



БІЛОУС

Максим Володимирович — кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, maksbilous@ukr.net

УДК 004.9; 519.8; 556.3

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ПРОСТОРОВОЇ ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ПРИРОДНО СКЛАДНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
11 березня 2015 року

В Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України спільно з Інститутом геологічних наук НАН України проводять роботи зі створення інформаційної технології моделювання просторових процесів фільтрації води в неоднорідних геологічних середовищах. Її особливостями є використання математичних моделей з розривними розв'язками у тривимірній постановці та застосування паралельних обчислень, що дозволяє розв'язувати задачі з великою кількістю невідомих. Розроблено архітектуру і виконано програмну реалізацію базових програмних модулів. Створене програмне забезпечення використовується для розв'язання задач з уточнення оцінки запасів підземних вод різних регіонів України, а обчислення виконуються на багатопроцесорних обчислювальних комплексах сімейства СКІТ в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України.

Ключові слова: фільтрація, підземні води, метод скінченних елементів, розривні розв'язки, чисельне моделювання, паралельні алгоритми.

Вступ

Підземні води є природним ресурсом, значущість якого сьогодні важко переоцінити. За даними Європейської комісії, 20% поверхневих вод на території ЄС серйозно забруднені і близько 70% населення залежить від підземних вод як джерела питної води. У США, за даними Агентства із захисту навколишнього середовища, понад 140 млн чол. використовують підземні води як питні (95% сільського населення і 35% міського). У Канаді, за даними урядових сайтів, від використання підземних вод залежить 30% населення. В Україні показник залежності населення від використання підземних вод як питних також

оцінюють на рівні 30%. Крім того, підземні води є джерелом технічних промислових вод і використовуються для зрошення. При цьому потреби у водних ресурсах часто перевищують обсяги, які можна видобувати без негативних наслідків для водоносних горизонтів. Так, за даними Європейської комісії, 60% європейських міст надмірно експлуатують свої ресурси підземних вод.

Інтенсивне використання підземних вод часто призводить до виснаження водоносних горизонтів, що в свою чергу спричинює екологічні катастрофи. Слід зазначити, що зміни у структурі гірських порід, зумовлені виснаженням водоносних горизонтів, є незворотними. Як приклад таких негативних наслідків можна навести опускання земної поверхні, викликане ущільненням порід через їх зневоднення. Так, за даними Американської геологічної служби, внаслідок інтенсивного відкачування підземних вод для потреб зрошення за період з 1925 по 1977 р. неподалік долини Сан-Хоакін у Каліфорнії сталося опускання земної поверхні на 9 м. Іншим наслідком надмірного відкачування підземних вод і спричиненого ним зниження рівня ґрунтових вод (підземних вод верхнього водоносного горизонту) є зневоднення верхнього шару ґрунтів, істотне зменшення рослинності та зникнення води в колодязях. Не менш актуальною проблемою є забруднення підземних вод промисловими стоками, витоками відходів з підземних сховищ тощо.

Наведені приклади демонструють важливі особливості режиму фільтрації підземних вод та його змінення внаслідок їх інтенсивного використання. По-перше, це великі території, на яких проявляється негативний ефект тривалого навантаження. Родовища підземних вод мають площу в десятки тисяч квадратних кілометрів і є складними системами, навантаження на окремі ділянки яких впливає на стан системи в цілому. По-друге, проміжок часу, впродовж якого триває постійне навантаження на водоносні горизонти, часто становить десятки років, і коли негативні зміни вже стали спостережуваними, виправити їх дуже складно або взагалі неможливо.

