

С. В. Гошовский, д-р техн. наук, профессор, директор, ukrdgri@ukrdgri.gov.ua,
А. В. Зурьян, заведующий отделом инновационных технологий, alexey_zuryan@ukr.net
(Украинский государственный геологоразведочный институт)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛЯНОГО РАСТВОРА В ПРОЦЕССЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ИЗ ВЕРХНИХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ

Разработана методика исследования изменения температуры соляного раствора в теплообменнике вертикальных и горизонтальных скважин в процессе извлечения теплоты из верхних слоев Земли геотермальной системой закрытого типа, а также изменения нагрузки на теплообменник вследствие работы геотермальной системы в режимах, отличных от номинального. Установлены закономерности изменения этих параметров. Определен уровень охлаждения теплоносителя в испарителе и уточнены параметры, от которых зависит оптимальная степень его охлаждения.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, возобновляемые источники энергии, геотермальная система, геотермальный теплообменник, геотермальный зонд, грунтовой коллектор.

Использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ) мировое сообщество рассматривает как один из наиболее перспективных путей решения растущих проблем энергообеспечения.

Одним из видов возобновляемых источников энергии, который уже сегодня в отдельных странах и регионах обеспечивает весомый вклад в обогрев жилого фонда, является тепловая энергия окружающей среды (воды, почвы, воздуха), которая с помощью теплонасосных установок (ТНУ) переводит энергию низкопотенциальных источников в пригодную для использования энергию.

Примерно три четверти необходимой мощности установка берет из окружающей среды, другую часть энергии покрывает электрический ток для работы привода компрессора. В системах, где первичным источником тепловой энергии является аккумулированное почвой тепло, в каче-

стве коллектора используются грунтовые теплообменники, которые могут быть как горизонтальные, так и вертикальные. Тепло приповерхностных слоев Земли до рабочей среды теплового насоса передается смесью воды и антифриза (соляным раствором – рассолом) [5].

Экономическая целесообразность использования ТНУ подтверждена мировым опытом. Однако в Украине технологии, использующие тепло верхних слоев Земли, применяются крайне редко. Данные системы не адаптированы к условиям эксплуатации в климатических условиях Украины и мало изучены научными работниками.

С целью проведения научно-исследовательской работы в этом направлении в Украинском государственном геологоразведочном институте была создана экспериментальная геотермальная установка. Подробно состав комплекса был описан в научном журнале “Минеральные ресурсы Украины” № 2, 2013 г. [6].

При выполнении научно-исследовательской работы изучались закономерности изменения температуры соляного раствора в вертикальном геотермальном теплообменнике и контуре испарителя теплового насоса в процессе извлечения теплоты из верхних слоев Земли геотермальной системой закрытого типа в условиях изменения нагрузки на теплообменник вследствие работы геотермальной системы в режимах, отличных от номинального.

Свойства и энергетическая эффективность тепловых насосов (ТН) значительно изменяются на режимах, отличных от номинального, т. е. при изменении условий использования, определяемых в основном температурами холодного и горячего теплоносителей. Вопрос эффективного использования тепловых насосов на этих режимах, несмотря на его очевидную важность, в литературных источниках освещен недостаточно. Проблема эффективного использования тепловых насосов на режимах, отличных от номинального, является актуальной, поэтому именно в этом направлении выполнена данная работа.

Целью работы было практическое исследование теплотехнических процессов, происходящих в геотермальной системе вследствие изменения нагрузки на теплообменник в режимах работы геотермальной системы, отличных от номинального, а также определение уровня охлаждения теплоносителя в испарителе геотермальной системы и параметров, от которых зависит оптимальная степень его охлаждения.

Разработанная в Украинском государственном геологоразведочном институте методика исследований изменения температур теплоносителя вертикального геотермального теплообменника в процессе извлечения теплоты из верхних слоев Земли и сконструированная экспериментальная геотермальная установка позволили в автоматическом режиме снимать показания с приборов, установленных в наземной и подземной части комплекса, а также создать архив

полученных данных для дальнейшей их интерпретации и обработки компьютерными программами.

В ходе исследовательской работы проводились измерения температур теплоносителя в земляном контуре во время работы геотермальной системы в режимах, отличных от номинального, по всей длине геотермального теплообменника (зонда), на глубине до 50 м с заданным шагом дискретизации.

