

© М.В. Лубков¹

¹ Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ СТАНЦІЙ В ІЗОТРОПНИХ ТА ЗСУВНО- ІЗОТРОПНИХ ПОРИСТИХ ВОДОНОСНИХ ПЛАСТАХ

© M. Lubkov¹

¹ Poltava Gravimetric Observatory of the Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, Poltava, Ukraine

MODELING OF OPTIMAL INSTALLATION OF GEOTHERMAL STATIONS IN THE ISOTROPIC AND SHEAR-ISOTROPIC POROUS WATER RESERVOIRS

Мета. Дослідити оптимальне розміщення геотермальних станцій в ізотропних та зсувно-ізотропних пористих водоносних пластах для ефективного використання.

Метод досліджень. Чисельне моделювання розподілу тиску навколо добувних та нагнітальних свердловини в ізотропних та зсувно-ізотропних пористих водоносних пластах здійснюється за допомогою комбінованого скінчено-елементно-різницевого методу.

Результати. Аналіз отриманих результатів показує, що найбільш ефективне використання геотермальних станцій можливе у проникних пластах. У слабопроникних пластах технічні можливості використання станцій значно скорочуються. При цьому наявність зсувної ізотропії пластів у всіх випадках призводить до погіршення фільтраційних властивостей. Для слабо або надзвичайно слабопроникних пластів найбільш оптимальним є діагонально-хрестоподібне розташування геотермальних станцій відносно їх головних осей анізотропії, в якому чергуються добувні та нагнітальні свердловини.

Наукова новизна. Вперше на основі чисельного моделювання за допомогою комбінованого скінчено-елементно-різницевого методу були встановлені оптимальні конфігурації розміщення геотермальних станцій в ізотропних та зсувно-ізотропних пластах. Показано, що у слабопроникних пластах можливе розміщення обмеженої кількості геотермальних станцій, коли відстані між добувними та нагнітальними станціями не перевищують 25 м. При цьому найбільш оптимальним у слабопроникних пластах є діагонально-хрестоподібне розташування геотермальних станцій відносно їх головних осей анізотропії, в яких чергуються добувні та нагнітальні свердловини.

Практична значимість. Результати дослідження показали, що інтенсивність процесів фільтрації навколо геотермальних станцій суттєво залежить від їх взаємного розташування у слабопроникних ізотропних та зсувно-ізотропних пластах. При цьому найбільш оптимальним є діагонально-хрестоподібне розташування станцій відносно головних осей анізотропії пласта. Представлений комбінований скінчено-елементно-різницевий метод може бути застосований для розв'язання різних практичних завдань щодо оптимального розташування геотермальних станцій.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, комбінований скінчено-елементно-різницевий метод, фільтраційні процеси, геотермальні станції.

Вступ. В наш час актуальними є проблеми застосування геотермальних ресурсів. Цей напрям енергетики використовується у більше ніж 60 країн світу. Лідерами з виробництва геотермальної енергії є США, Індонезія, Філіппіни, Туреччина, Нова Зеландія, Мексика, Кенія, Італія, Ісландія, Японія та інші країни [1–3]. Україна також має власні геотермальні ресурси [2–4], з іншого боку використання цих ресурсів у нашій країні ще знаходиться на початковому рівні. Ефективне застосування геотермальної енергетики потребує розвитку відповідної науково-технічної бази та здійснення фундаментальних і прикладних досліджень в цій галузі. На сучасному етапі вже використовуються різні технології збільшення ефективності видобутку теплової енергії з підземних пористих водоносних пластів [2–4]. Це можуть бути різні технології впливу на основні фільтраційні характеристики водоносного пласта – такі, як проникність, пористість, в'язкість та інші додаткові параметри [5, 6]. З іншого боку важливим фактором є врахування анізотропії водоносного пласта. В той же час для ефективного використання геотермальних технологій на практиці необхідно розуміти повну картину фільтрації навколо геотермальних станцій в слабопроникних неоднорідних пластах. В цій ситуації затребуваними є методи комп'ютерного моделювання водоносних пористих пластів, тому що вони дозволяють отримати уявлення про фільтраційні процеси навколо геотермальних станцій у різних практичних вимірах. Вони також дозволяють оцінювати і враховувати невизначеності, що виникають внаслідок недостатньої інформації про будову і властивості геотермального пласта за межами дії свердловин. Ця інформація може бути отримана порівняно дешевим способом і використана для ефективного аналізу, контролю та керуванню геотермальними станціями. На даний момент існує багато методів комп'ютерного моделювання, що дозволяють розв'язувати різні фільтраційні задачі у тому числі проблеми, що стосуються експлуатації геотермальних станцій [7–10]. З іншого боку в наш час залишається ряд проблем, які пов'язані з точністю та адекватністю моделювання складних неоднорідних водоносних колекторських систем в умовах реальної експлуатації геотермальних джерел. Запропонований в даній роботі комбінований скінчено-елементно-різницевий метод розв'язання нестационарної анізотропної задачі п'єзопровідності, з урахуванням неоднорідного розподілу різних фільтраційних параметрів всередині анізотропного деформованого водоносного пласта та на його межах, дозволяє адекватно розрахувати розподіл пластового тиску в реальних складних умовах експлуатації геотермальних станцій, що має ряд переваг у порівнянні з існуючими методами.

