DOI 10.25689/NP.2018.2.122-134
УДК 620.92

ОБ ОДНОМ ИЗ СПОСОБОВ ДОБЫЧИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Габдрахманова К.Ф., Измайлова Г.Р., Ларин П.А.
Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Октябрьском

ON ONE OF THE WAYS OF GEOTHERMAL ENERGY PRODUCTION

Gabdrakhmanova K.F., Izmailova G.R., Larin P.A.
Ufa State Petroleum Technical University, Oktyabrsky branch

E-mail:gulena-86@mail.ru

Аннотация. В статье приводится короткий обзор о состоянии геотермальной энергетики во всем мире. На сегодняшний день тепло, получаемое с недр Земли в геотермальных станциях, используется во многих странах, в качестве электроэнергии или тепловой энергии. Огромный потенциал тепла Земли раскрывает перспективу развития данного вида энергии во многих отраслях. По этой причине возникает необходимость развития теоретических исследований в данной области. Одним из способов добычи геотермальной энергии, рассмотренных в данной статье, является способ нагрева жидкости в двухтрубной одноствольной скважине. Вода закачивается в межтрубное пространство между НКТ и обсадной колонной. Двигаясь вниз к забою, жидкость нагревается от стенки обсадной колонны за счет конвективной и кондуктивной теплопроводности, которая граничит с окружающими породами. Тепло к окружающим породам поступает с недр Земли. Поток тепла в среднем равен 50 мВт/м^2, может различаться в зависимости от региона. Нагретая уже к забою вода поднимается обратно к поверхности через НКТ. Чтобы минимизировать потери тепла при подъеме, НКТ должна быть изготовлена из теплоизоляционного материала.

В работе приведена математическая модель нагрева жидкости в скважине за счет кондуктивного переноса тепла от окружающих скважину пород. Рассматриваются различные глубины скважин, геотермические градиенты пород и скорость движения жидкости по трубе. На основании построенных графиков зависимости температуры жидкости на выходе от времени, скорости закачки, глубины скважины, температурного градиента сделан вывод о прогнозировании использования данного метода в конкретном регионе.

Приведены графики распределения температурного поля вокруг скважины в различные моменты времени, по которым можно судить о динамике «остывания» грунта за счет кондуктивного переноса тепла к скважине.

Сделаны соответствующие выводы о возможности использования данного метода съема геотермальной энергии в различных регионах.

Ключевые слова: *теплообмен, геотермический градиент, нейтральный слой, теплопроводность, температурное поле.*

Abstract. This paper reviews the state of geothermal energy sector in the world. Today, geothermal heat generated at geothermal stations is used in many countries as electric or thermal energy. Huge potential of geothermal heat provides prospects for further development of this kind of energy in many industries. This entails the necessity in theoretical studies.

One of the ways of geothermal energy production discussed in this paper is heating of liquid in a two-string well. Water is injected into the tubing-casing annulus. When moving downward, water is heated by the casing string walls due to convection and conduction. Heat from the earth depths is transferred to the surrounding rock. Average heat stream is 50 mW/m^2 varying from region to region. Heated water goes to the surface via the tubing string. The tubing string should be heat-insulated to minimize heat losses.

This paper presents mathematical model of water heating in a wellbore due to conductive transfer of heat from the surrounding rock. Various well depths, rock temperature gradients and rates of flow are discussed. Based on diagrams of outlet liquid temperature vs time, injection rate, and temperature gradient, application of this technology in a certain region has been analyzed.

This paper also presents temperature patterns near the wellbore at various time points, which can be used to analyze rock cooling due to conductive transfer of heat to the wellbore.

Conclusions have been drawn concerning the possibility of using this method to capture geothermal energy in various regions.

Key words: *heat transfer, geothermal gradient, neutral layer, heat conductivity, temperature pattern*

Введение

Идея применения геотермальной энергии в последние годы получила широкое распространение во многих странах, в основном, из-за роста цен на привычные виды нам топлива (нефть, газ). Кроме того, по экспертным прогнозам, ожидается снижение темпа добычи органического топлива во всем мире. Интенсивное извлечение невозобновляемых энергоресурсов из недр, по мнению независимых европейских энергетических агентств [1], может привести уже через несколько десятков лет к резкому падению энергетического потенциала углеводородов. Между тем, сжигание ископаемого топлива несет основную ответственность за загрязнение окружающей среды, как дым, глобальное потепление и загрязнение воздуха. По мере роста спроса на энергию, вопрос охраны окружающей среды становится проблемой, которая требует быстрого решения. Использование возобновляемой энергии считается действительным способом решения проблем энергетики и окружающей среды. Итак, в последние годы растет интерес к использованию возобновляемых и

экологически чистых энергетических ресурсов, таких как солнечная энергия, энергия ветра, геотермальная энергия и энергия приливов и т. д. Среди этих энергий геотермальная энергия находит свои преимущества в долгосрочной стабильности, более высокой доступности, более высоким техническим потенциалом и экономически выгодным [2].

