

УДК 697.34:551.23

Оптимизация параметров и эксергетический анализ систем гидротермального теплоснабжения

К. И. Луданов¹

¹к.т.н., с.н.с. Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, г. Киев, Украина, k.i.ludanov@ukr.net

Аннотация. В работе проведена оптимизация параметров режима эксплуатации и эксергетический анализ систем гидротермального теплоснабжения на основе фонтанирующих скважин, которые вскрывают геотермальное месторождения горячей воды. Оптимизация проведена по дебиту теплоносителя с использованием полезной энергии фонтана в качестве функции оптимальности. Эксергетический анализ выполнен для термической составляющей энергии теплоносителя. Приведены примеры расчёта оптимальных параметров теплоносителя и производства теплоэнергии и эксергии для двух реальных систем гидротермального теплоснабжения.

Ключевые слова: оптимальный режим, эксергетический анализ, геотермальная энергетика, гидротермальное теплоснабжение, фонтанирующая скважина, геотермальная вода.

Вступление. Гидротермальные источники [1] относятся к геотермальным ресурсам, использование которых не приводит к генерации CO₂ и не провоцирует потепление климата на планете. Геотермальная энергетика [2] относится к возобновляемым источникам энергии, интерес к которым резко возрос в настоящее время в связи с известными сложностями развития тепловой и ядерной энергетики. Поэтому весьма актуальным является использование гидротермальных источников в качестве теплогенераторов для систем теплоснабжения.

Гидротермальное теплоснабжение объектов основано на использовании горячих геотермальных вод, обычно поступающих из фонтанирующих скважин. При больших дебитах такие скважины могут зимой могут покрывать нужды систем отопления крупных потребителей, а весной и осенью – нужды больших тепличных хозяйств. В нашей стране весьма значительными гидротермальными ресурсами обладают Закарпатье и АР Крым [3], где водоносные горизонты с горячей водой залегают на относительно небольшой глубине – от 0,5 до 2 км. Поэтому разработка вопросов гидротермального теплоснабжения имеет важное прикладное значение и может существенно повысить эффективность практического использования этих возобновляемых природных ресурсов.

Поскольку использование гидротермальных источников для нужд теплоснабжения – достаточно новая задача, – то вопросы оптимизации режимов их эксплуатации, а тем более эксергетического анализа, пока ещё требуют своего решения. Важно провести оптимизацию режимов эксплуатации фонтанирующих скважин и рассчитать не только оптимальные значения их параметров, но и значение оптимальной тепловой нагрузки систем гидротермального теплоснабжения. Необходимо также провести расчёт эксергии горячей воды для теплоснабже-

ния и провести анализ необходимости использования эксергетического тарифа на горячую воду.

Актуальность исследования. В Украине в коммунальной теплоэнергетике теплота, отпускаемая на нужды теплоснабжения, обычно оценивается в рамках «теплого» тарифа, т.е. в калориях. Поэтому и при оценке теплоты от гидротермальных источников также используется «тепловой» тариф, а иногда [4, 5] оценка производится в кубометрах отпускаемой геотермальной воды. Один из лидеров в геотермальной энергетике (США) подходит к оценке гидротермального тепла более ответственно. Известно, что Геологический комитет США учитывает запасы геотермальных ресурсов на своей территории по их эксергии, а не энтальпии [6]. Это объясняется тем, что в соответствии со вторым законом термодинамики ценность теплоты горячей воды резко уменьшается при снижении её температуры T_i , К, до температуры окружающей среды T_0 , К. Поэтому так важно проведение эксергетического анализа систем гидротермального теплоснабжения.

Последние исследования и публикации. Обычно, гидротермальные источники горячей воды представляют собой фонтанирующие скважины, которые бурились как разведочные при поиске газовых или нефтяных месторождений [1]. Если скважина при этом вскрывала не газовое или нефтяное месторождение, а водоносный (пласт) коллектор горячей геотермальной воды, то при существенном дебите и высокой температуре воды она затем использовалась в качестве теплогенератора системы гидротермального теплоснабжения крупных коммунальных объектов и больших тепличных хозяйств.

