

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 519.8:553.065

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ЗАДАЧИ ЕЕ ОПТИМИЗАЦИИ

Д. К. Джаватов

Институт проблем геотермии ДНЦ РАН

Рассматриваются вопросы повышения эффективности системы теплоснабжения на основе геотермальной энергии. Построена математическая модель системы с использованием пикового отопителя. Показано, что эксплуатация системы в оптимальном режиме позволяет повысить ее эффективность.

Issues concerning the raise of efficiency of heat supply on the basis of geothermal energy are being considered. The mathematic model of system using the peak heater has been build. It has been demonstrated that the operation of the system in optimal regime allows to raise its efficiency.

Ключевые слова: комбинированная система геотермального теплоснабжения; пиковый отопитель; оптимальное управление; эффективность.

Keywords: combined system of geothermal heat supply, peak heater, optimal management, efficiency.

Энергетика сегодня является одним из важнейших секторов, а в некотором смысле и локомотивом экономики. В связи с этим основой современной энергетической политики стал поиск мер, направленных на повышение эффективности использования энергии, энергосбережение, сокращение или ослабление воздействия энергетических объектов на окружающую среду. Альтернативой сложившейся структуре используемых традиционных источников энергии могут служить возобновляемые источники энергии. Одним из перспективных видов возобновляемой энергии является геотермальная энергия, накоплен значительный опыт ее практического использования. Однако, несмотря на это, доля геотермальной энергии в топливно-энергетическом балансе России незначительна.

Практический опыт показывает, что наиболее эффективная область использования геотермальных вод – это отопление, горячее и техническое водоснабжение жилых промышленных и сельскохозяйственных объектов [1]. В настоящее время в мире работают геотермальные системы теплоснабжения общей мощностью более 17000 МВт. Использование геотермальной энергии для теплоснабжения за последние годы увеличилось на 56%.

Из-за сезонного характера использования потребителем геотермальной энергии максимальный энергетический эффект достигается созданием специальных систем отопления – геотермальных теплораспределительных станций (ТРС) с повышенным перепадом температур – с использованием пикового догрева. Это особенно актуально, когда термальная вода используется в системах теплоснабжения, работающих не круглогодично.

Пиковый подогрев термальной воды может осуществляться как в обычных котельных, так и с помощью электрической энергии в электробойлерах.

Разработано и рекомендовано множество схем включения пикового догрева в общую схему теплоснабжения [1]. Обязательным при этом должно быть экономически оптимальное соотношение энергетических затрат геотермального и традиционных источников тепла.

Использование пикового отопителя на традиционном виде топлива в системе геотермального теплоснабжения увеличивает энергетическую эффективность систем геотермального теплоснабжения на 50–60%.

Проблема управления системами теплоснабжения охватывает широкий комплекс взаимосвязанных вопросов, касающихся технической политики в области развития систем, их расчета, оптимального проектирования и управления режимами работы в процессе эксплуатации.

Разработана математическая модель комбинированной системы геотермального теплоснабжения (КСГТ) с пиковым догревом, построенной на базе геотермальной циркуляционной системы (ГЦС), для которой на основе методов теории оптимального управления [2] решен ряд задач оптимизации ее эксплуатации.

В качестве критерия эффективности рассматривается минимум функционала приведенных затрат [3]:

$$I = \int_0^t \left(p_1 k_1 + (p_2 - p_1) \left[2t_0 k_2 \bar{W} + \frac{(t_* - 2t_0) \bar{W}^2}{V} \right] + \frac{p_3 u}{V} \right) e^{-\delta t} dt ,$$

где $p_1(t)$, $p_2(t)$ – стоимостные оценки единиц тепловой энергии термальной воды и отопителя в t -м году, $p_3(t)$ – стоимость наращивания единицы мощности отопителя, δ – коэффициент дисконтирования, t_0 – время конца пиковых нагрузок на комбинированную систему, t_* – время отключения отопительной системы, $\bar{W}(t)$ – максимальная мощность отопителя в t -м году; t – время, $V(t)$ – объем отапливаемого помещения в t -м году, k_1, k_2 – постоянные, u – скорость наращивания мощности пикового отопителя.

