

9. BP Statistical Review of World Energy June 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bp.com/statisticalreview>. – 10.11.2009.
10. Угольно-водородные парогазовые комплексы с дополнительным производством синтетических топлив / П. М. Канило, В. В. Соловей, В. Е. Костюк, К. В. Костенко // Пробл. машиностроения. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 64–72.
11. Кузык Б. Н. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б. Н. Кузык, Ю. В. Яковец. – М.: Ин-т эконом. исследований, 2007. – 400 с.
12. Канило П. М. Перспективы становления водородной энергетике и транспорта / П. М. Канило, К. В. Костенко // Автомоб. трансп. – Харьков: Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. – 2008. – Вып. 23. – С. 107–113.

Поступила в редакцию
19.05.10

УДК 620.91

А. А. Редько, канд. техн. наук

Харьковский государственный технический университет
строительства и архитектуры (E-mail: office@kstuca.kharkov.ua)

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОВ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Приводятся результаты расчетно-теоретического исследования термодинамических параметров циклов геотермальной энергетической станции. Численные результаты показывают повышение КПД и увеличение выработки удельной электрической энергии в геотермальной энергетической станции с бинарным циклом с несколькими низкокипящими рабочими веществами.

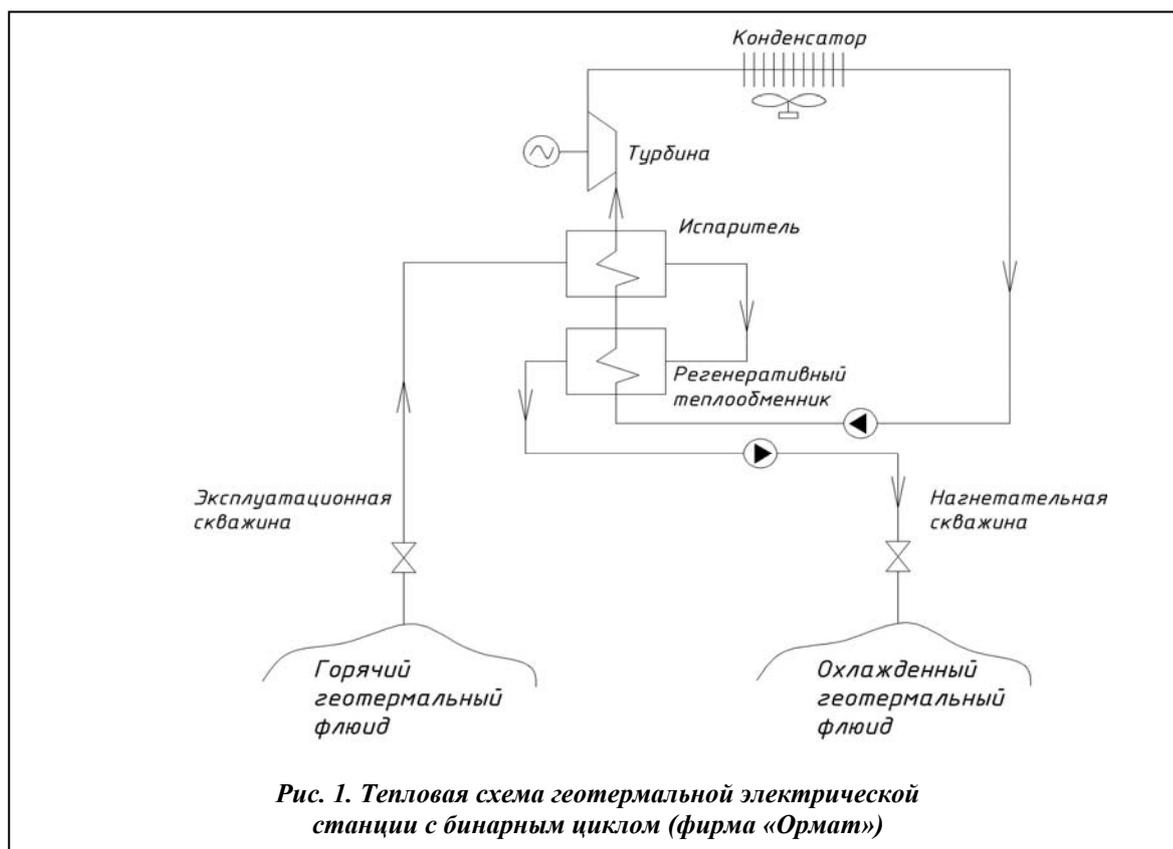
Наводяться результати розрахунково-теоретичного дослідження термодинамічних параметрів циклів геотермальної енергетичної станції. Чисельні результати показують підвищення ККД та збільшення вироблення питомої електричної енергії в геотермальній енергетичній станції з бінарним циклом із декількома низкокипящими речовинами.

