

## ВПЛИВ ПОТОКУ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ГЕОТЕРМАЛЬНИЙ ГРАДІЄНТ

**Олексій Зур'ян**

кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи

Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України,

вул. Гната Хоткевича, 20-А, Київ, Україна, 02094

**ORCID: 0000-0002-2391-1611**

У роботі наведено результати теоретичних досліджень щодо обґрунтування оптимального місцезнаходження теплообмінників для стабільного отримання низькопотенційної теплової енергії приповерхневих шарів Землі з метою забезпечення ефективного опалення та кондиціювання будівель і споруд завдяки використанню теплонасосних технологій. Підземні води – потужний тепловий чинник, що суттєво впливає на температурне поле земної кори. Доведено, що найбільший коефіцієнт перетворення мають геотермальні теплонасосні системи, у яких теплообмінники змонтовані нижче границі шару сезонної зміни температури. Водночас, відповідно до проведених в Інституті відновлюваної енергетики НАН України експериментальних і теоретичних досліджень, встановлено, що температура, нижче даної границі, залежно від геологічних, морфологічних і гідрогеологічних умов може мати суттєві зміни. Актуальним завданням під час проектування геотермальних теплонасосних систем із теплообмінниками, установленими у свердловині, є врахування можливої девіації температури ґрунту нижче нейтрального шару та проведення відповідних геотермічних досліджень. Відомо, що у виводі звичайних диференціальних рівнянь ізотермічної фільтрації використовується спільне рішення рівняння руху фільтраційного потоку та рівняння нерозривності. До них у цьому разі додається рівняння стану, яке визначає зв'язок між густиною рідини та пористістю пласта, з одного боку, та тиском – з іншого. У роботі, окрім цих неповних рівнянь стану (густина рідини в них залежить тільки від тиску, а температура вважається постійною), розглянуто ще третє рівняння – рівняння збереження енергії, яким описується закон зміни енергії маси фільтрації рідини під впливом усіх сил, що діють на рідину та з урахуванням тепла, що поступає у пласт ззовні. Наводиться приклад розв'язання задачі щодо впливу потоку підземних вод на геотермічний градієнт на основі рішення диференціального рівняння теплопередачі, яке базується на розгляді балансів теплових потоків з урахуванням того, що фільтраційний і тепловий потоки начебто є одномірними, тобто напір підземних вод, швидкість фільтрації, а отже, температура та щільність теплового потоку й інші фільтраційні та теплові елементи змінюються тільки залежно від однієї координати  $x$  та від часу  $t$ . Наведено вихідне диференціальне рівняння теплопередачі в одномірному потоці підземних вод. На основі його виведено рівняння, що враховує розподіл температури в розрізі. Обґрунтовано, що основну роль у зміні температури за глибиною відіграє конвекція. Аналітично встановлено, що в разі наявності фільтраційного потоку, направлено вниз від нейтрального шару, геотермальний градієнт зберігає ту ж величину, що і в умовах, не порушених фільтрацією. Експериментально доведено, що температура не зменшується до нескінченності, що можна пояснити спорадичним розповсюдженням вертикальних фільтраційних потоків. Доведено, що для оцінки цього явища можна використовувати ті ж розрахункові формули, але швидкість фільтрації в них варто брати зі зворотним знаком. Зроблено висновок, що за допомогою цього методу можна розглядати й інші аномалії геотемпературного поля, зумовлені фільтрацією рідини у проникних шарах. Наприклад, оцінити тепловий вплив локальних виходів води на різній глибині з тектонічних тріщин, вплив перетоку води з одного водоносного горизонту в інший тощо.

**Ключові слова:** тепловий насос, водоносний горизонт, свердловина, рівняння теплопередачі, фільтрація.

**Актуальність роботи.** Останніми роками, завдяки використанню теплових насосів, усе більшого практичного значення набуває використання відновлюваної низькопотенційної енергії приповерхневих шарів Землі на глибинах від 20 до 300 м. Її використання для теплопостачання окремих будинків, виробничих приміщень, теплиць та інших об'єктів стає економічно вигідним і зручним. На ефективність теплових насосів суттєво впливає температура первинного джерела низькопотенційної теплової енергії, величина якої залежить від як ендегенних, так і екзогенних чинників.

Підземні води – потужний тепловий чинник, що суттєво впливає на температурне поле земної кори. У зв'язку із цим у відновлюваній енергетиці великого значення набувають геотермічні дослідження. Завдання, що постають водночас, можна схематично розділити на дві основні групи. До першої відносять завдання загальногеологічного характеру, які вирішуються на основі вивчення природного геотемпературного поля, наприклад: відтворення теплової історії Землі, дослідження тектонічної будови та сучасної тектонічної активності в різних геологічних районах, пошуки корисних копалин, зокрема й цінних

водних джерел (термальних і промислових вод), на основі аномалій природного температурного поля та багато інших.

До другої групи завдань, пов'язаних із геотермічними дослідженнями в гідрогеології, можна віднести різноманітні завдання інженерного характеру, наприклад: прогноз зміни температури підземних вод у районі діючих водозаборів під впливом фільтрації з поверхневих водних джерел або в результаті закачування у пласт води через свердловини, оцінка запасів і розрахунок продуктивності свердловин під час експлуатації термальних вод, гідроциркуляційних теплонасосних систем і теплонасосних систем, що використовують вертикальні теплообмінники, встановлені у свердловини тощо.

