

УДК 536.24; 536.53

В.В.Величко (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Дослідження закономірностей проникності гірського масиву при заповненні водою вертикальної свердловини

На основі експериментальних досліджень підтверджено тип ґрунтів, що оточують вертикальну свердловину, яка використовується при проведенні досліджень. Оцінено теплофізичні характеристики масиву ґрунту, що оточує вертикальну свердловину. Розроблено схему експериментальної установки для натурних досліджень теплових процесів у верхніх шарах Землі з вертикальними свердловинами. Бібл. 8, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: гірський масив, вертикальна свердловина, інженерно-геологічний елемент, теплофізичні властивості ґрунту.

ORCID: 0000-0001-9979-0994

Вступ. Одним із джерел теплової енергії для теплопостачання приміщень є природна теплота ґрунту. Реалізувати її вилучення та використання можна за допомогою створення вертикальних підземних теплообмінників. Розмір необхідної поверхні теплообмінників та акумулюючі властивості ґрунту залежать від його теплофізичних властивостей, складу та вологовмісту.

Дослідження процесу поширення тепла в середовищі описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

де a – коефіцієнт дифузійного переносу енергії (коефіцієнт температуропровідності), для гірських порід його середнє значення – $0,0118 \text{ м}^2/\text{год}$.

Дослідження закономірностей проникності гірського масиву виконуємо і кількісно визначемо за законом лінійної фільтрації Дарсі:

$$Q = \frac{\kappa}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot F. \quad (2)$$

де Q – загальна витрата рідини, $\text{см}^3/\text{с}$; κ – коефіцієнт проникності, см^2 ; μ – динамічна в'язкість рідини, $\text{дин}\cdot\text{с}/\text{см}^2$; $\Delta p/\Delta l$ – градієнт тиску, $\text{дин}/\text{см}^3$; F – поверхня фільтрації, см^2 .

Характеристики вертикальної свердловини. В результаті інженерно-геологічних дослід-

жень на території Національного ботанічного саду ім. М.М.Гришка НАН України (м. Київ) було пробурено одну свердловину глибиною 20 м. Свердловина була обсаджена обсадною трубою діаметром 219 мм до глибини 19,8 м. Різьбові з'єднання труб загерметизовані силіконом і зверху покриті розплавленим бітумом. Ґрунтові води даною свердловиною розкрито не було.

В геологічній будові товща ґрунтів у межах розвіданої глибини 20 м розділена на три інженерно-геологічні елементи (ІГЕ):

- 1 – насипний ґрунт в інтервалі глибин 0-1 м;
- 2 – супіски пілуваті, лесоподібні, палеовибурі, макропористі, карбонатизовані, потужністю 10,2 м, в інтервалі глибин 1-11,2 м;
- 3 – суглинки легкі, пілуваті, від бурого до сірувато-бурого, твердої та напівтвердої консистенції, із включенням стяжень карбонатів, гальки з прошарками піску, потужністю 8,8 м в інтервалі глибин 11,2-20,0 м.

Виділення в масиві ґрунтів ІГЕ, визначення їх найменування та середні значення показників фізичних властивостей ґрунтів виконано згідно нормативної літератури [1, 2].

На основі трьох зразків проб ґрунту (№1241-1243) зроблено визначення коефіцієнта теплопровідності. При цьому було використано стандартний прилад типу ИТ-λ-400 (вимірювач теплопровідності), призначений для вимірювання

теплопровідності кристалічних та щільних осадових гірничих порід, з яких можна вибурювати зразки циліндричної форми діаметром 15 мм та заввишки 3,5-4 мм [3]. Прилад складається з теплового блоку (блок вимірювальний, блок живлення та регулювання, мікровольт-наноамперметр), який призначений для розміщення зразка для дослідження, задання умов експерименту та отримання первинної вимірювальної інформації. Зовнішній вигляд вимірювача теплопровідності ИТ-λ-400 показано на рис. 1.

Основні технічні характеристики приладу ИТ-λ-400 такі:

- діапазон значень вимірюваних коефіцієнтів теплопровідності: від 0,1 до 5,0 Вт/(м·К);
- межі допустимої основної відносної похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності: ±10%;
- діапазон значень середньої температури зразка: від -100 до +400°C.



Рис. 1. Вимірювач теплопровідності ИТ-λ-400.