Энергия Земли, заключенная в недрах, огромна по величине, по этой причине возникает необходимость развития теоретических исследований в области геотермальных технологий. В отличие от других низкотемпературных возобновляемых источников энергии источник, базирующийся на использовании петротермального (глубинного) тепла Земли, стабилен во времени и не зависит от климатических и территориальных факторов. Для организации съема тепла и производства тепловой и электрической энергии в этом случае не требуется значительных территорий, поэтому петротермальная теплоэнергостанция может быть построена даже в центре энергодефицитного мегаполиса. Экологическим преимуществом такого рода источников является отсутствие необходимости добывать, перерабатывать, транспортировать и сжигать топливо. Если учитывать отсутствие экологического ущерба в качестве экономической составляющей в себестоимости производства энергии, то использование для этой цели глубинного тепла оказывается конкурентоспособным в сравнении с традиционными способами получения энергии.

В современных условиях есть реальная возможность практически повсеместно использовать тепло недр Земли для решения проблем энергообеспечения удаленных потребителей независимо от объема потребления и территориального расположения. Применительно к России с учетом ее огромной территории это обстоятельство имеет первостепенное значение [2].

Степень разработанности темы

На сегодняшний день, для производства электроэнергии построено геотермальных электростанций в более чем 21 странах [2 - 5].

В работе [6] были проведены авторами проектирование геотермальной области в Италии на основе интегрированного и мультидисциплинарного подхода. Используя цифровое моделирование, авторы создали модель прогнозирования использования геотермальной энергии.

Важность изучения проблемы использования геотермальной энергии подчеркивают и авторы работы [7], например, в таких странах, как Никарагуа, где отсутствуют привычные источники энергии (нефть, газ).

Многие ученые России и зарубежья занимаются вопросами использования петротермальной энергии [8, 9]. Этим вопросам посвящены, в частности, работы таких авторов как: С.С. Смирнов, Г.А. Череменский, Н.А. Гнатусь, Ю.А. Попов, С.Л. Певзнер, В.П. Пименов, М.Д. Хуторской, Э.И. Богуславский, А.А. Чермошенцева, А.Н. Шулюпин, А.И. Филиппов, П.Н. Михайлов, О.В. Ахметова, Н.И. Стоянов.

Нет исследовательских работ, связанных с использованием фонда законсервированных скважин. Но, по состоянию на начало 2014 года, бездействующий фонд скважин составил соответственно 13,5 % от общего фонда скважин. Это именно тот фонд, исследованием которого посвящена наша работа.

Цель исследования

Проведение математических расчетов с экспериментальной проверкой эффективности использования геотермальной энергии и разработка рекомендаций по их использованию.

Методы исследования

Математическая модель создана на основе уравнений тепло- и массопереноса. Для решения системы дифференциальных уравнений применяется численный метод конечных разностей по явной схеме.

Постановка задачи

Имеются два коаксиальных цилиндра. Наружный цилиндр (обсадная колонна радиусом R_2) контактирует с грунтом, температура которого T увеличивается линейно с глубиной. В пространство между цилиндрами закачивается теплоноситель (скоростью v), который нагревается за счет тепла, поступающего из грунта. Через внутренний цилиндр (радиусом R_1) выкачивается прогретый за счет петротермальной энергии теплоноситель (температурой u), который используется на поверхности для выработки электроэнергии [10, 11]. Предполагается, что распределение температуры имеет цилиндрическую симметрию. Предполагается также, что отсутствует теплообмен между закачиваемой и добываемой жидкостями.

На рис.1.показано диаметральное сечение скважины.

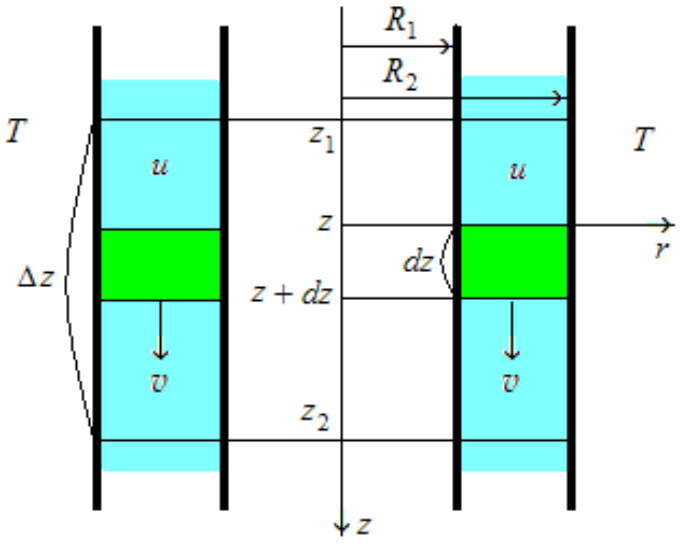

Рис. 1. Осевое сечение скважины.