Результати розгляду окремих завдань із теплопередачі у водо- та нафтогазоносних пластах викладаються в багатьох роботах [1–3]. Питання моделювання гідрогеофільтраційного поля ґрунтових вод у зоні техногенного впливу розглядається в роботі [4]. Проблема вивчення геотемпературних полів у гідрогеології висвітлюється у працях [5; 6]. Теплообмін під час руху геотермального теплоносія у свердловині досліджено в роботі [7]. Авторами [8] пропонується новий підхід до вивчення стаціонарних енергетичних характеристик вертикальних геотермальних систем. Методологія для оцінки швидкості поглинання тепла ґрунту ґрунтовими теплообмінниками та продуктивності труби як ґрунтового теплообмінника у ґрунтовому теплому насосі розглянуто в роботах [9; 10].

Метою роботи є визначення ефективності роботи геотермальної теплонасосної системи від глибини встановлення геотермального теплообмінника на основі проведених експериментальних досліджень зміни температури ґрунту на глибині нижче нейтрального шару та математичне моделювання щодо визначення температури ґрунту за наявності фільтраційного потоку, спрямованого вниз від нейтрального шару (зони нульових амплітуд температур).

Відповідно до поставленої мети дослідження мають бути вирішені такі завдання:

1. Розробити методику, провести експериментальні дослідження та виконати аналіз отриманих даних змін температури ґрунту із глибиною в місті установки вертикальних ґрунтових теплообмінників (колекторів).

2. Визначити відсоток падіння ефективності гідротермальної теплонасосної системи за нестабільних вхідних параметрів, пов'язаних із пере-

падами температури на вході до випарника теплонасосної системи.

3. Запропонувати математичну модель, яка дає змогу визначати температуру ґрунту  $T(z, t)$  залежно від глибини  $z \geq 0$  і часу  $t \geq 0$  за умови наявності фільтраційного потоку, спрямованого вниз від нейтрального шару.

4. Визначити відсоток падіння ефективності гідротермальної теплонасосної системи за нестабільних вхідних параметрів, пов'язаних із перепадами температури на вході до випарника теплонасосної системи.

5. Визначити подальші перспективні дослідження щодо залежності ефективності роботи геотермальних ТНУ від напрямку й інтенсивності фільтрації підземних вод і щільності та водопроникності ґрунту.

Для проведення досліджень в Інституті відновлюваної енергетики НАН України (далі – ІВЕ НАНУ) збудовано геотермальний полігон, на якому пробурені п'ять свердловин, що мають різні глибини та діаметр. Вони можуть використовуватися як для видобування низькопотенційної теплової енергії із ґрунту та води з водоносного горизонту для опалення та кондиціювання приміщень інституту, так і для проведення досліджень залежно від поставлених завдань. Спеціальним чином змонтовані низькопотенціальні теплові мережі, що поєднують свердловини, теплові насоси та системи накопичення теплової енергії, дають змогу моделювати різноманітні теплотехнічні системи для проведення досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень було задіяно свердловину № 1 завглибшки 50 метрів, змонтовано спеціальну вимірювальну косу. На косі були розташовані температурні датчики, що відповідають глибині 2,00; 5,00; 15,00; 25,00; 35 і 40 м. Для вимірювань температури в контрольних точках використовувалися температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204. Термоперетворювачі опору ТСП-204 внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур – від  $-40$  до  $+270^\circ\text{C}$ , показник теплової інерції – не більше 6 сек.

З урахуванням особливих умов проведення вимірювань у свердловині (підвищена вологість і велика глибина) та необхідності розміщення до чотирьох пар датчиків на одній косі було використано провід із восьма жилами та металевим екраном типу 4\*2\*0,51 (SF/UTP-cat.5E). Також місця можливого контакту проводу з вологою

було ізольовано в гумований кожух, а місця пайки контактів датчика температури (термоперетворювача опору) залито епоксидною смолою (Рис. 1).



а б в

Рис. 1. Вимірювальні пристрої:

- а – вимірювальна коса з установленими термоперетворювачами опору ТСП-204;
- б – монтаж вимірювальної коси у свердловину;
- в – місце монтажу кабелю SF/UTP-cat.5E, яким поєднано датчики, установлені у свердловині, з контролером, розташованим у будинку

Для збору даних із вимірювальних пристроїв було використано контролер MAXYCON FLEXY, приєднаний до персонального комп'ютера через шлюз USB і RS-485, призначений для прийому, перетворення та передачі цифрової інформації між цифровими лініями за інтерфейсом RS-485 і протоколом Modbus-RTU.

За допомогою розробленої автором інтерактивної системи диспетчеризації на базі програмного продукту ESM (Engineering Systems

Manager) з використанням мови програмування FBD (Function Block Diagram|Continuous Function Chart) було забезпечено збір даних із вимірювальних пристроїв із подальшою обробкою та записом в архів для їх інтерпретації та виведення на монітор комп'ютера програмою візуалізації в реальному часі. Інформація з датчиків знімалася автоматично із часовим інтервалом у п'ять секунд.

