



УДК 621.548:620.92:624.13

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРИТОКА ГОРНОГО МАССИВА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ*

Ю.П. Морозов

Институт возобновляемой энергетики, Национальная академия наук Украины
д. 20А, ул. Г. Хоткевича, Киев, 02094, Украина
тел./факс: +38(044)206-28-09; e-mail: geotherm@ukr.net

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.044-050

Заключение совета рецензентов: 06.06.18 Заключение совета экспертов: 15.06.18 Принято к публикации: 21.06.18

На основании решения задачи нестационарного теплообмена при движении жидкости в подземных проницаемых слоях получена зависимость для определения времени работы геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) в режиме постоянной и падающей температуры. Установлено, что при толщине пласта $H < 4$ м влияние теплопритоков при $\theta = 0,99$ и $\theta = 0,5$ практически одинаковое, но при толщине пласта $H > 5$ м влияние теплопритоков существенно зависит от температуры. При толщине проницаемого пласта $H > 20$ м теплоприток при $\theta = 0,99$ практически не влияет на тепловые процессы в проницаемом пласте, однако при $\theta = 0,5$ теплоприток в зависимости от скорости движения может составлять от 50 % до 90 %. Только при $H > 50$ м влияние теплопритока значительно уменьшается и составляет, в зависимости от скорости фильтрации, от 50 % до 10 %.

Установлено, что тепловое воздействие горного массива при толщине проницаемого слоя более 10 м, расстояние между контуром нагнетания и эксплуатации, а также скорость движения теплоносителя практически не влияют на определение времени работы ГЦС в режиме постоянной температуры.

Определено, что во время работы ГЦС при безразмерной температуре теплоносителя $\theta = 0,5$ существенной является скорость движения теплоносителя. При увеличении скорости движения теплоносителя в два раза погрешность изменяется в 1,5 раза.

Ключевые слова: неизотермическая фильтрация; геотермальная циркуляционная система; подземный проницаемый пласт; горный массив; температура теплоносителя.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT OF MOUNTAIN MASSIVE ON TEMPERATURE MODE OF GEOTHERMAL CIRCULATION SYSTEM

Yu.P. Morozov

Institute of Renewable Energy of NASU
20A G.Khotkevych St., Kiev, 20294, Ukraine
tel./fax: +38 044 206 28 09, e-mail: geotherm@ukr.net

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.044-050

Referred 6 June 2018 Received in revised form 15 June 2018 Accepted 21 June 2018

Based on the solution of the problem of non-stationary heat transfer during fluid motion in underground permeable layers, dependence was obtained to determine the operating time of the geothermal circulation system in the regime of constant and falling temperatures. It has been established that for a thickness of the layer $H < 4$ m, the influ-

*Морозов Ю.П. Влияние теплопритока горного массива на температурный режим геотермальной циркуляционной системы // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;25-30:44-50.



ence of heat influxes at $\theta = 0.99$ and $\theta = 0.5$ is practically the same, but for a thickness of the layer $H > 5$ m, the influence of heat inflows depends significantly on temperature. At a thickness of the permeable formation $H > 20$ m, the heat transfer at $\theta = 0.99$ has virtually no effect on the thermal processes in the permeable formation, but at $\theta = 0.5$ the heat influx, depending on the speed of movement, can be from 50 to 90%. Only at $H > 50$ m, the effect of heat influx significantly decreases and amounts, depending on the filtration rate, from 50 to 10%.

The thermal effect of the rock mass with its thickness of more than 10 m, the distance between the discharge circuit and operation, as well as the speed of the coolant have almost no effect on the determination of the operating time of the GCS in constant temperature mode.

During operation of the GCS at a dimensionless coolant temperature $\theta = 0.5$, the velocity of the coolant is significant. With an increase in the speed of the coolant in two times, the error changes by 1.5 times.

Keywords: non-isothermal filtration; geothermal circulation system; underground permeable reservoir; mountain massif; coolant temperature.



Юрий Петрович Морозов
Yurii Morozov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом геотермальной энергетики Института возобновляемой энергетики НАН Украины.

Образование: Национальный технический университет «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского» (1970 г.).

Область научных интересов: возобновляемая энергетика; геотермальная энергетика; использование тепла окружающей среды

Публикации: более 198.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Senior Researcher, Head of Geothermal Energy Department of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 1970.

