



Геоэкология / Geocology
Оригинальная статья / Original article
УДК 550.36
DOI: 10.18470/1992-1098-2017-1-73-81

ПРОБЛЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

^{1,2}Джават К. Джаватов, ¹Амир А. Азизов*

¹Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра
Российской академии наук, Махачкала, Россия, azizov_amir@mail.ru
²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Резюме. *Цель.* Для широкого использования геотермальной энергии необходимы передовые технологии, обеспечивающие ее конкурентоспособность с традиционными видами энергии. На сегодняшний момент в основе освоения геотермальной энергии остается технология добычи из недр теплоносителей. Существуют следующие способы извлечения теплоносителя: фонтанный; насосный; циркуляционный. Наибольший интерес представляет технология освоения геотермальной энергии на основе геотермальной циркуляционной системы (ГЦС). Обсуждается проблема правильного выбора технологических параметров геотермальных систем, обеспечивающих их эффективное функционирование. *Методы.* Рассматривается технология освоения геотермальной энергии на основе геотермальной циркуляционной системы, так как эта технология решает проблему захоронения отработанных вод, содержащих вредные для окружающей среды компоненты. Кроме решения экологических вопросов данная технология, позволяет интенсифицировать процесс добычи и степень извлечения из недр тепловых ресурсов, что существенно повышают потенциал ресурсов глубинного тепла Земли в топливно-энергетическом балансе. *Результаты.* Проведены оптимизационные расчеты для Тернаирского месторождения термальных вод. При проведении расчетов учитывалась температурная зависимость таких важных характеристик, как плотность и теплоемкость теплоносителя. *Выводы.* Показано существование критической температуры закачиваемого теплоносителя, зависящей от дебита и диаметра скважины, обеспечивающего эффективное функционирование геотермальных циркуляционных систем. **Ключевые слова:** геотермальная циркуляционная система, температура закачиваемого теплоносителя, энергетические затраты, полезная мощность, вязкость, оптимизация.

Формат цитирования: Джаватов Д.К., Азизов А.А. Проблема энергетической эффективности геотермальной циркуляционной системы при различных режимах обратной закачки теплоносителя // Юг России: экология, развитие. 2017. Т.12, N1. С.73-81. DOI: 10.18470/1992-1098-2017-1-73-81

THE PROBLEM OF ENERGY EFFICIENCY OF THE GEOTHERMAL CIRCULATION SYSTEM IN DIFFERENT MODES OF REINJECTION OF THE COOLANT

^{1,2}Djavit K. Djavatov, ¹Amir A. Azizov*

¹Institute of Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia, azizov_amir@mail.ru
²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Abstract. *Aim.* Advanced technologies are crucial for widespread use of geothermal energy to ensure its competitiveness with conventional forms of energy. To date, the basis for the development of geothermal energy is the technology of extracting the heat transfer fluids from the subsurface. There are the following ways to extract the coolant: free-flow; pumping and circular methods. Of greatest interest is the technology to harness the geothermal energy based on geothermal circulatory system (GCS). There is the problem of the right choice of technological parameters for geothermal systems to ensure their effective functioning. *Methods.* We consider the development of geothermal energy technology based on geothermal circulatory system, as this technology solves the dumping of the waste water containing environmentally harmful substances. In addition to the environmental issues, this technology makes it possible to intensify the process of production and the degree of extraction of thermal resources, which significantly increases the potential for geothermal heat resources in terms of the fuel and energy balance. *Findings.* Were car-

ried out optimization calculations for Ternaisky deposits of thermal waters. In the calculations, was taken into account the temperature dependence of important characteristics, such as the density and heat capacity of the coolant. **Conclusions.** There is the critical temperature of the coolant injected, depending on the flow rate and the diameter of the well, ensuring the effective functioning of the geothermal circulatory systems.

Keywords: geothermal circulatory system, temperature of the injected heat carrier, energy costs, net power, viscosity, optimization.