Методика, що використовується при дослідженні, дозволяє оцінити величину теплопровідності тільки вологих пластичних суглинків та, можливо, глинистих супісків, які дозволяють сформувати зразки необхідної форми та розмірів.

Фізико-механічні властивості проб ґрунтів, що відібрані при бурінні вертикальної свердловини та визначені при дослідженнях із використанням лабораторного обладнання, наведено в таблицях 1, 2.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості проб ґрунтів

Лабораторний номер проби	Глибина відбору проб ґрунту, м	Найменування ґрунту	Природна вологість <i>W</i> , д.о.*	Густина ґрунту <i>ρ</i> , г/см ³	Порожнистість <i>n</i> , д.о.*	Теплопровідність <i>λ</i> , Вт/(м·К)
ПГЕ - 1						
1234	1,8-2,0	супіски	0,112	1,76	0,407	–
1225	1,6	супіски	0,207	–	–	–
1235	2,2-2,4	супіски	0,123	1,80	0,400	–
1236	5,4-5,6	супіски	0,128	1,83	0,392	–
1226	5,4	супіски	0,127	–	–	–
1237	6,0-6,1	супіски	0,135	1,90	0,373	–
1238	6,4-6,6	супіски	0,128	1,85	0,386	–
1239	9,4-9,5	супіски	0,155	1,98	0,358	–
	середнє		0,139	1,85	0,390	–
	мінімум		0,112	1,76	0,358	–
	максимум		0,207	1,98	0,407	–
ПГЕ - 2						
1227	11,6	суглинки	0,191	–	–	–
1228	12,4	суглинки	0,247	–	–	–
1229	14,0	суглинки	0,171	–	–	–
1230	14,4	суглинки	0,168	–	–	–
1231	16,2	суглинки	0,137	–	–	–
1232	18,9	суглинки	0,143	–	–	–
1233	20,0	суглинки	0,161	–	–	–
1241	12,5-12,7	суглинки	–	–	–	1,31
1242	16,7-16,9	суглинки	–	–	–	1,24
1243	19,8-20,0	суглинки	–	–	–	1,61
	середнє		0,174		–	

* д.о. – доля одиниці.

Таблиця 2. Гранулометричний склад ПГЕ

Гранулометричний склад, %, для частинок, мм								
Лабораторний номер проби	Глибина відбору проб ґрунту, м	валуни	пісок			пил		глина
		1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПГЕ - 1								
1234	1,8-2,0	0,3	0,8	1,0	17,1	65,3	4,6	10,9
1225	1,6	–	–	–	–	–	–	–
1235	2,2-2,4	-	0,1	0,4	21,8	59,5	7,6	10,6
1236	5,4-5,6	0,1	0,6	2,0	20,6	60,8	5,8	10,1
1226	5,4	–	–	–	–	–	–	–
1237	6,0-6,1	0,1	0,4	1,9	18,4	62,8	6,8	9,6
1238	6,4-6,6	0,2	0,7	1,6	22,9	57,8	6,6	10,2
1239	9,4-9,5	0,1	0,3	2,2	31,9	50,3	5,8	9,4
середнє		0,13	0,48	1,52	22,12	59,42	6,2	10,13
мінімум		0,1	0,1	0,4	17,1	50,3	4,6	9,4
максимум		0,3	0,8	2,2	31,9	65,3	7,6	10,9

По кожній пробі виконувалась серія з 5 вимірювань із відбором зразків у різних місцях цієї проби, як у верхній, так і в нижній частинах, а також декілька повторних вимірювань. За літературними даними для глин характерна низька теплопровідність (0,83-1,24 Вт/м·К), для глинистих піщаників – дещо вища (1,24-1,65 Вт/м·К), тобто варіації глинистості є одним із факторів, що обумовлює великий діапазон змін теплопровідності осадових порід [4].

Проведені дослідження дали змогу експериментально встановити характер зміни коефіцієнта теплопровідності реальних ґрунтових масивів у залежності від температури та визначити тип ґрунтів (суглинок).

Породи двох верхніх горизонтів за теплопровідністю майже не відрізняються одна від одної (1,31 та 1,24 Вт/м·К). Самим теплопровідним є нижній горизонт (1,61 Вт/м·К) (див. табл. 1).

