DOI: 10.32347/2076-815X.2024.85.494-504
УДК 504.06:552.11:697.7

д.екон.н., професор **Предун К.М.**,
31172@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2634-9310,
Войналович В.О., mail@voinalovych.com, ORCID: 0009-0009-1932-5204,
Гулієв Дж., cemil@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3442-0906,
Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ ВЛАШТУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

На сучасному етапі розвитку України проблеми ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів та екологічної безпеки є одними з найважливіших. Житлово-комунальне господарство належить до числа найбільших споживачів енергії в державі та, відповідно, джерел забруднення довкілля. Запровадження стандартів «зеленого будівництва» в європейських країнах довели свою дієвість щодо скорочення негативного впливу забудови та інженерної інфраструктури на навколишнє природне середовище.

Запропоновано технічне вирішення проблеми стосовно джерела альтернативної енергії за рахунок використання теплоти приповерхневих шарів земної кори. На глибині розміщення зондів-теплообмінників, які структурно входять до складу теплонасосних установок, температура грунту практично незмінна протягом року і позитивна. Для підвищення експлуатаційної надійності установок застосовано незамерзаючі розчини гліколю.

Комплексний аналіз публікацій та літератури демонструє відсутність наявного чіткого сценарію щодо необхідних кроків задля визначення основних параметрів теплонасосних установок великої потужності (більше 30 кВт). Державні нормативні документи містять вимоги лише для відносно малих за продуктивністю систем. Проте, навіть для таких систем питомі значення відібраної теплової енергії вказані у вигляді діапазонів, розбіжність яких сягає майже 40 % між мінімальним та максимальним значенням для певного типу ґрунту. Таким чином, результуючий ефект виробництва теплової енергії не може бути визначений точно. Пропонована методологія розрахунку не дозволяє врахувати взаємний вплив теплообмінників між собою. А також, неможливо врахувати вплив ґрунтових вод. Але беручи до уваги низьку річну енергопродуктивність, даний підхід можна вважати допустимим.

Для більш потужних систем пропонується виконувати індивідуальні розрахунки, без чіткої дорожньої карти Точні розрахунки теплонасосних

систем великої потужності можуть бути проведені тільки за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінчених елементів. Вихідна інформація може бути отримана шляхом влаштування на проектному майданчику тестового геотермального зонду або групи зондів, з яким проводять «випробування теплового сприйняття» - thermal response test (TRT).

Ключові слова: енергетична ефективність; альтернативні джерела енергії; приповерхневі шари земної кори; грунтові теплонасосні установки; геотермальний теплообмінник; температурні поля; геотермальний зонд; випробування теплового сприйняття.

Формулювання цілей статті. Використання альтернативних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів сучасної енергетичної політики, спрямованої як на поліпшення стану довкілля, так і на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів. Метою даної статті є аналіз методів досліджень теплової потужності грунтових теплонасосних установок для підвищення достовірності отриманих результатів.

Постановка проблеми. Прийняті законодавчі, нормативно-правові акти сприяли стрімкому зростанню «зеленої» енергетики в Україні [1]. Сенс процесу еколого-енергетичної оптимізації – не заміна одного джерела енергії іншим, а економічна та індустріальна трансформація,декарбонізація та децентралізація. Одним із способів вирішення проблеми влаштування джерела альтернативної енергії за рахунок використання теплоти приповерхневих шарів земної кори [2]. Це досягається за допомогою розміщення геотермальних зондів, які формують кластерні теплообмінники, які входять до складу теплонасосних установок. Оскільки температура ґрунту практично незмінна протягом року і має позитивний градієнт, це дає можливість отримати постійний сталий тепловий потік для потреб теплохолодопостачання [3].

Сучасні світові дослідження, які проводяться в цьому напрямку, містять багато теоретичних та практичних напрацювань. Комплексний аналіз публікацій та літератури демонструє відсутність наявного чіткого сценарію, щодо необхідних кроків задля визначення основних параметрів теплонасосних установок великої потужності (більше 30 кВт). Державні нормативні документи містять вимоги лише для відносно малих за продуктивністю систем. Для потужних систем пропонується виконувати індивідуальні розрахунки, без чіткої дорожньої карти [3, 4].