For citation: Djavatov D.K., Azizov A.A. The problem of energy efficiency of the geothermal circulation system in different modes of reinjection of the coolant. *South of Russia: ecology, development.* 2017, vol. 12, no. 1, pp. 73-81. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2017-1-73-81

ВВЕДЕНИЕ

Перспективность освоения геотермальной энергии определяется глобальностью ее распространения, и требует научного, экономически обоснованного подхода к технологии ее разработки [1; 2]. Для широкого использования геотермальной энергии необходимы передовые технологии, обеспечивающие ее конкурентоспособность с традиционными видами энергии. На сегодняшний момент в основе освоения геотермальной энергии остается технология добычи из недр теплоносителей.

Существуют следующие способы извлечения теплоносителя: фонтанный; насосный; циркуляционный. Наибольший интерес

представляет технология освоения геотермальной энергии на основе геотермальной циркуляционной системы (ГЦС). Данная технология решает проблему захоронения отработанных вод, содержащих вредные для окружающей среды компоненты.

ГЦС включает (рис. 1): нагнетательную (4→1) и добычную (2→3) скважины, наземный комплекс оборудования для отбора тепла, трубопроводы для транспортировки теплоносителя от добычной скважины до потребителя, и от потребителя до нагнетательной скважины, насосная станция закачки, подземный коллектор. Большое количество работ посвящено созданию ГЦС [3-5].

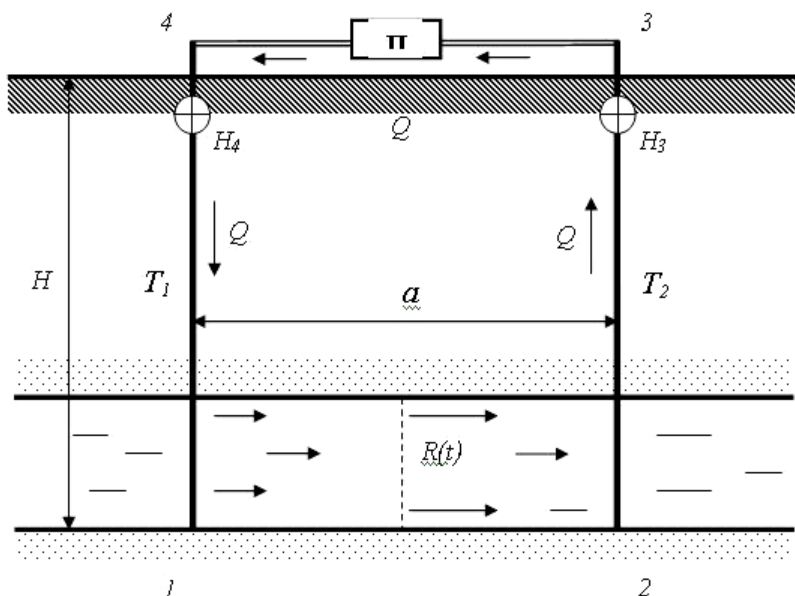


Рис. 1. Технологическая схема ГЦС (авторский рисунок)

Fig. 1. Technological scheme of the GCS (author's picture)

Такие технологии освоения геотермальных ресурсов кроме решения экологических вопросов, позволяют интенсифицировать процесс добычи и степень извлечения из недр тепловых ресурсов, а значит

существенно повышают потенциал ресурсов глубинного тепла Земли в топливно-энергетическом балансе, так как извлекается практически все тепло, аккумулированное подземными водами, а также часть тепла,



аккумулированного скелетом водовмещающих пород.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обратная закачка отработанных теплоносителей в пласт с поддержанием пластового давления в 2-3 раза дороже фонтанной технологии.

В связи с этим вопросы оптимизации эксплуатации ГЦС особенно актуальны.

$$c_H \cdot \rho_H \cdot Q \cdot \partial T_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_H \cdot K \cdot (T_0 + \Gamma \cdot z - T_1) \cdot \partial z, (1)$$

где z – ось вдоль нагнетательной скважины; T_0 – температура пород нейтрального слоя; Q – дебит ГЦС; r_H – радиус нагнетательной скважины; c_H, ρ_H – теплоемкость и плотность нагнетаемого теплоносителя; Γ – геотермический градиент; K – коэффициент теплопередачи от потока теп-

отработанный теплоноситель с температурой T_1 поступает в нагнетательную скважину. Процесс теплопереноса в нагнетательной скважине запишется уравнением [6]:

лоносителя к окружающим нагнетательную скважину горным породам.