В качестве функции управления рассматривается скорость наращивания максимальной мощности пикового отопителя v , которое задается уравнением:

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = u(t)$$

с естественными ограничениями: $0 \leq u(t) \leq \bar{u}$,

где \bar{u} – максимальные возможности по наращиванию мощности пикового отопителя.

Уравнение изменения теплового потенциала термальной воды имеет вид [3]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(\bar{W}^2(t)(t_* - 2t_0) + 2t_0 k_2 V \cdot \bar{W}(t) - k_1 \cdot V}{V_k Cr} ,$$

где V_k – объем подземного котла, $T(t)$ – температура добываемой термальной воды в t -м году.

Задаются начальные условия: $T_0 = T(0) > 0$, $W_0 = \bar{W}(0) = \bar{W}_0 > 0$ и условие на правый конец: $T(t) = T_k$, где $T_k > T_3$, T_3 – температура закачиваемой обратно в пласт воды.

Последнее условие означает, что ГЦС работает до полного истощения теплового потенциала термальной воды. Время эксплуатации КСГТ – τ считаем заданным.

В результате исследования модели построена следующая функция оптимального управления:

$$u_{\text{опт}}(t) = \begin{cases} 0 \text{ или } \bar{u}, & t \in [0, t_1], \\ u^*(t), & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \in [t_2, \tau] \end{cases}$$

где
$$\mathbf{u}_{\text{опт}}^*(t) = \frac{1}{(t_* - 2t_0)} \left\{ \frac{p_3}{\left(p_0 V - \frac{I}{V_k Cr} V^2 \right)} \left\{ 0,5 \frac{d^2 V}{dt^2} - \frac{\left(\frac{dV}{dt} \right)^2 \left(p_0 - \frac{2I}{V_k Cr} V \right)}{2 \cdot V \left(p_0 - \frac{I}{V_k Cr} V \right)} \right\} - t_0 k_2 \frac{dV}{dt} \right\},$$

$I = const$, а точки t_1 и t_2 определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} T_k - T_0 &= \frac{\bar{W}_0^2 (t_* - 2t_0)}{V_k Cr} t_1 + \frac{(2t_0 k_2 \bar{W}_0 - k_1)}{V_k Cr} \int_0^{t_1} S dq + \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \frac{\bar{W}^{*2} [t_* - 2t_0] + 2t_0 k_2 S \cdot \bar{W}^* - k_1 S}{V_k Cr} dq + \\ &+ \frac{\bar{W}^{*2} (t_2)(t_* - 2t_0)(t - t_2)}{V_k Cr} + \frac{(2t_0 k_2 \bar{W}^*(t_2) - k_1)}{V_k Cr} \int_{t_2}^t S dq \end{aligned}$$

и
$$\bar{W}_0 = \frac{1}{(t_* - 2t_0)} \left\{ \frac{p_3 \frac{dS}{dt} \Big|_{t=t_1}}{2 \left(p_0 \cdot S(t_1) - \frac{I}{V_k Cr} S^2(t_1) \right)} - t_0 k_2 S(t_1) \right\}.$$

Конкретный вид оптимального управления зависит от начального значения \bar{W}_0 , и в зависимости от соотношений между значениями \bar{W}_0 и \bar{W}_0^* он будет различным. Для этого вычисляем $\bar{W}^*(0)$ по следующей формуле:

$$\bar{W}^*(t) = \frac{1}{(t_* - 2t_0)} \left\{ \frac{p_3 \frac{dV}{dt}}{2 \left(p_0 V - \frac{I}{V_k Cr} V^2 \right)} - t_0 k_2 V \right\},$$

и тогда обязательно будет иметь место один из следующих случаев:

1) $\bar{W}_0^* < \bar{W}_0$. Это значит, что существует момент времени $t_1 \in]0, t_2[$, который определяется уравнением:

$$\bar{W}^*(t_1) = \bar{W}_0.$$

Оптимальное управление в этом случае имеет вид

$$\mathbf{u}_{\text{опт}}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_1[\\ \mathbf{u}^*(t), & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \in]t_2, t] \end{cases};$$