На етапі проектування промислових об'єктів чи міст, а також у процесі розроблення рішень з усунення наслідків згаданих негативних явищ зазвичай виконують інженерно-геологічні дослідження, що охоплюють як експериментальне обстеження геолого-гідрогеологічних умов території, так і математичне моделювання змін у геологічному середовищі, які може спричинити проєктований об'єкт. Зокрема, здійснюють математичне моделювання впливу проєктованого об'єкта на режим фільтрації підземних вод. Спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовують у таких розрахунках, є програмною реалізацією обчислювальних схем дискретизації математичних моделей (систем диференціальних рівнянь у частинних похідних) за допомогою методу скінченних різниць (наприклад, MODFLOW) або методу скінченних елементів (наприклад, FEMWATER, FEFLOW). Перевага методу скінченних різниць полягає в легкості генерування розрахункової сітки, проте її розмірність істотно зростає в разі необхідності врахування неоднорідностей геологічного середовища, поверхневих водотоків, складних границь. Метод скінченних елементів дає змогу більш точно враховувати конфігурацію досліджуваного регіону та особливості перебігу досліджуваних процесів, однак алгоритми генерування розрахункових сіток є набагато складнішими.

Співробітники Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України спільно з колегами з Інституту геологічних наук НАН України виконали низку робіт зі створення інформаційної технології моделювання режиму фільтрації підземних вод у природно складних геологічних середовищах. Однією з її складових є скінченно-елементний розв'язувач Надра-3D. Серед особливостей задач, на розв'язання яких спрямоване це програмне забезпечення, слід відзначити такі.

1. Великі розміри модельованої території. Як уже зазначалося, розміри території родовищ підземних вод становлять десятки тисяч квадратних кілометрів. При цьому за наявності багатьох місць водозабору сумарний ефект навантаження проявлятиметься для всього ре-

гіону в цілому, а результати моделювання, виконаного для моделі, що описує все родовище, відрізняться від результатів моделювання для набору дрібніших моделей, які описують його окремі частини.

2. Тривимірність геометрії досліджуваного регіону. Важливим аспектом моделювання природних процесів є врахування їх просторовості та просторовості досліджуваних середовищ (особливо при моделюванні неоднорідних об'єктів значних розмірів). Одним із підходів є припущення щодо певної однорідності перебігу процесу в певному напрямку, що дає можливість замінити задачі в тривимірній постановці двовимірними задачами. У такий спосіб можна знизити вимоги до потужності обчислювальної техніки та можливостей програмного забезпечення і в разі правильного вибору моделі отримати розрахунки, адекватні досліджуваному процесу. Разом з тим, сучасний розвиток обчислювальної техніки (як персональних комп'ютерів, так і суперкомп'ютерів та багатопроцесорних обчислювальних комплексів промислового призначення) і ґрид-технологій дозволяє виконувати повномасштабне моделювання тривимірних задач великих розмірностей (десятки і сотні мільйонів невідомих).

3. Багатокомпонентність геологічного середовища. Як правило, геологічне середовище родовищ підземних вод є поверховою системою водоносних горизонтів, тобто водонапірні шари порід перемежуються зі слабопроникними водотривами. Коефіцієнти фільтрації порід водотривів на кілька порядків менші, ніж коефіцієнти фільтрації порід водоносних шарів. При цьому кожен із пластів (і водоносних горизонтів, і водотривів) має багатокомпонентну структуру — складається з різних типів порід з різними коефіцієнтами фільтрації.

4. Наявність тріщин, тонких включень. Крім відмінностей у параметрах складових геологічного середовища, значний вплив на поведінку модельованого процесу можуть мати різноманітні тонкі включення, розміри яких значно менші за розміри компонент середовища. Як приклад можна навести тонкі прошарки глини, які внаслідок обводнення можуть відігравати

роль поверхні ковзання. Одна з найбільших аварій в історії гідротехнічного будівництва сталася на греблі на річці Вайонт (північ Італії, 1963 р.) через неврахування таких глиняних прошарків у складі обводнених порід, що спричинило зсув довжиною 2 км, який витіснив воду через гребінь дамби.

5. Необхідність урахування при моделюванні різноманітних чинників навантажень, таких як опади, водовідбори, розгалужена мережа поверхневих водойм. Детальне врахування цих факторів зумовлює адекватність моделі, а відповідно й адекватність отриманих результатів розрахунків.

