

Проблемы повышения эффективности электроэнергетического освоения Кумухского месторождения термальных вод

Джаватов Д.К.

ФГБУН «Институт проблем геотермии» ДНЦ РАН, ФГБОУ ВО ДГУ, Россия, г. Махачкала

Кумухское месторождение термальных вод (ТВ) расположено на Северодагестанской равнине. На месторождении в триасовых отложениях, на глубине 4850 м, залегает водоносный горизонт эффективной мощностью 65 м.

Температура подземных вод в пластовых условиях составляет -180 °С, минерализация $-140-160$ г/л, пластовое давление $-53,3$ МПа, пористость -16% , проницаемость $-0,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ [1].

Высокопотенциальные ТВ месторождения имеют большую перспективу, с точки зрения использования их тепла для получения электрической энергии на геотермальных электростанциях (ГеоЭС). Ввиду высокой степени минерализации, электроэнергетическое освоение таких ресурсов целесообразно только использованием технологии двухконтурных (бинарных) ГеоЭС на низкокипящих рабочих агентах.

Бинарные ГеоЭС включают как геотермальную циркуляционную систему (ГЦС), в контуре которой циркулирует ТВ, так и паротурбинную установку (ПТУ), где циркулирует низкокипящий вторичный теплоноситель. Использование ГеоЭС такого типа значительно увеличивает перспективы геотермальной энергетики, а также повышает конкурентоспособность геотермальной энергии по сравнению с традиционной.

При строительстве бинарной ГеоЭС наиболее важное значение имеет выбор рабочего тела во вторичном контуре, обладающего рядом свойств. Термодинамический анализ работы ПТУ, в основе которой лежит цикл Ренкина, позволил определить наиболее перспективный рабочий агент — изобутан [2], который обладает рядом преимуществ (лучшие теплофизические свойства, совместимость с маслами, не вызывает коррозии оборудования энергоустановок, невысокая стоимость и экологическая безвредность).

Главной целью строительства ГеоЭС является получение максимальной полезной мощности с минимизацией капитальных затрат на ее создание. Капитальные затраты составляют основную статью расходов создания ГеоЭС, и оптимизация параметров ГЦС с учетом этих затрат, позволит повысить эффективность функционирования ГеоЭС.

Другим направлением повышения мощности ГеоЭС является увеличение производительности ГЦС.

Просчитаем различные варианты создания бинарной ГеоЭС на Кумухском месторождении и проведем оценку их эффективности.

Для улучшения термодинамических характеристик ГеоЭС проведем оптимизацию технологических параметров первичного контура ГеоЭС — дебит системы, диаметры скважин, расстояние между скважинами, обеспечивающие минимум функционала (1).

За критерий оптимальности будем рассматривать функционал удельных капитальных затрат, определяемый по формуле [3]:

$$F = S / N_n \quad (1)$$

где S — капитальные затраты в строительстве ГЦС и наземной коммуникации, отн.ед.; N_n — полезная мощность ГеоЭС, кВт.

Принудительный характер закачки отработанного теплоносителя и значительные энергозатраты на обратную закачку является основным недостатком ГЦС. В связи с чем актуальна проблема изучения изменения энергозатрат на обратную закачку теплоносителя в ГЦС и выбор оптимального режима ее эксплуатации [5].

Для сравнения рассмотрены два вида термодинамических цикла ПТУ, в основе работы которых лежит цикл Ренкина — докритический и сверхкритический [2]. Проведем оценку эффективности ГеоЭС в каждом из этих циклов.

Оптимальные значения удельной полезной мощности энергоустановки (турбины) N_{Σ} (кВт), массового расхода m (кг/с) и давления испарения P_H (МПа) низкокипящего рабочего агента в расчете на 1кг/с расхода термальной воды при температуре теплоносителя $T_T=180$ °С, в докритическом цикле и сверхкритическом циклах, составляют, соответственно [2]:

$$N_{\Sigma}=76,6 \text{ кВт}; m=1,25 \text{ кг/с}; P_H=3,4 \text{ МПа} \text{ и } N_{\Sigma}=101,1 \text{ кВт}; m=1,54 \text{ кг/с}; P_H=5,0 \text{ МПа}.$$

Температура отработанной термальной воды, закачиваемой обратно в пласт, при этом составляет $T_H=55$ °С и $T_H=42$ °С для этих циклов, соответственно.

