
ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.91

А. А. РЕДЬКО

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ФРЕОНОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В БИНАРНОМ ЦИКЛЕ

Введение. В настоящее время все больше внимания уделяется нетрадиционным источникам энергии. Наиболее освоенным видом возобновляемой энергии является геотермальное тепло Земли. Потенциал геотермальной энергии по данным Министерства экологии и природных ресурсов Украины составляет 27,3 млн. м³/сутки геотермальной воды с температурой 70°C и выше, что соответствует теплоэнергетическому потенциалу 441 млн. Гкал/год (около 50 тыс. МВт). Геотермальная энергия является наиболее перспективной и подготовленной для практического освоения. За рубежом при использовании геотермальной энергии основное внимание обращается на получение электрической энергии. В 2000 г. в 21 стране находились в эксплуатации геотермальные энергетические станции (ГеоЭС) с суммарной установленной мощностью 7974 МВт, в США установленная мощность ГеоЭС составила 2228 МВт [1-3]. Эффективное преобразование геотермальной энергии в электрическую требует создания специального энергетического оборудования. В связи с недостаточно высокой термодинамической эффективностью ГеоЭС (КПД составляет около 10...12 %) продолжаются исследования и ведутся разработки тепловых схем энергетических станций, поиск эффективных рабочих тел и оптимизация термодинамических параметров циклов.

Состояние проблемы. В геотермальной энергетике находят применение энергетические станции с бинарным циклом. В первичном цикле геотермальная вода (солевой раствор) движется в геотермальной циркуляционной системе (ГЦС), отдавая теплоту от пласта поверхностным теплообменникам и, охлажденная, закачивается насосом обратно в пласт. Дебит эксплуатационной скважины, температура геотермальной воды в эксплуатационной и нагнетательных скважинах определяют количество теплоты, подводимое к геотермальной электрической станции (рис.1).

Теплоноситель ГеоЭС в бинарном цикле получает теплоту от геотермальной воды (солевого раствора), испаряется, расширяется в турбине, конденсируется и возвращается с помощью питательного насоса в испаритель.

Выбор рабочего вещества во вторичном контуре геотермальной энергетической станции определяет термодинамическую эффективность станции. Основные требования, предъявляемые к рабочему веществу – химическая стабильность, негорючесть, взрывобезопасность, нетоксичность, инертность по отношению к конструктивным материалам, озонобезопасность. Более эффективными являются вещества, характеризующиеся низкой динамической вязкостью и высоким коэффициентом теплопроводности (температуропроводности). Данные теплофизические характеристики определяют эффективность теплообмена и гидравлическое сопротивление в элементах теплообменного оборудования станции. Значение плотности пара низкокипящего вещества перед турбиной значительно выше плотности водяного пара при тех же технических параметрах (давление, температура), что обеспечивает более высокую удельную выработку электроэнергии, меньшую массу и габариты турбоустановки. Характер зависимости правой ветви пограничной кривой «жидкость – пар» некоторых низкокипящих веществ в «Т – S», «ln P – I» - диаграммах имеет положительную кривизну, а процесс расширения пара в турбине эффективен тогда, когда заканчивается в состоянии сухого перегретого пара. Поэтому для некоторых низкокипящих веществ, в том числе и для водяного пара, изменение энтальпии в процессе адиабатного расширения незначительное и параметры (давление и температура) в конденсаторе

имеют высокие значения из-за ограничений на влажность пара в процессе расширения, что приводит к снижению термодинамической эффективности и к резкому увеличению габаритов паротурбинной установки и, как следствие, ее стоимости. В зарубежных коммерческих геотермальных энергетических станциях в качестве рабочего вещества использовались различные теплоносители – аммиак и водоаммиачная смесь, изобутан и смесь изобутана и изопентана, фреоны R12, R142в, R114 и другие вещества. При выборе низкокипящего вещества определяющим является величина удельной выработки электроэнергии в турбине на удельный (1 кг/с) расход геотермальной воды. С повышением температуры геотермальной воды выработка электроэнергии увеличивается. При температуре геотермальной воды 65...130⁰С (338,15...403,15К) трудно построить паровую энергетическую станцию, которая может иметь эффективные термодинамические параметры. Как показывает зарубежный опыт, чем ниже температура геотермального источника, тем требуется применение более сложной технологии.