Експериментальне заповнення теплоносієм вертикальної свердловини. Дослідження закономірностей проникності гірського масиву

при заповненні водою вертикальної свердловини проводились на установці, яка створена на території Національного ботанічного саду ім. М.М.Гришка НАН України. Ця експериментальна установка для дослідження теплообміну теплоносія з гірським масивом верхніх шарів Землі складається із 7 свердловин глибиною 20 м, термопар, які встановлені на глибинах від 1 до 12 м, системи опитування, контролю та реєстрації сигналів від термопар, системи забезпечення подачі води в свердловину та вимірювання і регулювання витрат води (циркуляційного насоса, трубопроводів, запірно-регулюючої арматури), перетворювача інтерфейсів та персонального комп'ютера (багатоточкової системи вимірювання температур) [5–8].

Схема розміщення дослідної та вимірювальних свердловин та оголовка вертикальної свердловини для заповнення її теплоносієм наведено на рис. 2 та 3, складові елементи установки наведено в таблиці 3.

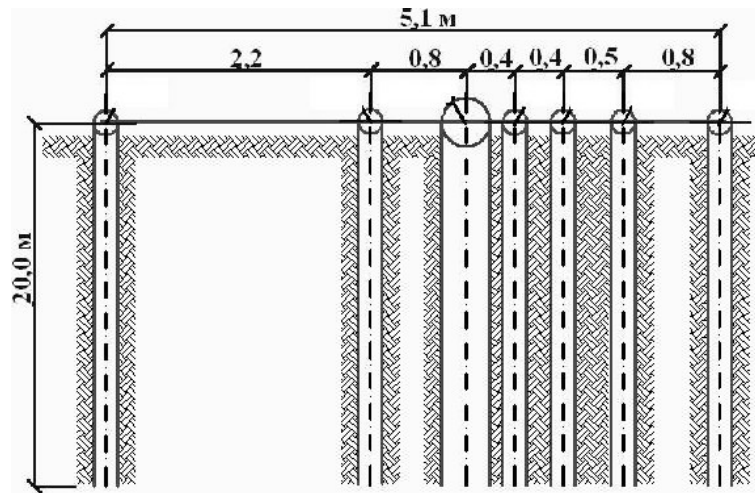


Рис. 2. Схема розміщення дослідної та вимірювальних свердловин.



Рис. 3. Схема оголовка вертикальної свердловини.

Таблиця 3. Складові елементи установки

№ п/п	Назва, тип, марка	Кількість, шт.
1	Лічильник води (витрата теплоносія 2,5 м ³ /год) (GROSS ETR-UA 15/80 для г.в. для вимірювання кількості теплоносія)	1
2	Соляний бойлер (об'єм 500 л, 2 кВт) (Tatramat VTS-500/3)	2
3	Засувка тонкого регулювання потоку теплоносія (Ду = 15 мм)	1
4	Трубопровід поліпропіленовий (PP-R, Ду = 25 мм), довжина одиниці 2 м	3
5	Трубопроводи поліетиленові (ПЕ-100, Ду = 25 мм, стінка 2 мм) прокладено від кімн. 1.1 до вертикальної свердловини та занурено у вертикальну свердловину, довжина одиниці 2 м	20
6	Вертикальна свердловина (глибина 19,80 м, діаметр 219 мм)	1
7	Датчики-термопари (розміщені на 6 контурах навколо вертикальної свердловини та на 7 ярусах за глибиною, розміщені через кожні 2 м до глибини H = 12 м)	39
8	Прилади контролю температури (УКТ-38-Щ4-ТП)	6
9	Адаптер мережі (АС-2 для взаємного перетворення сигналів приладів у вигляді "струмової петлі" та сигналів інтерфейсу RS-232)	1
10	Робоча станція (PC, персональний комп'ютер та програма для автоматичного контролю технологічних процесів, що дозволяє проводити збір, відображення та архів даних, які надходять від приладів ОБЕН на ПК)	1

Схему експериментальної установки для натурних досліджень теплових процесів у верхніх шарах Землі з вертикальними свердловинами наведено на рис. 4. Установка складається з трьох основних компонентів: I – система подачі та регулювання теплоносія; II – вертикальна свердловина з датчиками температури; III – вимірювальний блок.

За цією схемою теплоносії подається у свердловину через трубопроводи від солярного бойлера, вода в якому нагрівається завдяки сонячним колекторам. Забезпечення потрібного теплового та гідравлічного режимів дослідження теплообміну відбувається за допомогою трубчастого електронагрівача (тена) бойлера (2 кВт) та кількісного регулювання засувками тонкого регулювання і байпаса, а витрата теплоносія контролюється за допомогою лічильника.