Аналіз досліджень та публікацій. Світова спільнота інженерів покладається на польовий досвід експлуатації аналогічних установок, які були побудовані в цьому регіоні та експлуатується продовж тривалого часу [5-11]. Альтернативним підходом може бути теоретичне моделювання, спираючись на

інформацію, щодо геологічного складу порід, в яких планується влаштування теплообмінників [12-14]. Також, існує концепція та чимало прикладів проведення натурних випробувань тестового теплообмінника, із збором масиву даних, за результатами яких проводиться математичне моделювання [15, 16]. Але кожний із цих методів має свої недоліки, та не дозволяє в повній мірі відповісти на питання, які параметри слід приймати для кожного конкретного проекту, який розташовується в регіоні, де відсутні аналогічні проекти. Слід зазначити, методи польового випробування та математичного моделювання вимагають залучення висококваліфікованого персоналу, збору чималого масиву інформації. Що в свою чергу призводить до загального здороження проектних рішень та вимагає багато часу для визначення всіх параметрів теплонасосних установок.

Основна частина. Найпростішим шляхом до визначення потенціальної продуктивності геотермальних теплообмінників є метод табличних показників. Так, існує достатня кількість довідкової літератури та публікацій, яка містить основні характеристики, виражені у вигляді питомих значень відібраної теплової енергії для різних типів ґрунту з використанням горизонтальних чи вертикальних теплообмінників. Але, як вже згадувалось раніше, ці показники справедливі для обмеженого в часі періоду експлуатації, та обмежені максимальною потужністю системи.

Таблиця 1

Питомі значення величини відібраної теплової енергії для різних типів ґрунту з використанням горизонтального теплообмінника [3, 17, 18]

Характеристика ґрунту	Питоме значення норми відбору теплової енергії при експлуатаційному періоді один рік при роботі ТНУ	
	1800 год./рік	2400 год./рік
Сухий сипучий	10 Вт/м^2	8 Вт/м^2
Вологий в'язкий	20-30 Вт/м^2	16-24 Вт/м^2
Заповнений водою пісок або гравій	40 Вт/м^2	32 Вт/м^2

Таблиця 2

Питомі значення величини відібраної теплової енергії для різних типів ґрунту з використанням вертикального теплообмінника [3, 17, 18]

Тип ґрунту	Питоме значення відібраної теплової енергії за експлуатаційний період в один рік при роботі ТНУ	
	1800 год./рік	2400 год./рік
1	2	3
Загальні характеристики ґрунтів:		
Виснажений ґрунт (із сухими частинками і $\lambda <$ 1,5 Вт/(м×К))	25 Вт/м	20 Вт/м

Продовженння табл. 2.

1	2	3
Звичайний ґрунт із частинками просякнутими вологою 1,5 < λ < 3 Вт/(м×К)	60 Вт/м	50 Вт/м
Зцементована порода з високою теплопровідністю λ > 3 Вт/(м×К)	84 Вт/м	70 Вт/м
Характеристики окремих видів ґрунту:		
Сухий гравій або пісок	< 25 Вт/м	< 20 Вт/м
Гравій або пісок вологий	(65...80) Вт/м	(55...65) Вт/м
Потужний потік ґрунтових вод у гравію або піску	(80...100) Вт/м	(80...100) Вт/ч
Волога глина	(35...50) Вт/м	(30...40) Вт/м
Важкий вапняк	(55...70) Вт/м	(45...60) Вт/м
Пісковик	(65...80) Вт/м	(55...65) Вт/м
Крем'янистий магматит (наприклад, граніт)	(65...85) Вт/м	(55...70) Вт/м
Базовий магматит (наприклад, базальт)	(40...65) Вт/м	(35...55) Вт/м
Діорит	(70...85) Вт/м	(60...70) Вт/м
Примітка. Наведені у таблиці значення дійсні для систем теплових насосів з тепловою продуктивністю до 30 кВт.		

Як видно із цих табл. 1 і 2, навіть для невеликих систем, питомі значення відібраної теплової енергії вказані у вигляді діапазонів, розбіжність значень яких досягає майже 40 % між мінімальним та максимальним значенням для певного типу ґрунту. Така ситуація виникає через те, що масиви породи по своїй природі не є однорідними, та часто включають вкраплення та домішки інших порід, порожнини, а також наявність води в стані насичення, течії або фільтрації. Таким чином, результуючий ефект виробництва теплової енергії не може бути визначений точно. Також, дана методологія розрахунку не дозволяє врахувати взаємний вплив теплообмінників між собою. А також, неможливо врахувати вплив ґрунтових вод. Але беручи до уваги низьку річну продуктивність, даний підхід можна вважати допустимим.