Математичні моделі і метод скінченних елементів

Математичні моделі процесів фільтрації води в багатокомпонентних середовищах є початково-крайовими задачами для систем диференціальних рівнянь у частинних похідних. Вплив тонких включень та взаємодія двох складових середовища з різними коефіцієнтами фільтрації моделюються додаванням до базової системи диференціальних рівнянь умов спряження, визначених на поверхнях контакту. Такі задачі чисельно розв'язуються методом скінченних елементів (МСЕ).

Одним із напрямів розвитку МСЕ є розроблена академіками НАН України В.С. Дейнекою та І.В. Сергієнком методика використання класів розривних функцій для побудови математичних моделей складних процесів у багатокомпонентних суцільних середовищах та побудови обчислювальних схем підвищеного порядку точності їх чисельної дискретизації. В Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова виконано низку робіт з розвитку зазначеної методики та її застосування для побудови й обґрунтування математичних моделей (у площинних і просторових постановках) та обчислювальних схем для процесів різних типів. Зокрема, для стаціонарних і нестаціонарних процесів теплопереносу, фільтрації, зміни напружено-деформованого стану в областях з тонкими включеннями.

Послідовність моделювання певного процесу з використанням МСЕ має такий вигляд.

1. Побудова математичної моделі досліджуваного процесу у вигляді початково-крайової задачі для системи диференціальних рівнянь (з умовами спряження, з розривними розв'язками).

2. Побудова розрахункової схеми дискретизації математичної моделі за просторовими та часовими змінними, отримання оцінок збіжності.

3. Побудова розрахункової сітки.

4. Побудова для розрахункової сітки системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Взагалі побудована система може бути й нелінійною, і задачі, що зводяться саме до таких систем, становлять сьогодні практичний інтерес. У цьому випадку використовують чисельні методи розв'язання нелінійних систем рівнянь, одним з етапів яких є побудова та розв'язання СЛАР.

5. Знаходження розв'язків СЛАР.

6. Розрахунок на основі знайденого розв'язку та розрахункової сітки набору величин, що характеризують модельований процес.

7. Візуалізація розрахованих величин, підготовка звітів, аналіз отриманих результатів.

Етапи 1–2 належать до математичного етапу, що передуює розробленню програмного забезпечення. Користувач скінченно-елементного програмного забезпечення зазвичай обмежений вибором математичних моделей процесу, що його цікавить, з моделей та розрахункових схем, наданих розробниками.

Етап 3 є окремою великою задачею, що включає побудову геометрії модельованої області, прив'язку параметрів вибраної математичної моделі до елементів геометрії, розбиття побудованої моделі геометрії на сукупність скінченних елементів (триангуляцію). Роботи цього етапу виконуються інструментарієм препроцесора.

Етапи 4–6 виконуються скінченно-елементним розв'язувачем. При цьому більша частина часу моделювання витрачається на знаходження розв'язків СЛАР. Слід зазначити, що зазвичай моделювання передбачає багатократне розв'язання СЛАР, оскільки інтерес має динаміка досліджуваного процесу в часі, причому

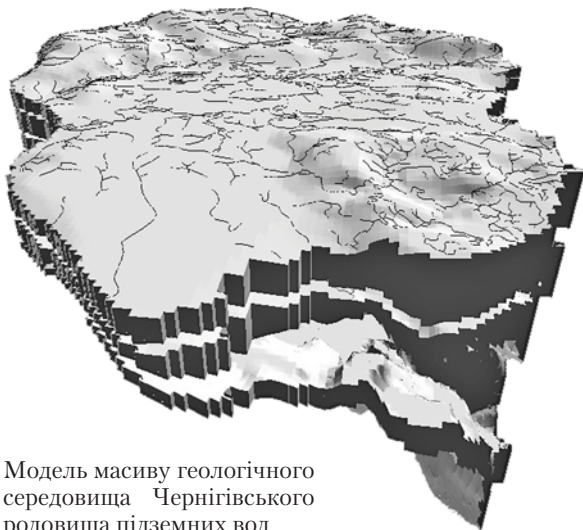
можуть знадобитися сотні й тисячі ітерацій. У разі нелінійних задач — це також багаторазова побудова та розв'язання СЛАР у межах однієї ітерації за часом.