Применение же насосной подачи горячих геотермальных вод из глубокого водоносного горизонта на поверхность для их последующего использования в системах теплоснабжения – это достаточно сложная задача, поскольку для этого необходимы герметичные погружные насосы, которые должны работать в условиях повышенной температуры и коррозионно активных сред с высокой минерализацией их состава. Выпускаемые в нашей стране погружные насосы имеют недостаточно высокий ресурс, а зарубежное оборудование – высокую цену.

В общем случае [7] выражение физической эксергии рабочих тел включает термическую и механическую составляющие. Для движения несжимаемой жидкости имеет значение только механическая составляющая. При абсолютном давлении p_i , Па, Я. Шаргут [7] приводит следующее выражение:

$$\Delta EX_A = W \cdot (p_i - p_0) = WP, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где W – средний объем, м^3 , в границах от давления окружающей среды p_0 , Па, до давления p_i , Па; $P_i = p_i - p_0$, Па, – избыточное давление несжимаемой жидкости. Для потока жидкости применяется поток эксергии, Вт, то есть, эксергия объёма жидкости, получаемого из скважины за одну секунду V , $\text{м}^3/\text{с}$. По формуле (1):

$$\Delta ex_A = V(p_i - p_0) = VP, \text{ Вт}. \quad (2)$$

В работе [8] приводится уравнение для дебита $V(P_i)$ фонтанирующих

скважин в зависимости от противодействия на выходе P_i :

$$V = V_{max}(1 - P_i/P_{max}), \quad (3)$$

где V_{max} – максимальный дебит фонтанирующей скважины при отсутствии противодействия, м³/с, P_{max} – максимальное давление в заглушённом устье скважины, Па.

Для термической составляющей эксергии несжимаемой жидкости [9], в случае, если её температура переменная, что характерно для систем тепло-снабжения, имеем удельную эксергию на 1 кг воды:

$$Ex_q = \int \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) dq = q - T_0 \int \frac{dq}{T_i}, \quad q = \int c_p(T_i) dT_i, \text{ Дж/кг}, \quad (4)$$

где c_p – удельная изобарная теплоёмкость, Дж/(кг К).

В некоторых случаях (например, для воды) можно принять $c_p \approx \text{const}$. В этом случае в результате интегрирования уравнения (4) получают:

$$Ex_q = c_p(T_i - T_0) \left(1 - \frac{T_0}{T_{\ln, i-0}}\right), \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $T_{\ln, i-j}$ – среднелогарифмическая температура от температуры T_i до T_j :

$$T_{\ln, i-j} = (T_i - T_j) / \ln(T_i / T_j), \text{ К}. \quad (6)$$

В случаях, когда температура T_i близка к температуре T_j ($T_i \rightarrow T_j$), выражение (6) стремится к неопределённости типа: 0/0 (раскрывающейся как T_j), что создаёт проблемы при расчётах. Я. Шаргут [7] предлагает в таких случаях температуру T_0 выносить из скобок, а выражение в скобках для удельной эксергии (5) раскладывать в степенной ряд:

$$\Delta Ex_q = c_p T_0 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{T_i - T_0}{T_0} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{T_i - T_0}{T_0} \right)^3 + \dots \right), \text{ Дж/кг}. \quad (7)$$

В уравнении (7) достаточно использовать первые два члена разложения. Несмотря на это, использование уравнения (7) в практических задачах неудобно. В. Бродянский [10] рекомендует использовать вместо среднелогарифмической температуры её среднеарифметическое приближение $T_{AP, i-j} = (T_i + T_j) / 2$. При этом для формулы (6) получаем самое грубое приближение, для которого выражение удельной эксергии воды имеет вид:

$$Ex_q \approx c_p T_0 (T_i - T_0) / (T_i + T_0), \text{ Дж/кг.} \quad (8)$$

Уравнение (8) при всей его простоте даёт низкую точность. Поэтому необходимо найти приближение для среднелогарифмической температуры, одновременно достаточно точное и удобное для расчётов.