Проведем расчеты основных технологических параметров ГеоЭС для Кумухского месторождения ТВ, при различных значениях диаметров скважин ГЦС. Соответствующие формулы для расчета основных технологических параметров приведены в работах [2, 4].

Анализ данных проведенных расчетов показывает существование оптимума удельных капитальных затрат (табл.2). Оптимизация по критерию (1) дает следующие значения диаметров: $d_H=d_{\Sigma}=0,257$ м — в докритическом и $d_H=d_{\Sigma}=0,254$ м — в сверхкритическом циклах. При этом полезная мощность в сверхкритическом цикле на 34% выше, значения в докритическом цикле, а удельные капитальные затраты — на 31% меньше. Создание ГЦС с различными диаметрами добычной и нагнетательной скважин и ее оптимизация еще более улучшает эти показатели (табл.1).

Бурение горизонтальных скважин и скважин с большим диаметром позволяет получать достаточно большие дебиты, но при этом растут и капитальные затраты на их бурение [4,5].

Проведем сравнительную оценку эффективности ГеоЭС для разных технологических схем строительства ГЦС.

Таблица 1. Параметры ГеоЭС в докритическом и сверхкритическом циклах Ренкина и оптимальные значения этих параметров

$d_{nr}=d_n$, м	Докритический цикл						Сверхкритический цикл Ренкина						Относительное изменение полез. мощности в циклах, %	Относит. изменение уд. кап. зат. в циклах, %
	Расстояние между скважинами, м	Дебит ГЦС, кг/с	Давление нагнетания, МПа	Мощ. нагнет. насоса, МПа	Полезная мощность, МВт	Удельные капитальные затраты, отн. ед./МВт	Расстояние между скважинами, м	Дебит ГЦС, кг/с	Давление нагнетания, МПа	Мощ. нагнетат. насоса, МПа	Полез. мощность, МВт	Удельные капитальные затраты, отн. ед./МВт		
0,1	662	24,8	22,3	0,5	1,3	1,1	660	24,7	22,2	0,56	1,93	0,76	+48	-32
0,15	1072	65,2	21,3	1,4	3,5	0,61	1062	63,9	21,0	1,38	5,01	0,43	+43	-42
0,18	1318	98,6	20,6	2,1	5,4	0,5	1298	95,6	20,0	1,97	7,7	0,36	+42	-39
0,21	1556	137,3	19,7	2,8	7,7	0,45	1522	131,4	19,0	2,58	10,7	0,33	+39	-36
0,24	1779	179,6	18,7	3,5	10,2	0,43	1727	169,2	17,9	3,13	13,4	0,32	+31	-34
0,26	1918	208,8	18,0	3,9	12,1	0,42	1852	194,5	17,2	3,45	16,2	0,32	+34	-31
0,27	1985	223,4	17,7	4,1	13,0	0,43	1910	206,8	16,9	3,6	17,3	0,32	+33	-34
0,28	2048	238,0	17,4	4,3	13,9	0,44	1965	219,0	16,6	3,74	18,4	0,33	+32	-33
0,29	2109	252,3	17,1	4,45	14,9	0,44	2017	230,8	16,2	3,86	19,5	0,34	+31	-29
0,30	2168	266,5	16,8	4,6	15,8	0,45	2067	242,3	15,9	3,97	20,5	0,35	+30	-28
Результаты оптимизации														
$d_{nr}=0,266$ $d_n=0,247$	1992	225,1	22,3	5,1	12,0	0,42	$d_{nr}=0,262$ $d_n=0,244$	244,5	31,4	7,9	16,8	0,293	+40	-43
$d_{nr}=d_n=0,257$	1986	223,8	22,4	5,14	12,1	0,42	$d_{nr}=d_n=0,254$	243,0	31,3	7,86	16,7	0,296	+38	-42

Расчеты проведем для следующих схем ГЦС:

- ГЦС с вертикальной добычной и вертикальной нагнетательной скважинами (ВС);
- ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами (ВГС);
- ГЦС с горизонтальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами (ГС);

Для каждой схемы также рассмотрим два термодинамических цикла ПТУ – докритический и сверхкритический [2].