Введение

В настоящее время из нетрадиционных источников 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. Утвержденные Министерством экологии и природных ресурсов потенциальные геотермальные ресурсы составляют 27,3 млн. м³/сутки геотермальной воды с температурой 70–130 °С (343,15–403,15 К), а их теплоэнергетический потенциал составляет 441 млн. Гкал/год. Эффективное преобразование геотермальной энергии в электрическую требует создания специального энергетического оборудования.

Состояние проблемы

В геотермальной энергетике находят применение энергетические станции с бинарным циклом [1, 2]. 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 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. 1).

Первая ГеоЭС мощностью 670 кВт с бинарным циклом была запущена в 1967 г. в поселке Паратунке (СССР) на полуострове Камчатка [3]. В качестве теплоносителя использовался фреон R12. Температура термальной воды равна 80 °С (353,15 К). 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 температурой 165 °С. Давление на входе в турбину 2,5 МПа, на выхлопе 0,4 МПа, расчетная удельная выработка электроэнергии равнялась 41 кДж/кг.

В настоящее время бинарные станции наиболее широко используются среди геотермальных энергетических станций. В 2004 г. находилось в эксплуатации 155 ГеоЭС, вырабатывающих 274 МВт энергии в 16 странах. При этом средняя мощность станции составляет около 1,5–1,8 МВт на станцию.

Анализ мировых геотермальных ресурсов показывает, что преобладают месторождения с температурой пластовой воды ниже 150 °С (423,1 К). В Украине также имеются геотермальные месторождения с температурой 150–180 °С (423,15–453,15 К), запасы которых позволяют производить около 200 МВт электроэнергии. Однако большая часть месторождений характеризуется температурным режимом 60–130 °С (333,15–403,15 К). При такой температуре геотермальной воды трудно построить энергетическую паровую станцию, которая сможет эффективно и экономично использовать теплоту такого источника теплоты. Чем ниже температура геотермального источника, тем более затруднительная и дорогая технология его использования.

Для геотермальной бинарной энергетической станции, использующей теплоноситель с начальной температурой 130 °С (403,15 К), и температурой отработанного (охлажденного) теплоносителя 35 °С (308,15 К) максимальный КПД идеального цикла Карно:

$$\eta_T = 1 - (308,15/403,15) = 3,56\%.$$

Учитывая неизотермичность теплового источника геотермальная вода охлаждается, отдавая теплоту рабочей жидкости. Таким образом, более реальным циклом геотермальной бинарной станции является треугольный цикл, состоящий из изобары при подводе теплоты до начальной температуры геотермального теплоносителя, изоэнтропного расширения в турбине и изотермического процесса отвода теплоты в конденсаторе.

КПД треугольного цикла:

$$\eta_T = (T_H - T_K)/(T_H + T_K) = (403,15 - 308,15)/(403,15 + 308,15) = 0,1336 = 13,36\%.$$

Поэтому повышение эффективности цикла на 1–2% позволит повысить КПД (или коэффициент утилизации) цикла на 10–20%, что существенно.

Известны усовершенствованные бинарные циклы: бинарный цикл с двумя давлениями [3]; бинарный цикл с двумя органическими жидкостями [3]; бинарный цикл «Калина» [6] с водоаммиачной смесью.

Автором предложена модифицированная тепловая схема геотермальной энергетической станции с несколькими жидкостями [5]. Цель данной работы – повышение термодинамической эффективности циклов геотермальной энергетической станции.

Основные результаты

Известные тепловые схемы геотермальных энергетических станций характеризуются ограниченным температурным интервалом (не более 15–25 К) эффективного применения каждого индивидуального рабочего вещества и отсутствием таких рабочих тел на весь диапазон температуры от 60 до 130 °С (333,15–403,15 К).

Тепловая схема предлагаемой модифицированной геотермальной бинарной станции показана на рис 2.

Исходные данные и принятые допущения:

- температура геотермальной воды 130 °С (403,15 К);
- температура окружающей среды $T_{0,c} = 15$ °С (288,15 К);
- $\Delta T = 5; 10$ К – минимальная разность температуры между геотермальной водой и теплоносителем вторичного контура;
- адиабатный КПД турбин 75%;
- адиабатный КПД насосов 80%.