Необхідність заповнення вертикальної свердловини водою обумовлена проведенням різного

роду досліджень, таких як вимірювання температури гірського масиву на різних глибинах, визначення теплофізичних властивостей гірського масиву і труб вертикальних свердловин, отримання води при потраплянні свердловини у водоносний горизонт.

Дослідження проводилося шляхом закачування носія з баків-акумуляторів (солярних бойлерів) у свердловину №7(В). Початкова температура носія в експерименті була 58°C.

Реєстрація проведення експериментів з дослідження теплових процесів виконувалася в автоматичному режимі за допомогою багатоточкової системи вимірювання температур.

Результати дослідження оброблені в табличній формі та представлені у вигляді експериментальних графіків, які характеризують зміну температури і витрати теплоносія, що закачується в свердловину. Результати проведення закачування теплоносія наведено в таблиці 4 та на рис. 5, 6.

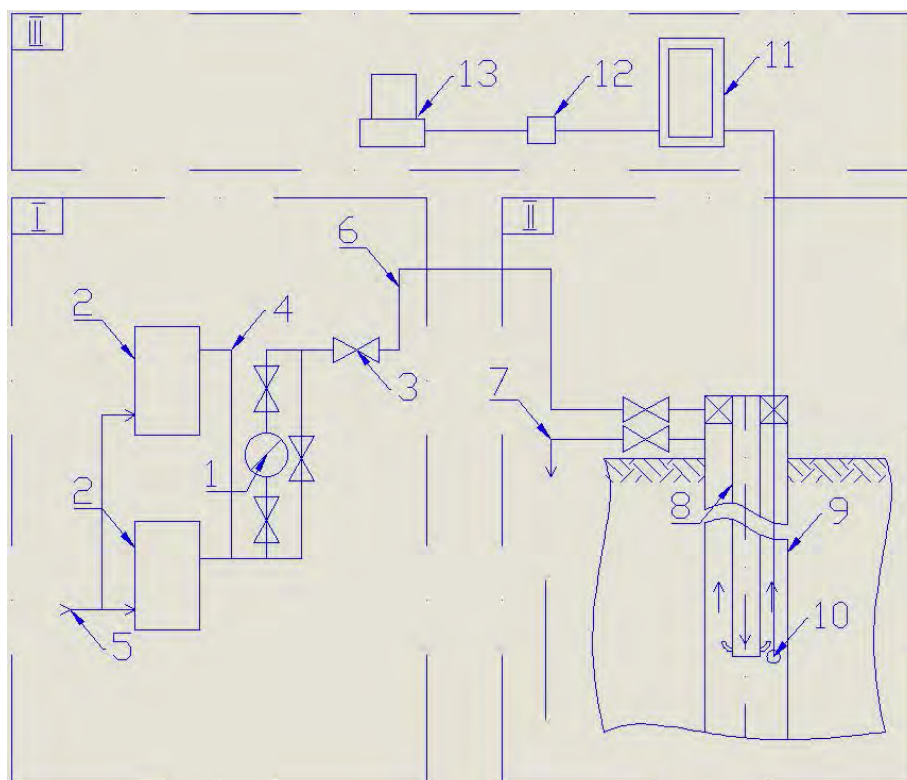


Рис. 4. Схема експериментальної установки для натурних досліджень теплових процесів у верхніх шарах Землі:

1 – лічильник води; 2 – солярний бойлер (№1, №2); 3 – засувка тонкого регулювання носія; 4 – байпас; 5 – трубопровід підживлюючий (холодна вода); 6 – трубопровід до свердловини; 7 – трубопровід від свердловини на дренаж;

8 – трубопровід у свердловині; 9 – вертикальна свердловина; 10 – датчики-термопар;

11 – прилади контролю температури; 12 – адаптер сигналів; 13 – міні-комп'ютер.

