

О. В. ЗУР'ЯН

кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник відділу геотермальної енергетики

Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України

ORCID: 0000-0002-2391-1611

ВРАХУВАННЯ ДИНАМІКИ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ДІЛЯНКАХ БЕРЕГОВИХ ВОДОЗАБОРІВ ГІДРОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМ

Прогноз динаміки змін температури підземних вод на ділянках розміщення берегових водозаборів становить великий практичний інтерес, оскільки температура підземних вод, які використовуються, не повинна виходити з рамок кондиції, обумовлених, наприклад, технологічними особливостями виробництва. Метою роботи є експериментально та аналітично оцінити вплив зміни температури підземних вод, в результаті змішування з водами, що фільтруються з водою, яка знаходиться поруч, на ефективність гідротермальної теплонасосної системи.

Представлено розроблену і сконструйовану в Інституті відновлюваної енергетики НАН України експериментальну гідротермальну теплонасосну систему, яка складається з теплового насосу та двох свердловин через які забезпечується циркуляція води від Полтавського водоносного горизонту до теплового насосу. Особливістю даної системи є те, що її свердловини в геоморфологічному відношенні розташовані на території останця Київського лесового плато, який обмежений із заходу, з півдня і зі сходу балками. Крім того Полтавський водоносний горизонт розкритий ерозією і виходить на денну поверхню на відстані 100 метрів від місця розташування свердловин. А за 300 метрів від свердловин на дні балки розташована серія ставків.

Наведено опис характеристик вимірювального обладнання, встановленого на гідротермальній теплонасосній системі та розробленої інтерактивної системи диспетчеризації яка була застосована для побудови системи візуалізації та архівації даних отриманих в процесі проведення даної науково-дослідницької роботи. Експериментально визначено, що температури води в свердловині, якою розкрито водоносний горизонт, має тенденцію спрямованого зменшення або збільшення в залежності від пори року та обґрунтовані отримані залежності зміни температури від глибини з урахуванням температури навколишнього середовища та інших факторів екзогенного впливу.

Викладено математичну модель, яка дає змогу визначати температуру підземних вод під час дії водозабору, що має вигляд лінійної низки свердловин, розташованої паралельно руслу річки. Наведено розв'язання рівняння теплопередачі, яке описує процес теплопередачі в експлуатаційному водоносному пласті. На основі аналітичних розрахунків визначено, що у випадку підйому температури води в річці за лінійним законом у пласті з часом відбувається безперервне зростання температури, а в разі стрибкоподібного підйому температури води в річці в пласті встановлюється стаціонарний розподіл температури. З отриманих даних зроблено висновок, що визначальним фактором у нагріванні підземних вод є фільтрація, тобто конвективна теплопередача. Кондуктивна складова спричиняє тільки деяке розсіювання теплового фронту.

Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють оптимізувати побудову геотермальних систем. Мають перспективу подальші дослідження впливу геологічних, гідрогеологічних морфологічних та антропогенних умов на зміни температури нижче нейтрального шару, та їх вплив на ефективність роботи геотермальних теплонасосних систем.

Ключові слова: водоносний горизонт, підземні води, тепло грунту, нейтральний шар, тепловий насос, водозабір.

O. V. ZURIAN

Candidate of Technical Sciences,

Senior Research at the Department of Geothermal Energy

Institute of Renewable Energy

of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-2391-1611

TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF GROUNDWATER TEMPERATURE CHANGES AT AREAS OF COASTAL WATER INTAKES OF HYDROTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS

Forecasting the dynamics of changes in groundwater temperature in areas where coastal water intakes are located is often of great practical interest, since the temperature of groundwater used should not go beyond the limits of conditions,

due, for example, to technological features of production. The aim of the work is to experimentally and analytically evaluate the impact of groundwater temperature changes, as a result of mixing with waters filtered from a nearby reservoir, on the efficiency of a hydrothermal heat pump system.

An experimental hydrothermal heat pump system developed and constructed at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, consisting of a heat pump and two wells, through which water is circulated from the Poltava aquifer to the heat pump, is presented. A feature of this system is that its wells are geomorphologically located on the territory of the remnant of the Kyiv forest plateau, limited from the west, from the south and from the east by beams. In addition, the Poltava aquifer is exposed by erosion and comes to the surface at a distance of 100 meters from the location of the wells. And 300 meters from the wells at the bottom of the beam there is a series of ponds.

A description of the characteristics of the measuring equipment installed on the hydrothermal heat pump system and the developed interactive dispatching system, which was used to build a system for visualizing and archiving data obtained in the course of this research work, is presented. It has been experimentally determined that the water temperature in the well, which opened the aquifer, tends to decrease or increase depending on the time of year, and the obtained dependences of temperature change on depth are substantiated, taking into account the ambient temperature and other factors of exogenous impact.