Research interests: renewable energy; geothermal energy; use of warm environment.

Publications: more than 198.

1. Введение

Одной из современных тенденций развития геотермальной энергетики является аккумуляция теплоты в подземных проницаемых слоях [1, 2, 3, 4, 5–9]. За счет такого аккумуляции возможно создание сезонных аккумуляторов теплоты, которые можно использовать, например, при сооружении солнечных отопительных систем. Избыточное тепло в межотопительный сезон (лето и часть весны и осени) применяется для нагрева воды, которая закачивается в подземные проницаемые слои и затем в отопительный сезон используется непосредственно для отопления или отопления с помощью тепловых насосов.

Серьезная проблема подземного аккумуляции – оценка потерь теплоты, неизбежных при закач-

ке нагретой воды в подземные слои, в которых значение начальной температуры ниже значения температуры закачиваемой воды. Именно от потерь теплоты зависит целесообразность осуществления аккумуляции в подземных слоях.

Задачей настоящего исследования является оценка потерь теплоты в результате теплообмена с подстилающим и покрывающим проницаемый подземный пласт горным массивом.

Впервые предложена оценка влияния теплового потока горного массива путем определения отношения времени работы ГЦС в определенном температурном режиме при расчете теплового потока от горного массива к сумме этого теплового потока и теплоты подземного проницаемого пласта.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
λ	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
τ	Время, с
θ	Безразмерная температура
ω	Скорость, м/с
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
a	Коэффициент температуропроводности, м ² /с
C	Объемная удельная теплоемкость, Дж/м ³ ·К
F	Удельная поверхность, м ¹
H	Толщина пласта, м
h	Половина толщины пласта, м
K	Коэффициент, м/с
m	Пористость, м ³ /м ³
Q	Количество теплоты, Дж
R	Расстояние между контуром нагнетания и эксплуатации, м

T	Температура, К
t	Температура, С°
<u>Буквы русского алфавита</u>	
Ф	Интеграл вероятности, erf
<u>Индексы верхние</u>	
зак	Закачивание
<u>Индексы нижние</u>	
в	Вода
ж	Жидкость
жн	Жидкостная начальная
м	Горный массив
пл.	Подземный проницаемый слой
пм	Суммарно пластовая и массива
пн	Пластовая начальная
ск	Скважина
ф	Фильтрация
ч	Частицы скелета пласта
<u>Аббревиатуры</u>	
ГЦС	Геотермальная циркуляционная система

2. Теоретический анализ

В геотермальных циркуляционных системах нагрев закачиваемого в пласт теплоносителя происходит в основном за счет тепла частиц породы, образующих проницаемый пласт, и теплопритока от окружающего пласт непроницаемого горного массива.

Подземный проницаемый слой (коллектор) представляет собой пористую среду, состоящую из частиц или блоков породы, которые под действием горного давления плотно прилегают друг к другу, образуя непрерывную структуру (сцементированную, уплотненную), называемую скелетом пласта.

Поры подземного пласта бывают, как правило, водонасыщенными или содержат другой флюид, так что пласт представляет собой двухфазную систему, состоящую из скелета пласта (твердая фаза) и жидкости, которая полностью заполняет все пустоты пласта.

Передача теплоты в пласте происходит от частицы к частице через жидкость, заполняющую поры между частицами породы и через контакты между ними, что обуславливает эффективный характер коэффициента теплопроводности пласта.

Некоторые исследователи [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16–19] обосновали следующие принятые нами допущения:

1. Проницаемый слой и непроницаемая оболочка однородные и изотропны.
2. Физические свойства жидкости, проницаемого слоя и горного массива не зависят от температуры [20].
3. Движение жидкости по сечению пласта равномерное.
4. Интенсивность теплопритоков от подстилающих и покрывающих пород окружающего проницаемый пласт горного массива одинакова.
5. Жидкость равномерно обтекает все частицы породы и полностью заполняет поры.

Процесс выравнивания температур между твердыми и жидкими компонентами пласта происходит мгновенно.

Процесс теплообмена в проницаемом пласте и окружающем горном массиве происходит без учета передачи тепла теплопроводностью в горизонтальном направлении. Теплопроводность пласта в вертикальном направлении считается бесконечно большой (схема Ловерье [10, 21, 22]).