Етап 7 виконується за допомогою інструментарію постпроцесора.

Як було зазначено, основною ідеєю МСЕ є зведення вихідної диференціальної задачі до побудови та розв'язання СЛАР, розв'язок якої визначає значення шуканої функції у вузлах розрахункової сітки. Значення розв'язку всередині елементів обчислюють на основі отриманих значень у вузлах сітки та вибраних базисних функцій. Це означає, що розмірність СЛАР пропорційна (не менша) кількості вузлів розрахункової сітки і для площ розмірами десятки тисяч квадратних кілометрів, як при моделюванні родовищ підземних вод, становить мільйони (або десятки мільйонів) невідомих. Для розв'язання таких задач за прийнятний час (тим більше, для багатократного розв'язання при моделюванні нестационарних процесів) можливостей персональних комп'ютерів і традиційних обчислювальних алгоритмів та програм недостатньо. Для цього використовують програмні реалізації паралельних алгоритмів, які функціонують на багатопроцесорних обчислювальних комплексах (у тому числі з гібридними обчислювальними вузлами на графічних прискорювачах). Прикладом є кластерні комплекси сімейства СКІТ Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова.

Скінченно-елементний розв'язувач Надра-3D

Програмні системи скінченно-елементного моделювання зазвичай складаються з двох компонент, які часто розвиваються окремо одна від одної, — препроцесора та скінченно-елементного розв'язувача (або декількох розв'язувачів). Завдання препроцесора — надання зручного інструментарію підготовки вхідних даних та побудови розрахункової сітки, а також інструментарію аналізу результатів. Завдання розв'язувача — побудова СЛАР та знаходження розв'язку у вузлах розрахункової



Модель масиву геологічного середовища Чернігівського родовища підземних вод

сітки. Саме розв'язувач і закладені в нього математичні моделі й алгоритми визначають застосовність системи для моделювання певного типу процесів, точність отриманого розв'язку та час його знаходження.

Створений в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова скінченно-елементний розв'язувач Надра-3D було спроектовано як програмний комплекс моделювання взаємопов'язаних просторових процесів у багатокомпонентних середовищах. У ньому передбачено можливості моделювання процесів теплопереносу, фільтрації та напружено-деформованого стану. Основною ідеєю при його проектуванні було максимальне відокремлення одна від одної підсистем формування та заповнення СЛАР МСЕ, підсистеми зберігання даних СЛАР в оперативній пам'яті та підсистеми розв'язання СЛАР. Такий підхід забезпечив гнучкість розширення програми і доповнення новими можливостями кожної із зазначених підсистем. Архітектуру програмного комплексу орієнтовано на розв'язання задач у дво- і тривимірних постановках з використанням лінійних або квадратичних базисних функцій МСЕ. При цьому передбачено його виконання на багатопроекторних обчислювальних комплексах (розв'язувач реалізовано з використанням технології MPI).

На сьогодні основним напрямом розвитку програмного комплексу обрано моделюван-

ня процесів фільтрації підземних вод. Серед практичних завдань, для вирішення яких використовують результати такого моделювання, можна назвати задачі, що виникають під час інженерно-геологічних досліджень при проектуванні водозаборів і будівництва (моделювання взаємодії проєктованих споруд з геологічним середовищем, попереднє визначення зони зміни гідрогеологічних умов, розрахунок та оцінка стійкості зсувонебезпечних схилів, прогнозування зміни інженерно-геологічних умов після будівництва), та задачі моделювання регіональних режимів фільтрації підземних вод, результати яких використовують, зокрема, для оцінки запасів підземних вод.