A mathematical model is presented that makes it possible to determine the temperature of groundwater during the operation of a water intake, which has the form of a linear row of wells located parallel to the riverbed. A solution of the heat transfer equation is given, which describes the process of heat transfer in a production aquifer. Based on analytical calculations, it was determined that in the case of a rise in the water temperature in the river according to a linear law, a continuous temperature increase occurs in the reservoir over time, and with an abrupt rise in the temperature of the water in the river, a stationary temperature distribution is established in the reservoir. From the data obtained, it was concluded that the determining factor in the heating of groundwater is filtration, that is, convective heat transfer. The conductive component entails only some scattering of the thermal front.

The obtained theoretical and practical results make it possible to improve the construction of geothermal systems. There are prospects for further studies of the influence of geological, hydrogeological morphological and anthropogenic conditions of temperature change below the neutral layer, and their influence on the efficiency of geothermal heat pump systems.

Key words: aquifer, groundwater, ground heat, neutral layer, heat pump, water intake.

Постановка проблеми

В Україні останні роки спостерігається стрімке зростання впровадження в системи теплопостачання геотермальних теплових насосів, що використовують низькопотенційні джерела енергії. А використання вод верхніх водоносних горизонтів з енергетичною метою – в умовах необхідності децентралізації енергопостачання все більше становиться реальністю нашого часу.

Ефективність роботи теплонасосної системи залежить від температури на виході з конденсатора теплового насоса та вході у його випарник. Якщо температура на виході з конденсатора регулюється в залежності від навантаження та визначається комфортними умовами перебування людей, роботи техніки та технологічних процесів, то температура на вході в випарник визначається природнім джерелом відновлюваної енергії і може мати девіації які обумовлені його нестабільністю. Тому актуальною задачею є прогнозування змін параметрів відновлюваного джерела енергії з метою забезпечення необхідної температури та дебіту теплоносія на вході до теплового насоса протягом часу його роботи.

Практичне значення моделі за якою можна прогнозувати величину коливань температури ґрунту та ґрунтових вод в місті встановлення колектора теплового насоса полягає в тому, що при проектуванні даних систем можливо заздалегідь визначити ефективність теплонасосної системи в залежності від особливостей місця її розташування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з підвищення ефективності теплових насосів проводяться як в Україні так і світі вже тривалий час. Перспективи застосування теплових насосів досліджені в роботах [1, 2, 3]. Аналіз ефективності використання теплового потенціалу докілья та верхніх шарів Землі приведено в роботі [4, 5]. В роботах [6, 7, 8] виконана оцінку ефективності теплових насосів різних типів. Окремо треба виділити дослідження авторами яких запропоновано математичну модель та наведені розрахунки теплообміну при русі геотермального теплоносія у свердловині [9]. Також в дослідженні [10], пропонується новий підхід до вивчення стаціонарних енергетичних характеристик вертикальних геотермальні системи. Методологія для оцінки швидкості поглинання тепла ґрунту ґрунтовими теплообмінниками розглянуто в роботах [11, 12]. В даних роботах викладено математичну модель, яка дає змогу визначати температуру ґрунту $T(z, t)$ залежно від глибини $z \geq 0$ і часу $t \geq 0$ за умов, що задано зміну температури поверхні ґрунту або зовнішнього повітря з часом з урахуванням припущення, що температура ґрунту не залежить від координати (x, y) і теплофізичні властивості ґрунту не змінюються з координатами (x, y, z) з часом. З практичної точки зору науковий інтерес викликають дослідження що враховують реальні умови розміщення даних систем. Тому виникла потреба продовження проведених в [13, 14] досліджень, що зроблено у даній статті.

Формулювання мети дослідження

Підземні води – потужний тепловий фактор, що суттєво впливає на температурне поле земної кори. У зв'язку з цим у відновлюваній геотермальній енергетиці важливого значення набувають геотермічні дослідження.

До групи завдань, пов'язаних з геотермічними дослідженнями можливо віднести різноманітні завдання інженерного характеру, наприклад, прогноз зміни температури підземних вод в районі діючих водозаборів під впливом фільтрації з поверхневих водойм, або в результаті закачування в пласт води через свердловини, розрахунок продуктивності свердловин при експлуатації термальних вод та геотермальних теплонасосних систем, що використовують вертикальні теплообмінники встановлені у свердловини та ін.

Метою даної роботи є визначення ефективності роботи гідротермальної теплонасосної системи під впливом фільтрації підземних вод з поверхневих водних джерел.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відповідно до поставленої мети дослідження були вирішені такі завдання: по-перше – проведені експериментальні дослідження температури води у водоносному горизонті та у міжтрубному просторі свердловини, що входить до складу гідротермальної теплонасосної системи змонтованої у густозаселеній місцевості з великим перепадом висот де поряд, у балках, знаходяться відкриті водойми; по-друге, запропонована математична модель, яка описує процес теплопередачі у водоносному пласті, що експлуатується та розв'язана задача визначення температури підземних вод при водозаборі гідротермальною теплонасосною системою, що використовує свердловини розташовані паралельно руслу річки; по-третє – визначення відсоток падіння ефективності гідротермальної теплонасосної системи при нестабільних вхідних параметрах пов'язаних з перепадами температури на вході до випарника гідротермальної теплонасосної системи теплообмінний пристрій якої знаходяться під впливом фільтрації підземних вод з поверхневих водних джерел.