Необходимо оценить влияние теплопритоков от непроницаемого горного массива на температурное поле жидкости, которая движется в проницаемом пласте, путем сравнения времени действия на заданном расстоянии и заранее определенном значении температуры решения соответствующих задач с учетом теплопритока от окружающего проницаемый пласт горного массива и значения температуры этой же проницаемой зоны, полученной для условий отсутствия теплопритоков.

Количество теплоты, которое можно извлечь из подземного аккумулятора теплоты Q^n на первой стадии имеет температуру, которая равняется начальной температуре теплоносителя или температуре скелета пласта, и на стадии понижающейся температуры теплоносителя, которая определяется тепловым действием окружающего пласт горного массива Q_m

$$Q^n = Q_{пл}^{зак} + Q_m, \quad (1)$$

где $Q_{пл}^{зак}$ – количество теплоты, которая аккумулируется подземными проницаемыми слоями, Дж; Q_m – количество теплоты окружающего горного массива, Дж.

Координаты расчетной модели, радиус скважины и толщина подземного проницаемого пласта приведены на рис. 1.



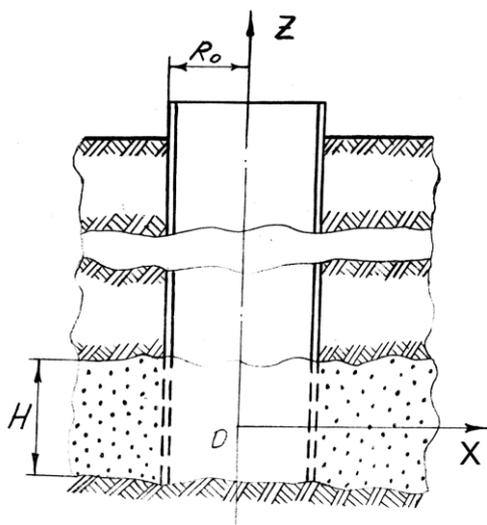


Рис. 1 – Схема пространственно-параллельной фильтрации теплоносителя
 Fig. 1 – Scheme of spatially parallel filtration of the heat transfer agent

где a_m – коэффициент температуропроводности горного массива, m^2/c ; λ_m – коэффициент теплопроводности горного массива, $Вт/м·К$; h – половина толщины пласта, $м$; $C_{пл}$ – объемная удельная теплоемкость пласта, $Дж/м^3·К$; m – пористость, $м^3/м^3$; $C_ж$ – объемная удельная теплоемкость жидкости, $Дж/м^3·К$; ω_ϕ – скорость фильтрации, $м/с$; C_ψ – объемная удельная теплоемкость частиц скелета пласта, $Дж/м^3·К$; $t_{пл}$ – температура пласта, $К$; t_m – температура горного массива, $К$; τ – время, $с$; $\lambda_{пл}$ – коэффициент теплопроводности пласта, $Вт/м·К$; θ – безразмерная температура; K_ϕ – коэффициент фильтрации, $м/с$; F_0 – удельная поверхность, $м^{-1}$; ω_d – скорость, $м/с$; C_m – объемная удельная теплоемкость горного массива, $Дж/м^3·К$; R – расстояние между контуром нагнетания и эксплуатации, $м$.

На основании (2) можно записать:

$$\tau_{пм} = \frac{\lambda_m \cdot C_m \cdot R^2}{4\Phi^2 \cdot \omega_\psi^2 \cdot m^2 \cdot C_\psi \cdot h^2} + \frac{C_{ск}}{m \cdot C_\psi} \cdot \frac{R}{\omega_\psi}, \quad (3)$$

где Φ – интеграл вероятности, erf .

Уравнение (3) демонстрирует, что время нагрева или охлаждения теплоносителя при его движении в подземных проницаемых слоях состоит из суммы, где первое слагаемое зависит только от параметров, которые характеризуют проницаемый пласт и окружающий его горный массив, а второе слагаемое зависит только от теплофизических свойств проницаемого пласта и времени.

На основании (3) можем записать:

$$\tau_{пм} = \tau_m + \tau_\psi. \quad (4)$$

Определение влияния градиента температуры по высоте подземного проницаемого пласта на тепловые показатели ГЦС осуществляется путем сравнения решений задач. Одним из основных показателей работы ГЦС является срок ее работы в постоянном температурном режиме (T_n), то есть до начала понижения температуры теплоносителя в подъемной скважине ($0 \div 0,999$).