Під час проведення дослідження були отримані дані, що дозволяють проаналізувати попередні результати залежності зміни температур від глибини ґрунту на різних часових ділянках від доби до року. І вивести залежність середньомісячних температур  $T$  за глибиною  $h$ , що нижче нейтрального шару, для конкретного ґрунтового масиву м. Києва.

Результати науково-дослідного експерименту щодо вимірювання температур ґрунтового масиву, виконаного на експериментальному полігоні ІВЕ НАНУ протягом року, були зведені в Таблицю 1. Вибірка з експериментально одержаних даних представлена в Таблиці 1. На основі табличних даних побудовано графік залежності температури ґрунту від глибини.

Що може бути зумовлено підвищеною фільтрацією підземних вод на цій глибині, іншими чинниками як екзогенного, так і ендегенного походження, що потребує проведення додаткових досліджень.

Відповідно до другого поставленого завдання дослідження було проаналізовано ефективність роботи гідротермальної теплонасосної системи за нестабільних вхідних параметрів, пов'язаних із перепадами температури на вході до теплонасосної системи.

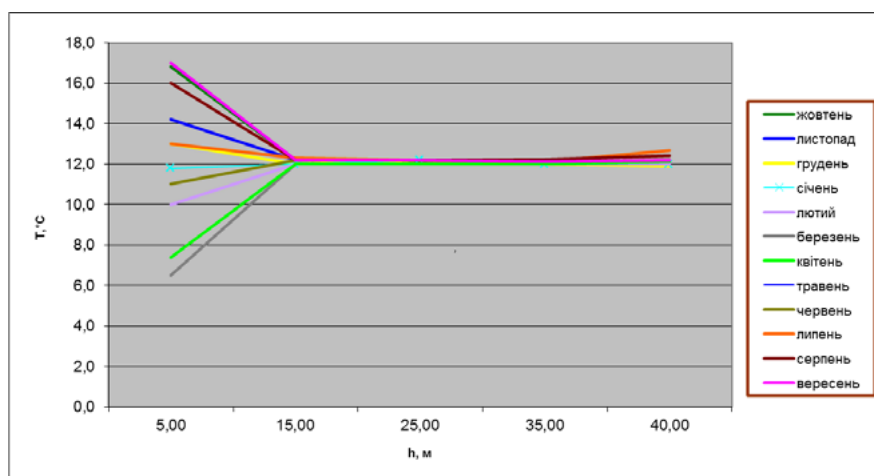


Рис. 2. Графік залежності температури ґрунту від глибини в місті установки гідротермальної теплонасосної системи ІВЕ НАНУ

Таблиця 1  
Вибірка з одержаних експериментальних даних залежності температури ґрунту від глибини

місяць	глибина, м				
	5,00	15,00	25,00	35,00	40,00
жовтень	16,8	12,2	12,1	12,0	12,1
листопад	14,2	12,2	12,2	12,0	12,0
грудень	13,0	12,0	12,2	12,0	11,9
січень	11,8	12,0	12,2	12,0	12,0
лютий	10,0	12,0	12,0	12,0	12,0
березень	6,5	12,0	12,0	12,0	12,1
квітень	7,4	12,0	12,0	12,0	12,1
травень	11,0	12,2	12,2	12,1	12,2
червень	11,0	12,2	12,2	12,1	12,2
липень	13,0	12,3	12,2	12,1	12,7
серпень	16,0	12,2	12,2	12,2	12,4
вересень	17,0	12,2	12,2	12,1	12,2
(T) (°C):	12,3	12,1	12,1	12,1	12,2
(ΔT) (°C):	10,5	0,3	0,2	0,2	0,8

Уведемо коефіцієнт  $k$ , який визначає відсоток, на який зменшується ефективність роботи теплонасосної системи залежно від падіння температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса. Цей коефіцієнт визначається за формулою:

$$k = \left(1 - \frac{k_i}{k_s}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

де:

$k_i$  – коефіцієнт трансформації теплонасосної установки за  $i$ -тій температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса;

$k_s$  – коефіцієнт трансформації гідротермальної теплонасосної системи за стабільної вхідної температури теплоносія.

З урахуванням (1), коефіцієнт  $k$  набуває значення:

$$k = \left(1 - \left[ \frac{T_{i\ out}}{T_{i\ out} - T_{i\ in}} \times \frac{T_{s\ out} - T_{s\ in}}{T_{s\ out}} \right]\right) \times 100\%, \quad (2)$$

де:

$T_{i\ out}$  – температура на виході з конденсатора теплового насоса за  $i$ -тій температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса;

$T_{s\ out}$  – температура на виході з конденсатора теплового насоса за стабільної температури теплоносія на вході до випарника теплового насоса;

$T_{i\ in}$  –  $i$ -та температура на вході у випарник теплового насоса гідротермальної теплонасосної системи;

$T_{s\ in}$  – стабільна температура на вході у випарник теплового насоса гідротермальної теплонасосної системи (дорівнює 12°C).