Експериментальна установка Інституту відновлюваної енергетики НАН України є теплообмінним пристроєм, який складається із двох свердловин (№ 1 та № 8), поєднаних трубопроводами для циркуляції підземних вод між водоносним горизонтом та будівлею Інституту де встановлено тепловий насос.

Свердловина № 1 пробурена до глибини 57 м. Свердловина № 8 пробурена на відстані 11,5 м від свердловини № 1. Глибина свердловини № 8 складає 50 м. Для обох свердловин продуктивним є Полтавський водоносний горизонт. Складається горизонт з дрібно-зернистих пісків, що залягають в інтервалі глибин 34–57 м. Статичний рівень води в свердловинах становить 40 м.

В геоморфологічному відношенні ділянка експериментальної установки розташована на території останця Київського лесового плато, який обмежений із заходу – Новосілецькою, з півдня – Хотівською і зі сходу – Феофанівською балками.

На дні балок розташовані водотоки з озерами, що мають непостійний характер, який на пряму залежить від кількості атмосферних опадів.

Полтавський водоносний горизонт виходить на денну поверхню на відстані 100 метрів від місця розташування свердловин. А за 300 метрів від свердловин на дні балки розташоване озеро. Перепад висот між гирлом свердловини та дном балки де розташоване озеро складає 40 метрів.

Відповідно до поставленого завдання дослідження для вимірювань температури у свердловині були встановлені датчики температури (термоперетворювачі опору) ТСП-204, на глибини: 42 м, 39 м, 34 м, 29 м. (рис. 1).

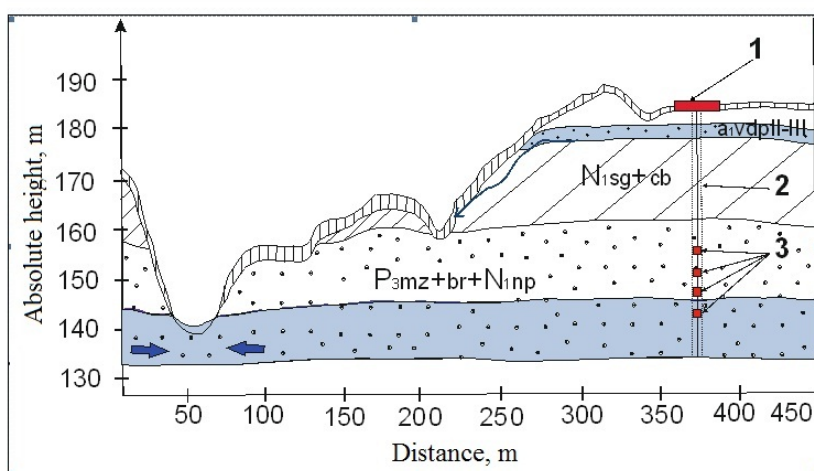


Рис. 1. Гідрогеологічний розріз території формування теплового режиму ділянки дослідження: 1 – ділянка дослідження; 2 – спостережна свердловина; 3 – датчики температури

Запроваджена в ІВЕ НАНУ автоматизована комп'ютерна система моніторингу забезпечила системність вимірювань, їх високу точність та дискретність.

Аналіз накопичених за період спостережень з жовтня 2021 року по лютий 2022 року даних температури води в свердловині, якою розкрито водоносний горизонт, виявив тенденцію їх спрямованого зменшення за цей період. Температура води в свердловині зменшилася на 2,0 °С, при цьому щоденна девіація температури складала від 0,3 °С до 0,9 °С.

Відхилення від лінійного тренда температур води в свердловині дозволяють припустити наявність річної компоненти в варіаціях цих характеристик. Прямий кореляційний зв'язок між варіаціями температур повітря і води в свердловині свідчать про вплив сезонних атмосферних змін температур на глибинах залягання водоносного горизонту.

Теоретично можна припустити, що це значення можуть бути завищені, враховуючи можливі неточності у вимірах.

Виникає питання необхідності статистичного підходу, як до інтерпретації отриманих даних, так і їх розрахунку.

Для перевірки отриманих результатів та визначення зміни значень температури та води нижче нейтрального шару температур за рахунок інфільтрації від водойми, що знаходиться поруч з водозабором було застосовано математичний апарат [15].