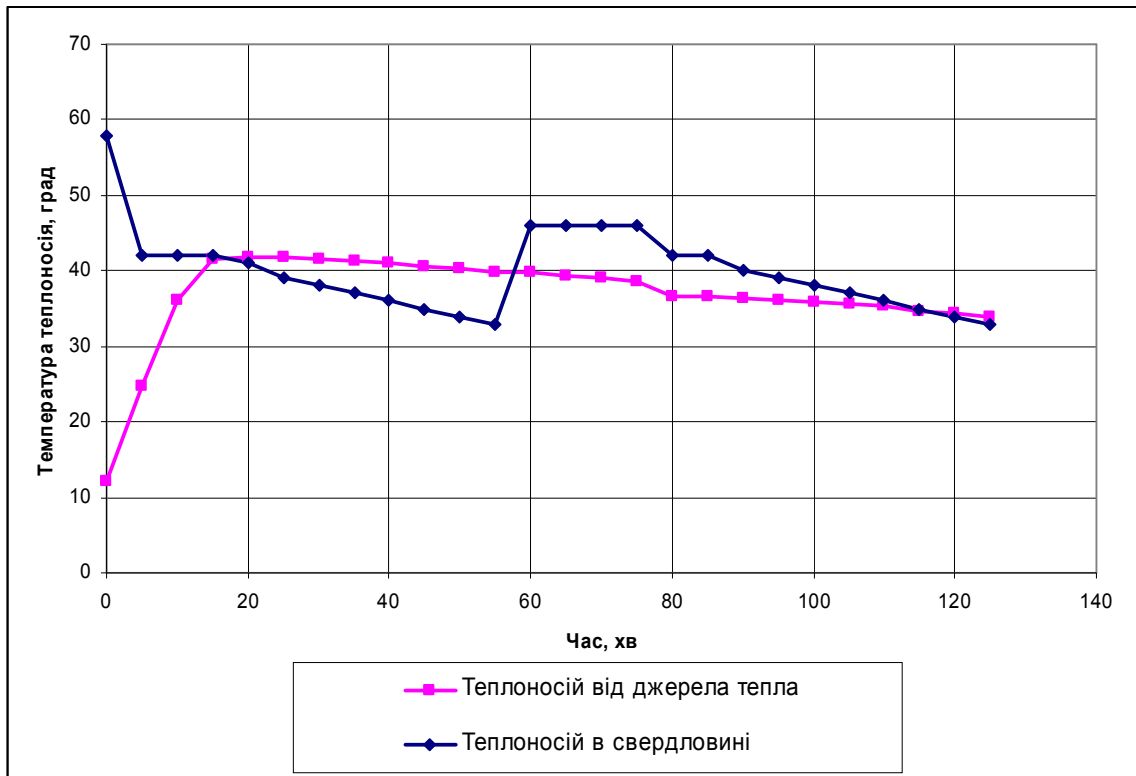


Рис. 5. Температура теплоносія, що закачується в свердловину.