Исследовались два варианта с различными рабочими веществами:

первый вариант:

- 1-я ступень – хладон R114;
- 2-я ступень – хладон R152a;
- 3-я ступень – хладон R143a;

второй вариант:

- 1-я ступень – хладон R142в;
- 2-я ступень – хладон R134a;
- 3-я ступень – хладон R22.

Изучаемые рабочие вещества – хладоны – характеризуются как озонобезопасные (ODP), с незначительным потенциалом глобального потепления (GWP), классом опасности 4.

Теплофизические параметры хладонов приведены в табл. 1. Циклы Ренкина геотермальной энергетической станции с многоступенчатым бинарным циклом показаны на рис. 3. Результаты расчета удельной электрической мощности и КПД цикла приведены в табл. 2, точки циклов показаны на рис. 2, 3.

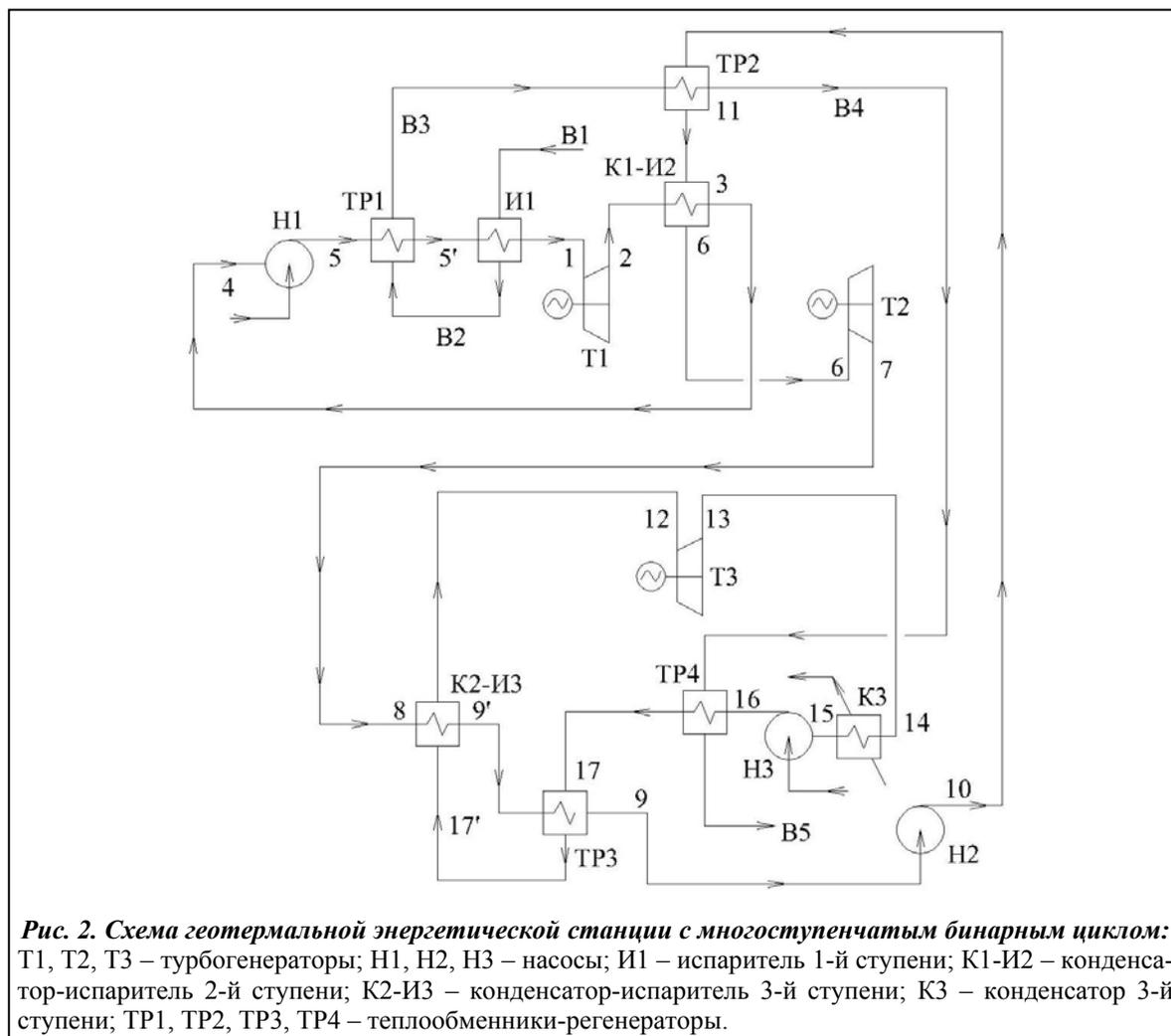


Таблица 1. Теплофизические параметры рабочих веществ геотермальной энергетической станции