За припущення, що фільтраційний і тепловий потоки є одномірними, тобто натиск підземних вод, швидкість фільтрації, а відповідно температура і щільність теплового потоку та інші фільтраційні теплові елементи змінюються в залежності тільки від однієї координати x і від часу t , то щільність (інтенсивність) теплового потоку через елемент пласта mdx (m – потужність пласта), можливо виразити наступним рівнянням:

$$W = W_{\lambda} + W_K + W_{\varepsilon}. \quad (1)$$

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:

$$W_{\lambda} = -\lambda m \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (2)$$

де λ – 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, то коефіцієнт теплопровідності можна представити в такому вигляді:

$$\lambda = \lambda_{ж} n_0 + \lambda_{ск} (1 - n_0); \quad (3)$$

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

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

$$W_K = C_{ж} T q_x. \quad (4)$$

Тут $C_{ж} = C_{ож} \gamma_{ж}$ – об'ємна теплоємність рідини, ккал/м³ • град; $C_{ож}$ – питома теплоємність рідини, ккал/кг • град; $\gamma_{ж}$ – об'ємна вага, кг/м³; $q_x = m v_x$ – складова витрат, м² / год; v_x – швидкість фільтрації, м / год.

Третій член рівняння (1) визначає частину теплового потоку, обумовлену так званим дросельним ефектом або ефектом Джоуля – Томсона (тобто підвищенням температури та нагріванням пласта в результаті роботи сил тертя частинок рідини шляхом фільтрації):

$$W_{\varepsilon} = C_{ж} T_{\varepsilon} q_x \quad (5)$$

У цьому рівнянні T_{ε} – зміна температури під впливом дросельного процесу. При певних припущеннях будемо вважати, що зміна температури прямо пропорційно зміні тиску:

$$T_{\varepsilon} = -\varepsilon P, \quad (6)$$

де ε – усереднений коефіцієнт Джоуля – Томсона, м² град / кг; P – тиск рідини, кг/м³.

У рівнянні (1) опущена складова теплового потоку, що виникає при нагріванні рідини внаслідок її стисливості під впливом зміни зовнішнього тиску 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 при підвищенні тиску на 100 атм становить всього 0,15 °С, тобто в 15–20 разів менше нагрівання під впливом дросельного ефекту.

Склавши вирази (2), (4), (5), матимемо наступне рівняння для щільності теплового потоку:

$$W = -\lambda m \frac{\partial T}{\partial x} + C_{ж} T q_x + \varepsilon C_{ж} T q_x. \quad (7)$$

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

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -C_n m \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial n} - \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial n}. \quad (8)$$

Тут ліва частина дає збільшення кількості тепла шляхом руху рідини, права – відповідні зміни кількості тепла в часі ($C_n m \frac{\partial T}{\partial t}$; t-час) і віддачу тепла в породі підшови і покрівлі ($\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial n}$ та $\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial n}$; n – нормаль до площин підшови і покрівлі).

Коефіцієнт C_n перед похідною температури за часом є повною об'ємною теплоємністю пласта:

$$C_n = C_{0,ж} \gamma_{ж} n_0 + C_{0,ск} \gamma_{ск} (1 - n_0) \quad (9)$$

де $C_{0,ск}$ – питома теплоємність скелета породи, ккал / кг • град; $\gamma_{жк}$ – його об'ємна вага, кг / м³.

Спільне рішення рівнянь (7) та (8) призводить до наступного:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \bar{C} v_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\lambda_n}{C_n m} \frac{\partial T_n}{\partial n} - \frac{\lambda_k}{C_n m} \frac{\partial T_k}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (10)$$

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

Рівняння (10) є вихідним диференціальним рівнянням теплопередачі в одновимірному потоці підземних вод. Так само можна вивести рівняння для двовимірних потоків, а також для потоків з осью симетрії.

Розглянемо задачу визначення температури підземних вод під час дії водозабору, що має вигляд низки свердловин, розташованої паралельно руслу річки (рис. 2).

Враховуючи, що відкачка виконується в умовах квазістатичного режиму фільтрації, отримаємо наступний вираз для напору H і швидкості фільтрації v_x :

$$H = H_e - \frac{q_0}{km} x; \quad v_x = -k \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{q_0}{m}; \quad (11)$$

де H_e – початкова потужність водоносного пласта (до початку відкачування зі свердловини); m – середня потужність пласта в процесі відкачування.