Интегрируя полученное уравнение, при начальном условии $T_1(0) = T_y$, получаем зависимость:

$$T_1(z) = T_y \cdot e^{-Az} + \Gamma \cdot z + (T_0 - \frac{\Gamma}{A}) \cdot (1 - e^{-Az}), (2)$$

где $A = \frac{2 \cdot K \cdot \pi \cdot r_H}{c_H \cdot \rho_H \cdot Q}$, T_y – температура на устье нагнетательной скважины.

Таблица 1

Изменение температуры закачиваемого теплоносителя в зависимости от глубины z при различных значениях T_y и дебита Q

Table 1

Changes in temperature of coolant injected, depending on the depth z for different values T_y and flow rate Q

z, м / m	$T_1, ^\circ\text{C}, (T_y / T_M = 20 ^\circ\text{C})$					$T_1, ^\circ\text{C}, (T_y / T_M = 40 ^\circ\text{C})$				
	Q=	Q=	Q=	Q=	Q=	Q=	Q=	Q=	Q=	Q=
	0,05 м ³ /с / м ³ /с	0,1 м ³ /с / м ³ /с	0,25 м ³ /с / м ³ /с	0,4 м ³ /с / м ³ /с	0,5 м ³ /с / м ³ /с	0,05 м ³ /с / м ³ /с	0,1 м ³ /с / м ³ /с	0,25 м ³ /с / м ³ /с	0,4 м ³ /с / м ³ /с	0,5 м ³ /с / м ³ /с
10	20	20	20	20	20	39,6	39,8	40	40	40
50	19,5	20	20	20	20	38,4	39	39,6	39,8	39,8
100	19	19,5	19,8	19,8	20	37	38	39,3	39,6	39,7
500	21,6	24,1	20,3	20	20	32	35	38	38,7	38,9
1000	33,5	27,7	23	21	21,7	37,7	37,6	38,6	39	39,2
2000	72,1	53,9	36,3	30,7	28,7	68	56	46,8	44,3	43,5
3000	118,5	90	57	45	40,4	108	86	62,7	55	52,2
4000	167,4	133	83,6	64	56,2	151	123	84,6	70	64,8
5000	192	155	98,8	75	65,6	174	142	97	79,4	72,5

Note: - z – depth; Q – flow rate the well; T_M – the heat-carrier temperature at the mouth of the injection well; T_1 – the heat-carrier temperature in the injection well.

Динамика изменения температуры закачиваемого теплоносителя в зависимости от глубины z при различных значениях температуры T_y и дебита Q ($T_0=10 ^\circ\text{C}$, $\Gamma=0,045 ^\circ\text{C}/\text{м}$) приведена в таблице 1.

Из данных таблицы 1 можно сделать вывод о том, что температура закачиваемого

теплоносителя сначала падает, а затем начинает расти, причем, чем меньше дебит скважины и чем выше температура T_y , тем заметнее такая динамика.

Как выше было отмечено, основным недостатком ГЦС является значительные энергетические затраты на обратную закачку



ку. Очевидно, что эксплуатация ГЦС целесообразна, когда энергетические затраты на обратную закачку меньше полезной энергии, получаемой ГЦС.