Постановка і метод розв'язання задачі. В подальшому будемо розглядати пористі ізотропні та зсувно-ізотропні водоносні пласти. Припускаючи, що середня потужність водоносного деформованого пористого пласта значно менше горизонтальних розмірів розглянутої ділянки, скористаємось двовимірною нестационарною анізотропною моделлю п'єзопровідності [5, 7, 11]. В даному випадку, загальна постановка нестационарної анізотропної задачі п'єзопровідності, з урахуванням умови проникності води на границі області, в декартовій системі координат (x, y) , що зв'язана з оточуючим пласт гірським масивом, має вид [11]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{c} (k_{xx} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + 2k_{xy} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y}) + \gamma; \quad (1)$$

$$P(t=0) = P_0; \quad (2)$$

$$k_b \text{grad} P = \alpha (P - P_b). \quad (3)$$

Тут (1) – нестационарне анізотропне рівняння п'єзопровідності; (2) – початкова умова; (3) – гранична умова інфільтрації води на межах розглянутої області; $P(x, y, t)$ – тиск, як функція координат і часу; $c = \eta(m\beta_1 + \beta_2)$ – коефіцієнт п'єзоопору; k_{xx}, k_{yy}, k_{xy} – анізотропні коефіцієнти проникності води; η – динамічна в'язкість води; m – пористість водоносного пласта; β_1 – коефіцієнт стискування води; β_2 – коефіцієнт стискування скелету порід водоносного пласта; γ – параметр інтенсивності добутку або закачування води в свердловині; P_0 – початковий тиск у пласті; α – коефіцієнт інфільтрації води на межах розглянутої області; P_m – тиск на межах розглянутої області; k_m – коефіцієнт проникності води на межах розглянутої області.

Для розв'язання нестационарної анізотропної задачі п'єзопровідності (1) – (3) застосовується варіаційний скінчено-елементний метод, що призводить до розв'язання варіаційного рівняння п'єзопровідності:

$$\delta I(P) = 0. \quad (4)$$

де $I(P)$ – функціонал анізотропної задачі п'єзопровідності (1) – (3), який представляється у вигляді:

$$I(P) = \frac{1}{2} \iint_S \{ k_{xx} (\frac{\partial P}{\partial x})^2 + k_{yy} (\frac{\partial P}{\partial y})^2 + 2k_{xy} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y} + 2 \int_{P_0}^P c \frac{\partial P}{\partial t} dP - 2\gamma P \} dx dy - \frac{1}{2} \int_L \alpha (P - 2P_b) P dl; \quad (5)$$

де: S – площа перерізу області (m^2), яка досліджується, L – контур, що охоплює площу (m) S , dl – елемент контуру (m).

При розв'язанні варіаційного рівняння (4) застосовується восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний скінчений елемент [11]. Як глобальна система координат, де відбувається об'єднання усіх скінчених елементів, на які розбито площу S , використовується декартова система (x, y) . В якості локальної системи координат, де в межах скінченого елемента визначаються функції апроксимації φ_i на основі квадратичних поліномів і проводиться чисельне інтегрування, використовується нормалізована система координат (ξ, η) [11]. В цій системі, координати, тиск, початковий тиск пласта, тиск на границях області, коефіцієнти інфільтрації води на межах області, а також похідні від тиску по координатам апроксимуються наступним чином:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^8 x_i \varphi_i; y = \sum_{i=1}^8 y_i \varphi_i; P = \sum_{i=1}^8 P_i \varphi_i; P_0 = \sum_{i=1}^8 P_{0i} \varphi_i; P_b = \sum_{i=1}^8 P_{bi} \varphi_i; \alpha = \sum_{i=1}^8 \alpha_i \varphi_i; \\ \frac{\partial P}{\partial x} &= \sum_{i=1}^8 P_i \Psi_i; \frac{\partial P}{\partial y} = \sum_{i=1}^8 P_i \Phi_i; \Psi_i = \frac{1}{|J|} (\frac{\partial \varphi_i}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta}); \Phi_i = \frac{1}{|J|} (\frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi}); \end{aligned} \quad (6)$$

де $J = \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi}$ – якобіан переходу між системами (x, y) і (ξ, η) .