Вираз (11) слід підставити в рівняння (10), яке в цьому разі випадку буде описувати процес теплопередачі в експлуатаційному водоносному пласті. Будемо розв'язувати це рівняння за таких умов:

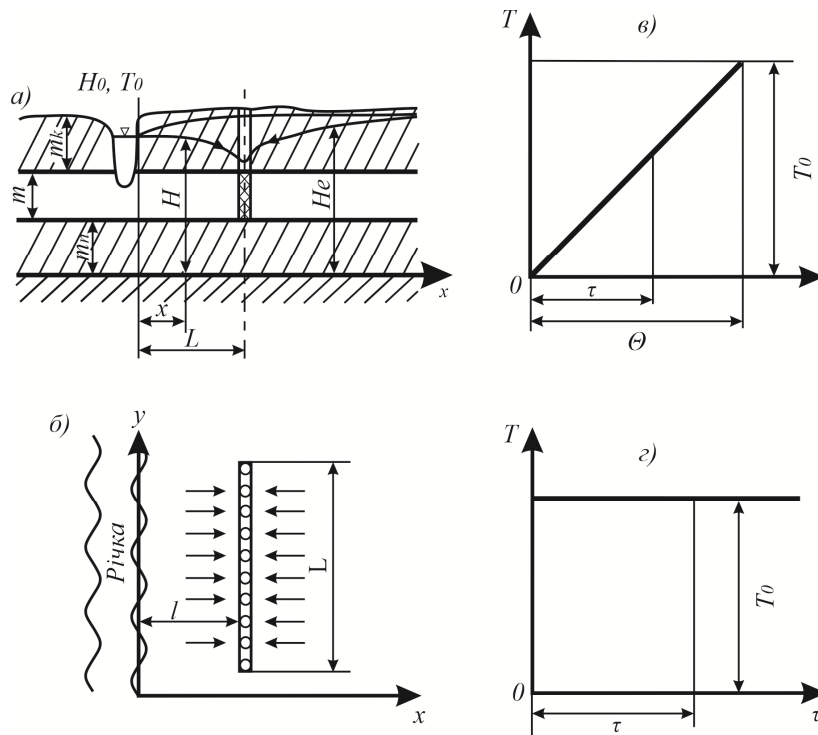


Рис. 2. Схема до задачі про зміну температури підземних вод під час дії берегового водозабору: а – розріз; б – план; в, г – графіки температури води в річці

$$t = 0; T = T_n; \tag{12}$$

$$t > 0; t = 0; T = \frac{T_0 - T_n}{\theta} t; \tag{13}$$

де $T_0 - T_n$ – повний перепад температури на межі пласта, тобто в річці, за час θ (рис. 2, в);

$$t > 0; x = \infty; T \neq \infty; \tag{14}$$

Умовою (14) характеризується лінійна зміна температури води, що надходить у пласт із річки. У окремому випадку можна прийняти

$$T_0 - T_n = const. \tag{15}$$

Для оцінки теплових втрат у підшову і покрівлю пласта приймемо спочатку наближену передумову про сталість температури в них протягом усього процесу фільтрації. Тоді нормальні похідні в рівнянні (10) можна виразити таким чином:

$$\frac{2\alpha}{C_n}(T - T_n). \tag{16}$$

Тут α – коефіцієнт теплообміну. У цьому разі розв'язок рівняння (10) за умов (12) і (13) матиме наступний вигляд:

$$T = T_n + T_0 - T_n \frac{t}{\theta} e^{\frac{P_e}{2} \sqrt{\frac{P_e^2 + 12x^2}{m^2}}}; \quad R_n(x, t). \tag{17}$$

$$R_n(x, t) = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{\xi}{\eta} \right) e^{4\xi\eta} \operatorname{erfc}(\xi + \eta) + \left(1 - \frac{\xi}{\eta} \right) \operatorname{erfc}(\xi - \eta) \right]; \tag{18}$$

де $\xi = \frac{1}{2\sqrt{F_0}}$; $\eta = \sqrt{\left(\frac{P_e^2}{4} + 12 \frac{x^2}{m^2} \right) F_0}$; $F_0 = \frac{at}{x^2}$; $P_e = \frac{\bar{C}v_x x}{a}$.

Якщо замість умови (14) прийняти, що на межі пласта температура піднімається стрибкоподібно до величини T_0 та згідно з умовою (15) підтримується постійною, то розв'язок відносно $T(x, t)$ також може бути поданий загальною формулою (19), але в ній слід приймати $\frac{t}{\theta} = 1$, а функцію R_n - за такою залежністю:

$$R_n(x, t) = \left[e^{4\xi\eta} \operatorname{erfc}(\xi + \eta) + \operatorname{erfc}(\xi - \eta) \right]; \tag{19}$$

Граничні значення R_n функції за (18) і (19) такі: при умові, що $t=0$ $R_n=0$; при $t=\infty$ $R_n=1$. За останньої умови в разі підйому температури води в річці за лінійним законом, як впливає з рівняння (17), у пласті з часом відбувається безперервне зростання температури, а в разі стрибкоподібного підйому температури води в річці в пласті встановлюється стаціонарний розподіл температури.

