

## Геотермальное месторождение и задача оптимизации процесса его освоения

Д.К. Джаватов  
ИПГ ДНЦ РАН

Теория разработки геотермальных месторождений до недавнего времени развивалась в основном по пути создания методов, позволяющих определить показатели освоения геотермальных теплоносителей. Однако в последние годы ее содержание существенно изменилось. Сегодня необходимо не только определять технологические показатели разработки ГМ, но и находить их оптимальные сочетания.

Современные математические методы позволяют по-новому подойти к постановке и решению интересных с точки зрения практики оптимизационных задач.

В настоящее время ни одно месторождение не вводится в разработку без заранее составленного и должным образом утвержденного проекта, являющегося основным геолого-технологическим документом в соответствии с которым разбуривают залежи и отбирают продукцию из них.

Использование методов математического моделирования способно обеспечить повышение эффективности использования геотермальных ресурсов и технико-экономических показателей, соответствующих современным требованиям отрасли, т.е. рационально организовать разработку ГМ.

Процессы, происходящие в геотермальных залежах при их разработке, отличаются большой сложностью вследствие влияния на них многочисленных факторов. При этом наряду с физико-геологическими факторами следует учитывать изменяющиеся во времени и по залежи параметры, определяющие систему разработки: количество добывающих и нагнетательных скважин, последовательность их ввода в эксплуатацию, дебиты и другие факторы.

Разработана модель, основанная на соответствующих уравнениях технологических процессов разработки ГМ.

С точки зрения соответствия реальному физическому процессу, данная модель характеризуется рядом допущений: коллекторские свойства пласта приняты близкими к идеальным; принимается равномерное размещение добывающих и нагнетательных скважин; расчеты ведутся на среднюю скважину.

Рассматриваемая термодинамическая модель ГМ предназначена для изучения и выбора стратегий освоения месторождений термальных вод. Итак, задача оптимизации освоения ГМ имеет следующий вид:

$$\int_0^{\tau} \{ \beta N (W - C \rho q \cdot T_3) - (1 - \beta) N k^* q_n^2 \} dt \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = -C_0 [ \beta N W - C \rho (1 - \beta) N q_n \cdot T_3 ] \\ \frac{dN}{dt} = n \\ \frac{dq}{dt} = -C_0 N (q \beta - (1 - \beta) q_n) \end{cases} \quad (2)$$

с начальными данными  
 $q_0 > 0, N_0 \geq 0, W_0 \geq 0.$  (3)

ограничениями на управления

$$\begin{cases} 0 \leq \beta \leq 1 \\ 0 \leq n \leq \bar{n}(t) \\ n \cdot c \leq K_0(t) \end{cases} \quad (4)$$

условиями на правый конец  
 $N(\tau) \leq N^*$  (5)

$W(\tau) > W^*$ , где  $W^* > 0.$  (6)

где  $t$  - время;  $\tau$  - длительность планового периода эксплуатации;  $N$  - фонд скважин на месторождении;  $n$  - число вводимых в строй скважин;  $\beta$  - доля фонда нагнетательных скважин, используемых как добывающие;  $q, q_n$  - дебит добывающих и нагнетательных скважин;  $W(t) = C \rho q(t) T(t)$  т.е.  $W(t)$  - количество тепла, получаемое в единицу времени эксплуатацией одной скважины в момент времени  $t$ ; капиталовложения в единицу времени -  $K_0(t)$ ,  $c$  - стоимость бурения и обустройства одной скважины;  $C_0 = q_0 / V_0$ ,  $T_3$  - температура закачиваемой обратно в пласт воды.

В зависимости от того, считается ли время  $\tau$  фиксированным или нефиксированным, получаем разные задачи.

В результате решения задачи показано, что существует оптимальный режим управления для числа скважин, вводимых в строй в единицу времени:

$$\tilde{n}(t) = \begin{cases} \bar{n}, & 0 \leq t \leq t_1, \\ 0, & t_1 < t \leq \tau, \end{cases}$$

и особый режим управления для переменной  $\beta(t)$ , определяемый формулой:

$$\beta^*(t) = \frac{q_H}{q(t) + q_H}.$$

Соответствующая фазовая переменная  $W^*(t)$  определяется по формуле:

$$W^*(t) = C\rho T_3 q(t_2) - \frac{kq_H^2}{(1 - \psi_1(0) \cdot C_0)}. \quad \text{В точке } t = 0 \text{ получаем:}$$

$$W^*(0) = C\rho T_3 q_0 - \frac{kq_H^2}{(1 - \psi_1(0) \cdot C_0)} \quad \text{и в зависимости от соотношений между значениями } W_0 \text{ и}$$

$W^*(0)$  оптимальное управление  $\beta^*(t)$  имеет различные виды, т. е. имеет место

*Теорема (о виде оптимального управления)*

Оптимальное управление в задаче (1)-(2) с соответствующими начальными данными (3) и ограничением на управление  $\beta$  (4) имеет вид:

$$\tilde{\beta}(t) = \begin{cases} 0 \text{ или } 1, & 0 \leq t < t_1 \\ \beta^*, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 1, & t_2 < t \leq \tau \end{cases}$$