Виходячи з варіаційного рівняння (4) і вважаючи, що вузлові значення від похідних тиску за часом $\frac{dP_i}{dt}$ – є відомими величинами і не варіюються складемо систему диференціальних рівнянь для n -го вузла p -го скінченного елемента у вигляді:

$$\frac{\partial I_p}{\partial P_n} = \sum_{i=1}^8 \{H_{ni}^p \frac{dP_i}{dt} + (A_{ni}^p + Q_{ni}^p)P_i - Q_{ni}^p P_0^i\} - \gamma_n^p = 0; \quad (7)$$

$$H_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 c^p \varphi_i \varphi_j |J| d\xi d\eta; A_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (k_{xx}^p \Psi_i \Psi_j + k_{yy}^p \Phi_i \Phi_j + k_{xy}^p \Psi_i \Phi_j) |J| d\xi d\eta; Q_{ij}^p = \int_L \alpha \varphi_i \varphi_j dl;$$

$$\gamma_i^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \gamma^p \varphi_i |J| d\xi d\eta.$$

Для розв'язання системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку (7) при початкових умовах з (6) використовується метод скінчених різниць, в якому апроксимація похідної за часом проводиться на основі неявної різницевої схеми:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (8)$$

Підставляючи вираз (8) в систему (7), отримуємо наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\sum_{i=1}^8 \{(\frac{1}{\Delta t} H_{ni}^p + A_{ni}^p + Q_{ni}^p)P_i(t + \Delta t) - \frac{1}{\Delta t} H_{ni}^p P_i(t) - Q_{ni}^p P_0^i\} - \gamma_n^p = 0 \quad (n=1-8). \quad (9)$$

Спрямовуючи додавання рівнянь (9) по всім скінченим елементам, отримуємо глобальну систему лінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволяє визначати невідомі значення тиску в момент часу $t + \Delta t$ через їх значення в попередній момент часу t . Розв'язання глобальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь здійснюється на основі чисельного методу Гауса без вибору головного елемента [11]. В результаті розв'язання, тиск визначається в усіх вузлових точках скінчено-елементної сітки. По знайденим вузловим значенням тиск визначається у довільній точці водоносного пласта у певний момент часу. Використання квадратичної апроксимації та неявної різницевої схеми призводить до збільшення точності та стійкості чисельного розв'язку задачі.

Моделювання розташування геотермальних станцій у водоносних пористих пластах. Розглянемо ізотропні та зсувно-ізотропні ділянки пористого водоносного пласта розмірами $90 \times 90 \text{ м}^2$ в яких розташовані геотермальні станції. Геотермальні станції будемо розглядати у вигляді добувної (подається гаряча вода з пласта) та нагнітальної свердловин (охолоджена вода закачується у пласт),

які розташовані на такій відстані, що з одного боку дозволяє підігріватись охолодженій воді, яка подається в пласт, з іншого боку дає можливість насичуватись пласту в околі добувної свердловини. Виберемо характерні середні параметри водоносного пористого пласта [5, 11]: $k_{xx} = k_{yy} = k_{xy} = 1 \text{ Д (Дарсі)} = 10^{-12} \text{ м}^2$; $m = 0,2$; $\eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\beta_1 = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$; $\beta_2 = 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. В цьому випадку коефіцієнт п'єзоопору $c = 0,3 \cdot 10^{-12} \text{ с}$. При моделюванні розподілу тисків у розглянутій пластовій ділянці припустимо, що початковий тиск у пласті дорівнює 200 атм. Вважатиме, що середня потужність видобувної свердловини складає 100 м^3 на добу. Припустимо, що нагнітальна свердловина буде закачувати в пласт таку ж саму кількість рідини на добу. Для мінімізації крайових ефектів при моделюванні, на межах розглянутої ділянки виберемо коефіцієнти інфільтрації нафтової фази рівними $0,001 \text{ м}$. Результати моделювання показують, що процес встановлення тиску у межах розглянутої ділянки відбувається приблизно за добу після початку дії свердловин. Прийнята потужність свердловини 100 м^3 на добу дозволяє теоретично отримати потужність теплової енергії $4,86 \text{ кВт/град}$, враховуючи витрати у сучасних перетворювачах енергії [2, 3], корисна потужність буде зменшена приблизно удвічі. Тут в градусах вимірюється різниця температури між входом та виходом води з теплообмінника.