Рассмотрим несколько вариантов расчетов:

- вариант 1 – для ГЦС с вертикальной добычной и вертикальной нагнетательной скважинами определяется оптимальное значение диаметра добычной и нагнетательной скважин при условии, что они равны ($d_d = d_n$). Для этих же значений диаметров просчитаны оптимальные параметры для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами, и для ГЦС с горизонтальными добычной и нагнетательной скважинами;

- вариант 2 – для каждого из 3-х типов ГЦС отдельно определяются оптимальные значения диаметра добычной и нагнетательной скважин при условии, что они равны ($d_d = d_n$);

- вариант 3 – для каждого из 3-х типов ГЦС определяются оптимальные значения диаметров добычной и нагнетательной скважин при условии, что они могут быть разными ($d_d \neq d_n$).

В дополнение, для ГЦС с горизонтальными добычной и нагнетательной скважинами были проведены расчеты, с учетом анизотропности (разных значений горизонтальной и вертикальной проницаемости) пласта ($k < k_r$, $k > k_r$).

При расчетах также учитывается зависимость вязкости от температуры закачиваемого теплоносителя на забое скважины, от величины которой зависит величина фильтрационных потерь давления в пласте, а значит и полезная мощность ГЦС.

Соответствующие формулы для расчета основных технологических параметров приведены в работах [2,4].

В табл.2 и табл.3 приведены основные оптимальные технологические параметры ГеоЭС сравнимых вариантов для разных схем ГЦС, для месторождения ТВ - Кумухское.

Анализ данных проведенных расчетов показывает, что использование ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами выгоднее, чем ГЦС с вертикальной добычной и вертикальной нагнетательной скважинами. Преимущество ГЦС с горизонтальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами по сравнению с другими схемами ГЦС как по значению полезной мощности, так и по удельным капитальным затратам наблюдается, если вертикальная проницаемость равна или больше горизонтальной.

Таблица 2. Основные оптимальные параметры геотермальной электростанции для разных технологических схем геотермальной циркуляционной системы (*докритический цикл*)

Технологическая схема ГЭС	Диаметр добычной скважины, м	Диаметр нагнетательной скважины, м	Длина горизонтального ствола добычной скважины, м	Длина горизонтального ствола нагнетательной скважины, м	Докритический цикл Ренкина					
					Расстояние между скважинами, м	Дебит ГЭС, кг/с	Давление нагнетания, МПа	Мощность нагнетательного насоса, МПа	Полезная мощность, МВт	Удельные капитальные затраты, отн. ед./МВт
Вариант 1										
ВС	0,247	0,247	-	-	2111	257	23,30	5,21	14,49	0,238
ВГС	0,247	0,247	-	231	2216	283	20,26	4,99	16,70	0,219
ГС, $k < k_f$	0,247	0,247	20	332	2253	293	23,99	6,10	16,31	0,232
ГС, $k = k_f$	0,247	0,247	14	235	2282	300	23,91	6,24	16,76	0,219
ГС, $k > k_f$	0,247	0,247	10	166	2310	308	24,25	6,49	17,09	0,211
Вариант 2										
ВС	0,247	0,247	-	-	2111	257	23,30	5,21	14,49	0,238
ВГС	0,285	0,285	-	276	2616	395	19,61	6,73	23,52	0,214
ГС, $k < k_f$	0,277	0,277	26	382	2579	384	23,78	7,93	21,46	0,228
ГС, $k = k_f$	0,286	0,286	20	280	2713	425	23,66	8,74	23,80	0,214
ГС, $k > k_f$	0,292	0,292	14	204	2819	458	23,59	9,40	25,71	0,204
Вариант 3										
ВС	0,255	0,237	-	-	2116	258	23,30	5,23	14,56	0,236
ВГС	0,298	0,273	-	291	2646	404	19,57	6,87	24,05	0,210
ГС, $k < k_f$	0,291	0,265	26	405	2609	393	23,62	8,06	22,01	0,223
ГС, $k = k_f$	0,299	0,273	19	296	2739	433	23,52	8,85	24,30	0,210
ГС, $k > k_f$	0,304	0,280	14	215	2842	466	23,48	9,51	26,18	0,201

