм і наводиться метод розв'язування системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. В § 2 розглядається задача фільтрації в анізотропному середовищі. Для розв'язання напірної фільтрації пропонується модифікований метод ітерування вільної поверхні, який не вимагає проведення повторних процедур кінцевоелементного розбиття областей, що досліджуються.

Наведені ефективні схеми МСЕ для обчислення нелінійних задач в областях великих розмірів. Методика суперелементів, що використовується, особливо ефективна в задачах дослідження екології ґрунтів та підземних вод регіонів, розрахунках безнапірної фільтрації гребель розпластаного типу, так як дозволяє істотно скоротити загальні ресурси пам'яті та часу ЕОМ для розв'язання конкретних задач. Математично обґрунтовуються запропоновані методи, а також доцільність та особливості їх практичного використання.

ГЛАВА 2. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ФІЛЬТРУЮЧИХ СПОРУД, ЩО МІСТЯТЬ ТОНКІ ВКЛЮЧЕННЯ

Виконано математичне моделювання напружено-деформованого стану фільтруючих середовищ, що послаблені тонкими слабкотривкими прошарками. Дослідження НДС є обов'язковим в проектному обґрунтуванні складних споруд, так як це дозволяє зробити оцінку їх надійності, стійкості. Основними характеристиками НДС об'єктів є напруги, зміщення та деформації.

Плоско деформований стан об'єкта описується системою рівнянь Ляме; на кривій депресії та поверхнях слаботривких включень задається відповідно умови спряження ідеального та неідеального контакту. Фільтраційні процеси моделюються аналогічно виконаному в главі 1. Для обох задач фільтрації та пружності з розривними розв'язками сформульовані відповідні варіаційні постановки; запропоновані алгоритми МСЕ їх розрахунку з обґрунтуванням послідовності розв'язання кожною.

У випадку фільтраційних потоків не тільки в тілі греблі, а й в її основі при змінних зовнішніх впливах (§ 2), пропонується модель та обчислювальний алгоритм дещо відмінний від попереднього. Спочатку на кожному часовому шарі розв'язується початкова - крайова фільтраційна задача, визначаються вектори швидкості фільтрації, а потім розв'язується задача теорії пружності. Взаємозв'язок між фізичними процесами виконується через задання коефіцієнта фільтрації, як функції залежної від об'ємної деформації (характеристики НДС). В свою чергу, вектор масових сил в задачах пружності є функцією напора, що визначається в процесі розрахунку фільтраційної задачі.

ГЛАВА 3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКУ І ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

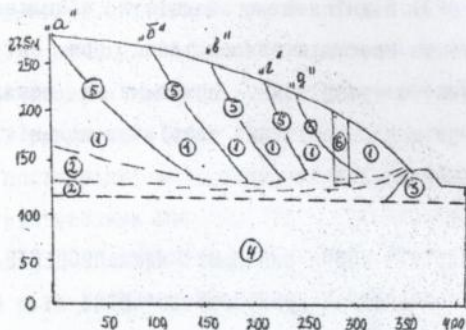
Глава присвячена опису системи автоматизації розрахунку задач механіки суцільного середовища методом скінченних елементів. Наведені список реалізованих задач, загальний опис системи, її складових підсистем (в розробці приймав участь дисертант). При реалізації підсистеми проблемно-орієнтованих модулів використані алгоритми та обчислювальні схеми МСЕ.

