

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ЗАДАЧИ ЕЕ ОПТИМИЗАЦИИ

Д.К. ДЖАВАТОВ

*Институт проблем геотермии ДНЦ РАН
г. Махачкала, просп. Шамиля, 39а*

Предложена термодинамическая модель комбинированной системы геотермального теплоснабжения. Показано, что ее оптимизация позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации.

It is offered a thermodynamic model of the geothermal heating's multifunction system. It is shown that its optimization allows greatly to raise efficiency to usages.

Технология добычи геотермальной энергии сводится к способам и средствам обеспечения необходимой интенсивности и длительности процессов теплопереноса в геотермальных коллекторах зон теплоотбора и в скважинах геотермальных систем.

В настоящее время существует различные физические модели подземного коллектора, через который фильтруется жидкость.

В реальном диапазоне изменения природных физико-химических условий, температуры ($0 < T < 600^\circ \text{C}$) и давления ($0 < P < 80 \text{ МПа}$) флюид является, по существу, водой, которая может выступать в роли жидкости и (или) пара. На границе существования фаз свойства воды – плотность, энтальпия, вязкость – испытывают разрыв на так называемой линии насыщения ($0 < T < 375^\circ \text{C}$, $0 < P < 22,5 \text{ МПа}$), при более высоких температурах и давлениях граница фаз также проявляется в виде скачков плотности, энтальпии и вязкости, но эти скачки уже являются непрерывными функциями. В большинстве случаев высокотемпературные термальные воды имеют хлоридный натриевый состав, минерализацию до 10-15 г/кг, содержат растворенные газы (преобладает метан и углекислый газ). Такие воды мало отличаются по своим теплофизическим свойствам от пресной воды, и это позволяет пользоваться при моделировании теплопереноса свойствами последней.

Существенно отличается подход к постановке задачи для пористых и трещиноватых коллекторов, так как структурными различиями коллекторов связаны различия и в способе перехода тепла из массива в пласт. Но неизбежным и в том и в другом случае является его структура при помощи введения идеальной модели.

Среди существующих математических моделей теплообмена при фильтрации жидкости в пористых средах можно выделить два подхода. Гомогенный подход, когда вместо двух компонентов - жидкость и твердые частицы - рассматривается один с эффективными характеристиками. Такая модель справедлива при достаточно большой величине удельной поверхности твердого скелета и достаточно большом коэффициенте теплопроводности частиц. И гетерогенный подход, когда учитывается влияние размеров блоков и условия теплообмена между блоками породы и жидкостью.

В зависимости от природно-технологических особенностей коллекторов и принятых способов подъема теплоносителя, условия развития процессов теплопереноса в геотермальных системах разных типов оказыва-

ются существенно различными. Уровень температуры, фазовый состав теплоносителя и их изменения по пути его движения и по времени в разных элементах геотермальной системы зависят от многих факторов - глубины, диаметра и схемы расположения скважин, геотермического градиента, теплофизических и коллекторных свойств горных пород и многих других факторов.

Целевая задача геотермальной теплофизики сводится к обоснованию методики расчета основных показателей теплового режима геотермальных систем, обеспечивающей возможность их рационального проектирования и эксплуатации, имеющей значение для выбора технологических решений, оптимизации систем разработки и определения экономических показателей освоения геотермальной энергии.

Для качественного исследования математических моделей реальных физических процессов, протекающих в геотермальных системах, с использованием методов оптимизации применение последних непосредственно к моделям, как правило, невозможно ввиду большой сложности моделей. В тоже время из исходной модели можно при различных упрощающих предположениях получить достаточно простые (аппроксимирующие) модели, содержащие функции управлений. Для этих аппроксимирующих моделей могут быть поставлены и решены различные оптимизационные задачи, решение которых может позволить качественно оценить поведение моделируемого объекта, указать наиболее предпочтительные области варьирования управлений.

Геотермальные теплоносители в диапазоне температур $30 \dots 300^\circ \text{C}$ могут использоваться весьма эффективно в энергетике, в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, бальнеологии и т.д. Но наиболее широкое применение геотермальная энергия получила для выработки электроэнергии и в теплоснабжении, где она сегодня вполне конкурентоспособна.

Практический опыт показывает, что наиболее эффективная область использования геотермальных вод - отопление, горячее и техническое водоснабжение жилых промышленных и сельскохозяйственных объектов [3]. 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 потребления потребителем геотермальной энергии, максимальный энергетический эффект достигается созданием специальных систем отопления с повышенным перепадом температур - исполь-

зованием пикового догрева [3]. Это особенно сильно сказывается, когда термальная вода используется в системах теплоснабжения, работающих только часть года.

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

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

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.

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

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

с естественными ограничениями:

$$0 \leq v(t) \leq \bar{v}$$

где \bar{v} - максимальные возможности по наращиванию мощности пикового отопителя.

Уравнение изменения теплового потенциала термальной воды имеет вид [1]:

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

В качестве критерия эффективности рассматривается минимум функционала приведенных затрат [1]:

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

где V_k - объем подземного котла.

Задаются начальные условия $T_0 = T(0) > 0$, $W_0 = \bar{W}(0) = \bar{W}_0 > 0$

и условие на правый конец

$$T(\tau) = T_k,$$

где $T_k > T_3$, T_3 - температура закачиваемой обратно в пласт воды, $\bar{W}(t)$ - максимальная мощность отопителя в t -м году; t - время, $T(t)$ - температура добываемой термальной воды в t -м году, $S(t)$ - объем отапливаемого помещения в t -м году, k_1, k_2 - постоянные.