Для описания распределения температуры T, u_z введём цилиндрическую систему координат, направив ось z вниз по оси

скважины, а ось r перпендикулярно этой оси.

Распределение температуры $T_t = T(t, r, z)$ в грунте за скважиной (т.е. при $r \geq R_2$) задаётся уравнением:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}^2}\right) \quad (1)$$

Глубину z будем отсчитывать от того уровня, где температура грунта не зависит от колебаний температуры на поверхности земли и равна значению T_0. Будем считать, что до начала эксплуатации скважины температура в грунте линейно увеличивалась с глубиной. Поэтому в начальный момент температура в грунте задаётся равенством

$$T\big|_{t=0} = T_0 + Gz, \quad (2)$$

где G – геотемпературный градиент. На расстоянии R от оси скважины эта температура сохраняется стабильной во времени:

$$T\big|_{r=R} = T_0 + Gz. \quad (3)$$

Будем считать, что на начальной глубине температура с течением времени не меняется и равна:

$$T\big|_{z=0} = T_0. \quad (4)$$

Уравнение для распределения температуры жидкости имеет вид:

$$u_t + \upsilon u_z = A(T\big|_{r=R_2} - u) + a_{\text{эф}} u_{zz}. \quad (5)$$

где коэффициенты имеют вид:

$$A = \frac{2R_2\alpha}{c\rho(R_2^2 - R_1^2)}, \quad a_{\text{эф}} = \frac{k_{\text{эф}}}{c\rho}.$$

Будем также считать, что в начальный момент температура закачиваемого теплоносителя в межтрубном пространстве одинакова по всему стволу скважины и равна $T_{\text{ж}}$:

$$u\big|_{t=0} = T_{\text{ж}}. \quad (6)$$

Температура закачиваемой жидкости на начальной глубине постоянна и также равна $T_ж$:

$$u\big|_{z=0} = T_ж. \qquad (7)$$

Наконец, примем, что между грунтом и жидкостью в межтрубье происходит теплообмен, описываемый уравнением вида:

$$kT_r - \alpha(T-u)\big|_{r=R_2} = 0 \ \ (t>0). \qquad (8)$$

Для численного решения задачи (1) – (8) применим метод сеток [12]. Для удобного визуального представления решения задачи и практичного применения конечно-разностные схемы данной задачи заложены в основу программы Mathlab.

В расчетах использованы следующие исходные данные:

Диаметр внутренней подъемной трубы, D_1 = 219 мм; Диаметр наружной опускной трубы, D_2 = 273 мм; Коэффициент теплоотдачи внутренней стенки трубы теплоносителю, α = 1000 Вт/м^2*К;

Теплофизические свойства грунта:

Теплопроводность грунта, λ = 2,0 Вт/м*К; Температуропроводность грунта, a = 10^{-6} м^2/с; Плотность, ρ = 2500 кг/м^3; Теплоемкость, c = 800 Дж/кг*К; Глубина, H = 2000 м; Температурный градиент, G = 0,03 °С/м; Радиус теплового влияния грунта, R = 2 м;

Теплофизические свойства теплоносителя:

В качестве теплоносителя использовалась вода.

Плотность, ρ = 1000 кг/м^3; Теплоемкость, c = 4190 Дж/кг*К; Начальная температура, T_0 = 15 °С; Расход теплоносителя, Q =1,8; 3,6; 7,2; 10,8; 14,4 м^3/час;

На рис. 2 – 4 приведены кривые динамики температуры жидкости в течение 30 суток с начала закачки. Через 8-10 дней после начала закачки, температура жидкости выходит на стационарный режим.

