

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Джаватов Д.К.

Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, Махачкала

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

Рассмотрены проблемы принятия решений в геотермальных системах. Приведены оптимизационные задачи для различных геотермальных систем, с расчетом оптимальных параметров для некоторых месторождений термальных вод.

Показано, что только при многокритериальной оптимизации можно получить эффективные оценки этих систем. Проведена оценка различных геотермальных систем с использованием методов многокритериальной оптимизации.

Процессы, происходящие в геотермальных системах (одиночная скважина, геотермальная циркуляционная скважина (ГЦС), многозабойная скважина), столь разнообразны и подвержены влиянию стольких факторов, что их учет, а тем более управление ими при их эксплуатации становится весьма сложной проблемой.

Для принятия эффективных управленческих решений в различных геотермальных системах необходимо иметь надежные методы, позволяющие осуществ-

ить выбор наилучшего из возможных вариантов их эксплуатации. В основу таких методов лежат оптимизационные методы, ориентированные на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов.

Одним из важнейших критериев, оценивающих эффективность ГЦС, является критерий минимума удельных капитальных затрат [1]:

$$F_1 = \frac{10^{0,146a_1-b_1} (10^{a_1 d_H - b_1} + 10^{a_1 d_D - b_1}) (A_1 H^2 + A_2 H) + B}{G} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где a_1, b_1, A_1, A_2 - постоянные коэффициенты, B - капиталовложения в наземную систему, d_H, d_D - диаметры нагнетательной и добычной скважин, соответственно,

H - глубина скважины, G - дебит добычной скважины.

С учетом эффекта термолифта и гидравлических потерь давления в скважинах и наземном трубопроводе для дебита ГЦС получаем формулу [2]:

$$G = \frac{-m_1 + \sqrt{m_1^2 + 4m_0 \cdot m_2}}{2m_0},$$

где
$$m_0 = \frac{8\lambda}{\pi^2} \left(\frac{H}{d_H^5 \rho_H} + \frac{H+a}{d_D^5 \rho_D} \right),$$

$$m_1 = \frac{3\mu}{2\pi k h \rho} \cdot Ln \left(\frac{2a}{d_H} \right),$$

$m_2 = \Delta P + \Delta \rho \cdot H \cdot g$, a - расстояние между скважинами, ΔP - перепад между

давлениями на забое нагнетательной скважины и на стенке добычной скважины.

Очевидно, что эксплуатация ГЦС сопряжена разного рода энергетическими затратами. В первую очередь они связаны с затратами на обратную закачку в пласт отработанной термальной воды (ТВ). Эти затраты, очевидно, зависят от темпов эксплуатации ГЦС, т.е. дебита системы, кото-

рый в свою очередь зависит от диаметров скважин.

Практическая эксплуатация ГЦС имеет смысл в том случае, когда затраты энергии на обратную закачку составляют лишь относительно небольшую долю общей, получаемой ГЦС энергии.

Через $E_{пл}$ обозначим долю общей энергии ГЦС, получаемой в результате ее эксплуатации, за вычетом энергии на обратную закачку отработанной воды в пласт:

$$E_{пл}(G) = Gc\Delta T - G \cdot \frac{\Delta P_H}{\rho} = G \cdot \left(c\Delta T - \frac{\Delta P_H}{\rho} \right),$$

где $\Delta P_H = \Delta \rho H \cdot g - \Delta P_{II}$, ΔP_{II} - потери давления в скважинах и в пласте.

Значение оптимального дебита, максимизирующего $E_{пл}$ определяется формулой:

$$G_{opt} = \frac{p_2 - \sqrt{p_2^2 - 4p_1p_3}}{2p_1}, \quad (2)$$

где $p_1 = -\frac{24\lambda(2H+a)}{\pi^2 d^5 \rho}$, $p_2 = -\frac{\mu}{\pi kh \rho} \ln\left(\frac{a}{d}\right)$, $p_3 = (c\Delta T - \Delta \rho g H)$.

В табл. 1 приведены функциональные зависимости оптимального дебита от диаметра скважины, полученные для некоторых месторождений ТВ при $\Delta P = \text{const}$.

