

УДК 620.9

Редько А.А.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С БИНАРНЫМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ

Приводятся результаты расчетно-теоретического исследования термодинамических параметров сверхкритических циклов геотермальных электрических станций. Численные результаты показывают повышение термодинамической эффективности циклов на 10–13 % применением озонобезопасных фреонов и их смесей в качестве рабочих тел станций для температуры геотермальной воды 100–130 °С.

Введение. В настоящее время наблюдается рост дефицита и удорожание органических топлив – природного газа и угля. В связи с этим все большее внимание уделяется нетрадиционным источникам энергии. Наиболее освоенным видом возобновляемой энергии является геотермальное тепло Земли. Наблюдается ежегодный мировой прирост установленной мощности геотермальных электростанций (ГеоЭС) на 10–20 %, а их суммарная мощность превышает 8000 МВт [1]. Украина также имеет значительный потенциал геотермальной энергии. Министерством экологии и природных ресурсов утверждены потенциальные геотермальные ресурсы составляют 27,3 млн. м³/сутки геотермальной воды с температурой 70–130 °С, а их теплоэнергетический потенциал составляет 441 млн. Гкал/год. Эффективное преобразование геотермальной энергии в электрическую требует создания специального энергетического оборудования. Традиционные энергоустановки на водяном паре (с паровыми турбинами на давление 0,5–0,7 МПа) не пригодны при таких температурах источника теплоты из-за низкой плотности и, соответственно, больших габаритов турбины. При этом, турбина и конденсатор находятся при вакуумных давлениях, что вызывает коррозию оборудования из-за присосов воздуха. Применение низкокипящих рабочих тел позволяет уменьшить размеры турбины и предотвратить поступление воздуха в рабочий контур энергоустановки.

Состояние проблемы. В геотермальной теплоэнергетике 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 ГеоЭС эксплуатационной и нагнетательной 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 (рис. 2).

Первая ГеоЭС мощностью 670 кВт с бинарным циклом была запущена в 1967 г. в поселке Паратунке (СССР) на полуострове Камчатка [2,3]. В качестве теплоносителя использовался фреон R12. Температура термальной воды равна 80 °С (353,15 °С). Применялась радиальная турбина с давлением на входе 1,4 МПа и на выхлопе 0,8 МПа. Удельная выработка электроэнергии равнялась 9,7 кДж/кг. В 1992 г. разработан проект геотермального модуля мощностью 1,5 МВт на хладоне R142В с радиально-осевой двухпоточной турбиной для использования теплоты геотермальной воды с температу-

рой 165 °С, Давление на входе в турбину 2,5 МПа, на выходе 0,4 МПа, расчетная удельная выработка электроэнергии равнялась 41 кДж/кг.

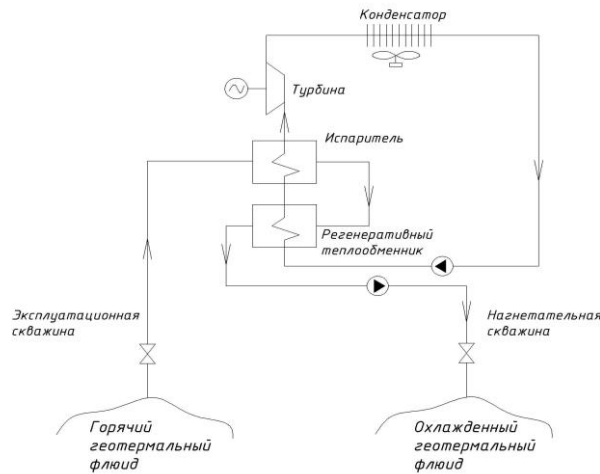


Рисунок 1 – Тепловая схема геотермальной электрической станции с бинарным циклом (фирма «Ормат»)

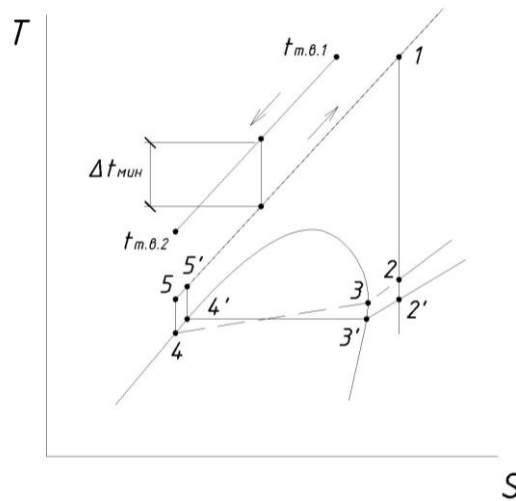


Рисунок 2 – Сверхкритический цикл паротурбинной установки в диаграмме «температура-энтропия» (процесс 1-2 – адиабатное расширение в турбине; $t_{т.в.1} - t_{т.в.2}$ – охлаждение геотермальной воды; $\Delta t_{мин}$ – минимальный перепад температур; 2-3-4-5 – процесс конденсации смеси фреонов)

В [5,7] предлагается использование смеси изобутана и изопентана в качестве рабочего вещества вторичного контура бинарной геотермальной станции при сверх критических параметрах.