На рис. 1 а – представлено встановлене розподілення тиску навколо трьох станцій, у яких велика відстань між добувними та нагнітальними свердловинами (приблизно 60 м) при заданих вище параметрах фільтрації та потужності свердловини у абсолютно ізотропному пласті ($k_{xy} = 0$). На рис. 1 б – той же варіант розташування, але в зсувно-ізотропному пласті. Таке розташування має сенс у досить тонкому водоносному пласті, коли обмежені можливості швидкого нагріву охолодженої води. Ми бачимо, що наявність зсувної ізотропії приводить до незначного зниження фільтраційних властивостей пласта. На рис. 1 в, г – представлено розташування чотирьох геотермальних станцій при тих же умовах, що у варіантах 1 а, б. Ми бачимо, що в цих випадках тиск навколо добувних свердловин зменшується не суттєво. Таким чином, можна зробити висновок, що проникні водоносні пласти створюють найкращі умови для різних варіантів розміщення геотермальних станцій. На рис. 2 а, б, в, г – представлено розподілення встановленого тиску навколо трьох та чотирьох станцій на різних відстанях між добувними та нагнітальними свердловинами у слабопроникних ізотропних та зсувно-ізотропних пластах. Ми бачимо, що на відстанях 40 м між добувними та нагнітальними станціями відбувається виснаження навколо добувних свердловин (рис. 2а). На відстанях 25 м – спостерігається задовільне насичування навколо добувних свердловин (рис. 2б, в, г), при цьому в зсувно-ізотропному випадку (рис. 2в) та при збільшенні кількості станцій до чотирьох (рис. 2г) спостерігається помітне виснаження навколо добувних станцій. Тобто наявність зсувної ізотропії у слабопроникних пластах також призводить до зниження фільтраційних властивостей. Таким чином, можна зробити висновок, що при послабленні проникності пласта технічні можливості розташування геотермальних станцій суттєво знижуються. На рис. 3 а, б, в, г – представлено найбільш оптимальні конфігурації розміщення геотермальних станцій в

слабопроникних (рис 3а, б) та надзвичайно слабопроникних (рис. 3в, г) ізотропних та зсувно-ізотропних водоносних пластах.