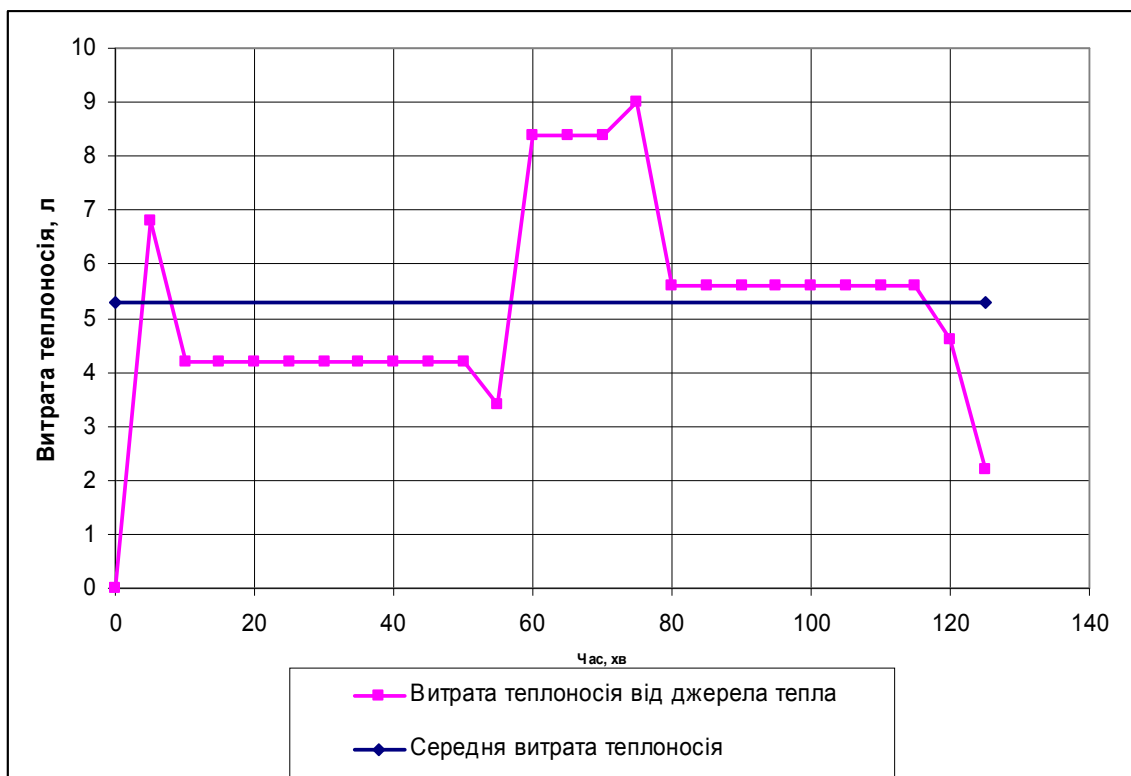


Рис. 6. Витрата теплоносія, що закачується в свердловину.

Таблиця 4. Результати закачування теплоносія у вертикальну свердловину

Час, хв	Витрата за показниками лічильника, м ³		Витрата, л	Швидкість		Температура теплоносія для закачування, °С	Температура теплоносія у свердловині на глибині 12 м, °С
	початок	кінець		л/хв	л/с		
0	3589	3589	0	0	0	58	12,2
5	3589	3623	34	6,8	0,113	42	24,7
10	3623	3644	21	4,2	0,7	42	36,2
15	3644	3665	21	4,2	0,7	42	41,6
20	3665	3686	21	4,2	0,7	41	41,9
25	3686	3707	21	4,2	0,7	39	41,9
30	3707	3728	21	4,2	0,7	38	41,6
35	3728	3749	21	4,2	0,7	37	41,3
40	3749	3770	21	4,2	0,7	36	41
45	3770	3791	21	4,2	0,7	35	40,6
50	3791	3812	21	4,2	0,7	34	40,2
55	3812	3823	11	3,4	0,057	33	39,9
60	3823	3865	42	8,4	0,14	46	39,7
65	3865	3907	42	8,4	0,14	46	39,3
70	3907	3949	42	8,4	0,14	46	39
75	3949	3994	45	9	0,15	46	38,5
80	3994	4022	28	5,6	0,093	42	36,6
85	4022	4050	28	5,6	0,093	42	36,6
90	4050	4078	28	5,6	0,093	40	36,3
95	4078	4106	28	5,6	0,093	39	36,1
100	4106	4134	28	5,6	0,093	38	35,8
105	4134	4162	28	5,6	0,093	37	35,6
110	4162	4190	28	5,6	0,093	36	35,4
115	4190	4218	28	5,6	0,093	35	34,6
120	4218	4241	23	4,6	0,077	34	34,3
125	4241	4252	11	2,2	0,037	33	34
			Σ=663				

Заповнення вертикальної свердловини про- водилось із середнім значенням витрати теплоно- сія 5,3 л/хв протягом інтервалу часу 125 хвилин; загальна витрата теплоносія склала 663 л. В інте- рвалі часу 0-55 хвилин теплоносії подавався від солярного бойлера №1 з початковою температу- рою 58°C у кількості 234 л, а в інтервалі часу 60- 125 хвилин – від солярного бойлера №2 з почат- ковою температурою 46°C у кількості 429 л.

Висновки. 1. На території НБС ім. М.М.Гришка пробурено вертикальну сверд- ловину глибиною 19,8 м та діаметром 219 мм. Пропонується використовувати цю свердловину для вивчення гідродинамічних і теплофізичних

властивостей ґрунту та дослідження вертикаль- них ґрунтових теплообмінників.

2. Експериментально встановлено характер зміни та величину коефіцієнта теплопровідності реальних ґрунтових масивів у залежності від тем- ператури і підтверджено тип ґрунтів – суглинок.

3. Розроблено схему експериментальної уста- новки для дослідження вертикальних свердловин.

4. Проведено експеримент із заповненням свердловини теплоносієм з температурою, фіксо- ваною в часі та за величиною.

5. Плануються наступні етапи досліджень вертикальних свердловин при проектуванні ґрун- тових теплообмінників системи тепло- та холо- допостачання приміщень НБС ім. М.М.Гришка.

1. ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95) "Грунти. Класифікація".
2. ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96) "Грунти. Методи статичної обробки результатів випробувань".
3. Денисова Э.И., Шак А.В. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ-"Лямбда"-400: Методическое руководство к лабораторной работе. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 35 с.
4. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Морозов Ю.П., Величко В.В., Туз В.О., Олійніченко В.Г. Експериментальна установка з дослідження теплових процесів у вертикальних свердловинах в натурних умовах // Відновлювана енергетика. – 2011. – №1(24). – С. 82–88.
6. ГОСТ Р 8.585-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
7. УКТ38 ШЧ4 Устройство для измерения и контроля температуры восьмиканальное. Руководство по эксплуатации.
8. АС-2 Адаптер интерфейса. Руководство по эксплуатации. – М. ОВЕН. – 17 с.

REFERENCES

1. DSTU B V.2.1-2-96 (HOST 25100-95) "Soils. Classification". (Rus)
2. DSTU B V.2.1-5-96 (HOST 20522-96) "Soils. The methods of static processing of test results". (Rus)
3. Denisova E.I., Shak A.V. Measuring thermal conductivity on the meter IT "Lambda"-400: Methodological Guide to laboratory work. – Yekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2005. – 35 p. (Rus)
4. Physical quantities. Directory. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. et al.; Eds. Grigoreva I.S., Meylikhova Ye.Z. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 p. (Rus)
5. Morozov Yu.P., Velychko V.V., Tuz V.O., Oliinichenko V.H. Experimental research installation with thermal processes in vertical wells in natural conditions // Vidnovliuvana enerhetyka. – 2011. – №1(24). – Pp. 82–88. (Ukr)
6. GOST R 8.585-2001 State system for ensuring the uniformity of measurements. Thermocouples. Nominal static characteristics of conversion. (Rus)
7. UKT38 Shch4 The eight-channel device for measuring and controlling the temperature. Manual. (Rus)
8. AS-2 Interface adapter. Manual. – M. OVYEN. – 17 p. (Rus)

В.В.Величко (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Исследования закономерностей проницаемости горного

масива при заполнении водой вертикальной скважины

На основе экспериментальных исследований подтвержден тип грунтов, окружающих вертикальную скважину, используемую при проведении исследований. Проведена оценка теплофизических характеристик массива грунта, окружающего вертикальную скважину. Разработана схема экспериментальной установки для натурных исследований тепловых процессов в верхних слоях Земли с вертикальными скважинами. Библ. 8, табл. 4, рис. 6.

Ключевые слова: горный массив, вертикальная скважина, инженерно-геологический элемент, теплофизические свойства грунта.

Velychko V. (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

Soil massif permeability pattern research at vertical well water fill

On the basis of experimental research confirmed the soil type that surrounding vertical well and used in conducting research. Conducted estimation of soil massif thermophysical characteristics that surrounding vertical well. Scheme of the experimental setup developed for field research of thermal processes in the upper layers of the Earth with vertical wells. *References 8, tables 4, figures 6.*

Keywords: soil massif, vertical well, scientific-geological element, soil thermophysical properties.

SYNOPSIS

One of the common sources of thermal energy is natural heat of the soil. Using this heat can be implemented through the creation of underground soil heat exchangers with the use of vertical wells. The subject of study is research of thermophysical properties in the soil massif that surrounding vertical wells.

In this article is possible to find experimental results of soil massif permeability and thermal conductivity of soil that surrounding vertical well during its filling of heat carrier. Determination of the thermophysical properties of soil massif that surrounding vertical well is necessary for determining the size of soil underground heat exchangers surface.

One part of this work is development of the experimental plant for field research of thermal processes in the upper layers of the Earth with vertical wells. On this plant completed the first stage of research - filling of vertical hole by liquid heat carrier total volume of 663l and at initial temperature of 58 C.

As the heat carrier at filling vertical wells uses water in terms of environmental safety - enters in the aquifer, and in terms of ensuring the following researches

- Temperature measurement of the soil massif at different depths;
- Determination of thermophysical properties of the soil massif and vertical wells pipes.

In conclusion, we see that there is a need for further research of soil massif that surrounding vertical well, with the study of thermal processes at heat carrier motion in the well.

Стаття надійшла до редакції 04.05.16
Остаточна версія 26.05.16