Также производились измерения параметров в наземной части комплекса: температуры на входе и выходе из испарителя, температуры греющего теплоносителя, подаваемого в систему отопления, температуры окружающей среды, а также расход теплоносителя в контурах испарителя и конденсатора теплонасосной системы.

Эксперимент проводился несколько раз с сохранением выходных параметров системы (температуры горячего теплоносителя и тепловой мощности) при изменении входных параметров экспериментальной установки (температуры соляного раствора на входе в испаритель), которые достигались уменьшением мощности грунтового теплообменника путем изменения его конфигурации.

Изменение конфигурации геотермального теплообменника состояло в том, что за счет конструктивных возможностей экспериментальной геотермальной установки УкрГГРИ во время проведения исследования изменялось как количество задействованных в отборе тепла Земли скважин с геотермальными теплообменниками, так и количество геотермальных теплообменников, смонтированных в скважинах. Эксперимент проводился как в зимний, так и летний периоды года.

В ходе проведения эксперимента в указанный период установочные параметры контура конденсатора в соответствии с методикой проведения эксперимента не менялись. Так, температура греющего теплоносителя в системе низкотемпературного отопления была 45 °С, а гистерезис $\Delta T = 4$ °С (рис. 1).

В то же время принудительно изменялась температура и расход теплоносителя на входе в испаритель и путем изменения конфигурации геотермального теплообменника.

Применяемая методика проведения экспериментов и возможности разработанного в УкрГТРИ программного обеспечения позволили детализировать необходимые для исследования временные интервалы, что дало возможность получить необходимые данные и сделать выводы о наблюдаемых закономерностях. На графиках (рис. 2–4) приведены примеры некоторых временных периодов для разных режимов работы геотермальной системы.

Обобщенные экспериментальные данные, полученные во время работы геотермальной системы в условиях изменения нагрузки для четырех режимов работы (4×2U, 2×2U, 1×2U, 1×1U) геотермального теплообменника при неизменных выходных параметрах системы, а также расчетные данные приведены в таблице.

Анализ всех экспериментально полученных данных в ходе проведения исследования позволяет сделать вывод о том, что оптимальная степень охлаждения теплоносителя зависит в первую очередь от аэродинамических или гидравлических потерь давления в контуре грунтового теплообменника и несущественно зависит от температуры окружающей среды и температуры среды на входе в испаритель. В ходе исследовательской работы была определена оптимальная степень охлаждения теплоносителя, которая равна 2,5 °С.

Экспериментальным путем была определена оптимальная степень охлаждения среды в испарителе теплового насоса, которой соответствуют минимальные суммарные затраты энергии на теплонасосную систему низкотемпературного отопления.

Результаты, полученные экспериментальным путем, свидетельствуют, что при заданной тепловой мощности

