

УДК 62–67

DOI 10.21661/r-116850

В.В. Беккер, С.В. Григорьев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОСКВАЖИННОЙ СИСТЕМЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НЕДР ПРИ ЕЁ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация: в статье рассматривается эффективность односкважинной системы съема глубинной тепловой энергии недр Земли. Приведена классификация нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Представлено описание температурного режима недр на территории России, введено понятие «снижение температурного потенциала недр» при использовании односкважинной системы съема. В работе приведены результаты расчетно-параметрического исследования односкважинной системы съема и извлечения глубинной тепловой энергии недр Земли.

Ключевые слова: петротермальный источник энергии, снижение температурного потенциала, односкважинная система съема, глубинная тепловая энергия недр Земли.

V. V. Bekker, S. V. Grigoriev

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF SINGLE-WELL HEAT EXCHANGER ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR ITS LONG-TERM OPERATION

Abstract: the paper deals with the effectiveness of the single well heat exchanger for extraction of deep heat energy of the bowels of the Earth. The classification of renewable sources of energy is presented. The authors describe the subsurface temperature regime on the territory of Russia and give definition to the concept of temperature reduction because of the use of the single well heat exchanger. The results of computational and parametric study of the single well heat exchanger are presented.

Keywords: *petrothermal energy source, temperature reduction, single well system, deep heat of the Earth.*

На сегодняшний день все большее внимание уделяется возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) с целью использования их для эффективного тепло- и электроснабжения автономных и обособленных потребителей. На сегодняшний день используются следующие виды ВИЭ: энергию биомассы, энергию ветра, солнечную энергию, энергию приливов океанов и морей, энергию малых рек, геотермальную энергию [1]. Классификация возобновляемых источников энергии приведена в таблице 1.

Таблица 1

Классификация возобновляемых источников энергии

<i>Источники первичной энергии</i>	<i>Естественное преобразование энергии</i>	<i>Техническое преобразование энергии</i>
Земля	Парогидротермальные ресурсы	Геотермальная электростанция
	Петротермальные ресурсы	Петротермальная электростанция
Солнце	Испарение атмосферных осадков	Гидроэлектростанции (напорные и свободнопоточные)
	Движение атмосферного воздуха	Ветроэнергетические установки
	Морские течения	Морские электростанции
	Движение волн	Волновые электростанции
	Таяние льдов	Ледниковые электростанции
	Фотосинтез	Электростанции на биомассе
		Фотоэлектричество
Планеты	Приливы и отливы	Приливные электростанции

Но наибольшим техническим и экономическим потенциалом среди возобновляемых источников энергии обладает глубинная энергия Земли – теплота, содержащаяся в твердых породах недр. Известно, что основными характеристиками, описывающими тепловое состояние недр, являются: геотермический градиент, теплопроводность, теплоемкость и плотность пород недр.

К тепловым характеристикам глубинных пород, обуславливающим тепловой потенциал, относятся теплопроводность, тепловое сопротивление, теплоемкость и температуропроводность. Основной характеристикой, описывающей тепловое состояние недр, является геотермический градиент температур

Γ , °C/100 м или К/м – обозначает увеличение температуры пород с увеличением глубины и определяется по представленному ниже выражению 1:

$$\Gamma = \frac{dT}{dZ}, \quad (1)$$

где: T – температура, К, Z – глубина, м.

Геотермический градиент колеблется в значительных пределах и зависит от ряда причин: теплопроводности, характера залегания и состава горных пород. В среднем для осадочных пород геотермический градиент принимается равным 3°C/100 м, а в действительности на территории России он колеблется от 2 до 5°C/100 м [2].

Наиболее высокие геотермические градиенты наблюдаются в районах вулканической активности, а в среднем на территории России значение геотермического градиента находится в диапазоне от 2 до 5°C/100 м. Так, например, на глубине 5000 м температура пород недр может достигать 250°C.

Геотермический градиент и тепловой поток из недр формируют температурное поле пород недр Земли – совокупность мгновенных значений температуры пород во всех точках изучаемого пространства для каждого момента времени. В геологической практике встречаются два вида температурных полей: стационарные и нестационарные [3]. Стационарным называют температурное поле, в каждой точке которого значение температуры остается неизменной во времени и является функцией только координаты. Нестационарным является поле, температура которого изменяется во времени. Также виды температурного поля недр можно классифицировать следующим образом:

– нормальное температурное поле, которое сформировано естественным путем и отражает, как правило, особенности геологического строения конкретной местности;

– идеальное температурное поле, которое могло бы возникнуть в однородных изотропных горных породах, в которых отсутствуют внутренние источники теплоты;

– нарушенное температурное поле, которое, как правило, формируется в регионах вулканической активности.