Коли мова йде про більш потужні системи, необхідно проводити аналітику, з використанням спрощених розрахункових методів. Ці методи беруть до уваги виключно характеристики теплопровідності порід, фізичні характеристики яких отримані за результатами польових досліджень у вигляді буріння свердловини та складання геологічного звіту, який містить детальний опис геологічної колонки. При цьому, можливо врахувати лише факт наявності насиченої в породі води, але без оцінки реального впливу, який спричиняє рух ґрунтової води між пластами порід, або в їх товщі за рахунок фільтрації. Існує декілька підходів щодо спрощеної калькуляції.

Перший метод спрощеної калькуляції температури навколо геотермального теплообмінника був розроблений в США в 1950 році.

Скориставшись лінійною теорією джерела за Кельвіном, Ingersoll L.R. [9, 19] була розроблена формула, яка описує, що температура може бути визначена в залежності від теплопровідності, кількості відібраної або ін'єктованої теплової енергії та відстані між трубами теплообмінників. При цьому, температури теплоносія всередині теплообмінника не можуть бути визначені. Спростивши цей підхід, Guernsey E.N. [20], розробив емпіричну формулу, якою можна користуватися для швидких розрахунків систем, тепловою потужністю до 100 кВт (за умови, що $\alpha t/r^2>1$):

$$\Delta T = \frac{0.1833Q}{\lambda}\left(\log_{10}\frac{\alpha t}{r^2} + 0{,}106\frac{r^2}{\alpha t} + 0{,}351\right), K,$$

де: ΔT- перепад температури, К;

Q – тепловий потік на погонний метр довжини труби, Вт/м;

λ – теплопровідність, Вт/(м•К);

r – відстань між центрами труб теплообмінників, м;

t – час, год;

α – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м^2•К);

Коефіцієнт теплопровідності розраховується за формулою:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times c_p}$$

де: λ – теплопровідність, Вт/(м•К);

ρ – густина ґрунту, кг/м^3;

c_p – теплоємність за сталого тиску, Дж/кг•К;

Наступний метод спрощеної калькуляції геотермальних теплообмінників з достатньо високою точністю результатів був розроблений Claesson в 1990 р. в University of Lund у Швеції [21]. Методологія була визначена на основі моделювання параметрів за допомогою чисельних розрахункових моделей SBM, які базувались на різних аналітичних композиціях значень теплового потоку з функцією різних комбінацій геометрії геотермальних зондів (g-функція). Значення цієї g-функції залежали від кількості, схеми розташування та відстані між теплообмінниками. Ця методологія може бути використана лише в складі спеціалізованого програмного комплексу, та лише в межах попередньо закладених значень і комбінацій g-функції. Більш детально цей метод описано в [21].

Точні розрахунки теплонасосних систем великої потужності можуть бути проведені тільки за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінчених елементів. На сучасному ринку доступно декілька програмних комплексів, які виконують такі розрахунки. Але слід брати до уваги, що моделювання такого

роду мають проводити виключно висококваліфіковані інженери із відповідними навичками та досвідом роботи з чисельними моделюваннями.

Існує також метод польових випробувань, на меті яких є проста задача: експериментально визначити наступні показники: теплопровідність шарів ґрунту, наявність та швидкість руху ґрунтової води, наявність пустот. Це вихідні дані, які можна використовувати при теоретичних моделюваннях, про які згадувалось раніше.

Ця інформація може бути отримана шляхом влаштування на проектному майданчику тестового геотермального зонду або групи зондів, з яким проводять «випробування теплового сприйняття», широко відоме серед інженерів як thermal response test (далі TRT). При цьому існують певні складнощі щодо трактування отриманих результатів польових досліджень. Це пов'язано із тим фактом, що тестовий геотермальний зонд може одночасно перетинати декілька геологічних порід, із різними фізичними характеристиками, а також знаходитись під впливом підземних течій, швидкість яких невідома. Також, результати тесту демонструють вже фактичний вплив таких факторів, як: опір теплопередачі від теплоносія до стінки труби, опір матеріалу труби, опір тампонажного матеріалу та його контакту із основними породами ґрунту. Слід розуміти, що випробування за методологією TRT, зазвичай, проводяться протягом 1-3 діб і не можуть дати достовірний прогноз, як себе буде вести така система через 50 років, оскільки під час впливу постійних температур на ґрунти, геологічна ситуація буде змінюватись. Тобто трактування результатів польових випробувань також вимагає високої кваліфікації всіх учасників проектування та будівництва.