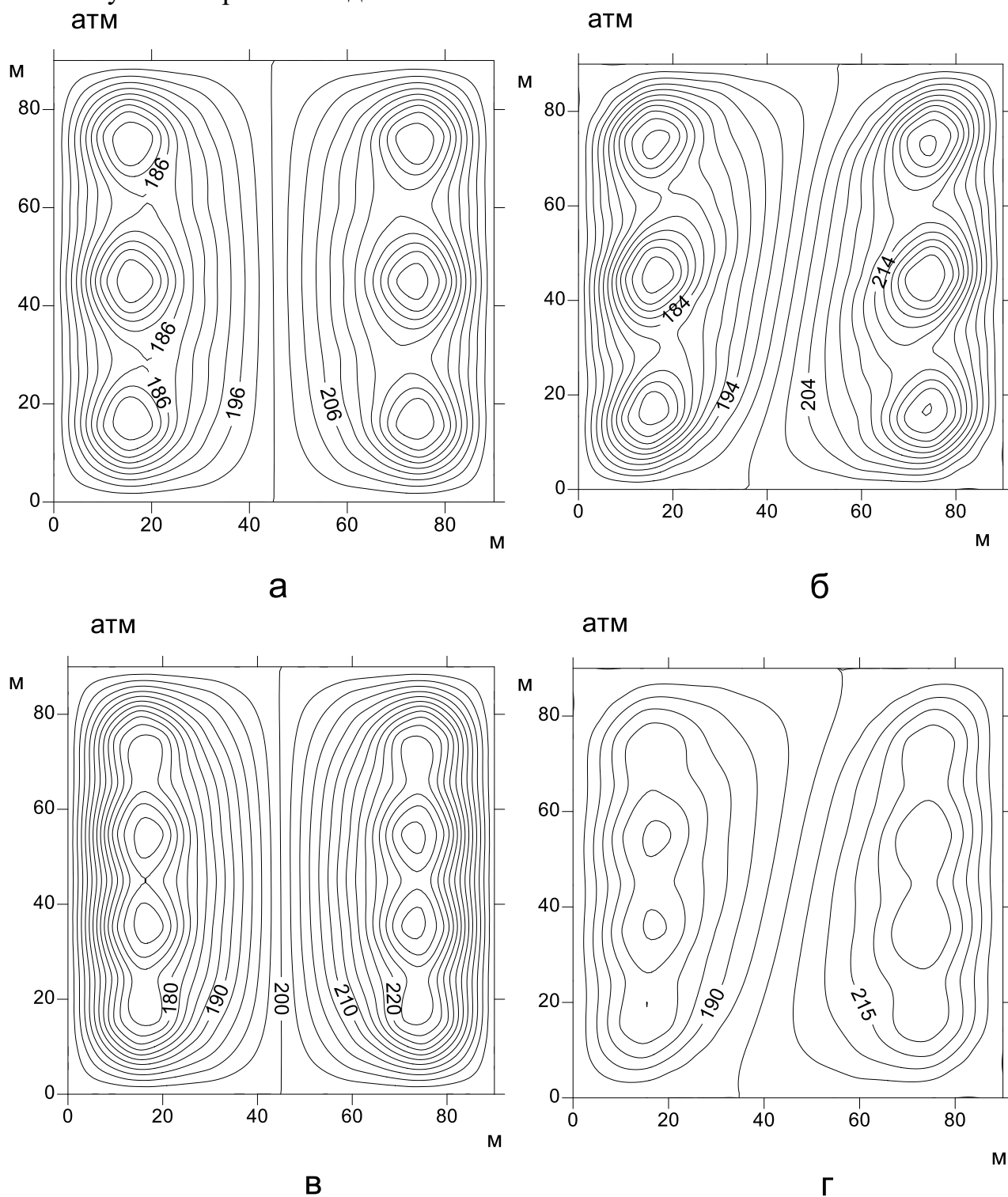


Рис. 1. Розподілення встановленого тиску навколо 3 та 4 геотермальних станцій при ізотропних та зсувно-ізотропних параметрах проникного водоносного пласта: а) $k_{xx} = 1Д$, $k_{yy} = 1Д$, $k_{xy} = 0$; б) $k_{xx} = 1Д$, $k_{yy} = 1Д$, $k_{xy} = 1Д$; в) $k_{xx} = 1Д$, $k_{yy} = 1Д$, $k_{xy} = 0$; г) $k_{xx} = 1Д$, $k_{yy} = 1Д$, $k_{xy} = 0$