розроблені в двох перших главах. В § 2 описаний комплекс розбиву областей складного типу, що містять різного роду вклучення (ПАРОР). Відмінною особливістю комплексу є його універсальність та простота використання при автоматичному розбиві областей з розрізами. Комплекс не накладає будь-яких жорстких умов на розміщення розрізів, кількість та орієнтування неоднорідних вклучень.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕ- ОДНОРІДНИХ ГРУНТОВИХ ОБ'ЄКТАХ

В главі наведені результати числових розрахунків системою САРПОК реальних об'єктів. В § 1, 2 досліджується вплив виду нелінійності та анізотропії на установлену напірну та безнапірну фільтрацію в гравітаційній греблі за наявності слабопроникних вклучень в її основі. Аналізується вплив протифільтраційних елементів в тілі греблі на перерозподіл напорів в її подошві. Обґрунтовується висновок про тісний взаємозв'язок стійкості та НДС споруд з характеристиками нелінійності, анізотропії середовища, існуванням та орієнтацією слабкопроникних вклучень та протифільтраційних елементів. Підтверджується твердження про незалежність побудованих алгоритмів від вибору початкового наближення.

Дослідження НДС берегового схилу (мал.2) та фільтрувочої основи греблі наведено в § 3, 4. Вхідні дані для проведення обчислювального експерименту відповідають параметрам Вільшської ГЕС-3 та Красноярської ГЕС. Проаналізовано вплив проникності завіси, фільтрації на вертикальні та горизонтальні зміщення основи греблі.



Мал.2. Розрахункова область берегового схилу.

1-4 - інженерно--геологічні елементи; 5 - слабкотривкі вклучення, які при розрахунку замінюються лініями "а -- д"; 6 - мерзла підпірна стінка.

Досліджено залежність НДС схилу Вілюйської ГЕС-3 від послабляючих дій слабкотривких вклучень та зміцнюючої дії завіси в зоні берегового примикання ґрунтової греблі. Основні результати роботи коротко описані в висновку.

ВИСНОВКИ

Основні наукові і практичні результати отримані особисто пошуковачем полягають у наступному:

- виконана модифікація методу ітерування вільної поверхні та досліджені процеси взаємодії тонких промарків з конструкціями споруди;

- розроблений та реалізований програмний комплекс за чисельним розрахунком процесів нелінійної фільтрації в спорудах, що містять слабкотривкі прошарки; створена підсистема автоматичного розбиву областей з розрізами на скінченні елементи та інші модулі, що ввійшли в систему САРПОК;

- визначений та реалізований набір параметрів по вводу геометрії досліджуваних областей з прив'язкою до крайових та початкових умов;

- побудовані та обгрунтовані математичні моделі фізико-механічних процесів різної природи в істотно неоднорідних середовищах, що містять тонкі вклучення з характеристиками, які значно відрізняються від характеристик основного середовища. Взаємодія середовищ з такими вклученнями моделюється завданням на їх поверхнях додаткових умов типу неідеального контакту;

- розроблені нові обчислювальні схеми МСЕ для дослідження класів нелінійних задач механіки суцільного середовища з розривними розв'язками;

- на базі методів ітерування вільної поверхні та суперелементів запропонований новий алгоритм обчислення безнапірних фільтраційних процесів. Основною відмінністю даного методу є консервативність дискретної області та істотне зменшення розмірів матриці жорсткості;

- досліджені процеси нелінійної напірної та безнапірної фільтрації в середовищах різної анізотропії, що містять тонкі слабкотривкі прошарки. Досліджено вплив конструктивних параметрів складної гідротехнічної споруди на характеристики фізико-механічних полів;

- реалізований обчислювальний експеримент по визначенню НДС діючих гідротехнічних об'єктів, послаблених різними слаботривкими прошарками.

В спільних публікаціях особистий внесок Л.І.Склепової становлять нові моделі, умови спряження та модифікація методу ітерування вільної поверхні, комплекс ПАРОР та програмна реалізація всіх проблемних модулів.