3. Экспериментальная часть

На рис. 2 показаны расчеты влияния теплового потока горного массива на время работы ГЦС до момента понижения температуры теплоносителя $\theta = 0,99$, что определяется отношением времени работы ГЦС за счет теплового потока от горного массива к сумме этого теплового потока и теплоты подземного проницаемого пласта в зависимости от скорости движения теплоносителя и расстояния между нагнетательной и добывающей скважинами [23].

Учитывая перечисленные допущения, процесс теплообмена в декартовых координатах описывается следующей системой дифференциальных уравнений, начальными и граничными условиями [11, 21]:

$$\frac{\partial^2 t_m}{\partial z^2} - \frac{1}{a_m} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = 0, \quad z > 0, \quad x > 0, \quad \tau > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\lambda_m}{h} \frac{\partial t_m}{\partial z} = C_{пл} \frac{\partial t_{пл}}{\partial \tau} + m C_{ж} \omega_\phi \frac{\partial t_{пл}}{\partial x}, \quad z = 0, \quad x > 0, \quad \tau > 0,$$

$$C_{пл} = C_\psi (1 - m) + C_ж \cdot m,$$

$$t_{пл} = t_m \text{ при } \tau = 0,$$

$$\left. \frac{\partial t_{пл}}{\partial Z} \right|_{Z=0} = 0,$$

$$\lambda_{пл} \frac{\partial t_{пл}}{\partial Z} = \lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial Z} \text{ при } Z = h,$$

$$\theta = erf \frac{K_\omega X}{2\sqrt{F_0 - K_\omega K_c X}},$$

$$\theta = \frac{t - t_{жн}}{t_{пн} - t_{жн}}, \quad F_0 = \frac{a_m \cdot \tau}{h^2},$$

$$K_\omega = \frac{\lambda_m}{h \omega_d C_\psi}, \quad X = \frac{x}{h}, \quad K_c = \frac{C_{пл}}{C_m},$$



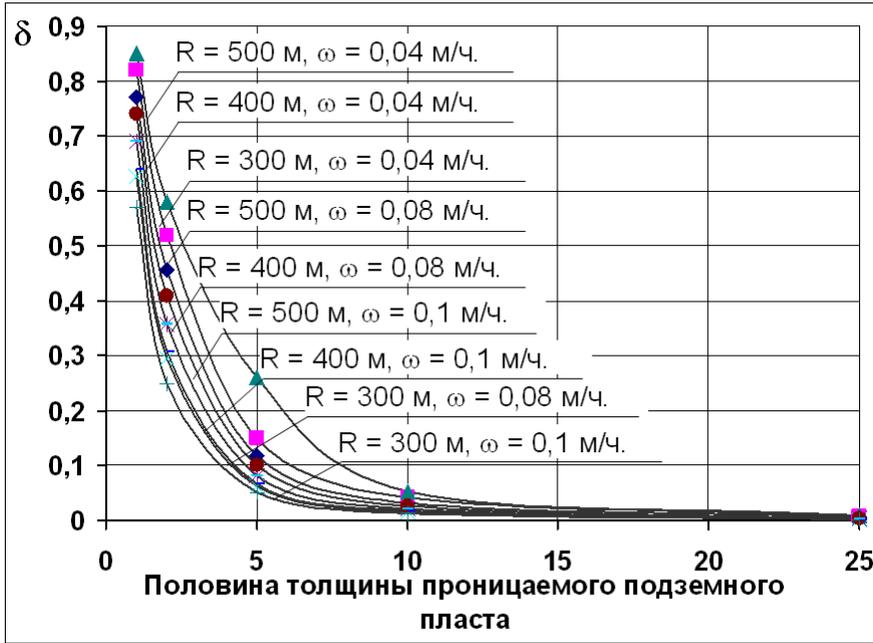


Рис. 2 – Зависимость ошибки в определении времени работы ГЦС при $\theta = 0,99$ при действии теплового потока от горного массива
Fig. 2 – Dependence of the error in determining the operating time of the geothermal circulation system at $\theta = 0,99$ under the action of the heat flux from the mountain massif

На рис. 2 $\delta = \frac{\tau_m}{\tau_m + \tau_{\text{п}}}$, где τ_m – время работы ГЦС

за счет теплового потока от горного массива, $\theta = 0,99$; $\tau_{\text{п}}$ – время работы ГЦС с использованием теплоты подземного коллектора, момент понижения температуры теплоносителя $\theta = 0,99$

Полученные результаты указывают на то, что тепловое действие горного массива на время работы ГЦС в постоянном тепловом режиме проявляется, когда толщина проницаемого пласта составляет меньше 10 м, и при толщине меньше чем 4 м тепловое влияние гор-

ного массива превышает ($\delta > 0,5$) тепловую составляющую подземного проницаемого пласта.