Відповідно до даних, отриманих експериментально, у разі встановлення ґрунтового колектора на глибину нижче нейтрального шару, де девіація температури ґрунту від 0,2 до 0,8°C, коефіцієнт  $k$ , який визначає відсоток, на який змінюється ефективність роботи гідротермальної системи залежно від девіації температури природного теплоносія на вході до випарника теплового насоса, не перевищує 2,4%:

$$k \leq 2,4\%.$$

Це значення в наших умовах дуже невелике, суттєво не впливає на роботу теплового насоса, але його треба враховувати у проектуванні даних пристроїв і систем відбору первинної теплової енергії.

Постає питання необхідності аналітичного підходу як до інтерпретації отриманих даних, так і до їх розрахунку шляхом математичного моделювання, для перевірки отриманих результатів.

Відомо, що повне диференціальне регулювання теплопередачі у водоносних пластах може бути виведено на основі спільного рішення рівняння руху фільтраційного потоку, рівняння нерозривності (збереження маси) та рівняння збереження енергії. Перше рівняння використовується під час виведення звичайних диференціальних рівнянь ізотермічної фільтрації. До нього в такому разі додаються урівноваження стану, що визначають зв'язок між щільністю рідини і пористістю пласта, з одного боку, і тиском – з іншого.

Для неізотермічної фільтрації замість цих неповних умов (оскільки щільність рідини в них залежить тільки від тиску, а температура вважається постійною) варто розглядати вказане третє вихідне співвідношення – збереження енергії, описується закон зміни маси енергії фільтруючої рідини (вираженої в теплових одиницях) під впливом усіх сил, які діють на рідину, з урахуванням тепла, що поступає у пласт іззовні.

Відповідно до третього поставленого завдання було виведено рівняння, що враховує вертикальну фільтрацію підземних вод у пласті, та виконана оцінка впливу потоку підземних вод на геотермічний градієнт.

Припустимо, що фільтраційний і тепловий потоки є одномірними, тобто натиск підземних вод, швидкість фільтрації, а відповідно, температура та щільність теплового потоку й інші фільтраційні теплові елементи змінюються залежно тільки від однієї координати  $x$ : і від часу  $t$ . Тоді щільність (інтенсивність) теплового потоку через елемент пласта  $mdx$  ( $m$  – потужність пласта) можна виразити таким рівнянням:

$$W = W_\lambda + W_K + W_\varepsilon. \quad (3)$$

Перший член у правій частині цього рівняння характеризує молекулярне, або кондуктивне, перенесення тепла, згідно із законом Фур'є, прямо пропорційне коефіцієнту теплопровідності та градієнту температури:

$$W_\lambda = -\lambda m \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, ккал/м • годину • град.;

$m$  – потужність пласта, м;

$T$  – температура, град.

Якщо виходити з передумови про миттєве вирівнювання температури рідини, що фільтрується, і скелета породи [3; 7], то коефіцієнт теплопровідності можна представити в такому вигляді:

$$\lambda = \lambda_{re} n_0 + \lambda_{re} (1 - n_0), \quad (5)$$

де  $\lambda_{жк}$  і  $\lambda_{ск}$  – теплопровідність відповідно рідини та скелета;  $n_0$  – пористість породи.

Другим членом у рівнянні (1) оцінюється конвективне перенесення тепла рідиною, пов'язане із власне гідродинамічними чинниками і прямо пропорційне швидкості фільтрації:

$$W_K = C_{жк} T q_x. \quad (6)$$

Тут  $C_{жк} = C_{0ж} \gamma_{жк}$  – об'ємна теплоємність рідини, ккал/м<sup>3</sup>град.;

$C_{0ж}$  – питома теплоємність рідини, ккал/кг • град.;

$\gamma_{жк}$  – об'ємна вага, кг/м<sup>3</sup>;

$q_x = m v_x$  – складова частина витрат, м<sup>2</sup>/год.;

$v_x$  – швидкість фільтрації, м/год.

Третій член рівняння (4) визначає частину теплового потоку, зумовлену так званим дросельним ефектом, або ефектом Джоуля – Томсона (тобто підвищенням температури та нагріванням пласта в результаті роботи сил тертя частинок рідини шляхом фільтрації):

$$W_\varepsilon = C_{жк} T_\varepsilon q_x. \quad (7)$$

У цьому рівнянні  $T_\varepsilon$  – зміна температури під впливом дросельного процесу. За деяких припущень уважатимуться, що зміна температури прямо пропорційна зміні тиску [74]:

$$T_\varepsilon = -\varepsilon P,$$

де  $\varepsilon$  – усереднений коефіцієнт Джоуля – Томсона, м<sup>2</sup> град/кг.;

$P$  – тиск рідини, кг/м<sup>3</sup>.

Абсолютні величини  $T_\varepsilon$  для води можуть досягати 2–3°C в разі перепаду тиску на 100 атм (або 0,002–0,003°C на 1 м вод. ст.), а для нафт і нафто-

продуктів – до 5°C на 100 атм тиску. Як бачимо, з огляду на наявність нині точних приладів для вимірювання температури, ця частина теплового потоку може бути досить надійно виявлена.