Мощность, затрачиваемая на обратную закачку N_H , зависит от многих техноло-

$$\Delta P = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} + \Delta P_F + (\rho_D - \rho_H) \cdot g \cdot H, \quad (4)$$

где ΔP_H , ΔP_D , ΔP_{HK} - соответственно гидравлические потери давления в нагнетательной и добычной скважинах, и наземных коммуникациях; ΔP_F - фильтрационные потери давления в пласте; ρ_D - плотность теп-

$$\Delta P_G = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} = \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{\lambda_H}{d_H^5 \rho_H} \cdot H + \frac{\lambda_D}{d_D^5 \rho_D} \cdot (H + R) \right), \quad (5)$$

$$\Delta P_F = \frac{Q \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h \cdot \rho_H} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot R^2}{d_H \cdot d_D} \right), \quad (6)$$

где λ_H , λ_D - коэффициенты гидравлических потерь для нагнетательной и добычной скважин; R - расстояние между нагнетательной и добычной скважинами; μ - динамическая вязкость закачиваемой воды; k - проницаемость пласта; h - мощность пласта;

$$N_{ПОЛ} = Q \cdot \rho_D \cdot c_D \cdot (T_D - T_H), \quad (7)$$

где c_D - теплоемкость теплоносителя в добычной скважине; T_D - температура теплоносителя на входе в теплообменник; T_H - температура теплоносителя на выходе из теплообменника.

$$N_{П} = N_{ПОЛ} - N_H = Q \cdot \left(c_D \cdot \rho_D \cdot \Delta T - \frac{\Delta P}{\rho_H} \right), \quad (8)$$

где $\Delta T = T_D - T_H$

Из формулы (8) следует, что чем больше тепловой потенциал передается теплообменнику, тем больше полезная мощность ГЦС. Полезная мощность является основной характеристикой ГЦС, определяющей эффективность ее эксплуатации. Пренебрегая тепловыми потерями при транспортировке отработанного теплоносителя от потребителя до нагнетательной скважины, можно считать, что $T_y = T_H$.

$$\mu(T) = \frac{35 + 0,7 \cdot C + 0,0227 \cdot C^2}{T + 15,7} \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

где T - температура теплоносителя на забое; C - концентрация солей в термальной воде, % ($C = 100\% \cdot \frac{M}{\rho_H}$);

гидравлических параметров ГЦС и параметров пласта:

$$N_H = Q \cdot \frac{\Delta P}{\rho_H}, \quad (3)$$

где ΔP - давление нагнетания в циркуляционном контуре ГЦС, которое определяется выражением [7]:

лоносителя в добычной скважине; H - глубина скважины.

Гидравлические и фильтрационные потери давления определяются по формуле [7]:

d_H , d_D - диаметры нагнетательной и добычной скважин, соответственно.

Из формул (5) и (6) следует, что давление нагнетания зависит от таких технологических параметров ГЦС как: μ , d_H , d_D , Q .

Полная мощность $N_{ПОЛ}$ ГЦС равна:

Полезная мощность $N_{П}$, вырабатываемая ГЦС, определяется как разность между полной мощностью $N_{ПОЛ}$ и мощностью, затрачиваемой на обратную закачку N_H :

От того с какой температурой T_y теплоноситель будет закачиваться обратно в пласт зависят энергетические затраты на обратную закачку, так как важнейшая характеристика, определяющая фильтрационные потери давления в пласте ΔP_F - вязкость μ , имеет сильную температурную зависимость.

В литературе имеется много формул такой зависимости, мы будем рассматривать следующую формулу [8]:

M - минерализация, г/л.

С одной стороны, чем больше будет сработан тепловой потенциал теплоносителя потребителем, тем выше полная мощность



ГЦС, с другой - по формуле (2) получаем, что при этом температура закачиваемого теплоносителя на забое увеличивается в меньшей степени, а значит, растет значение коэффициента вязкости по формуле (9) и фильтрационные потери давления в пласте. В этих условиях для повышения эффективности ГЦС, необходимо оптимизация ее параметров.

При проведении расчетов необходимо учесть температурную зависимость и таких важных характеристик как плотность и теп-

$$c(T) = T^2 \cdot 10^{-5} - 0,0014 \cdot T + 4,2$$

$$\rho(T) = -2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0004 \cdot T + 1,0121$$

Таким образом, при эксплуатации ГЦС возникает проблема выбора значений таких важнейших технологических параметров как дебит Q и температура T_y , обеспечивающих максимум полезной мощности.