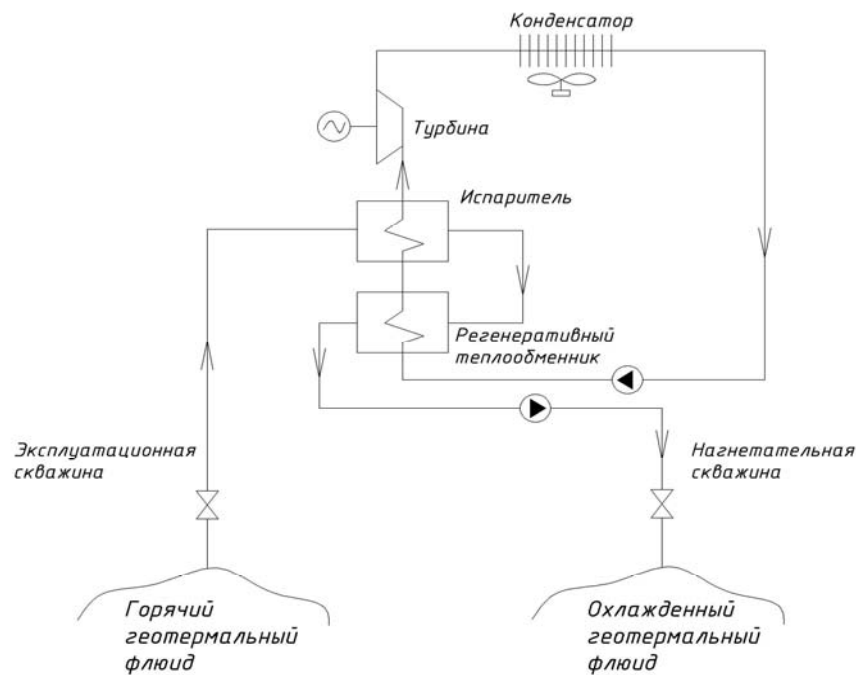


Рис.1. Тепловая схема геотермальной электрической станции с бинарным циклом (фирма «Ормат»)

Цель работы. Повышение термодинамической эффективности геотермальной электрической станции.

Методика расчета. Ниже приведены расчетные зависимости для элементов оборудования ГеоЭС.

1. Мощность насоса определяется с помощью зависимости:

$$N = \frac{[(P_{ВЫХ} - P_{ВХ}) \cdot m_{Ж}]}{\rho_{Ж} \cdot \eta}, \tag{1}$$

где $P_{ВЫХ}, P_{ВХ}$ - давление на выходе и на входе насоса;
 m – расход перекачиваемой насосом жидкости;
 ρ – плотность жидкости;
 η – адиабатический коэффициент полезного действия насоса.

Для расчета температуры жидкости на выходе из насоса используется соотношение:

$$N = m_{Ж} \cdot [i_{Ж} \cdot (P_{ВЫХ}, T_{ВЫХ}) - i_{Ж} \cdot (P_{ВХ}, T_{ВХ})], \tag{2}$$

где i – энтальпия жидкости при заданных давлении P и температуре T.

2. Расчет турбин производится по адиабатной модели. В качестве исходных данных используется давление и температура потока на входе в турбину, давление на выходе из турбины, расход рабочего тела и коэффициент полезного действия турбины.

Энтальпия идеального процесса расширения определяется из условия адиабатного расширения потока:

$$i_{ид.вых} = i(P_{вых}, S_{вых}), \quad (3)$$

где $S_{вых}$ – удельная энтальпия потока на входе в турбину, определяемая по известным температуре и давлению.

Тогда мощность, получаемая в идеальной турбине при адиабатном процессе расширения:

$$N_{ид} = [i_{ид.вых} - i(P_{вх}, T_{вх})] \cdot m_{п}, \quad (4)$$

где $m_{п}$ – расход пара через турбину.

Полезная мощность, снимаемая с вала турбины:

$$N_{реал} = N_{ид} \cdot \eta, \quad (5)$$

где η – адиабатический коэффициент полезного действия турбины.