Параметры  $t_1$  и  $t_2$  определяются по следующим уравнениям:

$$W_0 + C_0 C \rho q_H T_3 \int_0^{t_1} N d\theta = C\rho T_3 q(t_1) - \frac{kq_H^2}{(1 - \psi_1(0) \cdot C_0)}, \quad (7)$$

$$\left( \text{или } W_0 \cdot e^{-C_0 \int_0^{t_1} N(\theta) d\theta} = C\rho T_3 q(t_1) - \frac{kq_H^2}{(1 - \psi_1(0) \cdot C_0)}, \text{ в зависимости от значений } W_0 \text{ и } W^*(0) \right)$$

$$e^{C_0 \beta^* \int_{t_1}^{t_2} N d\theta} (\psi_1(0) - \beta^* \int_{t_1}^{t_2} N e^{-C_0 \beta^* \int_{t_1}^{\theta} N dt} d\theta) = \int_{t_2}^{\tau} N e^{-C_0 \int_{t_2}^{\theta} N dt} d\theta. \quad (8)$$

Ниже приведен алгоритм построения оптимального решения.

Пусть  $\tau$  фиксировано, тогда алгоритм построения оптимального решения будет следующим:

1) Выбираем  $\psi_1(0)$ .

2) Вычисляем  $W^*(0)$ .

3) Решая уравнение (7) и (8), в зависимости от соотношения между значениями  $W_0$  и  $W^*(0)$ , определяем точки  $t_1$  и  $t_2$  и определяем вид оптимального управления:

а) если  $W_0 < W^*(0)$ , то

$$\tilde{\beta}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1 \\ \beta^*, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 1, & t_2 < t \leq \tau \end{cases}$$

б) если  $W_0 > W^*(0)$ , то

$$\tilde{\beta}(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_1 \\ \beta^*, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 1, & t_2 < t \leq \tau \end{cases}$$

в) Если  $W^*(0) = W_0$ , то

$$\tilde{\beta}(t) = \begin{cases} \beta^*, & 0 \leq t \leq t_2 \\ 1, & t_2 < t \leq \tau \end{cases}$$

4) Вычисляем значение  $W(\tau)$  и проверяем условие  $W(\tau) > W^*$ .

Если неравенство выполняется, то процесс поиска завершаем, если нет-то выбираем другое начальное значение  $\psi_1(0)$ .

Проведем численные расчеты по построенной модели выше модели для некоторых месторождений ТВ.

Месторождение Кизляр ( $q_0 = 4300 \text{ м}^3/\text{сут}$ ,  $T_0 = 384 \text{ К}$ ,  $b = 26 \text{ м}$ ,

$$V_0 = 7,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3, q_H = 4500 \text{ м}^3/\text{сут}, k = 0,54 \cdot 10^{-12}, W_0 = 6,47 \cdot 10^5 \text{ Гкал/год}.$$

Расчет дает значение  $W_0^* = 5,69 \cdot 10^5 \text{ Гкал/год}$ . Оптимальное управление имеет следующий вид:

$$\tilde{\beta}(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_1 \\ 0,48, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 1, & t_2 < t \leq \tau \end{cases}$$

Параметры  $t_1$  и  $t_2$  зависят от значений многих параметров, но наиболее сильно от  $N^*$  и  $\bar{n}$ . В таблицах 1-2 показана такая зависимость для рассматриваемого месторождения.

$N^* = 5$ .

Таблица 1.

$\bar{n}$	1	2	3	4	5
$t_1$ , лет	14,8	13,56	13,13	12,9	12,8
$t_2$ , лет	25,7	25,7	25,23	25,14	25,10

$N^* = 30$ .

Таблица 2.

$\bar{n}$	1	5	8	10	15	20	25	30
$t_1$ , лет	10,46	5,03	3,91	3,53	3,03	2,79	2,63	2,54
$t_2$ , лет	26,12	26,04	26,04	26,03	26,03	25,64	25,64	25,6

Динамика основных показателей разработки месторождения Кизляр.

Таблица 3.

$t$ , лет	$\beta^*(t)$	$N$ , шт	$N \cdot \beta^*$ , шт	$N \cdot (1 - \beta^*)$ , шт	$q(t)$ , м <sup>3</sup> /год	$W(t)$ , Гкал/год	Добыча ТВ, м <sup>3</sup> /год
1	1	2	2	0	1554414	643111	3108828
2	1	4	4	0	1510020	624744	6040082
3	1	6	6	0	1438830	595291	8632986
4	1	8	8	0	1344768	556374	10758146
5	0,48	10	5	5	1232809	510053	6164046
6	0,48	12	6	6	1232809	510053	7396855
7	0,48	14	7	7	1232809	510053	8629665
8	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
9	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
10	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
11	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
12	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
13	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
14	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
15	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
16	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
17	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
18	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
19	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
20	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
21	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
22	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
23	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
24	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
25	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
26	0,48	16	8	8	1232809	510053	9508702
27	1	16	16	0	1153940	477421	18463043
28	1	16	16	0	988711	409061	15819378
29	1	16	16	0	847140	350489	13554252
30	1	16	16	0	725841	300303	11613461

Проведем расчет основных показателей разработки данного месторождения. В таблице 5 приведена динамика изменения основных показателей, рассчитанных для рассматриваемого месторождения ( $\tau = 30$  лет,  $N^* = 16$ ,  $\bar{n} = 2$ ).

$$\tilde{\beta}(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < 4,77 \\ 0,48, & 4,77 \leq t \leq 26,57 \\ 1, & 26,57 < t \leq 30 \end{cases}$$

Функционально зависимость  $t_1 = f(\bar{n})$  определяется как  $t_1 = 10,001 \cdot \bar{n}^{-0,426}$ .