Не враховуючи конвективну теплопередачу, тобто за $P_e=0$, замість формул (17) і (19) отримаємо:

$$R_n(x, t) = \left[e^{4\xi\eta} \operatorname{erfc}(\xi + \eta) + \operatorname{erfc}(\xi - \eta) \right]; \tag{20}$$

Розрахунок за цією формулою показує [15], що при підйомі температури води в річці з 8 °С до 30 °С через 50 діб температура підземних вод на відстані 10 м збільшується на 2,2 °С і далі, до $\tau = 200$ діб не змінюється (рис. 3).

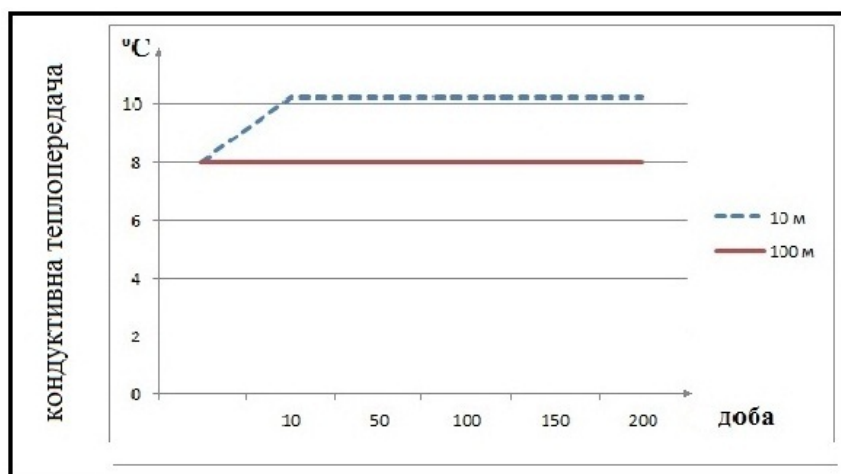


Рис. 3. Графік зміни температури підземних вод без врахування конвективної теплопередачі

Якщо ж знехтувати кондуктивною теплопровідністю в основному фільтрувальному шарі, тобто прийняти для нього $\lambda=0$ (при цьому коефіцієнт теплопровідності покрівлі та підшови $\lambda > 0$), то розв'язання задачі матиме такий вигляд:

$$T = T_n + (T_0 - T_n) e^{-\frac{12ax}{q_0 C m}}, \quad (21)$$

Результати розрахунку за цією формулою для умов розглянутого прикладу наводяться на рис. 4.

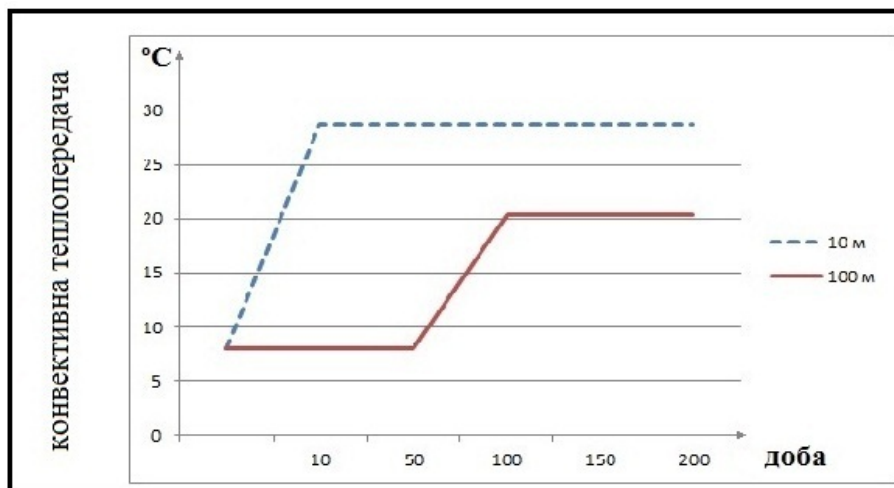


Рис. 4. Графік зміни температури підземних вод без врахування кондуктивної теплопровідності

На відстані 100 м вплив річки за 50 днів зовсім не відбувається. А після 100 днів температура води в водозаборі збільшується до 20,4 °C, що складає 70% від максимального підйому температури річкової води.

З отриманих аналітичних шляхом даних можливо зробити висновок, що визначальним фактором у нагріванні підземних вод є фільтрація, тобто конвективна теплопередача.

Кондуктивна складова, як уже зазначалося раніше, спричиняє тільки деяке розсіювання теплового фронту. У разі, коли має місце тільки конвекція, тепловий фронт набуває різких обрисів, при цьому відбувається поршневе витіснення підземних вод нагрітими водами, що фільтруються, з річки.

Відповідно до третьої поставленої задачі дослідження було проаналізовано ефективність роботи гідротермальної теплонасосної системи при нестабільних вхідних параметрах пов'язаних з перепадами температури на вході до ГідроТС.

Для оцінки енергетичної ефективності теплонасосної установки використовується коефіцієнт трансформації K (перетворення теплоти), якій уявляє собою відношення кількості енергії, що генерується тепловим насосом, до кількості енергії, що витрачається на процес перенесення тепла.