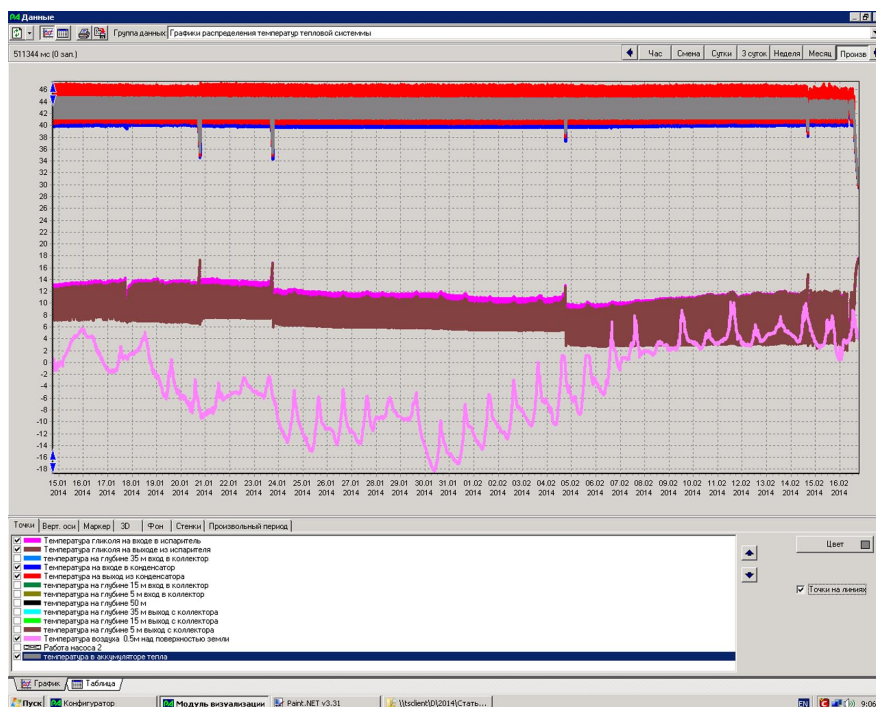


Рис. 1. График изменения температур при проведении эксперимента в контрольных точках геотермальной системы на протяжении тридцати дней зимнего периода (с 15.01 по 16.02.2014 г.)

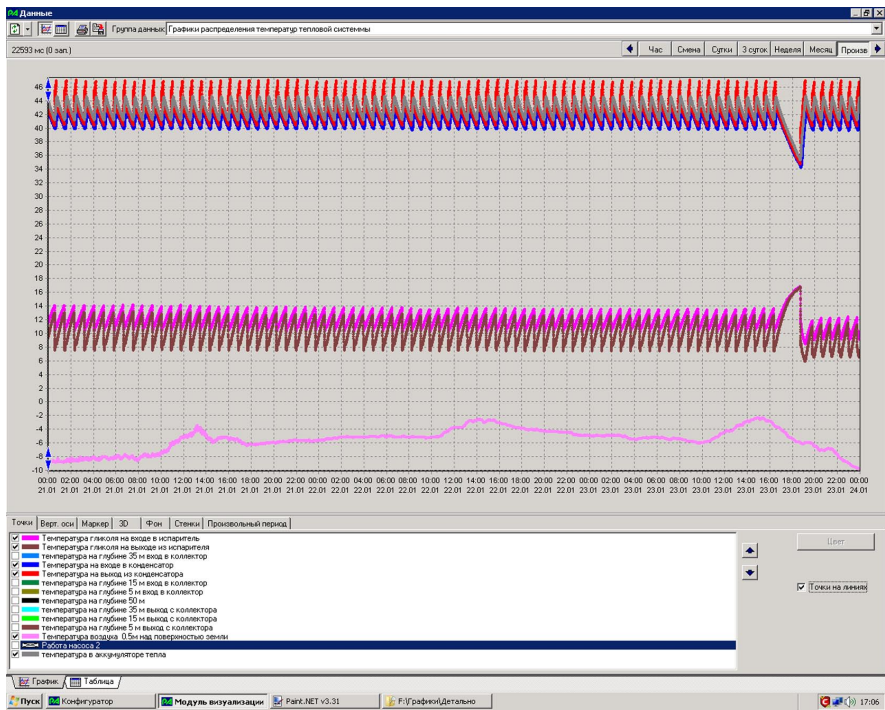


Рис. 2. График температур при работе геотермальной системы в штатном режиме 4x2U на протяжении трех суток (с 21.01–23.01.2014 г.)