Основні положення дисертації опубліковані в таких працях:

1. Система автоматизированного расчета полей и оптимизации конструкций (САРПОК) на СМ-ЕС ЭВМ / И.В. Сергиенко, В.В. Скопецкий, Л.И. Склеповая.-Киев, 1992.-17 с. (Препр. АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова; N 92-25).
2. Склеповая Л.И., Склеповой В.Н., О корректности одной нелинейной краевой задачи //Классические и неклассические краевые задачи для дифференциальных уравнений с частными производными, специальные функции, интегральные уравнения и их приложения.: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Куйбышев, 1988.- С. 18 - 19.
3. Скопецкий В.В., Дейнека В.С., Рыбачишин С.И., Склеповая Л.И. Фильтрация жидкости в неоднородной деформируемой грунтовой среде //Краевые задачи фильтрации грунтовых вод: Тез. докл. Респ. науч.-техн. семинара. - Казань, 1988.-С. 67.
4. Скопецкий В.В., Дейнека В.С., Склеповая Л.И.Численные исследования нелинейной фильтрации при наличии слабопроницаемых включений //Там же. - С. 66.

5. Скопецкий В.В., Дейнека В.С., Склеповая Л.И. Решение задачи нелинейной фильтрации при наличии слабопроницаемых включений // Вычисл. и прикл. математика. - 1988.-Вып. 65. - С. 92-99.
6. Скопецкий В.В., Дейнека В.С., Склеповая Л.И. Программный комплекс полуавтоматического разбиения областей с разрезами // Там же. - 1989. - Вып.69, - С. 96-102.
7. Напряженно-деформированное состояние мерзлого борта водохранилища /В.В.Скопецкий, В.С.Дейнека, ...,Л.И.Склеповая. Изв. вузов. Строительство и архитектура. - 1991. - N 4. - С. 70-78.
8. Скопецкий В.В., Дейнека В.С., Склеповая Л.И., Савов Т.П. Расчет неустановившейся напорной фильтрации при наличии тонких слабопроницаемых включений // Вычисл. и прикл. математика. - 1992. - Вып. 74. - С. 32-38.
9. Skopetskii V.V., Deineka V.S., Sklepovaya L.I. Problem in a domain with an unknown boundary //J. soviet mathematics. - New York and london, 1993. - P. 401-405.

Sklepovaya L.I. " Mathematical modelling and studying of filter processes in nonhomogeneous domains". This scientific work is a manuscript to submit thesis for candidate of physics and mathematics sciences in speciality 01.05.02 - mathematical modelling and calculating methods in scientific analyses. U.M.Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1996. This dissertation is devoted to elaboration and substantiation of

mathematical models of nonlinear physics and mathematical processes in porous materials which contain thin streaks with characteristics essentially differing from basic environmental parameters.

Modifications of free surface iteration methods and superelement method on calculating solid environment mechanic task classes have been proposed, grounded and approved comparing test and practical tasks. The programmed complex of triangular regions with sections and some other programmes included in the system of automatic calculating physical and mechanical processes in porous media have been developed.

Склеповая Л.И. " Математическое моделирование и исследование фильтрационных процессов в существенно неоднородных средах". Работой является рукопись на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.05.02 -математическое моделирование и вычислительные методы в научных исследованиях, Институт кибернетики имени В.М.Глушкова НАН Украины, Киев, 1996. Диссертационная работа посвящена разработке и обоснованию математических моделей нелинейных физико-механических процессов в пористых средах содержащих тонкие прослойки с характеристиками существенно отличающимися от параметров основной среды.

Предложены, обоснованы, апробированы на тестовых и практических задачах модификации методов итерирования свободной поверхности и метод суперэлементов по вычислению классов задач механики сплошной среды. Разработаны программный комплекс триангуляции областей с разрезами и другие программы, вошедшие в систему автоматического расчета физико-механических процессов в пористых средах.

Ключові слова: нелінійні фільтраційні процеси, істотно неоднорідні середовища, ітерування вільної поверхні, метод суперелементів, гідротехнічні споруди, слабкотривкі прошарки, комплекс ПАРОР, система САРПОК.

УВК НАУ ЗАМ. - 152 ТИР. - 100 96р.

438654

AB 35.531
AB 35.531