Оценивая, энергетическую эффективность оптимизации ГМ получаем, что оптимизация параметра  $\beta$  позволяет повысить эффективность освоения ГМ более чем на 14%.

## Выводы

На основе построенной выше модели, ее исследования и изучения и проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1) При разработке ГМ обязательно существует оптимальный режим, позволяющий получить максимум тепловой энергии. Характер режима освоения во многом определяется переменной управления  $\tilde{\beta}(t)$ . Динамический характер ее изменения зависит от соотношения начального значения параметра  $W_0$  и значения  $W^*(0)$ .

2) Оптимальный режим разработки ГМ позволяет получить больше тепловой энергии, чем обычный режим его освоения.

Рассмотренный пример ( $N^* = 16$  скв.,  $\bar{n} = 2$  скв./год) показывает, что освоение его в оптимальном режиме позволяет, повысит эффективность получения тепловой энергии в течение 30 лет, более чем на 14%.

Таким образом, проведенные расчеты, анализ полученных результатов свидетельствует о том, что построенная математическая модель ГМ является адекватной изучаемому объекту и позволяет оптимизировать режим его разработки с условием получения максимума тепловой энергии. Приведенные расчетные формулы, алгоритм построения оптимального решения можно использовать для выполнения соответствующих расчетов для любого ГМ, вводимого в строй.

На основе разработанной модели можно ставить и решать и другие оптимизационные задачи с другими критериями оптимальности, например, с максимизацией получаемого экономического эффекта, минимизацией приведенных затрат и др., строить прогнозы динамики основных технологических показателей разработки месторождения. Для выбора наиболее оптимальной стратегии разработки месторождения на основе модели можно проводить и разного характера имитационные эксперименты.

## Многолетняя изменчивость параметров термальных вод и оптимизация их промышленной эксплуатации

*А.М.Бойков, Г.М.Ахмедова, Л.Т.Омарова  
ИПГ ДНЦ РАН*

Постановка проблемы. Классическая гидрогеология принимает в качестве базового научного положения, что в естественных условиях термобарические и гидрохимические параметры термальных вод сохраняются неизменными во времени. Промышленная эксплуатация геотермальных месторождений, как можно предполагать, может приводить к изменчивости параметров термальных вод. Перепады значений этих параметров на устье скважин во времени, казалось бы, должны быть обусловлены интенсивностью промышленного отбора. Однако анализа режимных наблюдений, связывающего изменчивость термобарических, гидрохимических и эксплуатационных параметров термальных вод в достаточном объеме и на протяжении длительного периода не проводились. Результаты такого анализа для разнотипных в структурно-тектоническом отношении гидротермальных систем неизвестны. Эмпирические закономерности, связывающие многолетнюю изменчивость этих параметров термальных вод в динамическом режиме между собой и с типовыми структурно-геологическими условиями залегания геотермальных резервуаров, не выведены.

Поэтому остаются неизученными проблема оптимизации промышленного отбора термальных вод, её технологическая цепочка и методы контроля. Какие критерии должны лечь в основу оптимизации промышленной эксплуатации геотермальных резервуаров, другими словами, отбора термальных вод с максимально возможной высокой температурой и как контролировать подобный режим эксплуатации? Ответы на эти вопросы, кроме того, позволят повысить достоверность имитационного моделирования эволюции геотермальных резервуаров в процессе эксплуатации, а также выполнять прогнозирование изменчивости термобарических и гидрохимических параметров термальных вод, как и при проектировании извлечения геотермальной энергии, так и в опытно-промышленных целях. Актуальность такого исследования совершенно очевидна.

Обсуждение результатов и выводы. Предмет исследования – изучение многолетней изменчивости термобарических, гидрохимических и эксплуатационных параметров геотермальных месторождений (Республика Дагестан) в режиме промышленной эксплуатации в течение 10-летнего периода (1974-1983 гг.). Температура на устье скважин, расход и годовой объём добычи термальных вод, а также динамическое давление на устье скважин, минерализация; анионы  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , катионы ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , кислотность (рН) и жесткость воды ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ) служили информативными параметрами для анализа. Установлено, что перепад температуры на устье в отдельных скважинах геотермальных месторождений достигал  $15^\circ\text{C}$  на протяжении 10-летнего периода. Задача поддержания температурного максимума на устье скважин на протяжении всего периода разработки составляет главную цель оптимизации эксплуатации месторождения. Относительные перепады значений других параметров термальных вод в режиме эксплуатации не менее значительны. Количественно изменчивость во времени информа-