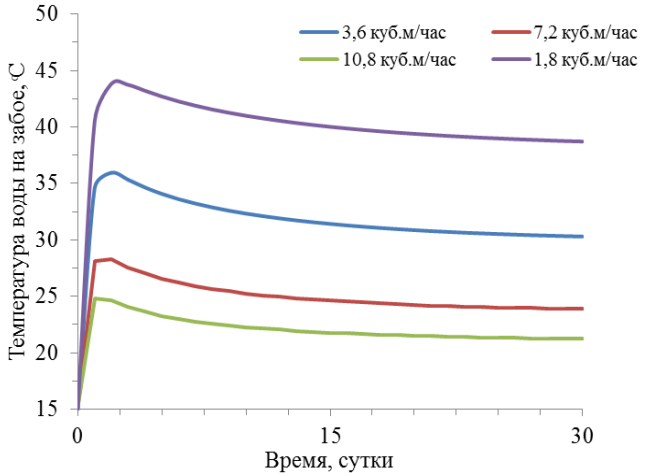

Рис. 2. Изменение температуры жидкости на забое при различных темпах закачки ($м^3$/час), геотермический градиент равен 0,03 ^{0}С/м, глубина 2000 м.

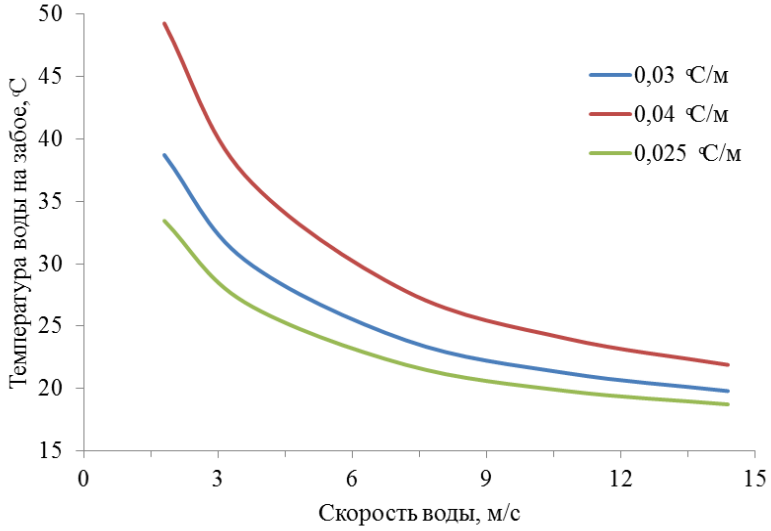

Рис. 3. Зависимость температуры воды на забое при различных темпах закачки (м/с), глубина 2000 м.

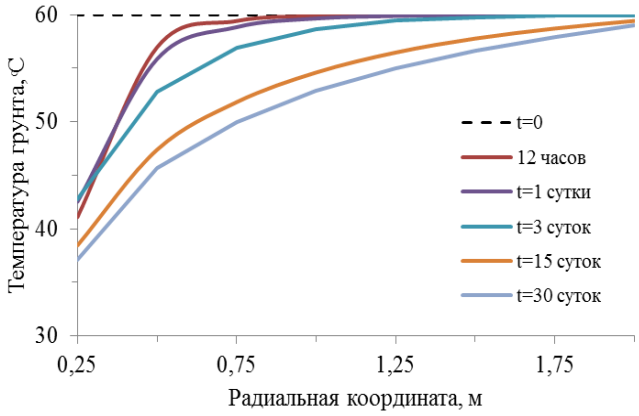

Рис. 4. Распределение температурного поля вокруг скважины в различные моменты времени на глубине 2000 м, скорость закачки воды v=0,05 м/с, геотермический градиент равен 0,03 ^{0}С/м.

Рассматривались различные темпы закачки:1,8; 3,6; 7,2; 10,8 м^3/час. Из графиков видно, что при увеличении скорости закачки температура жидкости снижается. Например, увеличение скорости закачки с 3,6 до 7,2 м^3/час снижает температуру воды с 30 °С до 25 °С.

Обсуждение результатов

Из рис. 2 видно, что вначале наблюдается резкий рост температуры воды на забое, что связано с нагревом воды от горячих труб на забое, затем медленный спад и стабилизация говорит о том, что тепло начинает приходить из глубин пласта и нагревать воду на забое. Стабилизация температуры воды наступает на 5-6 сутки и далее поддерживается постоянной, что дает возможность длительной добычи петротермальной энергии.

Из рис. 3 можно наблюдать, что скорость закачки определяет температуру воды на забое, что позволяет, регулируя темп закачки получить требуемое количество тепла на выходе.

Рис. 4 показывает процесс остывания грунта вокруг скважины через 30 суток. Вначале наблюдается резкое снижение температуры вблизи скважины, далее медленное движение теплового фронта в радиальном направлении.

Таким образом, использование петротермальной энергии возможно в долгосрочной перспективе, при условии оптимальной закачки теплоносителя, когда тепловой поток с недр Земли компенсирует энергию, отобранную в ходе закачки теплоносителя.