2) $\bar{W}_0^* = \bar{W}_0$. Тогда имеем $t_1 = 0$,

$$\mathbf{u}_{\text{опт}}(t) = \begin{cases} \mathbf{u}^*(t), & t \in [0, t_2] \\ 0, & t \in]t_2, t] \end{cases};$$

3) $\bar{W}_0^* > \bar{W}_0$. Тогда существует точка $t_1 \in]0, t_2[$, такая, что на $[0, t_1]$ оптимальное управление $\mathbf{u}_{\text{опт}}(t) = \bar{\mathbf{u}}$, а функция \bar{W} имеет вид:

$$\bar{W}(t) = \bar{W}_0 + \bar{\mathbf{u}} \cdot t,$$

а t_1 - является решением уравнения $\bar{W}_0 + \bar{\mathbf{u}} \cdot t = \bar{W}^*(t)$.

Оптимальное управление в этом случае имеет вид:

$$u_{\text{онт}}(t) = \begin{cases} \bar{u}, & t \in [0, t_1[, \\ u^*(t), & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \in]t_2, t]. \end{cases}$$

Результаты расчета характеристик СГТ с пиковым отопителем

\bar{W}_0 , тыс. Гкал/год	t_1 , лет	t_2 , лет	ΔI^* , руб/м ² /год	I (в пост. реж.), руб/м ² /год	$\Delta I / I$, %
$\bar{W}^*(0) > \bar{W}_0$, $t_0 = 50$ сут, $\bar{W}^*(0) = 21188$ Гкал/год, $u_{\text{онт}}(t) = 106$ Гкал/год					
20	1.2	15.6	18.2	32.86	55
16	5.1	17.5	16	32.86	48
10	11.2	20.8	12.6	32.86	38
8	13.2	21.9	11.5	32.86	35
5	16.2	23.8	9.8	32.86	29
$\bar{W}^*(0) > \bar{W}_0$, $t_0 = 55$ сут, $\bar{W}^*(0) = 16648$ Гкал/год, $u_{\text{онт}}(t) = 83,2$ Гкал/год					
15	1.6	15.6	15.5	28.4	54
10	6.7	18.3	13.1	28.4	46
8	8.8	19.5	12.1	28.4	43
5	11.7	20.8	10.7	28.4	37.5
$\bar{W}^*(0) < \bar{W}_0$, $t_0 = 50$ сут, $\bar{W}^*(0) = 21188$ Гкал/год, $u_{\text{онт}}(t) = 106$ Гкал/год					
21.3	0.1	15.6	19.3	32.8	59
22.5	1.3	17.7	17.1	32.8	52
23	1.8	18.5	16.7	32.8	51

* Через ΔI обозначена разность функционалов приведенных затрат, соответствующих оптимальному и постоянному режимам эксплуатации.

В таблице приведены результаты расчетов, проведенных по разработанному алгоритму для условий г. Кизляра при различных значениях параметра \bar{W}_0 и следующих стоимостных показателях тепловой энергии: геотермальной – 142.3 руб/Гкал; пикового отопителя – 270 руб/Гкал.

Расчет, проведенный по модели, показывает, что для случая $\bar{W}^*(0) > \bar{W}_0$ с увеличением значения \bar{W}_0 время t_1 уменьшается так же, как и время t_2 , а эффективность системы увеличивается. Повышение эффективности системы с увеличением значения \bar{W}_0 объясняется тем, что для покрытия пиковых нагрузок в меньшей степени используется более дорогая наращиваемая мощность отопителя. Чем ближе значение \bar{W}_0 к $\bar{W}^*(0)$, тем выше эффективность системы.

Проведенные расчеты убедительно показывают, что оптимизация СГТ позволяет существенно повысить эффективность системы, обеспечивая при этом насущные потребности в тепловой энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геотермальное теплоснабжение / А.Г. Гаджиев, Ю.И. Султанов, П.Н. Ригер, А.Н. Абдуллаев, А.Ш. Мейланов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 117 с.
2. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
3. Джаватов Д.К., Сокол В.А., Федосеев А.В. Имитационная модель и задачи оптимизации разработки геотермального месторождения. Препринт. М.: ВЦ РАН, 1994. 38 с.

Поступила в редакцию 01.02.2012 г.
Принята к печати 26.03.2012 г.