Формулировка целей статьи. Целями данной работы является оптимизация работы геотермальной скважины и определение эксергетической производительности скважины для правильной тарификации отпуска горячей воды.

Оптимизация дебита фонтанирующей скважины системы теплоснабжения. Оптимальным режимом работы скважины будем считать случай, когда фонтан геотермальной воды производит на поверхности земли максимальный поток механической эксергии. По уравнениям (2) и (3) после элементарных преобразований:

$$\Delta ex_A = P_{max} V_{max} \left[\frac{V}{V_{max}} \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right) \right] = P_{max} V_{max} \left[- \left(\frac{V}{V_{max}} \right)^2 + \frac{V}{V_{max}} \right], \text{ Вт.} \quad (9)$$

За квадратными скобками находятся константы скважины, а в квадратных скобках – квадратичная парабола относительно V/V_{max} . Корни параболы $V/V_{max} = 0$ и $V/V_{max} = 1$, а максимум – их среднее арифметическое (по свойству симметрии квадратичной параболы относительно вертикальной оси) $V_{opt}/V_{max} = 1/2$. Таким образом, по уравнению (9) оптимальный расход горячей воды, при котором максимально используется её механическая эксергия:

$$V_{opt} \approx V_{max} / 2; \quad \Delta ex_{A,max} = P_{max} V_{max} / 4. \quad (10)$$

Приближение для среднелогарифмической температуры горячей воды.

В качестве очень компактного приближения для среднелогарифмической температуры, и более точного, чем (8), предлагается среднее геометрическое $T_{geom, i-j} = (T_i T_j)^{1/2}$. В этом случае выражение удельной эксергии воды (5) принимает следующий вид:

$$Ex_q \approx c_p (T_i - T_0) (1 - (T_0 / T_i)^{1/2}), \text{ Дж/кг.} \quad (11)$$

Использование более точного, чем (7) среднегеометрического приближения для среднелогарифмической температуры исключает неопределённость типа 0/0, причём практически без потери точности (рис. 1). Например, при температуре воды $T = 373,15 \text{ К}$ ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) и окружающей среды $T_0 = 233,15 \text{ К}$ (минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$) расхождение между средними значениями составляет по рис. 1 лишь 0,93 %.

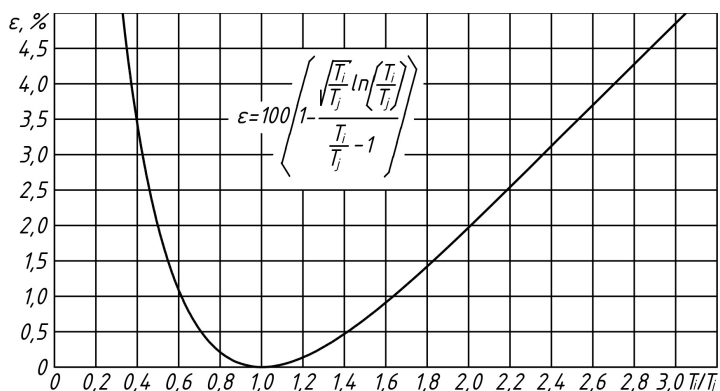


Рис. 1. Расхождение между среднелогарифмической и средней геометрической температурой

В случае, если поток теплоносителя (например, воды) охлаждается в системе теплоснабжения от температуры T_1 , К, до T_2 , К, отводимая удельная эксергия определяется как разность начальной и конечной эксергии по уравнению (5). После элементарных преобразований с учётом предложенной аппроксимации среднелогарифмической температуры средней геометрической:

$$\begin{aligned} \Delta Ex_q &= Ex_{q1} - Ex_{q2} = c_p (T_1 - T_2) \left(1 - \frac{T_0}{T_{\ln,1-2}} \right) \approx \\ &\approx c_p (T_1 - T_2) \left(1 - \frac{T_0}{\sqrt{T_1 T_2}} \right), \text{ Дж/кг}. \end{aligned} \quad (12)$$

Применив же разность эксергий по приближенной формуле (11), получить простыми преобразованиями приближенную формулу (12) не удастся. Разница эксергии по приближенной формуле (11) до двух раз грубее, чем отводимая эксергия по формуле (12), поскольку в первом случае приближение используется дважды, а во втором – один раз.