лоемкость теплоносителя. На основе исследования образцов термальной воды природного происхождения, отобранных из трёх естественных скважин Тернаирского месторождения г. Махачкала: 36; 22Т; 28Т, с минерализацией соответственно: 6,3; 12,23 и 22,1 г/л, в интервале температур от 20 до 205 °С, получены соответствующие функциональные зависимости теплоемкости и плотности геотермального теплоносителя от его температуры [9]:

Значения T_y , определенные при различных значениях дебита Q , при условии $N_H \rightarrow \max$ приведены в таблице 2.

Оптимальные значения температуры при различных значениях дебита

Таблица 2

Optimum temperatures for different values of the flow rate

Table 2

$Q, \text{ м}^3/\text{с} / \text{ м}^3/\text{с}$	0,1	0,15	0,18	0,2	0,25	0,28	0,3
$T_y / T_M, \text{ }^\circ\text{C}$	0	0	20	46,3	97,7	119,7	131,4
$N_H, \text{ МВт} / N_p, \text{ MW}$	0,23	0,96	1,7	2,3	4,2	5,58	6,6

Note: - N_p – the power required for pumping the heat-carrier into the formation

Как видно из таблицы 2 оптимальные значения T_y быстро растут при относительно небольшом увеличении дебита.

С практической точки зрения более интересна задача определения оптимальных значений Q и T_y при условии получения максимума полезной мощности ГЦС, $N_H \rightarrow \max$, по формуле (8).

Существование оптимума наглядно видно из данных таблицы 3, полученных на основе проведенных расчетов.

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальное значение дебита ГЦС, обеспечивающее максимум

полезной мощности убывает с увеличением устьевой температуры нагнетаемого теплоносителя, как и значения полезной мощности ГЦС и мощности нагнетания, при этом полезная мощность падает значительно быстрее, чем мощность нагнетания.

Увеличение дебита сверх установленных оптимальных значений, как и увеличение устьевой температуры закачиваемого теплоносителя при одном и том же значении дебита ухудшает технологические энергетические характеристики ГЦС - увеличивает мощность нагнетания и уменьшает полезную мощность.

Значения мощности нагнетания и полезной мощности ГЦС в зависимости от дебита для различных значений устьевой температуры*

Таблица 3



Table 3

The power values of pumping and the net power of GCS based on from the flow rate for various values of wellhead temperature*

Q_3 m ³ /c / m ³ /s	$T_v / T_M = 15\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 20\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 30\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 40\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 50\text{ }^\circ\text{C}$	
	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW
0,1	0,25	15,1	0,26	14,5	0,27	13,4	0,3	12,2	0,32	11,1
0,2	2,3	28,4	2,3	27,2	2,3	24,9	2,3	22,7	2,3	20,4
0,3	7,6	38,4	7,5	36,8	7,4	33,6	7,2	30,3	7,1	27
0,4	17,2	44,2	16,9	42,2	16,4	38,2	16	34,1	15,6	30
0,5	32	44,8	31,4	42,5	30,4	37,9	29,4	33,2	28,6	28,3
0,6	52,8	39,4	51,8	36,9	50	31,9	48,3	26,7	46,8	21,4
0,7	80,5	27	78,9	24,6	76,1	19,5	73,6	14	71,3	8,3
Q_3 m ³ /c / m ³ /s	$T_v / T_M = 60\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 70\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 80\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 90\text{ }^\circ\text{C}$		$T_v / T_M = 100\text{ }^\circ\text{C}$	
	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW	N_H , МВт / N_P , MW	N_{II} , МВт / N_N , MW
0,1	0,34	9,9	0,36	8,7	0,39	7,6	0,41	6,4	0,44	5,2
0,2	2,3	18,2	2,3	15,9	2,34	13,6	2,4	11,3	2,4	9
0,3	7	23,7	6,9	20,4	6,8	17,1	6,7	13,7	6,7	10,4
0,4	15,2	25,7	14,9	21,5	14,6	17,2	14,3	13	14,2	8,6
0,5	27,8	23,4	27,1	18,4	26,5	13,3	26	8,1	25,5	2,9
0,6	45,6	15,8	44,4	10,2	43,4	4,4	42,5	-1,5	41,7	-7,6

Примечание: * - Жирным цветом отмечены максимальные значения полезной мощности ГЦС.