Таблица 1. Функциональные зависимости оптимального дебита от величины диаметра для некоторых месторождений ТВ

Кизляр	Тарки	Ачису	Тернаир	ЮСК
$G = 7617,9 \cdot d^{2,14}$	$G = 18933 \cdot d^{2,46}$	$G = 17736 \cdot d^{2,46}$	$G = 15587 \cdot d^{2,36}$	$G = 11138 \cdot d^{2,3}$

Таблица 2. Оптимальные параметры ГЦС для некоторых месторождений в зависимости от значений ΔP , полученные при условии минимума F_1

КИЗЛЯР							
ΔP , МПа	G , кг/с	d , м	a , м	ΔP_H , МПа	$E_{зак}$, КДж	F_1 , от.ед/Дж	F_2 , %
1	6,6	0,124	510	0,46	3,19	14	99
2	9,7	0,131	619	1,2	12,3	10	99
5	18,8	0,144	860	3,5	68,4	5,8	98
10	33	0,157	1140	7,4	253	3,7	97
МАРТОВСКОЕ - ЮСК							
ΔP , МПа	G , кг/с	d , м	a , м	ΔP_H , МПа	$E_{зак}$, КДж	F_1 , от.ед/Дж	F_2 , %
1	13,2	0,15	367	0,5	6,9	8,7	99
2	18,2	0,16	431	1,28	24	6,7	99
5	34	0,173	590	3,66	130	4	98
10	58,6	0,186	774	7,7	471	2,6	96
ТЕРНАИР							
ΔP , МПа	G , кг/с	d , м	a , м	ΔP_H , МПа	$E_{зак}$, КДж	F_1 , от.ед/Дж	F_2 , %
1	17,6	0,16	599	0,61	11,2	7,2	99
2	27	0,172	744	1,4	40	5	99
5	53,3	0,19	1044	3,85	213	2,95	98
10	93	0,2	1376	8	773	1,9	96

Оценки эффективности сложных систем, каковыми являются и геотермальные системы, не будут объективными только лишь на основе одного, даже очень важного критерия, каким является критерий удельных капитальных затрат. При этом приходится учитывать требования технического, экологического и другого характера. Технические требования находят свое выражение в показателях, связанных с функционированием системы и ее технологических процессов.

Для оценки энергетической эффективности ГЦС определим следующий функционал, показывающий долю общей энергии ГЦС, за вычетом энергии, затрачиваемой на обратную закачку, который необходимо максимизировать:

$$F_2 = 1 - \frac{E_{ЗАК}}{E_{ПОЛ}}; \quad (3)$$

где $E_{ЗАК}$ - энергия, затрачиваемая на закачку, обратно в пласт обработанной ТВ, $E_{ПОЛ}$ - энергия, получаемая от теплоносителя массой G (кг/с) в результате изменения его температуры на ΔT (К).

Функционал F_2 , зависит от многих факторов, в том числе и от диаметров d_H и d_D . В табл. 2 приведены значения критериев F_1 и F_2 в зависимости от изменяющихся значений депрессии ΔP для некоторых месторождений ТВ.

Анализ данных, полученных в результате численного расчета, показывает,

$$G^n_{opt} = \frac{p_2 - \sqrt{p_2^2 - 4p_1p_3}}{2p_1}, \quad (4)$$

$$\text{где } p_1 = -\frac{24\lambda}{\pi^2} \left(\frac{Hn^2}{d_H^5 \rho_H} + \frac{H}{d_D^5 \rho_D} + \frac{a}{d_K^5 \rho_D} \right), \quad p_2 = -\frac{\mu}{2\pi kh\rho} \left(n \ln\left(\frac{a}{d_H}\right) + \ln\left(\frac{a}{nd_D}\right) \right),$$

$p_3 = (c\Delta T - \Delta\rho gH)$, n - число добычных скважин в батарее.

Проведенные расчеты (табл. 3), по оптимизации параметров круговой батареи (d_D, d_H) с условием минимума удельных капитальных затрат (1) и значения дебита, полученные на основе формулы (4) при различных количествах добычных скважин n в батарее показали, что рост числа

что с возрастанием значений депрессии давления ΔP также растет и энергия закачки $E_{ЗАК}$, причем энергетическая эффективность ГЦС (критерий F_2) при этом - уменьшается.

Исследование поведения определенных критериев на зависимость от мощности продуктивного пласта b и от глубины залегания пласта H показало, что эти факторы влияют на значения критерия F_1 и практически не влияют на критерий F_2 .

Основной вывод, вытекающий отсюда, заключается в том, что при создании ГЦС необходимо ориентироваться на такие площади, которые при относительно неглубоком залегании имеют большую мощность продуктивного пласта. А при создании ГЦС на конкретной площади дебит необходимо поддерживать на таком уровне, который обеспечивал бы выполнение поставленных целей.

При освоении геотермальных месторождений помимо оптимизации параметров ГЦС приходится решать и ряд взаимосвязанных задач по определению схемы размещения скважин и их числа.