Моделювання регіонального режиму фільтрації Чернігівського родовища підземних вод

Спільно з фахівцями Інституту геологічних наук НАН України виконується робота зі створення моделей фільтрації підземних вод різних регіонів України з метою уточнення оцінки їх запасів. Одним із завдань цієї роботи є моделювання режиму фільтрації Чернігівського родовища підземних вод.

У межах запропонованої фахівцями-геологами моделі масив геологічного середовища Чернігівського родовища підземних вод вважають таким, що складається з 5 шарів. При схематизації басейну в розрізі розглядають три водоносні горизонти (комплекси) зони інтенсивного та значного водообміну і два регіональні слабкопроникні шари між ними. Границі моделі задані з урахуванням отриманих на регіональній моделі Дніпровського артезіанського басейну положень рівнів підземних вод у природних, порушених техногенезом та прогнозних умовах.

Розміри моделі в площині ХУ становлять 184×222 км. При побудові тривимірної моделі геометрії геологічного середовища враховано просторову конфігурацію покрівель/підшов шарів порід і просторовий розподіл різних типів порід у межах одного шару. При моделюванні режиму фільтрації враховано інфільтра-

цію на покрівлі, водозабори, вплив річкової системи. Особливістю побудованої моделі є набагато детальніше, ніж дозволяли скінченно-різницеві схеми, врахування геометрії розгалуженої річкової мережі регіону. Моделювання виконували для розрахункових сіток різної детальності (від 400 тис. до 1,5 млн невідомих) з використанням кластерних обчислювальних комплексів СКІТ Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова. Зараз триває аналіз отриманих результатів і калібрування моделі за даними натурних спостережень.

М.В. Белоус

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины
просп. Академика Глушкова, 40, Киев, 03680, Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЕСТЕСТВЕННО СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины совместно с Институтом геологических наук НАН Украины ведут работы по созданию информационной технологии моделирования пространственных процессов фильтрации воды в неоднородных геологических средах. Ее особенностями являются использование математических моделей с разрывными решениями в трехмерной постановке и ориентированность на использование параллельных вычислений, что позволяет решать задачи с большим количеством неизвестных. Разработана архитектура и выполнена программная реализация базовых программных модулей. Созданное программное обеспечение используется при решении задач по уточнению оценки запасов подземных вод разных регионов Украины, а вычисления выполняются на многопроцессорных вычислительных комплексах семейства СКІТ в Институте кибернетики им. В.М. Глушкова.

Ключевые слова: фильтрация, подземные воды, метод конечных элементов, разрывные решения, численное моделирование, параллельные алгоритмы.

M.V. Bilous

Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine
40 Glushkov Ave., 03680, Kyiv, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY FOR SIMULATION OF SPATIAL DYNAMICS OF GROUNDWATER IN NATURALLY COMPLEX GEOLOGICAL ENVIRONMENTS

Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine in collaboration with Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine are developing an information technology for simulation of spatial processes of water filtration in heterogeneous geological environments. The peculiarities of this technology are mathematical models with discontinuous solutions in three-dimensional formulation and orientation on the use of parallel computing, which allows to solve problems with a large quantity of unknowns. The architecture was developed and basic software modules have been implemented. Developed software is used for solving of the problems of refinement of estimation of groundwater resources for various regions of Ukraine. The multiprocessor computer systems of SCIT family of Glushkov Institute of Cybernetics are used as computing resources.

Keywords: filtration, groundwater, finite element method, discontinuous solutions, numerical modeling, parallel algorithms.

Висновки

Розроблено інформаційну технологію скінченно-елементного моделювання просторових процесів фільтрації води, особливостями якої є математичні моделі з розривними розв'язками у тривимірній постановці та використання паралельних обчислень у програмній реалізації розроблених обчислювальних схем. Створене програмне забезпечення нині проходить апробацію з використанням у задачах оцінювання запасів підземних вод різних регіонів України.