Введемо коефіцієнт k , який визначає відсоток, на який зменшується ефективність роботи гідротермальної системи в залежності від падіння температури природного теплоносія на вході до випарника теплового насосу [16]. Цей коефіцієнт визначається за формулою:

$$k = \left(1 - \left[\frac{T_{iout}}{T_{iout} - T_{iin}} \times \frac{T_{sout} - T_{sin}}{T_{sout}} \right] \right) \times 100\% , \quad (22)$$

де T_{iout} – температура на виході з конденсатору теплового насоса при i -тій температурі природного теплоносія на вході до випарника теплового насоса; T_{sout} – температура на виході з конденсатору теплового насоса при стабільній температурі природного теплоносія на вході до випарника теплового насоса; T_{iin} – i -та температура на вході у випарник теплового насоса гідротермальної теплонасосної системи; T_{sin} – стабільна температура на вході у випарник теплового насоса гідротермальної теплонасосної системи, дорівнює 10 °C.

На рис. 5 наведено результати розрахунку за формулою (23) відсотку падіння ефективності гідротермальної теплонасосної системи завдяки нестабільності температурного параметра природного теплоносія на вході до випарника теплового насоса. При цьому за базову (максимальну) температуру природного теплоносія на вході до теплового насоса прийнята температура 10 °C.

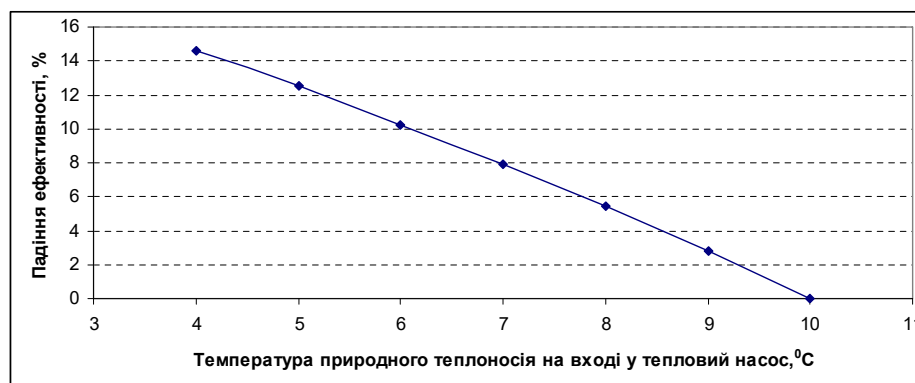


Рис. 5. Зменшення енергетичної ефективності експериментальної теплонасосної установки в залежності від падіння температури природного теплоносія

Висновки

1. Доведено, що на ділянках берегових водозаборів для гідротермальних теплонасосних систем температура води в свердловинах може суттєво змінюватися залежно від температури води в водоймі та відстані від свердловин до водойми.

2. Теоретично обґрунтовано, що основну роль в зміні температури підземних вод є фільтрація, тобто конвективна теплопередача. Кондуктивна складова спричиняє тільки деяке розсіювання теплового фронту.

3. Експериментально встановлено, що безпосередньо в районі житлового комплексу, в межах якого розташована ділянка проведення досліджень, Полтавський водоносний горизонт виходить на денну поверхню на відстані 100 метрів від місця розташування свердловин за рахунок чого цих місцях спостерігається гідравлічний зв'язок горизонту з поверхневими водоймами, що розташовані на дні балок, а живлення горизонту здійснюється безпосередньо за рахунок інфільтрації атмосферних опадів.

4. Обґрунтовано, що під час проектування гідротермальних теплонасосних установок необхідно враховувати, що на ділянках, де перепад висот рельєфу є близькими за розміром з глибиною залягання продуктивного водоносного горизонту коефіцієнт трансформації теплонасосної системи може суттєво відрізнятись від розрахункового.

5. Підтверджено, що для ефективного використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплової енергії необхідно проведення попередніх гідрогеологічних досліджень та якісне вивчення як існуючого антропогенного навантаження так і геоморфологічних, геологічних та гідрогеологічних параметрів ділянки проведення бурових робіт.