Note: * - Text in bold characters indicates the maximum value of the net power GCS;
 N_N – the net power produced by the GCS.

Проведены оптимизационные расчеты для ГЦС по определению оптимального дебита при различных значениях T_y для разных значений диаметров d_H , d_D и температу-

ры пластовой воды $T_{пл}$, при условии $N_{II} \rightarrow \max$. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Оптимальные значения дебита в зависимости от устьевой температуры закачиваемого теплоносителя, диаметра скважин и температуры пластовой воды

Table 4

Optimum values of flow rate depending on the wellhead temperature of the injected coolant, diameter of the wells and the temperature of the formation water

$T_y / T_M, \text{ }^\circ\text{C}$	Оптимальное значение дебита ГЦС ($Q, \text{ m}^3/\text{c}$) The optimal value of debit GCS ($Q, \text{ m}^3/\text{s}$)					
	$d_H=d_D=0,25\text{m} / d_I=d_E=0,25\text{m}$		$d_H=d_D=0,298\text{m} / d_I=d_E=0,298\text{m}$		$d_H=d_D=0,34\text{m} / d_I=d_E=0,34\text{m}$	
	$T_{пл} / T_F = 125\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{пл} / T_F = 150\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{пл} / T_F = 125\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{пл} / T_F = 150\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{пл} / T_F = 125\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{пл} / T_F = 150\text{ }^\circ\text{C}$
15	0,3	0,33	0,41	0,46	0,5	0,57
20	0,29	0,32	0,4	0,45	0,5	0,56
30	0,28	0,32	0,39	0,45	0,48	0,55
40	0,26	0,3	0,37	0,44	0,46	0,54
50	0,25	0,3	0,35	0,43	0,44	0,53



60	0,23	0,28	0,33	0,41	0,41	0,5
70	0,21	0,26	0,3	0,4	0,38	0,48
80	0,19	0,25	0,27	0,38	0,34	0,45
90	0,17	0,24	0,23	0,37	0,31	0,41

Note: - d_I – the diameter the injection well; d_E – the diameter the extraction well;
 T_F - the temperature of the formation water.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных проведенных расчетов показывает, что:

- с увеличением диаметра скважин ГЦС растет и значение оптимального дебита при одной и той же температуре T_y , а значит растет и значение $N_{П}$.

В вопросах практического использования геотермальной энергии, получаемой на основе ГЦС при значительных энергетических затратах на закачку очень важно знать значение температуры с которой можно закачивать теплоноситель, чтобы при

этом полезная мощность, с учетом К.П.Д. была не меньше мощности, необходимой для закачки.

Температуру закачиваемого теплоносителя на устье скважины, при которой мощность закачки будет равна полезной мощности, получаемой ГЦС, назовем критической. Из таблицы 3 наглядно видно, существование такой температуры и что повышение температуры закачиваемого теплоносителя выше этого значения делает эксплуатацию ГЦС нецелесообразной.