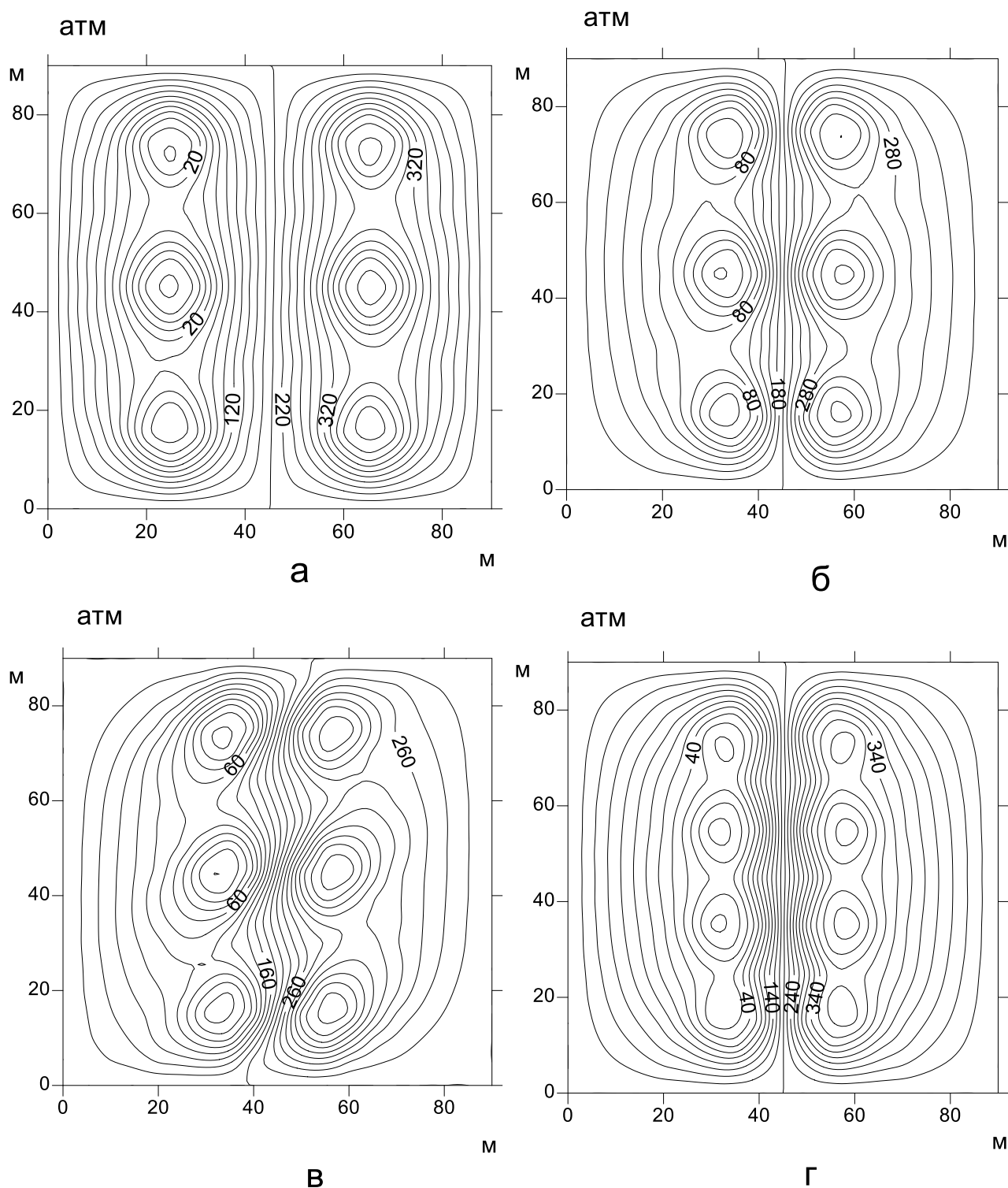


Рис. 2. Розподілення встановленого тиску навколо 3 та 4 геотермальних станцій в слабопроникних ізотропних та зсувно-ізотропних водоносних пластах при різних відстанях між добувними та нагнітальними свердловинами: а) $k_{xx} = 0,1\text{Д}, k_{yy} = 0,1\text{Д}, k_{xy} = 0$; б) $k_{xx} = 0,1\text{Д}, k_{yy} = 0,1\text{Д}, k_{xy} = 0$; в) $k_{xx} = 0,1\text{Д}, k_{yy} = 0,1\text{Д}, k_{xy} = 0,1\text{Д}$; г) $k_{xx} = 0,1\text{Д}, k_{yy} = 0,1\text{Д}, k_{xy} = 0$.