У рівнянні (4) опущена складова частина теплового потоку, що виникає під час нагрівання рідини внаслідок її стисливості під впливом зміни зовнішнього тиску (так званий адиабатичний нагрів). У зв'язку з надзвичайно малими значеннями температурного коефіцієнта об'єму (або об'ємного коефіцієнта температурного розширення для води) «вага» зазначеного процесу в загальному тепловому балансі водоносних пластів дуже мала; адиабатичне нагрівання води в разі підвищення тиску на 100 атм становить лише 0,15°C, тобто в 15–20 разів менше нагрівання під впливом дросельного ефекту.

Підсумуємо вирази (1), (3), (4), матимемо таке рівняння для щільності теплового потоку:

$$W = -\lambda m \frac{\partial T}{\partial x} + C_{жк} T q_x + \varepsilon C_{жк} T q_x. \quad (8)$$

З іншого боку, можна написати рівняння нерозривності чи балансу теплового потоку:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -C_I m \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial n} - \lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial n}. \quad (9)$$

Тут ліва частина дає збільшення кількості тепла шляхом руху рідини, права – відповідні зміни кількості тепла в часі ( $C_I m \frac{\partial T}{\partial t}$ ;  $t$  – час) і віддачу тепла в породи підшви та покрівлі ( $\lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial n}$  та  $\lambda_E \frac{\partial T_E}{\partial n}$ ;  $n$  – нормаль до площин підшви та покрівлі).

Коефіцієнт  $C_{II}$  перед похідною температури за часом є повною об'ємною теплоємністю пласта:

$$C_{II} = C_{0ж} \gamma_{жк} n_0 + C_{0ск} \gamma_{ск} (1 - n_0), \quad (10)$$

де  $C_{0ск}$  – питома теплоємність скелета породи, ккал/кг • град.;

$\gamma_{ск}$  – його об'ємна вага, кг/м<sup>3</sup>.

Спільне рішення рівнянь (7) і (8) приводить до такого:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \bar{C} v_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\lambda_{II}}{C_{II} m} \frac{\partial T_{II}}{\partial n} - \frac{\lambda_K}{C_{II} m} \frac{\partial T_K}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (13).$$

Тут  $a = \frac{\lambda}{C_{II}}$  та  $\bar{C} = \frac{C_{жк}}{C_{II}}$ .

Рівняння (13) є вихідним диференціальним рівнянням теплопередачі в одновимірному потоці підземних вод. Так само можна вивести рівняння для двовимірних потоків, а також для потоків з осью симетріїю.

Зауважимо, що дане рівняння є наближеним, оскільки, по-перше, у ньому температура пласта середня за вертикаллю, по-друге, під час виве-



дення ми знехтували змінами тепла, зумовленими нагріванням рідини, що вивільняється із пласта завдяки пружним силам, тобто прийняли, що:

$$C_{\infty}(T + \varepsilon P) \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0.$$

Однак і за цих припущень рівняння (13) досить повно описує процес теплопередачі, їм можна користуватися для вирішення широкого кола завдань.

Граничні умови залежно від конкретної ситуації формулюються по-різному. У найпростіших випадках, як і у власне гідродинамічних завданнях, можуть бути зведені до умов 1-го, 2-го і 3-го родів, тобто відповідно до меж пласта можуть бути задані: а) постійні або такі, що деяким чином змінюються, температури; б) тепловий потік; в) тепловий потік, що змінюється зі зміною температури.

Для розрахунку тепловіддачі в покрівлю та підшову пласта, що виражається нормальними похідними температури (останні члени в лівій частині рівняння (10)), та встановлення закономірності розподілу температури та теплового потоку в породах покрівлі та підшови варто вирішувати систему рівнянь, кожним із яких описується теплопередача в основному шарі, а також у породах покрівлі та підшови.

У всіх випадках прийнято виходити з передумови, що гідродинамічні параметри пластів не залежать від температури; отже, зміни температури не впливають на розподіл тиску. Це дає можливість вирішувати гідродинамічні завдання окремо, незалежно від рівнянь теплопередачі, знайдених із цих гідродинамічних рішень величини швидкості та тиску, які потім вводяться.

Під час вирішення завдання про вплив потоку підземних вод на геотермальний градієнт приймемо як відоме, що температура земної кори із глибиною зростає, причому зазвичай приймається лінійний закон зміни температури:

$$T = T_0 + \Gamma_0 z, \quad (11)$$

де  $T_0$  – температура на невеликій глибині від поверхні землі (~ 8–10 м), у так званій зоні нульових амплітуд, де коливання температури, що відбуваються під впливом метеорологічних чинників, уже не позначаються;

$$\Gamma_0 = \frac{\partial T}{\partial z} \text{ – геотермічний градієнт.}$$

У середньому для платформних, спокійних у тектонічному відношенні областей геотермічний градієнт дорівнює 2–4°C на 100 м.

На розподіл температури у верхніх частинах розрізу земної кори суттєво впливає фільтрація підземних вод. Це можна показати на прикладі.

Припустимо, що з поверхні відбувається низхідний рух підземних вод, причому для спрощення задачі приймемо, що низхідний потік є одновірним і швидкість його постійна:  $u_z = \text{const}$ . У такому разі розподіл температури в розрізі описується таким рівнянням, що впливає з виведеного вище вихідного диференціального рівняння теплопередачі (13):

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \bar{C}v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\bar{C}\varepsilon\gamma}{k} v_z^2 = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (12)$$

Тут враховано, що  $\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\gamma}{k} v_z$ ;

$\gamma$  – об’ємна вага води;

$k$  – коефіцієнт фільтрації.