Эксергетическая производительность фонтанирующей скважины.

Поток физической эксергии геотермальной воды из фонтанирующей скважины включает две составляющие: механическую и термическую.

Механическая составляющая потока эксергии горячей воды определяется по уравнению (9) или через давление по уравнениям (2) и (3):

$$\Delta ex_A = P_{max} V \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right) = V_{max} P \left(1 - \frac{P}{P_{max}} \right), \text{ Вт}. \quad (13)$$

Термическая составляющая определяется произведением удельной эксергии (12) и массового расхода (ρV), кг/с, воды плотностью ρ , кг/м³, в скважине:

$$\Delta ex_q = \rho V \Delta Ex_q \approx c_p \rho V (T_1 - T_2) \left(1 - \frac{T_0}{\sqrt{T_1 T_2}} \right) = Q \left(1 - \frac{T_0}{\sqrt{T_1 T_2}} \right), \text{ Вт}, \quad (14)$$

где Q – тепловая нагрузка системы теплоснабжения:

$$Q = c_p \rho V (T_1 - T_2), \text{ Вт}. \quad (15)$$

Суммарное выражение для физической эксергии гидротермального источника:

$$\Delta ex = \Delta ex_A + \Delta ex_q = V \left(P_{max} \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right) + c_p \rho (T_1 - T_2) \left(1 - \frac{T_0}{\sqrt{T_1 T_2}} \right) \right), \text{ Вт}. \quad (16)$$

Расчёты тепловой нагрузки и потока эксергии в системах тепло-снабжения. Проведём расчёт параметров двух систем гидротермального тепло-снабжения, расположенных в пос. Янтарное и пос. Ново-Алексеевка АР Крым. Вся вода, поступающая из скважин в эти системы теплоснабжения, после её охлаждения закачивается обратно в пласт для поддержания в нем начального давления. Температура «обратной» воды обычно принимается равной $t_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_2 = 308,15 \text{ К}$), поскольку при дальнейшем понижении температуры резко возрастает её динамическая вязкость и, соответственно, потери давления на закачку в пласт. Так, например, при снижении температуры воды с $80 \text{ }^\circ\text{C}$ до $20 \text{ }^\circ\text{C}$ значение динамической вязкости увеличивается почти втрое. Кроме того, закачка геотермальной воды в водоносный коллектор исключает экологические проблемы при сбросе высокоминерализованных и химически активных геотермальных вод в окружающую среду. Температуру «окружающей среды» для периода «осень-зима-весна» в АР Крым можно принять $t_0 = +12 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 285,15 \text{ К}$).

Пример 1. Система гидротермального теплоснабжения на основе фонтанирующей скважины в пос. Ново-Алексеевка (АР Крым), характеризуется следующими параметрами: максимальный дебит $205 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $V_{max} = 205 / 3600 = 0,05694 \text{ м}^3/\text{с}$, температура воды $t_1 = 53 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_1 = 326,15 \text{ К}$).

Результаты расчета:

- 1) оптимальный расход в системе по формуле (10):

$$V_{opt} = V_{max} / 2 = 0,05694 / 2 = 0,002847 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 102,5 \text{ м}^3/\text{ч};$$

- 2) тепловая нагрузка в системе по уравнению (15):

$$Q = V_{opt} \rho c_p (T_1 - T_2) = 0,002847 \cdot 1000 \cdot 4190 \cdot (326,15 - 308,15) = 2,15 \cdot 10^6 \text{ Вт} \\ \text{или } 513 \text{ ккал/с};$$

3) поток эксергии в системе по зависимости (14):

$$\Delta ex_q = Q \left(1 - \frac{T_0}{\sqrt{T_1 T_2}} \right) = 2,15 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{285,15}{\sqrt{326,15 \cdot 308,15}} \right) = 2,16 \cdot 10^5 \text{ Вт или } 216 \text{ кВт.}$$

Пример 2. Система гидротермального теплоснабжения на основе фонтанирующей скважины в пос. Янтарное (АР Крым), характеризуется следующими параметрами: максимальный дебит 65 м³/ч или $V_{max} = 65 / 3600 = 0,01806 \text{ м}^3/\text{с}$, температура воды $t_1 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_1 = 358,15 \text{ К}$).