На большей части территории России преобладает нормальное температурное поле пород недр, что выражается в равномерном изменении температуры пород с увеличением глубины.

Извлечение тепловой энергии недр возможно с использованием следующих способов:

– «открытого», который заключается в создании многоскважинной открытой системы съема теплоты, представляющей собой несколько опускных и подъемных скважин, объединенных общим глубинным коллектором, образованным в результате гидравлического разрыва пласта;

– «закрытого» – с использованием односкважинного теплообменного аппарата типа «труба в трубе».

Скважинный теплообменник представляет собой два коаксиальных цилиндра. Промежуточный теплоноситель опускается по межтрубному кольцевому пространству теплообменника и отбирает теплоту от окружающей горной породы, а далее в нагретом состоянии поднимается по внутренней теплоизолированной колонне. С целью предотвращения обратного оттока теплоты, наружная поверхность внутренней подъемной трубы теплоизолирована. Внешняя труба крепится к стволу скважины теплопроводным тампонажным материалом (специальным бетоном). Конструкция системы представлена на рис. 1 [4].

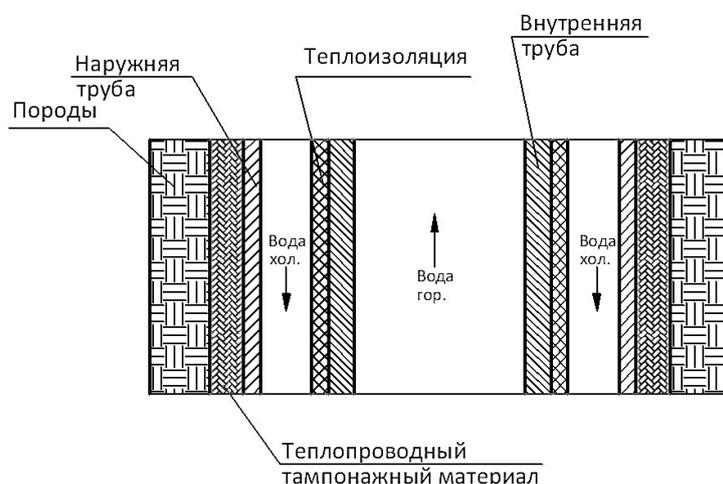


Рис. 1. Схема конструкции односкважинной системы съема

Существует несколько методик расчета односкважинной системы съема и транспортировки глубинной тепловой энергии Земли [5–6]. В методике [5] описан способ определения температуры теплоносителя на выходе из односкважинной системы, однако принято допущение об идеальной тепловой изоляции коаксиальной трубы, т.е. не учитывается остывание теплоносителя при его движении по коаксиальной трубе из забоя скважины. Ввиду значительной протяженности системы данное допущение вносит погрешность в расчет температуры на выходе из скважины. Наиболее полное математическое описание процесса нагрева жидкости при ее движении по односкважинной системе представлено в методике [6].

Процесс передачи теплоты происходит от горной породы за обсадной цементной колонной с ее естественной температурой к нагнетаемой холодной воде. При малых расходах вода успевает согреться до температуры горной породы на забое, при больших расходах вода прогревается на меньшее значение. Тепловая изоляция внешней поверхности колонны труб, по которой поднимается вода, осуществляется в виде слоя достаточной толщины, покрытого тонкой пластиковой трубой. При длительной эксплуатации таких систем наблюдается снижение температуры с стенки односкважинной системы съема, вследствие захлаживания околоскважинных пород недр Земли, что проявляется в установлении нового температурного поля вокруг односкважинной системы с течением времени [7–8]. Данный процесс определяется радиусом температурного влияния R , измеряемым в метрах, и который фактически показывает расстояние от поверхности односкважинной системы съема до координаты, где температура пород недр соответствует своему нормальному естественному значению.