Энтальпия на выходе из турбины в реальном процессе (с учетом потерь) определяется как:

$$i(P_{вых}, S_{вых}) = i(P_{вх}, T_{вх}) - (N_{реал} / m_{п}), \quad (6)$$

что дает возможность рассчитать температуру пара на выходе из турбины.

3. Противоточный теплообменник. Для определения параметров в противоточном теплообменнике в нашей постановке задачи (т. е. без учета гидрпотерь в проточной части и теплотерь в окружающую среду) используется система из трех уравнений:

$$\begin{cases} Q = m_{г} \cdot [i(T_{гвх}) - i(T_{гвых})] \\ Q = m_{х} \cdot [i(T_{хвх}) - i(T_{хвых})] \\ Q = k \cdot F \cdot \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

где $m_{г}$, $m_{х}$ – массовый расход горячего и холодного теплоносителей;

$T_{гвх}$, $T_{гвых}$, $T_{хвх}$, $T_{хвых}$ – температуры соответственно на входе и на выходе холодного и горячего теплоносителей;

F – площадь теплообменной поверхности;

k – средний коэффициент теплопередачи теплообменника, принимается из литературных источников;

ΔT – среднее значение температурного напора теплообменника.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора теплообменника используется следующее соотношение:

$$\Delta T = \frac{[(T_{гвх} - T_{хвых}) - (T_{гвых} - T_{хвх})]}{\ln \frac{T_{гвх} - T_{хвых}}{T_{гвых} - T_{хвх}}}. \quad (8)$$

Ввиду сложности теплообменных процессов, происходящих в теплообменнике, с целью повышения точности за счет задания соответствующего значения k теплообменник условно разбивается на участки с фазовыми переходами и без них, а также обеспечения задания разности температуры теплоносителей в пинч-точке (точке минимального температурного перепада).

Основные результаты. В настоящее время появились экологически безопасные – озонобезопасные вещества нового поколения – фреоны этанового, пропанового и бутанового рядов. Перспективность их применения в качестве рабочего вещества цикла преобразователя геотермальной энергии в электрическую изучалась в настоящей работе. Экологические и теплофизические характеристики рабочих веществ приведены в табл. 1.

В работе выполнены численные исследования цикла Ренкина геотермальной энергетической станции с бинарным циклом, тепловая схема которой приведена на рис. 1.

Наличие регенеративного теплообменника, в котором теплота геотермальной воды на выходе из испарителя (или пара из турбины) отводится на подогрев низкотемпературного теплоносителя перед испарителем, обеспечивает снижение тепловой нагрузки как испарителя, так и конденсатора. Рациональное использование энергии геотермальной воды требует разработки оптимальной тепловой схемы и определения оптимальных параметров цикла энергоустановки. В целом оптимальные технико-экономические параметры двухконтурной ГеоЭС могут быть получены на основе анализа и оптимизации совокупности термодинамических, технологических, геолого-гидрологических и других. Как показывают результаты выполненных исследований [3-5],

получение максимальной полезной электрической мощности достигается увеличением расхода геотермальной воды, циркулирующей в геотермальной циркуляционной системе (ГЦС), и оптимизацией термодинамических параметров цикла вторичного контура. Процесс расширения пара в турбине рассматривался как адиабатический. Расчет расширения пара в политропном процессе связан в основном с техническим совершенством технологического оборудования [4, 5].

Таблица 1

Экологические и теплофизические характеристики озонобезопасных фреонов

Вещество	Характеристики							
	Молекулярная масса	Температура кипения, °С	Температура критическая, °С	Давление критическое, бар	Озоноразрушающий потенциал, ОДР	Потенциал глобального потепления, GWP	ПДК _{р.з.} , мг/м ³	Класс опасности
R12	120,91	-29,74	112,0	41,19	0,9	8500	3000	4
R13	104,46	-81,5	28,80	38,78	1,0	11700	3000	4
R13в1	148,91	-57,7	67,0	39,64	13,2	5600	3000	4
R22	86,5	-40,9	96,0	49,77	0,05	1700	3000	4
R114	170,9	3,6	145,8	32,7	0,85	9200	3000	4
R134a	102,03	-26,5	101,1	40,60	0	1300	-	4
R142в	100,495	-9,2	136,8	41,50	0,065	2000	3000	4
R143a	84,04	-47,60	73,10	37,60	0	4400	3000	4
R152a	66,05	-24,55	113,50	44,91	0	1400	3000	4
R218	188,02	-36,8	71,9	26,77	0	2000	3000	4
R318	200,03	-6	115,22	27,78	0	2000	3000	4