Следует отметить, что тепловое воздействие горного массива при толщине проницаемого слоя более 10 м, расстояние между контуром нагнетания и эксплуатации, а также скорость движения теплоносителя практически не влияют на определение времени работы ГЦС в режиме постоянной температуры.

На рис. 3 приведены результаты расчетов влияния теплового потока горного массива на время работы ГЦС, когда безразмерная температура $\theta = 0,5$.

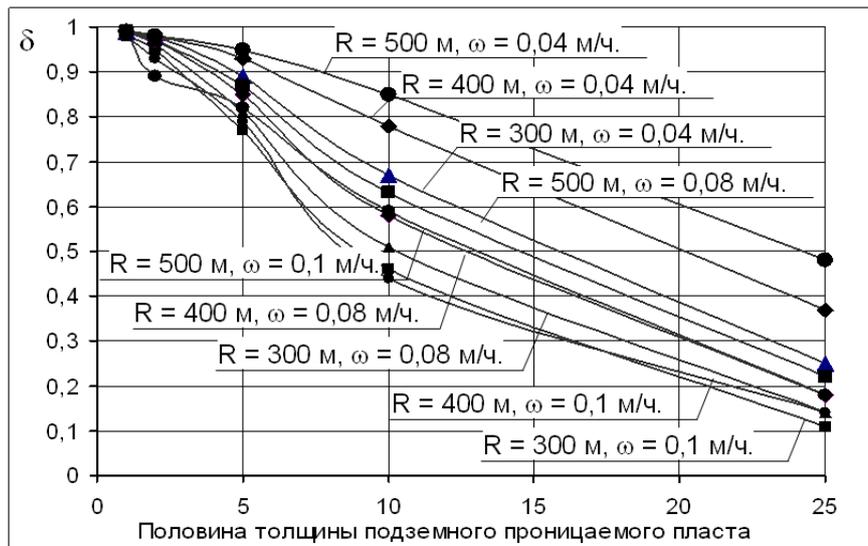


Рис. 3 – Зависимость погрешности в определении времени работы ГЦС при $\theta = 0,5$ при действии теплового потока от горного массива
Fig. 3 – Dependence of the error in determining the operating time of the geothermal circulation system at $\theta = 0,5$ under the action of the heat flux from the mountain massif

Это определяется соотношением времени работы ГЦС за счет действия теплового потока горного мас-

сива к сумме времени действия этого теплового потока и действия теплоты подземного проницаемого пласта.



4. Результаты и их обсуждение

Сопоставление графиков рис. 2 и 3 показывает, что при толщине пласта $H < 4$ м влияние теплопритоков при $\theta = 0,99$ и $\theta = 0,5$ практически одинаковое, но при толщине пласта $H > 5$ м влияние теплопритоков существенно зависит от температуры. При толщине проницаемого пласта $H > 20$ м теплоприток при $\theta = 0,99$ практически не влияет на тепловые процессы в проницаемом пласте, но при $\theta = 0,5$ теплоприток в зависимости от скорости движения может составлять от 50 % до 90 %. Только при $H > 50$ м влияние теплопритока значительно уменьшается и составляет, в зависимости от скорости фильтрации, от 50 % до 10 %.

На графике рис. 3 видно, что во время работы ГЦС при безразмерной температуре теплоносителя $\theta = 0,5$ существенной является скорость движения теплоносителя. При увеличении скорости движения теплоносителя в два раза погрешность изменяется в 1,5 раза.

5. Заключение

Теоретические расчеты показали, что аккумуляторы теплоты в подземных проницаемых слоях существенно зависят от толщины пласта. Потери теплоты в проницаемых слоях толщиной больше 8 м составляют меньше 10 % от начальной энтальпии закачиваемого теплоносителя.