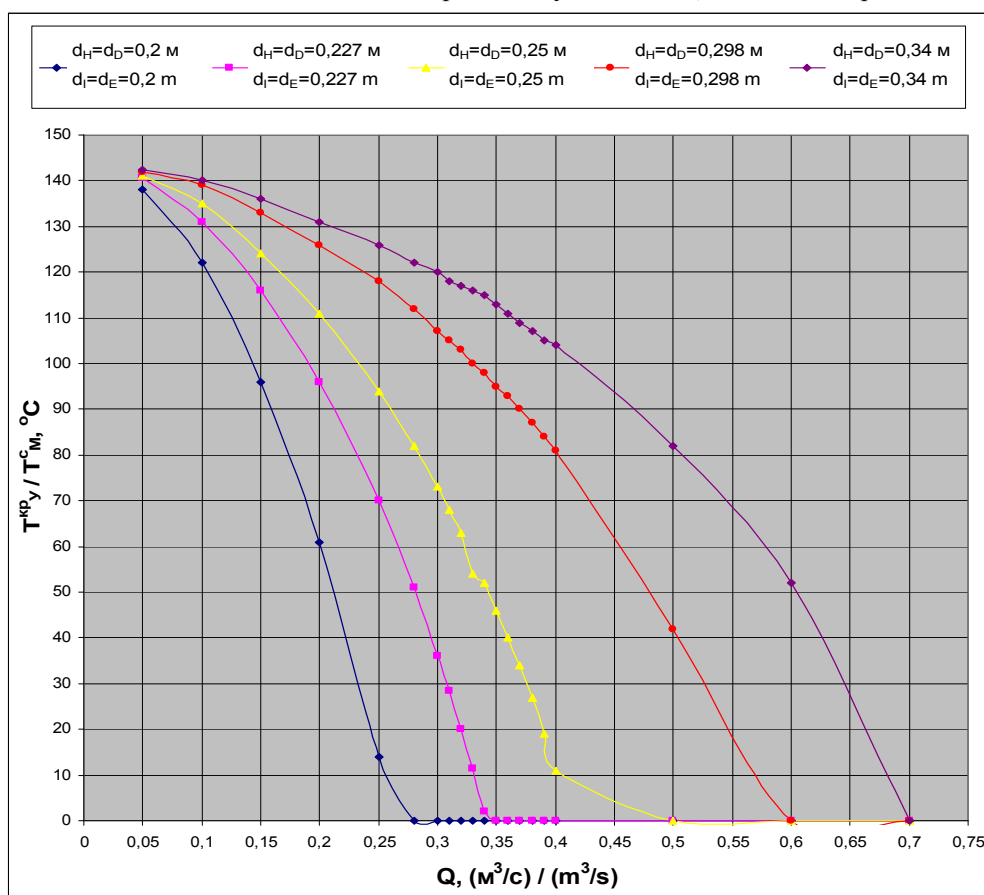


Рис. 2. Зависимость критической температуры закачиваемого теплоносителя от дебита при различных значениях диаметра скважины

Fig. 2. The dependence of the critical temperature of the injected coolant on the flow rate at different values of the diameter of the well



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что:

- при заданных диаметрах скважин существуют критические значения дебита, такие, что эксплуатация ГЦС сверх этих значений дебита становится неэффективной;
- с увеличением диаметра скважины критическое значение дебита также растет;
- для каждого значения дебита существует критическая температура закачиваемого теплоносителя, причем с увеличением дебита значение этой температуры падает;
- чем меньше диаметр скважины, тем меньше и максимальное значение дебита,

при котором критическая температура выше нуля. Это значит, что с увеличением диаметра скважины растет и значение эффективного дебита, позволяющего получать полезную энергию.

Тем самым установлено существование критической температуры закачиваемого теплоносителя и повышение температуры выше этого значения делает эксплуатацию ГЦС неэффективной. Знание критической температуры позволяет определить пути повышения эффективности эксплуатации ГЦС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кремнев О.А. Некоторые проблемы технологии извлечения и использования глубинного тепла Земли. М.: Недра, 1981. 78 с.
2. Джаватов Д.К. Математическое моделирование геотермальных систем и проблемы повышения их эффективности. Махачкала: Ин-т проблем геотермии ДНЦ РАН, 2007. 248 с.
3. Дядькин Ю.Д., Гендлер С.Г. Процессы тепломассопереноса при извлечении геотермальной энергии. Л.: ЛГИ, 1985. 94 с.
4. Дядькин Ю.Д. Основы геотермальной технологии. Л.: ЛГИ, 1985. 175 с.
5. Магомедов К.М. Теоретические основы расчета геотермальных циркуляционных систем // Ежегодник «Геотермия». М.: Наука, 1991, Вып.1. С. 18-26.
6. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. М.: Недра, 1989. 229 с.
7. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
8. Алишаев М.Г., Гаджиев А.Г., Гайдаров Г.М., Каспаров С.А., Курбанов М.К., Омаров М.А., Суетнов В.В., Султанов Ю.И. Проблемы геотермальной энергетике Дагестана / Под ред. Амирханова Х.И. и Ятрова С.Н. М.: Недра, 1980. 208 с.
9. Джаватов Д.К., Дворянчиков В.И. Температурная зависимость термодинамических параметров геотермальных флюидов в задачах оптимизации геотермальных систем // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. NS3. С. 69-73.