Расчеты термодинамических параметров цикла Ренкина выполнялись при следующих условиях:

- адиабатный КПД турбины - 0,70...0,80;
- КПД насоса – 0,75...0,80;
- температура окружающей среды – 15; 20; 25°С (288,15; 293,15; 298,15 К).
- $\Delta T_{HEД}$ – 5; 10; 15 К недорекуперация в регенеративном теплообменнике и испарителе (минимальная разность температур между геотермальной водой и рабочим веществом).

Давление на выходе из турбины определяется условием насыщенного состояния рабочего вещества. На входе в турбину давление определяется по значению температуры, а на выходе из испарителя подбирается максимально возможное давление, при котором поток пара на выходе из турбины будет однофазным.

Значения удельной электрической мощности для различных хладонов и их смесей приведены в табл. 2 и 3.

Значение удельной электрической мощности при температуре геотермальной воды 70°С (343,15 К) для исследуемых рабочих тел – фреонов и их смесей – составляет около 3,2...3,3 кВт/(кг/с). Результаты были обобщены в виде аппроксимирующих зависимостей:

1. Удельная электрическая мощность N , кВт/(кг/с) при температуре геотермальной воды $T_{т.в.}=70^{\circ}\text{C}$ (343,15 К):

$$N = a_0 + a_1 \Delta T_{HEД} + a_2 X_{R12} + a_3 T_{O.C.}, \tag{9}$$

где $a_0 = 10,068$; $a_1 = -0,37994$; $a_2 = 0,043654$;

X_{R12} – концентрация хлада R12 в смеси.

2. Удельная электрическая мощность N , кВт/(кг/с) при температуре геотермальной воды $T_{т.в.}=130^{\circ}\text{C}$ (403,15 К):

$$N = 43,72 - 1,0998 \Delta T_{HEД} + 1,1833 X_{R12} - 0,5714 T_{O.C.}. \tag{10}$$

Таблица 2

Значения удельной электрической мощности ГеоЭС с различными теплоносителями во вторичном контуре ($T_{т.в.}=130^{\circ}\text{C}$ (403,15 К); $T_{о.с.}=15^{\circ}\text{C}$ (288,15К))

Теплоноситель	Параметр					
	$P_{п}$, кПа	$T_{п}$, °C	$T_{н}$, °C	N , кВт/(кг/с)	m , кг/с	КПДц, %
Хладон R12	2200	74,47	68,48	25,58	1,44	9,44
*Хладон R13b1	5000	-	40,64	34,10	3,56	8,72
Хладон R22	2500	61,16	55,28	24,73	1,35	7,38
*Хладон R22	5000	-	39,0	43,37	1,90	10,90
Хладон R114	866	76,88	70,54	23,40	1,38	8,94
Хладон R134a	3800	97,65	71,88	27,99	1,10	10,93
*Хладон R134a	5000	-	38,52	43,87	1,95	10,96
Хладон R142b	1263	75,22	70,18	24,44	0,94	9,28
Хладон R143a	3500	69,56	41,70	29,89	1,60	7,73
*Хладон R143a	5000	-	40,42	35,95	1,79	9,17
Хладон R152a	2175	77,03	69,16	26,02	0,73	9,72
Хладон R218	5000	-	40,79	32,76	3,11	8,41
Хладон R318	1500	84,97	69,48	22,79	1,51	8,55
Изобутан	1400	81,98	75,86	22,35	0,50	10,33

* - сверхкритический цикл.