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

В результате исследования построенной модели построена следующая функция оптимального управления:

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

где,

$$v^*(t) = \frac{1}{(t_* - 2t_0)} \left\{ \frac{p_3}{\left(p_0 S - \frac{\lambda}{V_k C \rho} S^2 \right)} \left\{ 0,5 \frac{d^2 S}{dt^2} - \frac{\left(\frac{dS}{dt} \right)^2 \left(p_0 - \frac{2\lambda}{V_k C \rho} S \right)}{2 \cdot S \left(p_0 - \frac{\lambda}{V_k C \rho} S \right)} \right\} - t_0 k_2 \frac{dS}{dt} \right\}$$

$$\lambda = const.$$

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

$$\bar{W}^*(t) = \frac{1}{(t_* - 2t_0)} \left\{ \frac{p_3 \frac{dS}{dt}}{2 \left(p_0 S - \frac{\lambda}{V_k C \rho} S^2 \right)} - t_0 k_2 S \right\}$$

и, тогда, обязательно, будет иметь место один из следующих случаев (рис.3.3):

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

$\bar{W}^*(t_1) = \bar{W}_0$. Оптимальное управление в этом случае имеет вид

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО

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

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

$$v_{\text{опт}}(t) = \begin{cases} v^*(t), & t \in [0, t_2] \\ 0, & t \in]t_2, \tau] \end{cases}$$

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

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

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

Оптимальное управление в этом случае имеет вид:

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

Для определения второй точки переключения t_2 для каждого случая получено соответствующее уравнение [4].

Проведем численные расчеты по построенной модели для условий г.Кизляра со следующими данными:

Характеристики водоносного пласта:

$T_0=378$ К, $C=4,19$ кДж/кг·К, $\rho=998$ кг/м³,
 $q=4300$ м³/сут, $V_k=5 \cdot 10^7$ м³.

Параметры СГТ :

$t_* = 75$ сут, $t_{**} = 290$ сут, $t_{00} = 345$ сут, $T_k=345$ К, $T_s = 330$ К, $S_0=10^5$ м³/сут, $\zeta_0=50$ м³/сут, $\bar{v}=1000$ тыс. Гкал/год, $\tau=30$ лет.

Расчетные значения: $\tilde{t}_1=50$ сут, $\tilde{t}_2=320$ сут.

Стоимостные показатели тепловой энергии:

-геотермальной - 142,3 руб/Гкал;
 -пикового отопителя - 270 руб/Гкал.
 -наращивание единицы мощности пикового отопителя – 500 руб/Гкал.

В таблице 1 приведены результаты численных расчетов, полученные для различных значений параметра \bar{W}_0 .

Таблица 4.

Результаты расчета характеристик СГТ с пиковым отопителем

\bar{W}_0 , тыс. Гкал/год	t_1 , лет	t_2 , лет	ΔI^* , тыс. Гкал	I (в пост. реж.), тыс. Гкал	$\Delta I / I$, %
Случай $\bar{W}^*(0) > \bar{W}_0$. $t_0 = 50$ сут, $\bar{W}^*(0) = 21188$ Гкал/год, $v_{\text{опт}}(t) = 106$ Гкал/год					
20	1,2	15,6	18,2	32,86	55
18	3,2	16,6	17	32,86	51
16	5,1	17,5	16	32,86	48
12	9,2	19,7	13,7	32,86	41
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
Случай $\bar{W}^*(0) > \bar{W}_0$. $t_0 = 55$ сут, $\bar{W}^*(0) = 16648$ Гкал/год, $v_{\text{опт}}(t) = 83,2$ Гкал/год					
15	1,6	15,6	15,5	28,4	54
13	3,65	16,7	14,4	28,4	51
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
Случай $\bar{W}^*(0) < \bar{W}_0$. $t_0 = 50$ сут, $\bar{W}^*(0) = 21188$ Гкал/год, $v_{\text{опт}}(t) = 106$ Гкал/год					
21,3	0,1	15,6	19,3	32,8	59
22	0,81	16,8	18,2	32,8	55
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.

Проведенный расчет показывает, что для случая $\bar{W}^*(0) > \bar{W}_0$ с увеличением значения \bar{W}_0 время t_1 уменьшается также 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 эффек-

тивность системы. Поэтому, определив для заданных параметров системы значение $\bar{W}^*(0)$ необходимо, начальное значение \bar{W}_0 в системе задавать как можно ближе к этому значению.

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

-
- [1]. *Д.К.Джаватов, В.А.Сокол, А.В.Федосеев* Имитационная модель и задачи оптимизации разработки геотермального месторождения. Препринт. М.: ВЦ РАН, 1994.- 38с.
- [2]. *В.Г. Болтянский* Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1969.-408с.
- [3]. *А.Г.Гаджиев, Султанов Ю.И., П.Н. Ригер, А.Н.Абдуллаев, А.Ш. Мейланов* Геотермальное теплоснабжение. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 117с.
- [4]. *Д.К.Джаватов, А.Б. Алхасов* Оптимизация эксплуатации комбинированной системы геотермального теплоснабжения// Вестник Дагестанского госуниверситета (Естественные науки). – Махачкала, 1999.- вып.1.- С.31-35.

Received:31.01.2007