Список використаної літератури

1. Безродний М. К. Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання: навч. посіб. К. НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
2. Долінський А. А., Драганов Б. Х. Теплові насоси у системі тепlopостачання будівель. Промислова тепло-техніка. 2008. т. 30. № 6. С. 71–83.
3. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії. ІВЕ НАН України. Київ. 2020. 354 с.
4. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Ніколаєвська Н.В., Добровольський М.П. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу довкілля та верхніх шарів Землі України. Відновлювана енергетика. 2019. №4(63). С. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
5. Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. The geothermal potential of urban heat islands. 2010. Environ. Res. Lett. no. 5. pp. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
6. Морозов Ю.П. та ін Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання. Ю.П. Морозов, А.А. Барило, Д.М. Чалаєв, М.П. Добровольський. Відновлювана енергетика. 2019. № 2. С. 70-78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
7. Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech. Varna. Bulgaria. 2019. С. 83-90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>
8. Малкін Е.С., Кулінко Є.О. Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2014. № 17. С. 63–69.
9. Морозов, Ю. П., Жохін, А. С. (2023). Теплообмін при русі геотермального теплоносія у свердловині. Відновлювана енергетика, 4(71), 83-89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).83-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).83-89)

10. Kordas Olga, Nikiforovich Eugene. A phenomenological theory of steady-state vertical geothermal systems: A novel approach *Energy* 175 (2019) 23–35. doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.030
11. Yoon S, Lee SR, Kim MJ, Kim WJ, Kim GY, Kim K. Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system. *Energy* 2016;113:328e37. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.057>
12. Stylianou I, Florides G, Tassou S, Tsiolakis E, Christodoulides P. Methodology for estimating the ground heat absorption rate of Ground Heat Exchangers. *Energy* 2017;127:258e70. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.070>
13. Зур'ян О.В. Експериментальні дослідження теплового режиму гідротермальної теплонасосної системи. *Відновлювана енергетика*. 2021. № №4(67). С. 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
14. 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*. № 1(132). 2022. С. 192–202. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.26>
15. Бочевєр Ф.М. та інші. Основи гідрогеологічних розрахунків / Ф.М. Бочевєр, І.В. Гармонов, А.В. Лебєдєв, В.М. Шостаков. Надра, 1969. 366 с.
16. Zurian O.V., Barilo A.A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31. No 3. С. 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>

References

1. Bezrodnyi M. K. Pukhovyi I. I., Kutra D. S. Teplovi nasosy ta yikh vykorystannia: navch. posib. K. NTUU “KPI”. 2013. 312 s.
2. Dolinskyi A. A., Drahanov B. Kh. Teplovi nasosy u systemi teplopostachannia budivel. *Promyslova teplotekhnika*. 2008. t. 30. № 6. С. 71–83.
3. Kudria S.O. Vidnovliuvani dzherela enerhii. IVE NAN Ukrainy. Kyiv. 2020. 354 s.
4. Morozov Yu.P., Chalaiev D.M., Nikolaievskia N.V., Dobrovolskyi M.P. Otsinka efektyvnosti vykorystannia teplovoho potentsialu dovkillia ta verkhnikh shariv Zemli Ukrainy. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2019. № 4(63). С. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
5. Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. The geothermal potential of urban heat islands. 2010. *Environ. Res. Lett.* no. 5. pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
6. Morozov Yu.P. ta in Enerhetychna efektyvnist vykorystannia pershykh vid povorkhni vodonosnykh horyzontiv dlia teplo- i khladopostachannia. Yu.P. Morozov, A.A. Barylo, D.M. Chalaiev, M.P. Dobrovolskyi. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2019. № 2. С. 70–78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
7. Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech. Varna. Bulgaria. 2019. С. 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>
8. Malkin E.S., Kulinko Ye.O. Perspektyvy ta aspekty zastosuvannia system teplokhodopostachannia, yaki vykorystovuiut prypovorkhnevi shary vody v yakosti teplovoho akumulatora. *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia*. 2014. №17. С. 63–69.
9. Morozov, Yu. P., Zhokhin, A. S. (2023). Teploobmin pry rusi heotermalnogo teplonosiia u sverdlovyni. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 4(71), 83–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).83-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).83-89)
10. Kordas Olga, Nikiforovich Eugene. A phenomenological theory of steady-state vertical geothermal systems: A novel approach *Energy* 175 (2019) 23–35. doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.030
11. Yoon S, Lee SR, Kim MJ, Kim WJ, Kim GY, Kim K. Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system. *Energy* 2016;113:328e37. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.057>
12. Stylianou I, Florides G, Tassou S, Tsiolakis E, Christodoulides P. Methodology for estimating the ground heat absorption rate of Ground Heat Exchangers. *Energy* 2017;127:258e70. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.070>
13. Zurian O.V. Eksperymentalni doslidzhennia teplovoho rezhymu hidrotermalnoi teplonasosnoi systemy. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2021. № №4(67). С. 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
14. Zurian O.V. Vrahuvannia antropohennoho vplyvu ta heomorfolohichnykh umov na pidzemnu hidrosferu pry projektuvanni hidrotermalnykh teplonasosnykh system. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnogo universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. № 1(132). 2022. С. 192–202. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.26>
15. Bochever F.M. ta inshi. Osnovy hidroheolohichnykh rozrakhunkiv. /F.M. Bochever, I.V. Harmonov, A.V. Lebediev, V.M. Shostakov. Nadra, 1969. 366 s.
16. Zurian O.V., Barilo A.A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol 31. No 3. С. 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>