В кольцевой зазор теплоносителю поступает два потока теплоты: от горячих недр Земли и из внутренней подъемной трубы от нагретого теплоносителя. Нагрев теплоносителя определяется первым тепловым потоком, который можно найти по приведенному ниже выражению 2.

$$q_{недр} = \frac{\pi \cdot (T_n(z) - T_g(z))}{R_{пород} + R_{т.б.} + R_{обс.кол.} + R_{\alpha 1}}, \quad (2)$$

где $T_{п}(z)$ – температура пород на глубине Z , м; $T_{в}(Z)$ – температура теплоносителя в кольцевом зазоре на глубине Z , м; $R_{пород}$ – линейное термическое сопротивление пород недр, м*К/Вт; $R_{т.б.}$ – линейное термическое сопротивление тампонажного камня, м*К/Вт; $R_{обс.кол.}$ – линейное термическое сопротивление стенки наружной (обсадной) трубы, м*К/Вт; $R_{\alpha 1}$ – термическое сопротивление теплоотдачи от внутренней поверхности обсадной трубы к теплоносителю в кольцевом зазоре отнесенное к внутреннему диаметру обсадной колонны труб, м*К/Вт.

Второй тепловой поток, поступающий в кольцевой зазор на глубине Z от горячего теплоносителя, движущегося по внутренней подъемной трубе определяется: температурой горячего теплоносителя, термическим сопротивлением теплоотдачи от наружной поверхности внутренней трубы и от внутренней поверхности подъемной трубы теплоносителю в кольцевом зазоре, термическими сопротивлениями тепловой изоляции и стенки внутренней трубы.

Числитель выражения 2 является полным линейным термическим сопротивлением теплопередачи из пород недр теплоносителю, величина которого фактически определяется температурным фронтом, который распространяется радиально от оси односкважинной системы съема. Причем известно, что термическое сопротивление является обратной величиной коэффициенту теплопередачи, который для толщи пород недр можно определить по выражению 3.

$$k_n = \frac{1}{R_{пород}} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_c}\right)} \quad (3)$$

где: λ_n – коэффициент теплопроводности пород недр, Вт/м*К; R – радиус температурного влияния односкважинной системы, м; r_c – наружный диаметр обсадной колонны труб, м.

Анализ выражения 3 показывает, что коэффициент теплопередачи из объема пород недр в кольцевой зазор снижается при распространении температурного фронта радиусом R от ствола скважины. Причем при достижении величины

80 м (что по предварительным оценкам соответствует 40 годам эксплуатации системы) дальнейшее снижение значения коэффициента теплопередачи незначительно.