Висновки

Таким чином, точні розрахунки теплонасосних систем великої потужності можуть бути проведені тільки за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінчених елементів. Лише цей метод дозволить врахувати взаємний температурний вплив теплообмінників між собою, а також вплив руху ґрунтової води та процесів фільтрації в породах. Цей підхід сприятиме довгостроковому прогнозуванню щодо робочих параметрів системи через 25, 50 або навіть 100 років. Водночас залишається відкритим питання, як слід проводити комплексні розрахунки, беручи до уваги наявність всієї можливої інформації за результатами польових досліджень геологічної колонки та за результатами TRT.

Використані джерела

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність": Розпорядж. Каб.

МіністрівУкраїни від 18.08.2017 р. № 605-р: станом на 21 квіт. 2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-р#Text (дата звернення: 17.03. 2024).

2. Про внесення змін до Закону України "Про теплопостачання" щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії: Закон України від 21.03.2017 р. № 1959-VIII. URL:https://zakon.rada.gov.ua/ laws/show/1959-19#Text (дата звернення: 17.03.2024).

3. ДСТУ Б В.2.5-44:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами (EN 154550:2007, MOD). Чинний від 2010-02-02. Вид. офіц.

4. ДСТУ EN 378-4:2014. Холодильні установки та теплові насоси. Безпечність та екологічні вимоги. Частина 4. Експлуатація, технічне обслуговування, ремонт і поновлення (EN 378-4:2008+A1:2012, IDT). На заміну ДСТУ EN 378-4:2005; чинний від 2015-07-01. Вид. офіц.

5. Allan M., Philippacopoulos A. Thermally conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps. progress report by 1998. New York: Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, NY (United States), 1998. 78 с. URL: https:// doi.org/10.2172/760977 (дата звернення: 17.03.2024).

6. Ashrae. 2019 ASHRAE Handbook - HVAC Applications. Ashrae, 2019. 1408 p.

7. Dincer I., Ozturk M. Geothermal energy systems. Elsevier, 2020. 410 p.

8. Kavanaugh S. Ground and water source heat pumps: a manual for the design and installation of ground-coupled, groundwater, and lake water heating and cooling systems in southern climates. Oklahoma State University. 154 p.

9. Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C. Heat conduction with engineering, geological, and other applications. *Physics today*. 1955. Т. 8, № 3. С. 17. URL: https://doi.org/10.1063/1.3061951 (дата звернення: 17.03.2024).

10. Ochsner K. Geothermal heat pumps. A guide for planning and installing. London: Earthscan, 2007. 167 p.

11. Rafferty K., Kavanaugh S. Ground source heat pumps design of geothermal systems for commercial and institutional buildings (#90376). Amer Society of Heating Refrig. 135 p.

12. Infinite borehole field model–a new approach to estimate the shallow geothermal potential of urban areas applied to central Budapest, Hungary / K. Korhonen та ін. *Renewable energy*. 2023. URL: https://doi.org/10.1016/ j.renene.2023.03.043 (дата звернення: 17.03.2024).

13. Tarrad A.H. 3D numerical modeling to evaluate the thermal performance of single and double u-tube ground-coupled heat pump. *High Tech and innovation*

journal. 2022. Т. 3, № 2. С.115–129. URL: https://doi.org/10.28991/hij-2022-03-02-01 (дата звернення: 17.03.2024).

14. Zanchini E., Jahanbin A. Finite-element analysis of the fluid temperature distribution in double U-tube Borehole Heat Exchangers. *Journal of physics: conference series*. 2016. Т. 745. С. 032002. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/745/3/032002 (дата звернення: 17.03.2024).

15. Mazzotti Pallard W., Lazzarotto A. Thermal response tests: a biased parameter estimation procedure? *Geothermics*. 2021. Т. 97. С. 102221. URL: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102221 (дата звернення: 17.03.2024).

16. Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger / M. Yoshioka та ін. *Geothermics*. 2022. Т. 102. С. 102390. URL: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102390 (дата звернення: 17.03. 2024).

17. VDI 4640 Blatt 1: 2000-12: Thermiche Nutzung des Untergrundes. *Bauphysik*. 2001. Т. 23, № 2. С. 115. URL: https://doi.org/10.1002/bapi.200100590 (дата звернення: 17.03.2024).

18. VDI 4640 Blatt 2 zur Installation von erdge koppelten Wärme pumpen. *Bauphysik*. 2019. Т. 41, № 4. С. 198. URL: https://doi.org/10.1002/bapi.201970403 (дата звернення: 17.03.2024).

19. Jamieson J.C. Heat conduction, with engineering, geological, and other applications. L.R. Ingersoll, O.J. Zobel, A.C. Ingersoll. *The journal of geology*. 1955. Т. 63, № 2. С. 196. URL: https://doi.org/10.1086/626247. (дата звернення: 17.03.2024).

20. Guernsey E., Betz P., Skau N. Earth as a heat source or storage medium for the heat pump. *Heating, piping & air conditioning*. 1949. Vol. 21. P. 117–122.

21. Eskilson P., Claesson J. Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical heat transfer*. 1988. Т. 13, № 2. С. 149–165. URL: https://doi.org/10.1080/10407788808913609 (дата звернення: 17.03.2024).

Doctor of Economics, Professor **Predun Predun**,
PhD student **Voinalovich Vitalii**, PhD student **Guliyev Jamil**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

ANALYSIS OF METHODS OF FORECASTING THE PRODUCTIVITY OF GEOTHERMAL HEAT EXCHANGERS FOR ESTABLISHING HEAT PUMP INSTALLATIONS

At the current stage of Ukraine's development, the problems of effective use of fuel and energy resources and environmental safety are among the most important.

Housing and communal services are among the largest consumers of energy in the state and, accordingly, sources of environmental pollution. The introduction of "green construction" standards in European countries has proven to be effective in reducing the negative impact of construction and engineering infrastructure on the natural environment.

A technical solution to the problem of a source of alternative energy due to the use of the heat of the near-surface layers of the earth's crust is proposed. At the depth of placement of probes-heat exchangers, which are structurally part of heat pump installations, the soil temperature is practically unchanged throughout the year and is positive. Non-freezing glycol solutions are used to increase the operational reliability of the installations.

A comprehensive analysis of publications and literature demonstrates the absence of a clear scenario for the necessary steps to determine the main parameters of high-capacity heat pump units (more than 30 kW). State regulatory documents contain requirements only for relatively small systems in terms of performance. However, even for such systems, the specific values of the selected thermal energy are indicated in the form of ranges, the discrepancy of which reaches almost 40% between the minimum and maximum values for a certain type of soil. Thus, the resulting effect of thermal energy production cannot be determined precisely. The proposed calculation methodology does not allow taking into account the mutual influence of heat exchangers among themselves. Also, it is impossible to take into account the influence of groundwater. But taking into account the low annual energy productivity, this approach can be considered acceptable.

For more powerful systems, it is suggested to perform individual calculations, without a clear road map. Accurate calculations of high-capacity heat pump systems can be carried out only with the help of computer modeling using the finite element method. Initial information can be obtained by placing a test geothermal probe or a group of probes on the project site, with which a thermal response test (TRT) is conducted.

Key words: energy efficiency; alternative energy sources; near-surface layers of the earth's crust; ground heat pump installations; geothermal heat exchanger; temperature fields; geothermal probe; thermal perception test.

REFERENCES

1. Pro skhvalennya Enerhetychnoyi stratehiyi Ukrayiny na period do 2035 roku “Bezpeka, enerhoefektyvnist′, konkurentospromozhnist′”: Rozporyadzh. Kab. MinistrivUkrayiny vid 18.08.2017 r. № 605-r: stanom na 21 kvit. 2023 r. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text. (data zvernennya: 17.03. 2024). {in Ukrainian}

2. Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrayiny "Pro teplopostachannya" shchodo stymulyuvannya vyrobnytstva teplovoyi enerhiyi z al′ternatyvnykh dzherel enerhiyi: Zakon Ukrayiny vid 21.03.2017 r. № 1959-VIII. URL:https://zakon. rada.gov.ua/ laws/show/1959-19#Text. (data zvernennya: 17.03.2024). {in Ukrainian}