Рассматривая в качестве схемы размещения скважин на месторождении круговую батарею с расположенной в центре нагнетательной скважиной [1] для определения оптимального дебита такой системы получаем формулу:

скважин при относительно небольшом увеличении значений критерия F_1 (20-40 %) (для значений депрессии ΔP порядка до 10 МПа) позволяет получать значительно большие дебиты (увеличение может составить 50 % и более). Увеличение депрессии ΔP приводит при улучшении

оценок по критерию F_1 к значительному ухудшению оценок по F_2 критерию.

Поэтому при освоении конкретного месторождения ТВ целесообразно создавать круговые батареи, а решение о количестве добычных скважин в батарее необходимо принимать с учетом реальных по-

требностей потребителей в тепловой энергии. При высоких значениях депрессии увеличение числа добычных скважин в батарее резко ухудшает оценки по второму критерию F_2 . Поэтому решение о числе скважин в батарее необходимо принимать с учетом оценок по обоим критериям.

Таблица 3. Оптимальные параметры круговой батареи при различных значениях количества добычных скважин в батарее

$\Delta P = 1$ МПа						
n	ΔP_H , МПа	G^* , кг/с	d_D , м	d_H , м	F_1 , от.ед/Дж	F_2 , %
1	0,96	31	0,2	0,2	11,2	99
2	0,6	21,5	0,18	0,225	11,6	99
3	0,4	17	0,164	0,241	12,4	99
4	0,26	14	0,153	0,254	13,2	99
5	0,15	12	0,145	0,262	13,9	99
6	0,07	10,5	0,14	0,27	14,7	99
$\Delta P = 10$ МПа						
n	ΔP_H , МПа	G , кг/с	d_D , м	d_H , м	F_1 , от.ед/Дж	F_2 , %
2	8,5	83	0,21	0,263	3,98	93
3	7,7	66	0,195	0,28	4,2	90
4	7,1	55	0,182	0,296	4,4	88
5	6,7	47	0,173	0,3	4,6	86
6	6,3	42	0,166	0,31	4,8	84
$\Delta P = 50$ МПа						
n	ΔP_H , МПа	G , кг/с	d_D , м	d_H , м	F_1 , от.ед/Дж	F_2 , %
2	45,4	260	0,24	0,3	1,6	62
3	43	208	0,22	0,315	1,66	46
4	40	175	0,2	0,33	1,73	31
5	39	153	0,197	0,34	1,8	17
6	38,3	136	0,19	0,35	1,87	4

* G - обозначает дебит одной эксплуатационной скважины.

Для улучшения технико-экономических показателей геотермальной отрасли, для повышения ее рентабельности и конкурентоспособности по сравнению с традиционными энергетическими отраслями необходимо создавать ГЦС с горизонтальными скважинами [2].

В табл. 4 для месторождения Кизляр приводятся рассчитанные оптимальные параметры ГеоТЭС, построенной на базе ГЦС с горизонтальными скважинами. Увеличение значений диаметра скважин улучшает оценки по критерию F_2 , а по критерию F_1 существует оптимум, его

минимума. Для месторождения Кизляр таким значением диаметра является – 0,26 м. С увеличением диаметра растут и длины горизонтальных стволов добывающей и нагнетательной скважин. Причем длина последней растет значительно быстрее, что объясняется увеличением зоны дренирования, способствующим уменьшению потерь давления и увеличению полезной мощности ГеоТЭС (табл. 4).

При разработке ГМ всегда возникает проблема выбора системы добычи геотермального теплоносителя (одиночная скважина, ГЦС, ГЦС с горизонтальными сква-

жинами, батарея скважин с n – добывающими и одной нагнетательной, многозабойная скважина с n горизонтальными стволами), обеспечивающей при возможно

меньшей себестоимости добычи теплоносителя возможно большую энергетическую эффективность с удовлетворением потребностей потребителя.

Таблица 4. Оптимальные параметры ГеоТЭС для ГЦС с горизонтальными скважинами при одной паре скважин в зависимости от диаметра скважины

Кизляр						
$d, м$	$G, кг/с$	$a1, м$	$a2, м$	$W_n, МВт$	$F_1, от.ед/Вт$	$F_2, \%$
0,1	15	18	244	0,3	10,9	81
0,13	28,4	26	338	0,63	7,35	82
0,15	40	32	404	0,9	6,13	83
0,17	54	38	474	1,2	5,35	83,4
0,19	70	44	547	1,6	4,84	84
0,2	78	44	547	1,8	4,66	84,5
0,23	108	59	700	2,5	4,3	85,3
0,26	142	70	824	3,3	4,16	86,2
0,29	180	84	954	4,2	4,17	87
0,32	222	98	1092	5,3	4,3	88
0,35	268	113	1238	6,4	4,55	89
0,38	318	129	1391	7,7	4,9	90
0,41	370	147	1552	9	5,42	91

Трудность выбора решения в условиях многоцелевой оптимизации определяется не столько количеством критериев оптимизации и тем более вариантов решения, сколько их противоречивостью.