Использование смесей при сверхкритических параметрах позволяет изменяя состав смеси управлять термодинамическими параметрами рабочего вещества. При этом характер кривой охлаждения геотермальной воды такой же, как и кривой нагрева низкотемпературного вещества, что позволяет обеспечить минимальные значения перепада температуры между ними.

Анализ сверхкритических циклов для высокотемпературной геотермальной воды ($t_{ТГВ}=180^{\circ}\text{C}$) показал, что наиболее эффективным с точки зрения получения максимальной электрической мощности является сверхкритический цикл, подобный тре-

угольному циклу с начальным давлением 5,0 МПа [5]. В [6] приводятся результаты цикла с рабочим веществом н-бутаном для температурного интервала 180–200 °С. По сравнению с до критическим циклом (начальное давление 3,4 МПа) электрическая мощность, вырабатываемая турбиной, увеличивается на 11 %. При этом плотность рабочего вещества перед турбиной в 1,7 раза выше, чем в докритическом, что позволяет уменьшить габаритные размеры паротурбинной установки.

Предлагается [5] для геотермальной станции с температурой термальной воды 120°С использовать во вторичном контуре хладона R13B1 при сверхкритических параметрах.

Цель работы – повышение термодинамической эффективности циклов геотермальной станции.

Описание результатов. Применение хладонов R142a, R134в не позволяет расширить диапазон температуры термальной воды ниже 115–165 °С.

В данной работе исследованы смеси фреонов (R13в1+R142В), (R13в1+R13). В расчетах термодинамических параметров сверхкритического цикла приняты следующие допущения:

- минимальный температурный напор ($\Delta t_{\text{мин}}$) – 10 К;
- КПД турбины – 0,75;
- КПД насоса – 0,75;
- температура окружающей среды – 15 °С;
- давление за насосом – 5000 кПа

Теплофизические свойства хладонов наведены в [8].

Результаты расчета параметров сверх критического цикла для смеси фреонов (80% R13в1+20%R142в) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Точки цикла	P, кПа	T, °С	V, м ³ /кг	I, МДж/кг	S, кДж/кг °С
1	5000	120	0,002836	-4349,12178	1,75284
2	1326	51,741	0,01195	-4363,72165	1,76800
4	1326	25	0,000684	-4477,57726	1,39334
5	5000	29,917	0,000670	-4474,22733	1,39652

Для вариантов смеси (50 % R13в1+50 % R142в), (20 % R13в1+80 % R142в) сверхкритический режим при давлении 5,0МПа не реализуется из-за повышения критической температуры и давления смеси. При этом расширение пара в турбине завершается в двухфазной области. Численные результаты показывают, что удельная электрическая мощность турбины составляет 34 кВт/(кг/с).

Результаты расчета параметров сверхкритического цикла для смеси фреонов (R13 и R13в1) приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения удельной мощности турбины, для смеси фреонов

Состав смеси	N, кВт/(кг/с)	m, кг/с	η , %
80%R13+20%R13в1	17,00	3,02	4,6
50%R13+50%R13в1	22,57	3,13	6,04
20%R13+80%R13в1	28,48	3,30	7,58
10%R13+90%R13в1	30,57	3,36	8,14

Таблиця 3 – Параметри сверхкритического цикла для смеси 80 % R13+20 % R13в1

Точки цикла	Р, кПа	Т, °С	V, м ³ /кг	I, МДж/кг	S, кДж/кг °С
1	5000	120	0,004507	-5986,92839	2,1188894
2	3086	97,228	0,007257	-5994,98219	2,1261709
4	3086	25	0,0009995	-6114,21154	1,7478821
5	5000	31,733	0,0009957	-6111,66078	1,7498231