Рівняння (12) вирішуватимемо за таких умов:

$$Z=0; T=T_0=\text{const}; z=\infty; T\neq\infty. \quad (13)$$

Початкові умови виражатимуться за формулою (14). За зазначених умов результат розв’язання рівняння (15) має такий вигляд:

$$T = T_0 + \Gamma_0(z - \bar{C}v_z t) + \frac{\bar{C}\varepsilon}{k} \gamma v_z^2 t - \left( \Gamma_0 + \frac{\varepsilon}{k} \gamma v_z \right) zR(z,t); \quad (14)$$

$$zR(z,t) = \frac{P_e}{2} \int_0^{z_0} \left[ e^{-2Pe} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{F_0}} - \frac{P_e}{2} \sqrt{F_0} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{F_0}} + \frac{P_e}{2} \sqrt{F_0} \right) \right] dF_0; \quad (15)$$

$$P_e = \frac{\bar{C}v_z z}{a}; P_0 = \frac{at}{z^2}.$$

За тривалих періодів вертикальної фільтрації (коли  $F_0$  велике):

$$R \approx \frac{\bar{C}v_z t}{z} e^{-2Pe}. \quad (16)$$

У правій частині формули (17) другий і третій члени характеризують зміну температури відповідно під впливом конвективного перенесення тепла (що надходить від поверхні з рідиною) і дросельного процесу, останній член – розсіювання тепла в результаті теплопровідності (кондуктивної теплопередачі).

Легко переконатися, що основну роль у зміні температури від глибини відіграє конвекція. Дросельне нагрівання та теплопровідність порівняно із цією складовою частиною теплового потоку малі. Загальним критерієм відносної значущості кондуктивної та конвективної теплопередачі може бути безрозмірне співвідношення  $Pe$  – критерій Пекле (18). Це співвідношення виходить безпосередньо із зіставлення порядку величин двох членів рівняння (15):

$$\bar{C}v_z \frac{\partial T}{\partial z} \text{ та } a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Коефіцієнт теплопровідності різних порід  $\lambda = 2 \div 4$  ккал/м · год – град, об’ємна теплоємність

води  $C_{ж} = 1\,000$  ккал/м<sup>2</sup>·град, теплоємність пласта  $C_{п} = 400\text{--}600$  ккал/м<sup>3</sup>·град, отже, коефіцієнт температуропровідності  $a = \lambda/C_{п} = 0,003 \div 0,006$  м<sup>2</sup>/годину ( $\leq 0,1$  м<sup>2</sup>/добу). За цих значень основних теплових параметрів і звичайних швидкостей фільтрації величина критерію Пекле завжди буде істотно більше одиниці, останній член у рівнянні (14) виявляється дуже малим. Більш високого порядку малості проти конвективної частини є також величина дросельного нагріву, яка є пропорційною квадрату швидкості фільтрації.

У зв'язку із цим для оцінки аналізованого нами явища можна обидві зазначені складові частини рівняння (17) не враховувати, до того ж вони діють у різних напрямках: завдяки дросельному процесу температура підвищується, кондуктивне перенесення тепла приводить до розсіювання теплового фронту та зниження температури. У разі нехтування цими чинниками з формули (14) отримуємо вираз:

$$T \approx T_0 + \Gamma_0(z - \bar{C}v_z t); \quad (z \geq \bar{C}v_z t). \quad (17)$$

Із цього ми бачимо, що за наявності фільтраційного потоку, спрямованого вниз від нейтрального шару (зони нульових амплітуд температур), геотермічний градієнт зберігає ту ж величину, що й у природних умовах, не порушених фільтрацією ( $\frac{\partial T}{\partial z} = \Gamma_0 = \text{const}$ ), але температура в кожній точці за глибиною знижується на однакову величину, що дорівнює  $\Gamma_0 \bar{C}v_z t$  (Рис. 3).

Теоретично, за такої постановки завдання температура має зменшуватися по всьому розрізу до безкінечності. Насправді цього не спостерігається, що можна пояснити спорадичним розповсюдженням вертикальних фільтраційних потоків, спрямованих вниз, які надають постійний охолодний ефект. Ці потоки поглинаються також фільтраційними течіями нагрітих вод, що мають протилежний напрямок, тобто піднімаються із глибини до землі.