REFERENCES

1. Kremnev O.A. *Nekotorye problemy tekhnologii izvlecheniya i ispol'zovaniya glubinnogo tepla Zemli* [Some problems of the technology of extraction and use of geothermal heat]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 78 p. (In Russian)
2. Djavatov D.K. *Matematicheskoe modelirovanie geotermal'nykh sistem i problemy povysheniya ikh effektivnosti* [Mathematical modeling of geothermal systems and the problems of increasing their efficiency]. Makhachkala, Institute of geothermal problems of the Dagestan Scientific Center of RAS Publ., 2007. 248 p. (In Russian)
3. Dyadkin Yu.D., Gendler S.G. *Protsessy teplomassoperenosa pri izvlechenii geotermal'noi energii* [Heat and mass transfer processes at extraction of geothermal energy]. Leningrad, Leningrad Mining Institute Publ., 1985. 94 p. (In Russian)
4. Dyadkin Y.D. *Osnovy geotermal'noi tekhnologii* [Basics of geothermal technology]. Leningrad, Leningrad Mining Institute Publ., 1985. 175 p. (In Russian)
5. Magomedov K.M. The theoretical basis of the calculation of geothermal circulation systems. *Ezhegodnik «Geotermiya»* [Yearbook «Geothermics»]. Moscow, Nauka Publ., 1991. Vol. 1. pp.18-26. (In Russian)
6. Dyadkin Yu.D. *Razrabotka geotermal'nykh mestorozhdenii* [Development of geothermal fields]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 229 p. (In Russian)
7. Alkhasov A.B. *Geotermal'naya energetika: problemy, resursy, tekhnologii* [Geothermal energy: problems, resources and technology]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 376 p. (In Russian)
8. Alishaev M.G., Gadzhiev A.G., Gajdarov G.M., Kasparov S.A., Kurbanov M.K., Omarov M.A., Suetnov V.V., Sultanov Yu.I. *Problemy geotermal'noi energetiki Dagestana* [Problems of geothermal energy of Dagestan]. Amirhanova H.I., Jatrova S.N. Eds., Moscow, Nedra Publ., 1980. 208 p. (In Russian)
9. Djavatov D.K., Dvoryanchikov V.I. The temperature dependence of the thermodynamic parameters of geothermal fluids in optimization problems geothermal sys-



tems. Izvestiya vuzov. Severokavkazskii region. Tekhnicheskie nauki [University news. North-Caucasian

region. Technical sciences series]. 2006, no. S3. pp. 69-73. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Принадлежность к организации

Джават К. Джаватов - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; кафедра «Математическое моделирование, эконометрика и статистика», ФГБОУ ВО Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия.

Амир А. Азизов* - ведущий специалист, ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, тел.: 89034779149, пр. И. Шамиля, 39а, г. Махачкала, 367030, Россия.
E-mail: azizov_amir@mail.ru

Критерий авторства

Джават К. Джаватов – провёл расчёты, проанализировал данные, написал рукопись, несёт ответственность за плагиат. Амир А. Азизов – провёл расчёты, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.09.2016
Принята в печать 25.10.2016

AUTHORS INFORMATION

Affiliations

Djavat K. Djavatov - Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Federal State Institution of Science Institute of Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Sub-department of Mathematical modeling, econometrics and statistics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Dagestan State University, Makhachkala, Russia.

Amir A. Azizov* - leading specialist, Federal State Institution of Science Institute of Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, tel. 89034779149, 39a I. Shamilya st., Makhachkala, 367030, Russia. E-mail: azizov_amir@mail.ru

Contribution

Djavat K. Djavatov, conducted calculations, analyzed the data and wrote the manuscript and is responsible for avoiding the plagiarism. Amir A. Azizov, conducted calculations, prepared the manuscript for publication.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.09.2016
Accepted for publication 25.10.2016