Таблица 3

Значения удельной электрической мощности ГеоЭС с фреонными смесями во вторичном контуре ($T_{т.в.} = 130^{\circ}\text{C}$ (403,15 К); $T_{п}$ – температура геотермальной воды на выходе из регенеративного теплообменника)

Теплоноситель	Параметр					
	$P_{п}$, кПа	$T_{п}$, °C	$T_{н}$, °C	N , кВт/(кг/с)	m , кг/с	КПДц, %
20%R12 и 80% R142В	1452,5	76,27 – 77,59	62,73	29,87	1,096	10,10
10%R12 и 90% R142В	1370,0	76,20 – 76,95	62,97	29,95	1,051	10,16
30%R12 и 70% R142В	1575,0	76,76 – 78,47	62,82	29,87	1,14	10,11
70%R12 и 30% R142В	1925,0	77,61 – 79,23	61,90	30,52	1,35	10,19
80%R12 + 20% R142В	2034,0	78,04 – 79,26	61,73	30,86	1,41	10,29
90%R12 + 10% R142В	2155,0	78,67 – 79,34	61,63	31,29	1,47	10,41

При повышении температуры геотермальной воды увеличивается выработка электрической мощности ГеоЭС (рис. 2).

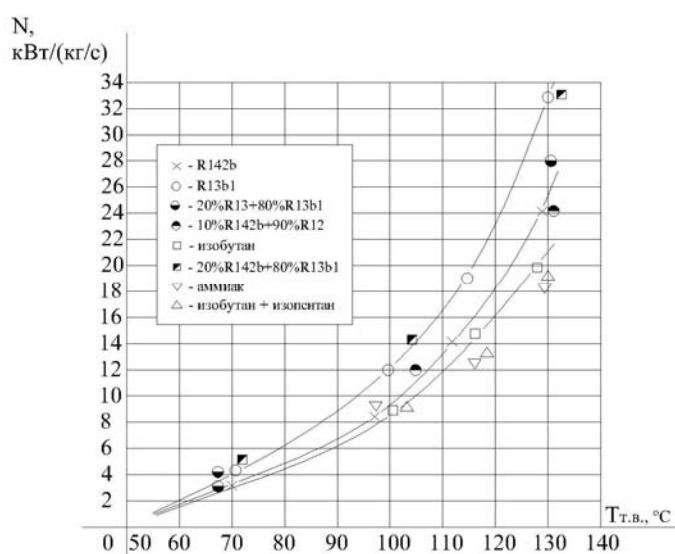


Рис. 2. Зависимость удельной электрической мощности ГеоЭС от температуры геотермальной воды

3. Оптимальное давление в испарителе, соответствующее максимальной удельной мощности при температуре геотермальной воды 70°C (343,15K):

$$P = 434,02 - 0,39092\Delta T_{HEД} + 462,5X_{R12} + 8,7916T_{O.C.}, \text{ кПа} . \quad (11)$$

4. Оптимальное давление в испарителе при температуре геотермальной воды 130 °С (403,15K):

$$P = 1061,5 + 932,7\Delta T_{HEД} - 6,3582X_{R12} + 16,608T_{O.C.}, \text{ кПа} , \quad (12)$$

где X_{R12} – концентрация хладона R12;
 $\Delta T_{HEД}$ – минимальный перепад температуры, К;
 $T_{o.c.}$ – температура окружающей среды, К.

Зависимость удельного расхода геотермальной воды показана на рис. 3.

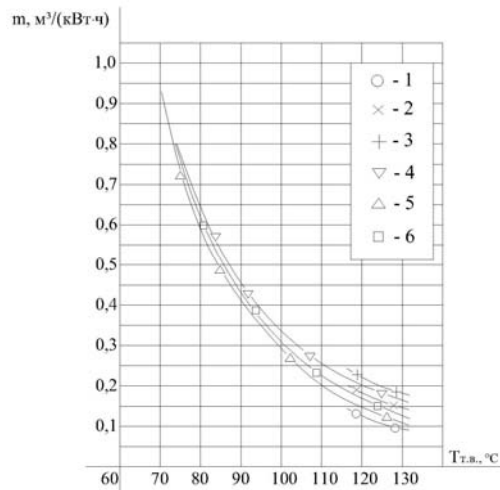


Рис.3. Зависимость расхода геотермальной воды от температуры для различных рабочих веществ:
 1 – изобутан ($T_k=7^\circ\text{C}$, $\Delta T_{мин}=10\text{ К}$); 2 – изобутан ($T_k=30^\circ\text{C}$, $\Delta T_{мин}=10\text{ К}$);
 3 – изобутан ($T_k=30^\circ\text{C}$, $\Delta T_{мин}=20\text{ К}$); 4 – R142b ($T_k=25^\circ\text{C}$, $\Delta T_{мин}=10\text{ К}$);
 5 – R13b1 ($T_k=25^\circ\text{C}$, $\Delta T_{мин}=10\text{ К}$); 6 – 20% R142b + 80% R13b1 ($T_k=25^\circ\text{C}$, $\Delta T_{мин}=10\text{ К}$)