Для оцінки цього явища можна скористатися тими самими розрахунковими формулами, але швидкість фільтрації  $v_z$  яких варто брати зі зворотним знаком. Формула (18), наприклад, буде виглядати так:

$$T \approx T_0 + \Gamma_0(z + \bar{C}v_z t). \quad (18)$$

За викладеним методом можна розглянути інші аномалії геотемпературного поля, що зумов-

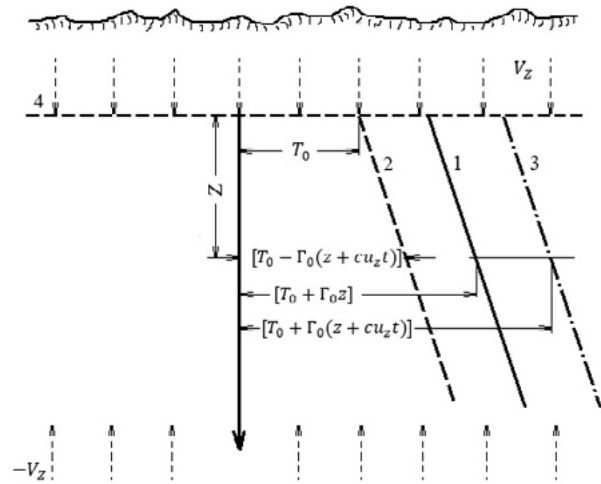


Рис. 3. Графік зміни температури гірських порід із глибиною під впливом вертикальної фільтрації підземних вод

люються фільтрацією рідини. Наприклад, таким шляхом можна оцінити тепловий вплив локальних виходів води на різній глибині з тектонічних тріщин, вплив перетікання води з одного водонесного горизонту в інший тощо.

#### Висновки:

1. Експериментально та теоретично підтверджено, що основну роль у зміні температури за глибиною відіграє конвекція.
2. Аналітично обґрунтовано, що за наявності фільтраційного потоку, направлено вниз від нейтрального шару, геотермальний градієнт зберігає ту ж величину, що і в умовах, не порушених фільтрацією.
3. Експериментально та теоретично доведено, що можливі аномалії геотермального поля нижче нейтрального шару зумовлені фільтрацією підземних вод.
4. Експериментально підтверджено, що ефективність роботи гідротермальної теплонасосної системи за нестабільних вхідних параметрів, пов'язаних із перепадами температури на вході до ТН, може змінюватися, що необхідно враховувати у проектуванні даних пристроїв і систем відбору первинної теплової енергії.
5. Доведено, що для ефективного використання водонесного горизонту як природного акумулятора теплової енергії необхідне проведення попередніх гідрогеологічних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Evaluation of the heat extraction performance of an abandoned well pattern in multilayer commingled production oil reservoirs / Xianzhi Song et al. *Natural Gas Industry B*. December 2022. Volume 9. Issue 6. P. 578–587. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.11.007.
2. Zholudiev S.V. Mathematical bases of heat-transfer in groundwater. Dnipropetrovsk University Bulletin. Series “Geology, geography”. 2016. № 24 (1). P. 37–42. DOI: 10.15421/111606.
3. Leszek Pająk. Simultaneous production and injection of two water-bearing layers in the same well. *Geothermal training programme reports*. 2000. IS-108 Reykjavik, Iceland.
4. Моделювання гідрогеофільтраційного поля ґрунтових вод у зоні впливу металургійного виробництва / О.В. Щербак та ін. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 3. С. 19–20. DOI: 10.31996/mru.2018.3.19-25.
5. Назаревич А.В. До проблеми підвищення глибини, чутливості і точності моніторингових та нафтогазопошукових свердловинних геотермічних досліджень. *Геодинаміка*. 2018. № 1 (24). С. 60–79.
6. Морозов Ю.П., Жохін А.С. Теплообмін при русі геотермального теплоносія у свердловині. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 4 (71). P. 83–89. DOI: 10.36296/1819-8058.2022.4(71).83-89.
7. Kordas Olga, Nikiforovich Eugene. A phenomenological theory of steady-state vertical geothermal systems. A novel approach. *Energy*. 2019. 175. P. 23–35. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.030.
8. Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system / S. Yoon et al. *Energy*. 2016. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.057.
9. Methodology for estimating the ground heat absorption rate of Ground / I. Stylianou et al. *Heat Exchangers. Energy*. 2017. № 127. 258–70. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.070.
10. Зур'ян О.В. Врахування антропогенного впливу та геоморфологічних умов на підземну гідросферу при проектуванні гідротермальних теплонасосних систем. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2022. № 1 (132). С. 192–202. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.1.26.

INFLUENCE OF GROUNDWATER FLOW ON GEOTHERMAL GRADIENT

**Oleksii Zurian**

Candidate of Engineering Science, Deputy Director of Research

Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine, 20-A Hnata Khotkevycha str., Kyiv, Ukraine, 02094