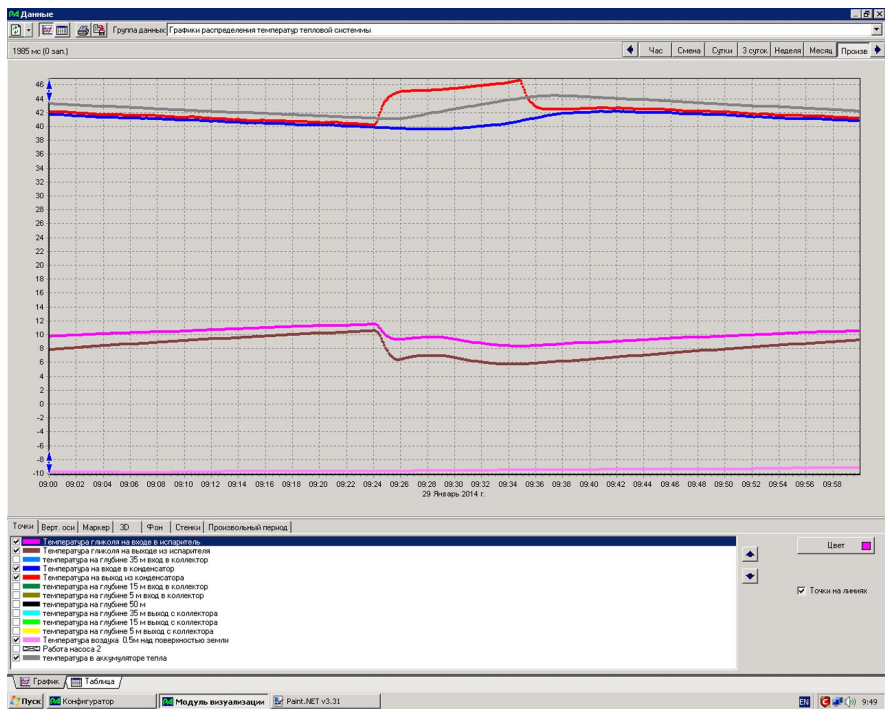


Рис. 3. График температур при работе геотермальной системы в нештатном режиме 2x2U на протяжении одного часа (29.01.2014 г.)

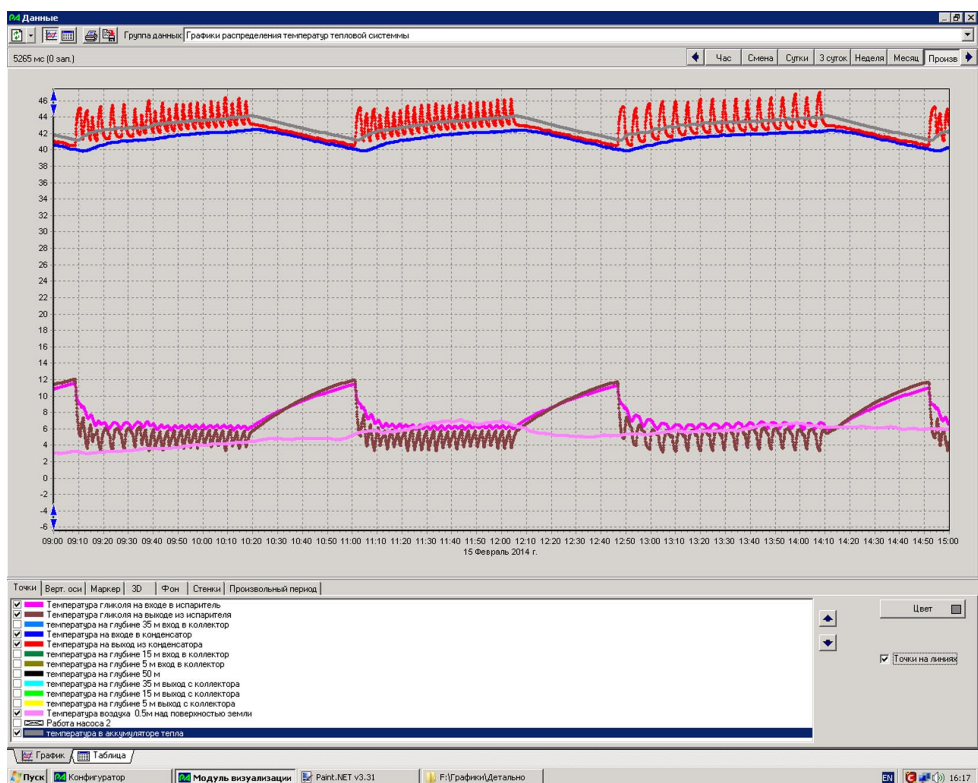


Рис. 4. График температур при работе геотермальной системы в нештатном, аварийном режиме 1×1U на протяжении пяти часов одних суток (15.02.2014 г.)