Результаты расчета:

1) оптимальный расход в системе по формуле (10):

$$V_{opt} = V_{max} / 2 = 0,0181 / 2 = 0,00903 \text{ м}^3/\text{с или } 32,5 \text{ м}^3/\text{ч};$$

2) тепловая нагрузка в системе по уравнению (15):

$$Q = V_{opt} \rho c_p (T_1 - T_2) = 0,00903 \cdot 1000 \cdot 4190 \cdot (358,15 - 308,15) = 1,89 \cdot 10^6 \text{ Вт или } 452 \text{ ккал/с};$$

3) поток эксергии в системе по зависимости (14):

$$\Delta ex_q = Q \left(1 - \frac{T_0}{\sqrt{T_1 T_2}} \right) = 1,89 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{285,15}{\sqrt{358,15 \cdot 308,15}} \right) = 2,68 \cdot 10^5 \text{ Вт или } 268 \text{ кВт}$$

Анализ расчётов двух систем гидротермального теплоснабжения показывает, что для первой системы продавать потребителю теплоэнергию выгоднее на основе теплового тарифа, а во втором случае (при высокой начальной температуре) тепловую энергию выгоднее продавать на основе эксергетического тарифа.

Выводы. На основе предложенного в данной работе приближения для среднеинтегральной температуры отвода тепловой энергии от горячей геотермальной воды в системе теплоснабжения появляется возможность инженерного анализа эксергетического баланса системы гидротермального теплоснабжения. Оценка тепловой энергии для теплоснабжения коммунальных объектов приводит к тому, что горячая вода для теплоснабжения подаётся потребителям при невысокой температуре, но при больших расходах. Это выгодно организациям – поставщикам тепловой энергии, однако невыгодно потребителям, поскольку, например, в системах отопления площадь отопительных приборов рассчитана на достаточно высокую температуру воды. В практике расчётов за геотермальную воду целесообразно использовать эксергетический тариф на горячую воду для теплоснабжения.

Перспективы дальнейших исследований. В дальнейшем планируется разработать подход к формированию эксергетического тарифа на геотермальную

воду. Также планируется оптимизация гидротермального теплоснабжения по двум переменным: не только по расходу теплоносителя, но и по температуре «обратной» воды с использованием суммарной эксергии в качестве целевой функции.

Литература

1. Геотермальное теплоснабжение / А. Г. Гаджиев, Ю. И. Султанов, П. Н. Ригер и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 119 с.
2. Луданов К.И. Геотермальная энергетика. Обзор состояния. Оценка ресурсов. Анализ решений. Прогноз развития / К.И. Луданов // Энергетика та електрифікація. – 2016, № 14 (397) – С. 29-33.
3. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України // Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – Київ, 2008. – 55 с.
4. ВСН 36-77. Инструкция по комплексному использованию геотермальных вод для теплохладоснабжения зданий и сооружений. / Госгражданстрой. – действ. с. 01.07.1978. – Москва: Стройиздат, 1978.
5. Kuzgunkaya E.H. Evaluation of Turkey's Geothermal Energy in term of Exergy Analysis / E.H. Kuzgunkaya // Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.– P. 1-9.
6. Янтовский Е.И. Потоки энергии и эксергии / Е.И. Янтовский. – Москва: «Наука», 1988. – 144 с.
7. Szargut J. Energetyka cieplna w hutnictwie / J. Szargut . – Katowice, «Śląsk», 1971. – 568 s.
8. Иконникова Л.Н. Оценка забойного давления фонтанирующей скважины при его значении ниже давления насыщения / Л.Н. Иконникова, А.Б. Золотухин // Вестник ПНИПУ «Геология. Нефтяное и горное дело». 2012, №2 С.61-68.
9. Техническая термодинамика. Учебник для ВУЗов / Крутов В.И. и др. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
10. Соколов Е.А. Эксергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. Пособие для ВУЗов / Е.А. Соколов, В. М. Бродянский. – 2-е изд. –Москва: Энергоиздат, 1981 г. – 320 с.