Анализ результатов. Результаты расчетов показывают, что на получение максимальной удельной электрической мощности влияют значения давления (P_{II}) и температуры пара (T_{II}) рабочего вещества перед турбиной, расход рабочего вещества (m), значение минимального температурного напора ($\Delta T_{HEД}$), температура окружающей среды ($T_{o.c.}$) и другие параметры.

Влияние минимального температурного напора наиболее существенно. Так, уменьшение $\Delta T_{HEД}$ от 10...15 К до 5...7 К позволяет увеличить N на 20...25%. Увеличение $\Delta T_{HEД}$ приводит к понижению давления и температуры испарения, что существенно снижает КПД и удельную электрическую мощность (N). Численные результаты показывают, что каждому значению температуры геотермальной воды соответствует оптимальная температура испарения рабочего вещества (рис.4).

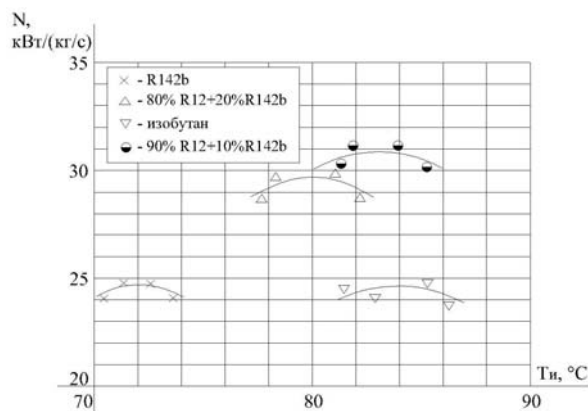


Рис.4. Зависимость удельной электрической мощности от температурного испарения

Выводы

Результаты численных расчетов показывают перспективность использования в качестве рабочего вещества ГеоЭС экологически безопасных фреонов и их смесей. При температуре геотермальной воды 70...130°C удельная электрическая мощность на валу турбинной установки на фреоновых смесях составляет 29...31 кВт/(кг/с), что на 10...12% выше, чем для циклов чистых веществ – 22...24 кВт/(кг/с). Дальнейшее улучшение термодинамической эффективности циклов возможно повышением их параметров до сверхкритических (например, для хладона R13в1 получена удельная электрическая мощность 34,0 кВт/(кг/с), а для R22 – 43,37 кВт/(кг/с) и R134a – 43,87 кВт/(кг/с) при температуре геотермальной воды 130°C (403,15 K) (табл. 2).

Литература

1. Anon. Recent Developments in the Utilization of the Earth's Heat. // Mechanical Engineering. – V. 46, No. 8. – 1924. – pp. 448 – 449.
2. DiPippo. R. An Analysis of an Early Hybrid Fossil – Geothermal Power Plant Proposal. // Geothermal Energy Magazine. – V. 6. No. 3. – 1978. – pp. 34 – 36.
3. DiPippo. R. Geothermal Power Plant: Principles, Applications and Case Studies. // Oxford OX51GB, UK. – 2005. – 450 p.
4. Васильев В.А. Расчет параметров унифицированной геотермальной энергоустановки на водоаммиачной смеси. / Васильев В.А., Кратнов А.В., Говорков И.Г. // Теплоэнергетика. – 1996. – №5. – С. 27 – 32.
5. Абдулагатов И.М. Преобразование геотермальной энергии в электрическую с использованием во вторичном контуре сверхкритического цикла. / Абдулагатов И.М., Алхасов А. Б. // Теплоэнергетика. – 1998. – №4. – С. 53 – 57.