**ORCID: 0000-0002-2391-1611**

The paper presents the results of theoretical studies on the substantiation of the optimal location of ground heat exchangers for the stable production of low-potential thermal energy of the near-surface layers of the Earth in order to ensure effective heating and air conditioning of buildings and structures through the use of heat pump technologies. Groundwater is a powerful thermal factor that significantly affects the temperature field of the Earth's crust. It has been proven that geothermal heat pump systems in which the heat exchangers are mounted below the boundary of the seasonal temperature change layer have the highest conversion coefficient. At the same time, according to the experimental and theoretical studies conducted at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, it was established that the temperature below this limit, depending on the geological, morphological and hydrogeological conditions, can have significant changes. An urgent task in the design of geothermal heat pump systems with heat exchangers installed in wells is to take into account the possible deviation of the soil temperature below the neutral layer and conduct relevant geothermal research. It is known that in the derivation of ordinary differential equations of isothermal filtration, a joint solution of the equation of movement of the filtration flow and the continuity equation is used. In this case, the equation of state is added to them, which determines the relationship between fluid density and formation porosity, on the one hand, and pressure, on the other. In addition to these incomplete equations of state (the density of the liquid in them depends only on the pressure, and the temperature is considered constant), the work also considers a third equation – namely, the equation of energy conservation, which describes the law of change in the energy of the liquid filtration mass under the influence of all forces acting on the liquid and taking into account the heat entering the formation from the outside. An example of solving the problem of the influence of groundwater flow on the geothermal gradient is given based on the solution of the differential equation of heat transfer, which is based on the consideration of heat flow balances, taking into account the fact that filtration and heat flows are apparently one-dimensional, that is, the pressure of groundwater, the filtration speed, and accordingly the temperature and density of the heat flow and other filtration and thermal elements change only depending on one coordinate  $x$  and time  $t$ . The initial differential equation of heat transfer in a one-dimensional flow of groundwater is given. Based on it, an equation is derived that takes into account the temperature distribution in the section. It is substantiated that the main role in the change of temperature along the depth is played by convection. It was analytically established that in the presence of a filtration flow directed downwards from the neutral layer, the geothermal gradient retains the same value as in conditions not disturbed by filtration. It has been experimentally proven that the temperature does not decrease to infinity, which can be explained by the sporadic distribution of vertical



filtration flows. It has been proven that the same calculation formulas can be used to estimate this phenomenon, but the filtration rate in them should be taken with the opposite sign. It was concluded that using this method it is possible to consider other anomalies of the geotemperature field caused by liquid filtration in permeable layers. For example, to evaluate the thermal effect of local water exits at different depths from tectonic cracks, the effect of water flow from one aquifer to another, etc.

**Key words:** heat pump, aquifer, well, heat transfer equation, filtration.

## REFERENCES

1. Xianzhi, Song, Fuqiang, Xu, Jiayan, Ji, Yu, Shi (2022). Evaluation of the heat extraction performance of an abandoned well pattern in multilayer commingled production oil reservoirs. Volume 9, Issue 6, December. P. 578–587. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.11.007.
2. Zholudiev, S.V. (2016). Mathematical bases of heat-transfer in groundwater. *Dnipropetrovsk University Bulletin. Series "Geology, geography"*. № 24 (1), 37–42. DOI: 10.15421/111606.
3. Leszek, Pająk (2000). Simultaneous production and injection of two water-bearing layers in the same well. Geothermal training programme Reports. IS-108 Reykjavik, Iceland ; Koshlyakova, T.O. (2011). Suchasnyj stan vykory'stannya pytnyx pidzemnyx vod [Current state of drinking groundwater use]. *Zbirnyk naukovykh statej III-go Vseukrayinskogo z'yizdu ekologiv z mizhnarodnoyu uchastyu. Vinnytsya*. Tom.1. S. 204–207 [in Ukrainian]
4. Shcherbak, O.V., Yakovlev, E.O., Dolin, V.V. (2018). Modeliuvannya hidroheofiltratsiinoho polia gruntovykh vod u zoni vplyvu metalurhiinoho vyrobnytstva. [Modeling of the hydrogeofiltration field of groundwater in the zone of influence of metallurgical production]. *Mineral resources of Ukraine*. № 3. P. 19–20. DOI: 10.31996/mru.2018.3.19-25 [in Ukrainian]
5. Nazarevich, A.V. (2018). Do problemy pidvyshchennia hlybnyosti, chutlyvosti i tochnosti monitorynhovykh ta naftohazoposhukovykh sverdlovynnykh heotermichnykh doslidzhen [To the problem of increasing the depth, sensitivity and accuracy of monitoring and oil and gas exploration borehole geothermal research]. *Geodynamics*. № 1 (24). P. 60–79 [in Ukrainian].
6. Morozov, Yu.P., Zhohin, A.S. (2023). Teploobmin pry rusi heotermalnoho teplonosiiia u sverdlovyni [Heat exchange during the movement of a geothermal heat carrier in a drill pit]. *Renewable Energy*, 4 (71), 83–89. DOI: 10.36296/1819-8058.2022.4(71).83-89 [in Ukrainian].
7. Kordas, Olga, Nikiforovich, Eugene (2018). A phenomenological theory of steady-state vertical geothermal systems: A novel approach. *Energy*. P. 23–35. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.030.
8. Yoon, S., Lee, S.R., Kim, M.J., Kim, W.J., Kim, G.Y., Kim K. (2016). [Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system]. *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.057.
9. Stylianou, I., Florides, G., Tassou, S., Tsiolakis, E., Christodoulides, P. (2017) [Methodology for estimating the ground heat absorption rate of Ground Heat Exchangers]. *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.070.
10. Zuryan, O.V. (2022). Vrakhuvannya antropohennoho vplyvu ta heomorfolohichnykh umov na pidzemnu hidrosferu pry proektuvanni hidrotermalnykh teplonasosnykh system [Taking into account anthropogenic influence and geomorphological conditions on the underground hydrosphere during the design of hydrothermal heat-pump systems]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoh*. № 1 (132). P. 192–202. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.1.26 [in Ukrainian].

Стаття надійшла 12.04.2023