Таблица 3. Основные оптимальные параметры геотермальной электростанции для разных технологических схем геотермальной циркуляционной системы (*сверхкритический цикл*)

Технологическая схема ГЭС	Диаметр добычной скважины, м	Диаметр нагнетательной скважины, м	Длина горизонтального ствола добычной скважины, м	Длина горизонтального ствола нагнетательной скважины, м	Сверхкритический цикл Ренкина					
					Расстояние между скважинами, м	Дебит ГЭС, кг/с	Давление нагнетания, МПа	Мощность нагнетательного насоса, МПа	Полезная мощность, МВт	Удельные капитальные затраты, отн. ед./МВт
Вариант 1										
ВС	0,238	0,238	-	-	1988	228	23,49	4,65	18,39	0,174
ВГС	0,238	0,238	-	245	2111	257	20,42	4,56	21,42	0,159
ГС, $k < k_f$	0,238	0,238	40	347	2186	276	26,67	6,39	21,47	0,165
ГС, $k = k_f$	0,238	0,238	31	245	2220	284	26,85	6,63	22,10	0,156
ГС, $k > k_f$	0,238	0,238	24	173	2245	291	27,04	6,84	22,56	0,149
Вариант 2										
ВС	0,238	0,238	-	-	1988	228	23,49	4,65	18,39	0,174
ВГС	0,281	0,281	-	300	2557	377	19,72	6,46	31,66	0,154
ГС, $k < k_f$	0,277	0,277	52	494	2629	399	26,09	9,04	31,25	0,162
ГС, $k = k_f$	0,282	0,282	40	301	2704	422	26,17	9,60	33,05	0,150
ГС, $k > k_f$	0,288	0,288	33	219	2820	459	26,23	10,46	35,92	0,143
Вариант 3										
ВС	0,246	0,228	-	-	1993	229	23,49	4,67	18,48	0,172
ВГС	0,294	0,268	-	317	2586	386	19,68	6,60	32,41	0,151
ГС, $k < k_f$	0,286	0,260	48	434	2588	387	25,99	8,73	30,34	0,158
ГС, $k = k_f$	0,294	0,269	39	318	2730	430	26,03	9,73	33,74	0,148
ГС, $k > k_f$	0,30	0,276	31	231	2843	466	26,11	10,58	36,55	0,140

Выводы

Разработка Кумухского месторождения термальных вод геотермальными циркуляционными системами, позволит получать относительно дешевую электроэнергию и дополнительную тепловую мощность, за счет утилизации теплового потенциала отработанных рассолов на теплонасосных установках.

Строительство ГеоЭС на месторождении на основе геотермальных циркуляционных систем с гори-

зонтальными добычной и нагнетательной скважинами позволит получать электроэнергию, с мощностью до 33 МВт и тепловую мощность, до 8 МВт. При этом годовая выработка электроэнергии составит 290 млн. кВт·ч, со стоимостью продукции более 725 млн. руб./год., а вырабатываемая тепловая мощность - 8 МВт, позволит сэкономить более 1000 т.у.т. в год.

Литература:

1. Амирханов Х.И., Ятров С.Н. (1980) Проблемы геотермальной энергетики Дагестана. М.: Недра, 208 с.
2. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. - М.: Физматлит, 2008. - 376 с.
3. 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.
4. Джаватов Д.К. Математическое моделирование геотермальных систем и проблемы повышения их эффективности. Махачкала: Ин-т проблем геотермии ДНЦ РАН. 2007. 248 с.
5. Джаватов Д.К., Азизов А.А. Оптимизация энергетических потерь геотермальной циркуляционной системы на обратную закачку теплоносителя. // Известия ВУЗов. Северо–Кавказский регион. Технические науки. - 2016. - Вып. 4. - С. 51-56.