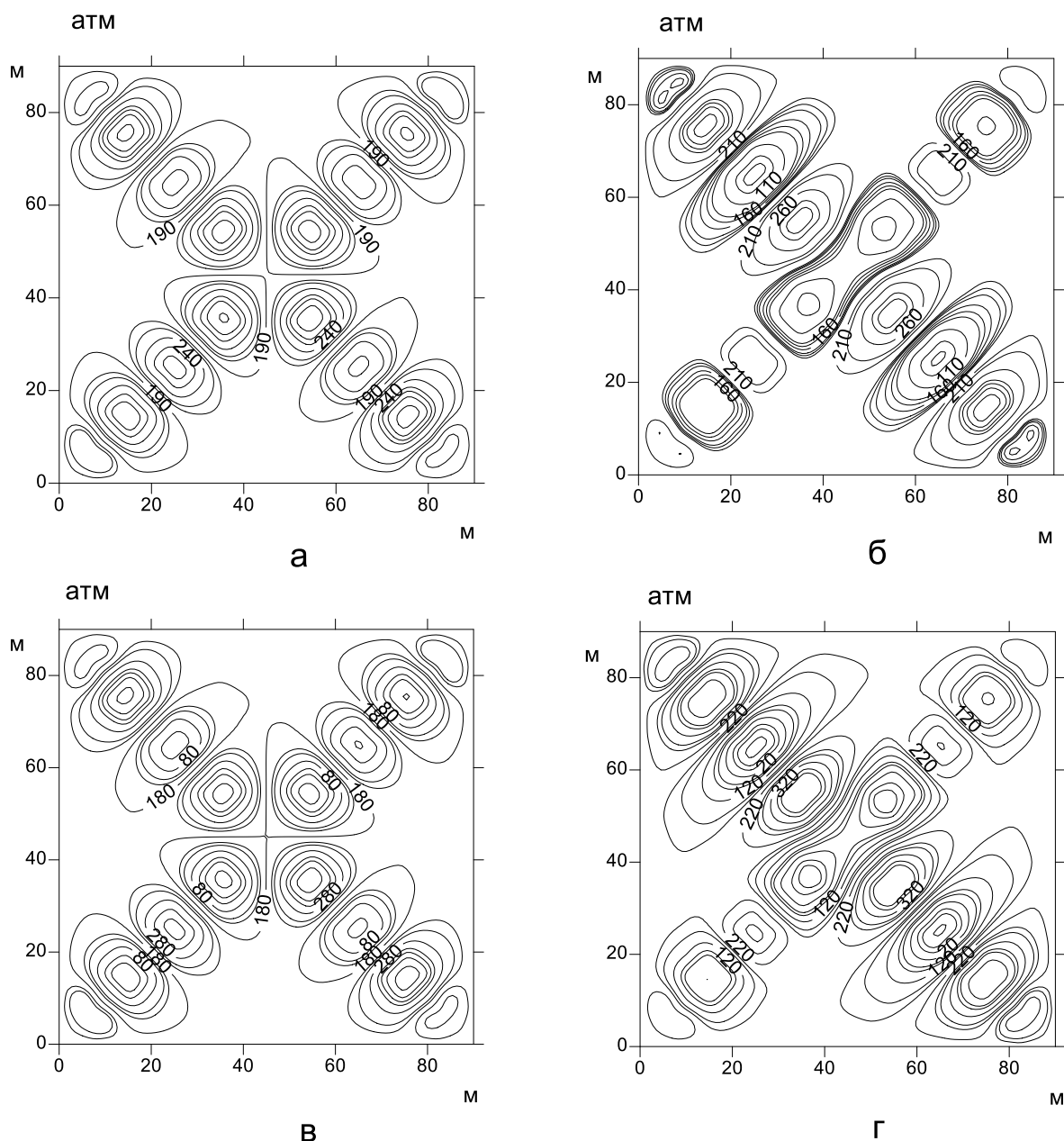


Рис. 3. Розподілення встановленого тиску навколо найбільш оптимальних конфігурацій розташування геотермальних станцій в слабопроникних ізотропних та зсувно-ізотропних водоносних пластах: а) $k_{xx} = 0,1\text{Д}$, $k_{yy} = 0,1\text{Д}$, $k_{xy} = 0$; б) $k_{xx} = 0,1\text{Д}$, $k_{yy} = 0,1\text{Д}$, $k_{xy} = 0,1\text{Д}$; в) $k_{xx} = 0,05\text{Д}$, $k_{yy} = 0,05\text{Д}$, $k_{xy} = 0$; г) $k_{xx} = 0,05\text{Д}$, $k_{yy} = 0,05\text{Д}$, $k_{xy} = 0,05\text{Д}$.

Результати моделювання показують, що для заданої ділянки найбільш оптимальним є діагонально-хрестоподібне розташування станцій відносно головних осей анізотропії пласта, в яких чергуються добувні та нагнітальні свердловини. Таке розміщення дозволяє підтримувати достатню фільтраційну активність між свердловинами навіть у надзвичайно слабопроникних ізотропних та зсувно-ізотропних пластах. В той же час близьке розташування добувних та нагнітальних свердловин вимагає підвищеного теплообміну між рідиною та скелетом гірських порід пласта. Тобто потребує достатньої товщини навколишнього

пористого пласта, або його підвищених геотермальних умов. Зазначимо, що і в цьому випадку наявність зсувної анізотропії пласта призводить до погіршення фільтраційних властивостей навколо свердловин.

Висновки. Розроблений скінчено-елементно-різницевий метод розв'язання нестационарної анізотропної задачі п'єзопровідності у деформованих водоносних пластах дозволяє адекватно на кількісному рівні описувати розподілення тиску в ізотропних та зсувно-ізотропних пластах між добувними та нагнітальними свердловинами для різних специфічних випадків розташування геотермальних станцій, що дає можливість їх застосування в реальних умовах експлуатації. Результати моделювання показують, що інтенсивність процесу фільтрації між добувними та нагнітальними свердловинами суттєво залежить від їх розташування, як в ізотропних так і зсувно-ізотропних водоносних пластах. Причому наявність проникності у зсувному напрямку призводить до погіршення фільтраційних властивостей, як для проникних пластів, так і для слабопроникних й надзвичайно слабопроникних пластів. Виходячи з отриманої інформації, проникні пласти надають усі технічні можливості ефективного застосування геотермальних станцій. Єдиним обмеженням в цьому випадку є швидкість теплообміну між охолодженою водою, що закачується в пласт та гарячим скелетом навколишніх гірських порід. Очевидно ця проблема регулюється взаємним розташуванням добувних та нагнітальних свердловин при заданій середній потужності навколишнього пористого пласта та його геотермальними умовами. У слабопроникних водоносних пластах технічні можливості ефективного застосування геотермальних станцій різко скорочуються. Встановлено, що в слабопроникних пластах можливе розміщення обмеженої кількості геотермальних станцій, коли відстані між добувними та нагнітальними станціями не перевищують 25 м. Результати моделювання показують, що для заданої ділянки слабопроникного або надзвичайно слабопроникного пласта найбільш оптимальним є діагонально-хрестоподібне розташування геотермальних станцій відносно його головних осей анізотропії, в яких чергуються добувні та нагнітальні свердловини. Таке розміщення дозволяє підтримувати достатню фільтраційну активність між свердловинами навіть у надзвичайно слабопроникних ізотропних та зсувно-ізотропних пластах. В той же час близьке розташування добувних та нагнітальних свердловин вимагає підвищеного теплообміну між рідиною та скелетом гірських порід пласта. Тобто потребує достатньої потужності навколишнього пористого пласта, або його підвищених геотермальних умов. Очевидно найкращі умови розміщення геотермальних свердловин у відповідному практичному випадку досягаються внаслідок оптимального підбору усіх впливових факторів фільтрації у розглянутих пластах. З іншого боку ці фактори можуть бути оцінені за допомогою представленого методу.