Таблица. Экспериментально полученные и расчетные данные в ходе проведения исследования

| Режим работы | 4×2U | 2×2U | 1×2U | 1×2U |
|----------------------------|------|------|------|------|
| Параметр | | | | |
| $t_c^{в\text{ых}}$ (°C) | 7,5 | 6,1 | 2,7 | 2,7 |
| $t_c^{вх}$ (°C) | 11 | 8,8 | 5,6 | 6,7 |
| t_T^P (°C) | 45 | 45 | 45 | 45 |
| $\Delta t_{\text{н}}$ (°C) | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 4 |
| Δt_0 (°C) | 6 | 6 | 8 | 1 |
| V (м³/час) | 3 | 2,9 | 2,4 | 1,62 |
| z | 28 | 30 | 27 | |
| Tz (мин) | 10 | 11 | 11 | |
| $Q_{\text{от}}$ (кВт) | 9,4 | 9,26 | 8,27 | 7,9 |

Примечания: $t_c^{в\text{ых}}$ – температура среды на выходе из испарителя; $t_c^{вх}$ – температура среды на входе в испаритель; t_T^P – расчетная температуры греющего теплоносителя; $\Delta t_{\text{н}}$ – разница температур среды и рабочего тела ТН на выходе из испарителя; Δt_0 – изменение температуры окружающей среды за период исследования; $Q_{\text{н}}$ – тепловой поток в испарителе теплового насоса; $Q_{\text{от}}$ – тепловой поток, отведенный от аккумулятора тепла; z – количество включений компрессора за сутки; Tz – время работы компрессора при одном включении; V – расход теплоносителя.

теплового насоса и температуре теплоносителя в системе отопления, которые определяются самим объектом теплоснабжения, температура теплоносителя на выходе из испарителя теплового насоса является неоднозначной. Это обусловлено тем, что количество теплоты, отобранное от Земли в испарителе ТН, зависит от разности температур на входе и выходе из испарителя и расхода теплоносителя.

Возникает вопрос в необходимости чисто аналитического подхода как к интерпретации полученных данных, так и их расчета путем математического моделирования для проверки полученных результатов. При изучении этого вопроса нами было проанализировано ряд научных статей различных авторов [1–3].

Наиболее приемлемым для исследуемого объекта есть математический аппарат [4], где приводится решение задачи определения оптимальной степени охлаждения среды в испарителе теплового насоса математическим путем. Получено

соотношение для определения оптимальной степени охлаждения среды в испарителе теплового насоса:

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{A(273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}})}{\eta_{\text{и}} \eta_{\text{пр}}} \left[\eta_{\text{ТН}} - 1 + \frac{273 + t_{\text{с}}^{\text{вх}} - \Delta t_{\text{и}}}{273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}}} \right]}.$$

Оптимальная степень охлаждения среды в испарителе теплового насоса возрастает с увеличением комплекса заданных величин A (который зависит от аэродинамических или гидравлических потерь давления в контуре испарителя).

На рис. 5 представлены зависимости оптимальной степени охлаждения среды от комплекса заданных величин A при различных значениях температур теплоносителя на входе в испаритель теплового насоса.

Расчеты также показали, что оптимальная степень охлаждения среды практически не зависит от температуры греющего теплоносителя в системе низкотемпературного отопления и температуры окружающей среды [1–3].