Таблиця 4 – для смеси 50 % R13+50 % R13в1

Точки цикла	Р, кПа	Т, °С	V, м ³ /кг	I, МДж/кг	S, кДж/кг °С
1	5000	120	0,00385	-5217,25317	1,9951121
2	2488	86,136	0,007765	-5227,20529	2,0044074
4	2488	25	0,000811	-5340,41072	1,6393245
5	5000	31,0554	0,000787	-5337,69534	1,6415134

Таблиця 5 – для смеси 20 % R13+80 % R13в1

Точки цикла	Р, кПа	Т, °С	V, м ³ /кг	I, МДж/кг	S, кДж/кг °С
1	5000	120	0,003292	-4594,6113	1,8709
2	1953	73,262	0,008631	-4606,13417	1,8821988
4	1953	25	0,000704	-4711,83505	1,5362133
5	5000	30,762	0,000683	-4708,97668	1,538668

Таблиця 6 – для смеси 10 % R13+90 % R13в1

Точки цикла	Р, кПа	Т, °С	V, м ³ /кг	I, МДж/кг	S, кДж/кг °С
1	5000	120	0,003122	-4412,73343	1,82804835
2	1783	68,382	0,009053	-4424,75963	1,83990
4	1783	25	0,000675	-4527,84937	1,5005924
5	5000	30,702	0,000656	-4524,95252	1,5031167

Таблиця 7 – Параметри до критического цикла для чистого вещества R142в

Точки цикла	Р, кПа	Т, °С	V, м ³ /кг	I, МДж/кг	S, кДж/кг °С
1	1263	120	0,002205	-4917,63663	1,63977669
2	339,4	80,370	0,08184	-4944,81293	1,66576276
4	339,4	25	0,000956	-5198,97558	0,82717039
5	1263	25,776	0,000954	-5197,79788	0,82842527

Выводы. Значение удельной электрической мощности турбины в докритических циклах чистых веществ R13, R13в1, R142в составляет около 22–24 кВт/(кг/с), что на 11–12 % ниже, чем для циклов на фреоновых смесях. Эффективность сверхкритических циклов на смесях фреонов также на 12–13 % выше (34–36 кВт/(кг/с), чем докритических циклов на смесях тех же фреонов (27–30 кВт/(кг/с).

Литература

1. Поваров О.А., Томаров Г.В., Кошкин Н.Г. Состояние и перспектива развития геотермальной энергетики России. – Теплоэнергетика. – 1994. – №2. –С. 15–22.
2. Moskvichtva V.N., Popov A.E. Geothermal Power Plant on the Paratunka River. Geothermic – Special Issue 2/ U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources Pizza. V.2. Pt.2. 1970 –pp. 1567–1571.
3. DiPippo R. Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies. – Oxford OX51GB, UK. – 2005. – 450 с.
4. Васильев В.А., Крайнов А.В., Говорков И.Г. Расчет параметров унифицированной геотермальной энергоустановки на водоаммиачной смеси. – Теплоэнергетика. 1996. – №5. –С. 27–32.
5. Абдулагатов И.М., Алхасов А.Б. Преобразование геотермальной энергии в электрическую с использованием во вторичном конкурсе сверхкритического цикла. – Теплоэнергетика. 1998. – №4. –С. 53–57.
6. Пятничко В.А. Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическими теплоносителями. – Экотехнологии и ресурсосбережение. –2002. №5. С. 10–14.
7. Ram H., Yahalom Y. Commercially successful large scale binary applications //1988/ GRC Bulletin/ vol.17 №5. –pp 18–23.
8. Перельштейн И.И., Парухин Е.Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. – М.: Легкая и пищевая промышленность. –1984. – 232 с.

УДК 620.9

Редько А.О.

**ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
СТАНЦІЇ З БІНАРНИМ НАДКРИТИЧНИМ ЦИКЛОМ**

Наведені результати розрахунково-теоретичного дослідження термодинамічних параметрів надкритичних циклів геотермальних електричних станцій. Численні результати показують підвищення термодинамічної ефективності циклів на 10–13 % при застосуванні фреонів та їх сумішей в якості робочих тіл станцій для температури геотермальної води 100–130 °С.

Red'ko A.O.

**THERMODYNAMIC PARAMETERS OF GEOTHERMAL ELECTRIC POWER
PLANTS WITH A BINARY SUPERCRITICAL CYCLE**

The design-theoretical research results of thermodynamic parameters for supercritical cycles of geothermal electric power plants are presented. The numerical results show the 10–13 % increase of cycles thermodynamic effectiveness with application of the ozone-safe freons and their mixtures as working mediums of plants for the geothermal water temperature of 100–130 °С.