Список литературы

- [1] Дядькин, Ю.Д. Геотермальная теплофизика / Ю.Д. Дядькин, С.Г. Гендлер, Н.Н. Смирнова. – С.-Петербург: Наука, 1993. – 256 с.
- [2] Дворов, И.М. Геотермальная энергетика / И.М. Дворов. – М.: Наука, 1976. – 191 с.
- [3] Levarsen, A.I. Geology of Petroleum / A.I. Levarsen. – San-Francisco, 1958. – 234 p.
- [4] Долинский, А. А. Процессы фильтрации геотермального теплоносителя в пористом слое / А.А. Долинский [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2009. – № 5. – С. 69 – 75.
- [5] Накорчевский, А.И. Теоретические и прикладные аспекты грунтового аккумуляирования и извлечения теплоты / А.И. Накорчевский – К.: Наукова думка, 2008. – 150 с.
- [6] Шетлце, С. Аккумуляция тепловой энергии в водоносных горизонтах. Устройство и практическое применение / С. Шетлце [и др.]; пер. с англ под ред. канд. техн. наук В.Р. Котлера. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
- [7] Богуславский, Э. И. Освоение тепловой энергии недр / Э.И. Богуславский. – М.: Спутник, 2018. – 448 с.
- [8] Томаров, Г.В. Геотермальная энергетика / Г.В. Томаров [и др.]. – М.: Теплоэнергетик, 2015. – 303 с.

[9] Бутузов, В.А. Геотермальное энергосбережение южного региона России. Ресурсы, использование, перспективы / В.А. Бутузов, Г.В. Томаров. – Saar-Brucken. Deutschland: Lambert Academie Publishing, 2012.

[10] Чекалюк, Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б. Чекалюк – М.: Недра, 1965. – 238 с.

[11] Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1964. – 488 с.

[12] Curtis, R. Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity / R. Curtis [et al.] // Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April 2005. – P. 175 – 177.

[13] Щербань, А.Н. Доброе дыхание Земли / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев // Известия. – 1963. – № 125. – С. 3.

[14] Лялько, В.И. Исследование процессов переноса тепла и вещества в земной коре / В.И. Лялько, М.М. Митник. – К.: Наукова думка, 1978. – 152 с.

[15] Рубинштейн, Л.И. Температурные поля в нефтяных пластах / Л.И. Рубинштейн – М.: Недра, 1972. – 276 с.

[16] Желтов, Ю. П. Механика нефтегазонасного пласта / Ю. П. Желтов – Москва.: Недра, 1975. – 216 с.

[17] Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р.И. Нигматулин – М.: Наука, 1978. – 336 с.

[18] Майдебор, В.Н. Влияние изменения температуры на пористость и проницаемость трещинной и пористой сред. Разработка нефтяных месторождений с трещинными коллекторами / В.Н. Майдебор – М.: Недра, 1967. – С. 94 – 97.

[19] Пыхачев, Г.Б. Подземная гидравлика / Г.Б. Пыхачев. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 387 с.

[20] Алхасов, А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии / А.Б. Алхасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с. – ISBN 978-5-9221-0976-5.

[21] Lauwerier, H. A. The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid / H.A. Lauwerier // Applied Scientific Research. – 1955. – Sec. A, Vol. 5, № 2. – P. 145 – 150.

[22] Справочник по специальным функциям. – М.: Издательство «Наука», Главная редакция физ.-мат. литературы, 1979 г. – 832 с.

[23] Морозов, Ю.П. Добыча геотермальных ресурсов и аккумуляция в подземных горизонтах / Ю.П. Морозов. – К.: Наукова думка, 2017. – 197 с.

References

- [1] Dyadkin Yu.D., Gendler S.G., Smirnova N.N. Geothermal Thermal Physics (Geotermal'naya teplofizika). St. Petersburg: Science, 1993; 256 p. (in Russ.).