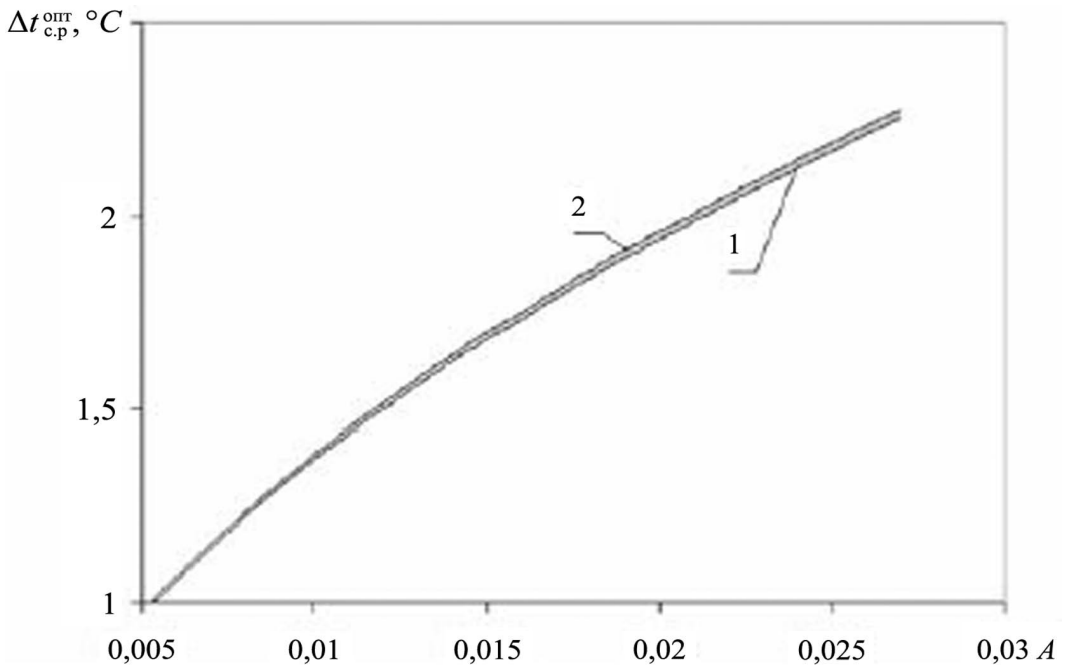


Рис. 5. Зависимость оптимальной степени охлаждения среды в испарителе от комплекса значений величины A : 1, 2 – температура соляного раствора $t_{\text{ср.вх}}=2$ и 5 °C

Выводы

Было практически подтверждено, что при использовании теплоты грунта оптимальная степень охлаждения теплоносителя зависит от аэродинамических или гидравлических потерь давления в контуре грунтового коллектора и слабо зависит от температуры среды на входе в испаритель, от температуры греющего теплоносителя в системе низкотемпературного отопления и температуры окружающей среды.

Результаты работы имеют практическое значение и должны быть учтены уже на стадии проектирования геотермальных систем теплоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродний М. К., Притула Н. А. Про оптимальну роботу ТН в низкотемпературних системах опалення з використанням теплоти зовнішнього повітря//Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2011. – № 3. – С. 26–33.

2. Безродний М. К., Притула Н. А. Про умови оптимальної роботи теплового насоса в низкотемпературних системах опалення з використанням теплоти природної води//Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 2. – С. 11–16.

3. Безродний М. К., Притула Н. А. Оптимальна робота теплового насоса в низкотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунту//Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 1–6.

4. Безродний М. К., Притула Н. А. Об оптимальных условиях работы теплонасосных систем отопления при использовании возобновляемых источников теплоты//Вісник НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 13. – С. 94–103.

5. Гершкович В. Ф. Особенности проектирования систем теплоснабжения зданий с тепловыми насосами. – К.: Украинская академия архитектуры ЧП “Энергоминимум”, 2009. – 60 с.

6. Гошовский С. В., Зурьян А. В. Анализ изменений температур в верхних слоях Земли при решении задач грунтового аккумулирования и извлечения теплоты геотермальными системами закрытого типа//Мінеральні ресурси України. – 2013. – № 2. – С. 41–47.

REFERENCES

1. Bezrodniy M. K., Prytula N. A. About optimum work of Heat Pump in low-temperature heating systems with outside heat air using//Zbirnyk naukovykh prac. – Dnipropetrovsk: Nova ideologija, 2011. – № 3. – P. 26–33. (In Ukrainian).

2. Bezrodniy M. K., Prytula N. A. About optimal work conditions of Heat Pump in low-temperature heating systems with natural water heat using//Enerhetyka: ekonomika, texnologiji, ekolohija. – 2011. – № 2. – P. 11–16. (In Ukrainian).

3. Bezrodniy M. K., Prytula N. A. Optimal work of Heat Pump in low-temperature heating systems with ground heat using//Naukovi visti NTUU “KPI”. – 2012. – № 1. – P. 1–6. (In Ukrainian).

4. Bezrodniy M. K., Prytula N. A. About optimal work conditions of heat pump in heating systems with renewable heat using//Visnyk NTU “XPI”. – 2013. – № 13. (In Ukrainian).

5. Gerkovich V. F. Design features of heating systems in buildings with heat pumps. K.: Ukraynskaja akademyja arxytekturi “Enerhotynum”, 2009. – 60 p. (In Russian).

6. Goshovskiy S. V., Zur'jan A. V. Temperature changes analysis in the upper layers of Earth when solving problems of soil storage and heat retrieval by closed type geothermal systems// Mineral'nye resursy Ukrainy. – 2013. – № 2. – P. 41–47. (In Russian).

Рукопис отримано 11.11.2014.