Так, для конкретного месторождения ТВ всегда возникает задача определения оптимальной технологической схемы добычи теплоносителя, удовлетворяющей следующим условиям:

- минимуму удельных капитальных затрат;
- максимуму энергетической эффективности;
- максимуму полезной мощности ГеоТЭС.

Проведенный сравнительный многокритериальный анализ для четырех техно-

логических схем добычи теплоносителя: I - ГЦС с одной добычной и одной нагнетательной горизонтальными скважинами; II - три добычные вертикальные скважины и одна, расположенная в центре, нагнетательная скважина, III - четыре добычные вертикальные скважины и одна, расположенная в центре, нагнетательная скважина, IV- многозабойная скважина с двумя горизонтальными стволами, показал, что ни одна из рассматриваемых технологических схем не имеет доминирующих оценок по всем рассматриваемым критериям, т.е. все они принадлежат множеству Парето.

Приведя оценки по критериям к сопоставимым значениям для каждой из альтернатив, получаем:

$$A1=(0; 0,8; 1), A2=(0,72; 0,08; 0), A3=(1; 0; 0), A4=(0,66; 1; 0,82).$$

Если все критерии считать равноценными, то очевидно, что наилучшей будет альтернатива A4. Действительно, последовательно применяя метод t – упорядочения [3] к имеющимся альтернативам

получаем: $A4=(0,66; 1; 0,82) \succ A40=(0,66; 0,82; 1) \succ A1=(0; 0,8; 1) \succ A10=(1; 0,8; 0) \succ A3=(1; 0; 0) \succ A30=(0,92; 0,08; 0) \succ A2=(0,72; 0,08; 0)$.

Значит, альтернативы ранжируются следующим образом: A_4, A_1, A_3, A_2 .

Пусть теперь критерии имеют относительную важность в виде цепочки нера-

$$A_4 = (0,66; 1; 0,82) \succ A_4 = (0,66; 0,82; 1) \succ A_1 = (0; 0,8; 1) \text{ и} \\ A_3 = (1; 0; 0) \succ A_3 = (0,92; 0,08; 0) \succ A_2 = (0,72; 0,08; 0).$$

Для сравнения альтернатив A_1 и A_3 нужна дополнительная информация об относительной важности критериев F_2 и F_3 . Поэтому основным недостатком рассмотренного метода является его недостаточная «мощность».

Для установления количественной оценки относительной важности критериев воспользуемся методом Саати [3].

Тогда рассматриваемые альтернативы имеют следующие оценки: $J(A_1) = 0,488$; $J(A_2) = 0,24$; $J(A_3) = 0,27$; $J(A_4) = 0,87$, т.е. наилучшими являются альтернативы с горизонтальными скважинами: ГЦС и многозабойная скважина.

Для различных площадей оценки эти будут изменяться, но, несомненно, что среди наилучших альтернатив будут альтернативы геотермальных систем с горизонтальными скважинами.

Основной вывод, который можно сделать на основе проведенного анализа заключается в том, что при освоении но-

венств, например, вида: $F_1 > F_2 > F_3$. Тогда имеем:

вых площадей ТВ необходимо ориентироваться на геотермальные системы с горизонтальными скважинами, ибо они имеют интегрированные преимущества перед другими видами геотермальных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алхасов А.Б., Магомедбеков Х.Г. Перспективы строительства ГеоТЭС на базе среднепотенциальных термальных вод // Геотермия. Геотермальная энергетика – Сб. науч. тр. ИПГ ДНЦ РАН. Махачкала, 1994, - с. 17-35.

2. Алхасов А.Б., Джаватов Д.К. Перспективы использования горизонтальных скважин при разработке геотермальных месторождений / Геотермальная теплоэнергетика - Сб. науч. тр. Отдела энергетики и геотермомеханики ИПГ ДНЦ РАН, Махачкала, 2002, - с.35-46.

3. Чернооружий И.Г. Методы принятия решений.- СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 416 с.

PROBLEMS AND METHODS OF DECISION MAKING IN GEOTHERMAL SYSTEMS

Dzhavatov D.K.

Institute of Geothermal problems, DSC, RAS, Makhachkala

The problems of decision making in geothermal systems is considered. The optimization problems are given for different geo-thermal systems, with calculation of optimum parameters for some deposits of thermal water.

It is shown that only at multi-objective optimization the efficient estimations of these systems are possible. Evaluation of different geothermal systems is carried out with using of methods of multi-objective optimization.