Перелік посилань

1. Войтюк, С.Д. (2010). Питання екології відновлювальних джерел енергії. *Науковий вісник НУБПУ*, 144(1), 117–125.
2. Карпенко, В.М., Стасенко, В.М., & Карпенко, О.В. (2013). Геотермальні ресурси України. *Геоінформатика*, 2, 39–47.

3. Кудря, С.О., Головка, В.М., & Яценко, Л.В. (2010). Використання енергії відновлювальних джерел в агропромисловому комплексі України. *Науковий вісник НУБПУ*, 153, 93–99.
4. Палійчук, У.Ю. (2012). Використання геотермальної енергії в Україні: можливості та перспективи. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, 32(2), 37–40.
5. Basniev, K. S., Dmitriev, N. M., & Rozenberg, G. D. (2003). *Oil and Gas Hydromechanics: A Textbook for Universities*. In-t komp'jut. issled.
6. Mishhenko, I.T. (2015). *Well oil production*. Izdatel'skij centr RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina.
7. Aziz, H., & Settari, Je. (2004). *Mathematical modeling of reservoir systems*. In-t komp'jut. issled.
8. Kanevskaja, R. D. (2003). *Mathematical modeling of hydrocarbon deposit development*. In-t komp'jut. issled.
9. Chen, Z., Huan, G., & Ma, Y. (2006). *Computational methods for multiphase flows in porous media*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
10. Ertekin, T., Abou-Kassem, J. H., & King, G. R. (2001). *Basic applied reservoir simulation*. Richardson.
11. Лубков, М. В., & Захарчук, О. О. (2021). Моделювання процесів витіснення нафтової фази у неоднорідних анізотропних пластах. *Геофізичний журнал*, 43(3), 170–180.

ABSTRACT

Purpose. Investigation of the optimal placement of geothermal stations in isotropic and shear-isotropic porous aquifers for effective using.

The method of investigation. The numerical modeling of pressure distribution around geothermal stations in the anisotropic water porous reservoirs is carried out using a combined finite-element-difference method.

Results. Analysis of the obtained results shows that the most effective using of the geothermal stations is possible in permeable reservoirs. In low-permeable reservoirs, the technical possibilities of using stations are significantly reduced. At the same time, the presence of shear isotropy of the reservoirs in all cases leads to decreasing of the filtration properties. For low- or extremely low-permeable reservoirs, the most optimal is the diagonal-cross-shaped arrangement of the geothermal stations relatively their main axes of anisotropy, in which production and injection wells alternate.

The originality. For the first time, on the base of numerical modeling using a combined finite element-difference method, optimal configurations for the placement of geothermal stations in isotropic and shear-isotropic reservoirs were estimated. It was shown that in the low-permeable reservoirs it is possible to install a limited number of geothermal stations, when the distances between the production and injection stations do not exceed 25 m. At the same time, the most optimal arrangement of geothermal stations in the low-permeable reservoirs is the diagonal-cross-shaped installation relatively its main axes of anisotropy, in which production and injection wells alternate.

Practical implementation. The obtained results have showed that the intensity of filtration processes around geothermal stations significantly depends on their mutual location in low-permeable isotropic and shear-isotropic reservoirs. At the same time, the most optimal is the diagonal-cross-shaped location of the stations relatively the main axes of the anisotropy of the reservoir. The presented combined finite-element-difference method can be used for resolving various practical problems relatively the optimal location of geothermal stations.

Keywords: computer modeling, combined finite-element-difference method, filtration processes, geothermal stations.