С. В. Гошовський, д-р техн. наук, професор, директор, ukrdgr1@ukrdgri.gov.ua,

О. В. Зур'ян, завідувач відділу інноваційних технологій, alexey_zuryan@ukr.net

(Український державний геологорозвідувальний інститут)

АНАЛІЗ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ СОЛЯНОГО РОЗЧИНУ В ПРОЦЕСІ ВИЛУЧЕННЯ ТЕПЛОТИ З ВЕРХНІХ ШАРІВ ЗЕМЛІ

Розроблено методика дослідження зміни температури соляного розчину в теплообміннику вертикальних і горизонтальних свердловин у процесі вилучення теплоты з верхніх шарів Землі геотермальною системою закритого типу. а також зміни навантаження на теплообмінник унаслідок роботи геотермальної системи в режимах, відмінних від но-

мінального. Виявлено закономірності зміни цих параметрів. Визначено рівень охолодження теплоносія у випарнику та уточнено параметри, від яких залежить оптимальний ступінь його охолодження.

Ключові слова: альтернативна енергетика, відновлювані джерела енергії, геотермальна система, геотермальний теплообмінник, геотермальний зонд, ґрунтовий колектор.

S. V. Goshovskiy, Dr. of engineering sciences, Professor, Director, ukrdgri@ukrdgri.gov.ua,

A. V. Zurian, department head of innovative technologies, alexey_zuryan@ukr.net

(Ukrainian State Geological Research Institute)

IMPACT ANALYSIS OF BRINE TEMPERATURE IN THE PROCESS OF EXTRACT HEAT FROM THE HIGHER SLICE GROUND

Developed test procedure of variations of temperature brine in the vertical geothermal heat exchanger and vaporizer contour circuit of the heat pump in the process of extract heat from the higher slice ground by geothermal system of closed type in the context of changing load on the heat exchanger by work of geothermal system in modes other than the indicated. Defined cooling level of heat exchanger in vaporizer of geothermal system and specified parameters, from which depend up the optimal degree of cooling.

Economic feasibility of use of heatpumping installations is confirmed with world experience. However in Ukraine the technologies, that use warmly top layers of Earth, are applied extremely seldom. These systems aren't adapted for service in climatic conditions of Ukraine and are little studied. For the purpose of carrying out research work in this direction at the Ukrainian State Geological Research Institute was created experimental geothermal installation. The structure of a complex was described in the scientific magazine "Mineral Resources of Ukraine" № 2.2013.

Properties and power efficiency of the thermal pump considerably change on the modes differing from nominal that is at change of the conditions of use, that are defined temperatures of cold and hot heat carriers. The efficient use of heat pumps in these regimes despite his obvious importance, is described in the literature not enough. The problem of effective use of thermal pumps on the modes, differing from nominal, is actual. In this direction work is performed.

The objective of work was practical probes of the heattechnical processes happening in geothermal system owing to change of load of the heat exchanger in modes of behavior differing from nominal. Determination of level of cooling of the heat carrier in the evaporator of geothermal system and parameters that determine the optimal degree of cooling. During research work measurements of temperatures of the heat carrier in an earth circuit in working hours of geothermal system in the modes differing from nominal, on all length of the geothermal heat exchanger (Probe), at a depth up to 50 meters with a predetermined sampling interval.

Also measurements of parameters in land part of a complex were performed: temperatures on an entrance and an exit from the evaporator, temperature of the heating heat carrier of the heating given to system, ambient temperature, and also a heat carrier expense in circuits of the evaporator and condenser of heatpumping system of sampling. Forcibly temperature and an expense of the heat carrier on an entrance to the evaporator and by change of a configuration of the geothermal heat exchanger changed. The applied technique of carrying out experiments and possibilities of the software developed at UkrSGRI allowed to detail time intervals, necessary for probe.

It allowed to obtain necessary data and to draw conclusions on observed regularities, namely that optimum extent of cooling of the heat carrier depends first of all on aerodynamic or hydraulic losses of pressure in a circuit of the soil heat exchanger. And insignificantly depends on ambient temperature and temperature of the environment on an entrance to the evaporator.

Optimum extent of cooling of the environment in which evaporator of the thermal pump was experimentally defined there correspond the minimum total costs of energy of heatpumping system of low-temperature heating.

Keywords: alternative energy, renewable energy source, geothermal system, a geothermal heat exchanger, geothermal probe, ground collector.