- [2] Dvorov I.M. Geothermal energy (Geotermal'naya energetika). Moscow: Nauka, 1976; 191 p. (in Russ.).
- [3] Levarsen A.I. Geology of Petroleum. San Francisco, 1958; 234 p.
- [4] Dolinsky A.A., Basok B.I., Avramenko A.A., et al. Processes of filtration of a geothermal heat carrier in a porous layer (Protsessy fil'tratsii geotermal'nogo teplonosatelya v poristom sloye). *Industrial heat engineering*, 2009;(5):69–75. (in Russ.).
- [5] Nakorchevsky A.I. Theoretical and applied aspects of soil accumulation and heat recovery (Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty gruntovogo akumulirovaniya i izvlecheniya teploty). Kiev: Naukova Dumka Publ., 2008; 150 p. (in Russ.).
- [6] Sheletz S., Brett S., Grabbes D., Sepponen M. Storage of thermal energy in aquifers. The device and practical application (Akkumulirovaniye teplovoy energii v vodonosnykh gorizontakh. Ustroystvo i prakticheskoye primeneniye). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984; 208 p. (in Russ.).
- [7] Boguslavsky E.I. The development of thermal energy of the subsoil (Osvoyeniye teplovoy energii nedr). Moscow: Sputnik Publ., 2018; 448 p. (in Russ.).
- [8] Tomarov G.V., Nikolsky A.I., Semenov V.N., Shchipkov A.A. Geothermal energy (Geotermal'naya energetika). Moscow: Teploenergetik Publ., 2015; 303 p. (in Russ.).
- [9] Butuzov V.A., Tomarov G.V. Geothermal energy saving in the southern region of Russia. Resources, usage, perspectives (Geotermal'noye energosberezheniye yuzhnogo regiona Rossii. Resursy, ispol'zovaniye, perspektivy). Saar-Brucken. Deutschland: Lambert Academie Publishing, 2012 (in Russ.).
- [10] Chekalyuk E.B. Thermodynamics of the oil reservoir (Termodinamika neftyanogo plasta). Moscow: Nedra, 1965; 238 p. (in Russ.).
- [11] Karslou G., Eger D. Thermal Conductivity of Solids (Teploprovodnost' tverdykh tel). Moscow: Science, Editorial Board of Physical and Mathematical Literature, 1964; 488 p. (in Russ.).
- [12] Curtis R., Lund J., Sanner B., Rybach L. Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005; P. 175–177.
- [13] Shcherban A.N., Kremnev O.A. Good Breath of the Earth (Dobroye dykhaniye Zemli). *Izvestia*, 1963, no. 125, p. 3 (in Russ.).
- [14] Lyalko V.I., Mitnyk M.M. Investigation of the processes of transfer of heat and matter in the earth's crust (Issledovaniye protsessov perenosa tepla i veshchestva v zemnoy kore). Kiev: Scientific Opinion, 1978; 152 p. (in Russ.).
- [15] Rubinstein L.I. Temperature fields in oil reservoirs (Temperaturnyye polya v neftyanykh plastakh). Moscow: Nedra, 1972; 276 p. (in Russ.).
- [16] Zheltov Yu.P. Mechanics of oil and gas reservoir (Mekhanika neftegazonosnogo plasta). Moscow: Nedra, 1975; 216 p. (in Russ.).
- [17] Nigmatulin R.I. Fundamentals of Mechanics of heterogeneous media (Osnovy mekhaniki geterogennykh sred). Moscow: Nauka, 1978; 336 p. (in Russ.).
- [18] Maydebor V.N. Influence of temperature change on porosity and permeability of cracked and porous media. Development of oilfields with fractal collectors (Vliyaniye izmeneniya temperatury na poristost' i pronitsayemost' treshchinnoy i poristoy sred. Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy s treshchinnyimi kollektorami). Moscow: Nedra, 1967; pp. 94–97 (in Russ.).
- [19] Pychachev G.B. Underground Hydraulics (Podzemnaya gidravlika). Moscow: Gostoptechizdat Publ., 1961; 387 p. (in Russ.).
- [20] Alkhasov A.B. Geothermal energy: problems, resources, technologies (Geotermal'naya energetika: problemy, resursy, tekhnologii). Moscow: FIZMATLIT, 2008, 376 pp.; ISBN 978-5-9221-0976-5 (in Russ.).
- [21] Lauwerier H.A. The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid. *Applied Scientific Research*, 1955;5(2):145–150.
- [22] Handbook of special functions (Spravochnik po spetsial'nyim funktsiyam). Moscow: "Science" Publishing House, Main edition of Phys. -Mat. Literature, 1979; 832 p. (in Russ.).
- [23] Morozov Yu.P. Extraction of geothermal resources and accumulation in underground horizons (Dobycha geotermal'nykh resursov i akumulirovaniye v podzemnykh gorizontakh). Kiev: Scientific Opinion, 2017; 197 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