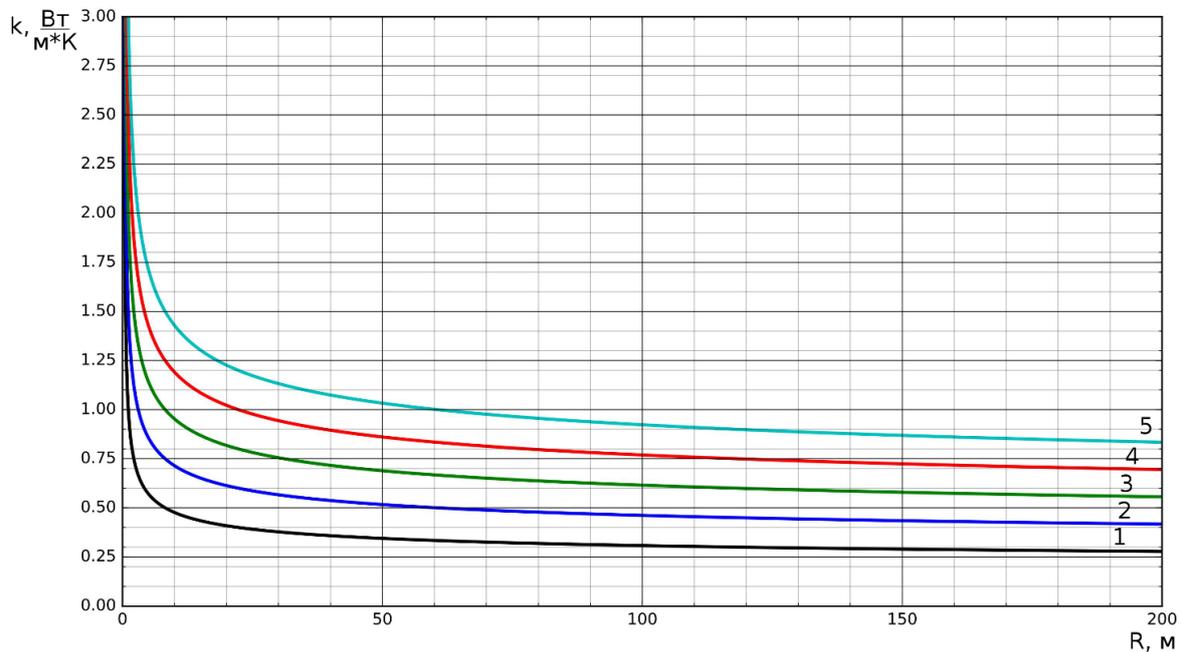


Рис. 2 – Изменение коэффициента теплопередачи из пород недр теплоносителю в кольцевом зазоре. 1 – $\lambda_{п} = 1,0$ Вт/м*К, 2 – $\lambda_{п} = 1,5$ Вт/м*К, 3 – $\lambda_{п} = 2,0$ Вт/м*К, 4 – $\lambda_{п} = 2,5$ Вт/м*К, 5 – $\lambda_{п} = 3,0$ Вт/м*К

Основываясь на выражении 2 было проведено расчетно-параметрическое исследование изменения температуры теплоносителя на выходе из односкважинной системы съема при распространении температурного фронта R вплоть до 80 м.

В качестве исходных данных для определения тепловой мощности односкважинной системы съема были приняты следующие геометрические параметры односкважинной системы: наружный диаметр внешней обсадной стальной трубы – 273 мм, толщина стенки обсадной трубы – 7,1 мм, наружный диаметр коаксиальной внутренней стальной трубы – 114 мм, и толщина стенки коаксиальной трубы 10 мм, глубина забоя скважин составляла от 3000 до 7000 м. Геотермический градиент составляет 4 °С/100 м, теплопроводность пород недр $2,5$ Вт/м*К.

Проведенное расчетно-параметрическое исследование выявило, что при увеличении радиуса температурного влияния до 80 м происходит снижение температуры теплоносителя на выходе из односкважинной системы съема в среднем на 17–22% по сравнению с начальным периодом эксплуатации системы съема. При этом тепловая мощность снижается в среднем на 37%, что должно быть учтено при создании таких систем.

Как видно из вышесказанного при длительном функционировании односкважинной системы съема происходит снижение температурного потенциала теплоносителя и тепловой мощности источника. Однако даже с учетом темпов снижения тепловой мощности использование только уже существующих пробуренных и неиспользуемых скважин на территории России позволит обеспечить эффективное энергоснабжение географически соседствующих потребителей на длительный срок.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Приказ Минобрнауки России о назначении стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2015–2017 годы от 10 марта 2015 года №184).

Список литературы

1. Гнатусь Н.А. Использование петротермального (глубинного) тепла Земли для энергоснабжения автономных потребителей / Н.А. Гнатусь, В.А. Рыженков, А.В. Мартынов, Н.Е. Кутько, С.В. Григорьев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – №3. – С. 23–27.
2. Darrell L. Gallup. Production engineering in geothermal technology // Geothermics. – Vol. 38. – 2009. – P. 326–334.
3. Фролов Н.М. Гидрогеотермия. – 2-е изд-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 280 с.

4. Рыженков В.А. Использование глубинного тепла Земли для энергоснабжения обособленных и удаленных потребителей / В.А. Рыженков, А.В. Куршаков, И.П. Анахов, А.В. Мартынов, С.В. Григорьев // Энергетик. – 2012. – №5. – С. 29–32.

5. Никитенко В.А. Однотрубный геотермальный теплообменник / В.А. Никитенко, А.В. Мотулевич // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докладов XII МНТК студентов и аспирантов. В 3-х т. Т. 2. – М.: МЭИ, 2006. – С. 475.

6. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика. – Физматлит, 2012. – 256 с.

7. Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах / Г.П. Васильев, Н.В. Шилкин // АВОК. – №2. – 2003. – С. 52–61.

8. Rybach L. Sustainability aspects of geothermal heat pump operation, with experience from Switzerland / L. Rybach, W. Eugster // Geothermics. – Volume 39. – Issue 4. – 2010. – P. 365–369.

Беккер Владимир Викторович – аспирант ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.

Bekker Vladimir Viktorovich – postgraduate FSFEI of HE “National Research University “MPEI”, Russia, Moscow.

Григорьев Сергей Владимирович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.

Grigoriev Sergey Vladimirovich – candidate of technical sciences, senior researcher FSFEI of HE “National Research University “MPEI”, Russia, Moscow.