Заключение

Созданная математическая модель позволяет определить условия выбора скважин при различных темпах закачки и геотермических

градиентах. Данные исследования позволят создать технологию добычи петротермальной энергии.

Разработана новая математическая модель, отличающаяся от известных тем, что дает математическое описание температурного поля в массиве грунта вокруг петротермальной скважины, начальная температура которого линейно зависит от глубины.

Результаты наших исследований показали, что возможно длительное эксплуатация петротермальных скважин без снижения температуры теплоносителя, таким образом, использование геотермальной установки имеет долгосрочную перспективу.

Благодарности

Выражаем благодарность ООО «КОСМО групп» за финансовую поддержку при проведении исследований, а также коллегам, которые заинтересуются нашими исследованиями и выскажут свои суждения.

Список литературы

1. Muhammad U. Design and experimental investigation 590 of a 1 kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade 591 waste heat recovery from steam/ Muhammad U., Imran M., Lee D.H., Park B.S.// Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol.103. – p.1089-1100.
2. Hammons T.J. Geothermal power generation worldwide: Global perspective, technology, field experience, and research and development// Electric Power Components and Systems. – 2004. - Vol. 32, p. 529-553.
3. Tchanche B.F. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications / Tchanche B.F., Lambrinos G., Frangoudakis A., Papadakis G.// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol.15(8). – p. 3963-3979.
4. Dipippo R. Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact / R. Dipippo. - Butterworth-Heinemann, 2008. – 600 p.
5. Franco A. Numerical simulation of geothermal reservoirs for the 601 sustainable design of energy plants: A review/ Franco A., Vaccaro M. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 30(2). – p. 987-1002.
6. Desai N.B. Process integration of organic Rankine cycle / Desai N.B., Bandyopadhyay S. // Energy. – 2009. – Vol. 34(10). – p.1674-1686.

7. Gola G., Bertini G. and etc. Data integration and conceptual modelling of the Larderello geothermal area, Italy // Energy Procedia. – V.125. – 2017. – p.300-309
8. Meza C. Transforming the Nicaraguan energy mix towards 100% renewable // 2017 International conference on Alternative energy in developing countries and emerging economies 2017 AEDCEE, 25-26 May, Bangkok, Thailand // Energy Procedia. – V.138. – 2017. – p.494-499.
9. Walraven D. Comparison of thermodynamic cycles for 606 power production from low-temperature geothermal heat sources / Walraven D., Laenen B., D'Haeseleer W. // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 66(1). - p. 220–233.
10. Габдрахманова К.Ф., Усманова Ф. К. Прикладные методы решения задач в нефтегазовом деле / К.Ф. Габдрахманова, Ф. К. Усманова. Часть I. Уфа: 2013. - 197с.
11. Ларин П.А. О решении одномерного неоднородного волнового уравнения в конечном виде / П.А. Ларин // Фундаментальные исследования. – 2014. - №9 (часть 10) . – с. 2169-2173.
12. Izmailova G. R. Acoustic wave energy absorption and distributed heat sources upon an acoustic impact on media / Izmailova G. R., Kovaleva L. A., and Nasyrov N. M. // High Temperature, 2016, Vol. 54, № 1, pp. 56–61.

Сведения об авторах

Габдрахманова Клара Фаткуллиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных технологий, математических и естественных наук, филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Октябрьском, г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Российская Федерация
E-mail: klara47@mail.ru

Измайлова Гульнара Ришадовна, кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных технологий, математических и естественных наук, филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Октябрьском, г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Российская Федерация
E-mail:gulena-86@mail.ru

Ларин Петр Андреевич, старший преподаватель кафедры Информационных технологий, математики и естественных наук, филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Октябрьском, г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Российская Федерация.
E-mail: Larinpa@mail.ru

Authors

Gabdrakhmanova K.F., PhD, Senior Lecturer in Informational Technologies, Mathematics and Natural Sciences, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, Oktyabrsky, Bashkortostan, Russia
Email: klara47@mail.ru

Izmailova G.R., PhD, Senior Lecturer in Informational Technologies, Mathematics and Natural Sciences, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, Oktyabrsky, Bashkortostan, Russia
E-mail:gulena-86@mail.ru

Larin P.A., Senior Lecturer in Informational Technologies, Mathematics and Natural Sciences, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, Oktyabrsky, Bashkortostan, Russia
Email: Larinpa@mail.ru

Измайлова Гульнара Ришадовна
452607, Российская Федерация, Республика Башкортостан,
г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а
тел: +7(937)1672013
E-mail:gulena-86@mail.ru