References

1. Gadzhiev A. G., Sultanov Yu. I., Riger P. N. *Geotermalnoe teplosnabzhenie*. Energoatomizdat, 1984.
2. Ludanov K.I. “Geotermalnaia energetika. Obzor sostoianiiia. Otsenka resursov. Analiz reshenii. Prognoz razvitiia.” *Enerhetyka ta elektryfikatsiia*, no. 14 (397), 2016, P. 29-33
3. *Atlas energetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel energii Ukrainy*. Kyiv, 2008.
4. *Instruktsiia po kompleksnomu ispolsovaniuu geotermalnykh vod dlia teplokhladosnabzheniia zdanii i sooruzhenii*. VSN 36-77. Stroiizdat, 1978
5. Kuzgunkaya E. H. “Evaluation of Turkey's Geothermal Energy in term of Exergy Analysis.” *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*, P. 1-9
6. Yantovskii E.I. *Potoki energii i eksergii*. Nauka, 1988
7. Szargut J. *Energetyka cieplna w hutnictwie*. Slask, 1971
8. Ikonnikova L. N., Zolotukhin A. B. “Otsenka zaboynogo davleniia fontaniruiushchei skvazhini pri ego znachenii nizhe davleniia nasyshcheniia.” *Vestnik PNIPU «Geologiya*.

Neftianoe i gornoie delo», no. 2, 2012, P. 61-68.

9. Krutov V. I. *Tekhnicheskaiia termodinamika*. Energoatomizdat, 1983.

10. Sokolov E. A., Brodianskii V. M. *Eksergeticheskie osnovy transformatsii tepla i processov okhlazhdeniia: ucheb. posobie dlia VUZov*. Energoatomizdat, 1981.

УДК 697.34:551.23

Оптимізація параметрів й ексергетичний аналіз систем гідротермального теплопостачання

К. І. Луданов¹

¹к.т.н., с.н.с. Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна, k.i.ludanov@ukr.net

Анотація. В роботі проведена оптимізація параметрів режиму експлуатації й ексергетичний аналіз систем гідротермального теплопостачання на основі свердловин, що фонтанують, які відкривають геотермальне родовище гарячої води. Оптимізація проведена за дебітом теплоносія з використанням корисної ексергії фонтана як цільової функції. Ексергетичний аналіз виконано для термічної складової енергії теплоносія. Наведено приклади розрахунку оптимальних параметрів теплоносія й виробництва теплової енергії та ексергії для двох реальних систем гідротермального теплопостачання

Ключові слова: оптимальний режим, ексергетичний аналіз, геотермальна енергетика, гідротермальне теплопостачання, свердловина, що фонтанує, геотермальна вода.

UDC 697.34: 551.23

Optimization of Parameters and Exergy Analysis of Hydrothermal Heating Systems

K.I. Ludanov¹

¹Ph.D., Senior Scientist. Institute for Renewable Energy of the NAS of Ukraine, m. Kyiv, Ukraine, k.i.ludanov@ukr.net

In this work the optimization of operating mode parameters and exergy analysis of hydrothermal heating systems based on flowing wells, which reveal the geothermal field of hot water. Optimization performed by debit coolant using a fountain of useful energy in an optimal function. Exergy analysis performed for the thermal component of the coolant energy. Examples of the calculation of the optimal parameters of the coolant and heat production and Exergy for two real systems of hydrothermal heating.

Keywords: optimal mode, exergy analysis, geothermal, hydrothermal heating, gushing wells, geothermal water.

Надійшла до редакції 7 грудня 2016 р.