3. DSTU B V.2.5-44:2010. Inzhenerne obladnannya budynkiv i sporud. Proektuvannya system opalennya budivel′ z teplovymy nasosamy (EN 154550:2007, MOD). Chynnyy vid 2010-02-02. Vyd. ofits. {in Ukrainian}

4. DSTU EN 378-4:2014. Kholodyl′ni ustanovky ta teplovi nasosy. Bezpechnist′ ta ekolohichni vymohy. Chastyna 4. Ekspluatatsiya, tekhnichne obsluhovuvannya, remont i ponovlennya (EN 378-4:2008+A1:2012, IDT). Na zaminu DSTU EN 378-4:2005; chynnyy vid 2015-07-01. Vyd. Ofits. {in Ukrainian}

5. Allan M., Philippacopoulos A. Thermally conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps. progress report by 1998. New York: Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, NY (United States), 1998. 78 c. URL: https:// doi.org/10.2172/760977 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

6. Ashrae. 2019 ASHRAE Handbook - HVAC Applications. Ashrae, 2019. 1408 p. {in English}

7. Dincer I., Ozturk M. Geothermal energy systems. Elsevier, 2020. 410 p. {in English}

8. Kavanaugh S. Ground and water source heat pumps: a manual for the design and installation of ground-coupled, groundwater, and lake water heating and cooling systems in southern climates. Oklahoma State University. 154 p. {in English}

9. Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C. Heat conduction with engineering, geological, and other applications. *Physics today*. 1955. Т. 8, № 3. С. 17. URL: https://doi.org/10.1063/1.3061951 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

10. Ochsner K. Geothermal heat pumps. A guide for planning and installing. London: Earthscan, 2007. 167 p. {in English}

11. Rafferty K., Kavanaugh S. Ground source heat pumps design of geothermal systems for commercial and institutional buildings (#90376). Amer Society of Heating Refrig. 135 p. {in English}

12. Infinite borehole field model–a new approach to estimate the shallow geothermal potential of urban areas applied to central Budapest, Hungary / K. Korhonen та ін. *Renewable energy*. 2023. URL: https://doi.org/10.1016/ j.renene.2023.03.043 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

13. Tarrad A.H. 3D numerical modeling to evaluate the thermal performance of single and double u-tube ground-coupled heat pump. *High Tech and innovation*

journal. 2022. T. 3, № 2. C.115–129. URL: https://doi.org/10.28991/hij-2022-03-02-01 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

14. Zanchini E., Jahanbin A. Finite-element analysis of the fluid temperature distribution in double U-tube Borehole Heat Exchangers. *Journal of physics: conference series*. 2016. T. 745. C. 032002. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/745/3/032002 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

15. Mazzotti Pallard W., Lazzarotto A. Thermal response tests: a biased parameter estimation procedure? *Geothermics*. 2021. T. 97. C. 102221. URL: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102221 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

16. Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger / M. Yoshioka та ін. *Geothermics*. 2022. T. 102. C. 102390. URL: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102390 (data zvernennya: 17.03. 2024). {in English}

17. VDI 4640 Blatt 1: 2000-12: Thermiche Nutzung des Untergrundes. *Bauphysik*. 2001. T. 23, № 2. C. 115. URL: https://doi.org/10.1002/bapi.200100590 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

18. VDI 4640 Blatt 2 zur Installation von erdge koppelten Wärme pumpen. *Bauphysik*. 2019. T. 41, № 4. C. 198. URL: https://doi.org/10.1002/bapi.201970403 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

19. Jamieson J. C. Heat conduction, with engineering, geological, and other applications. L.R. Ingersoll, O.J. Zobel, A.C. Ingersoll. *The journal of geology*. 1955. T. 63, № 2. C. 196. URL: https://doi.org/10.1086/626247 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}

20. Guernsey E., Betz P., Skau N. Earth as a heat source or storage medium for the heat pump. *Heating, piping & air conditioning*. 1949. Vol. 21. P. 117–122. {in English}

21. Eskilson P., Claesson J. Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical heat transfer*. 1988. T. 13, № 2. C. 149–165. URL: https://doi.org/10.1080/10407788808913609 (data zvernennya: 17.03.2024). {in English}