Параметр	R114	R152a	R143a	R142в	R134a	R22
Молекулярная масса	170,92	66,05	84,04	100,49	102,03	86,50
Температура кипения при $P = 1$ бар, °C	-3,50	-24,55	-47,60	-9,20	-26,50	-40,90
Температура критическая, °C	145,89	113,5	73,15	136,80	101,0	96,0
Давление критическое, МПа	3,261	4,500	3,760	4,150	4,055	4,977

Таблица 2. Значение удельной электрической мощности и КПД цикла геотермальной энергетической станции с несколькими жидкостями (вариант А*/вариант А1, $\Delta t_n = 10K$)

Параметр	I ступень хладон R114	II ступень хладон R152a	III ступень хладон R143a	Суммарная мощность, кВт/(кг/с)	КПД _ц , %
Удельная электрическая мощность, кВт/(кг/с)	1,327/1,057	5,960/8,586	18,389/27,102	25,676/36,746	9,64/9,66
Удельный расход рабочего тела, кг/с	0,545/0,768	0,763/1,083	1,44/1,97	–	–

* Вариант А: Давление в испарителе – 1700 кПа; вариант А1: давление в испарителе – 1500 кПа.

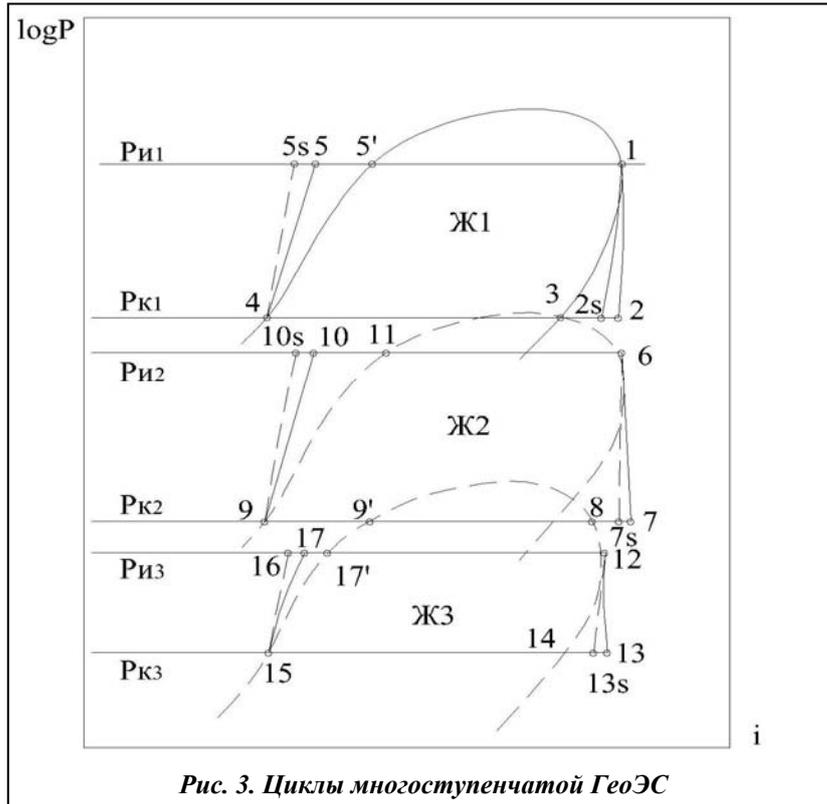


Рис. 3. Циклы многоступенчатой ГеоЭС

Понижение давления в испарителе приводит к увеличению полезной электрической мощности от 25,676 до 36,746 кВт/(кг/с)

Удельная электрическая мощность геотермальной станции зависит от давления и температуры в испарителе, массового расхода рабочего вещества, минимального температурного перепада (недорекуперации). Выполненные варианты расчеты позволили определить рациональные термодинамические параметры геотермальной энергетической станции. Результаты расчета приведены в табл. 4, 5.

Существенно влияет на эффективность цикла значение минимального температурного перепада, который определяет оптимальные термодинамические параметры цикла геотермальной энергетической станции с бинарным циклом (вариант Б2 $\Delta t_n = 5$ К).

Таблица 3. Значение удельной электрической мощности и КПД цикла геотермальной энергетической станции с несколькими жидкостями (вариант Б* / вариант Б1, $\Delta t_n = 10$ К)

Параметр	I ступень хладон R142в	II ступень хладон R134а	III ступень хладон R22	Суммарная мощность, кВт/(кг/с)	КПД _ц , %
Удельная электрическая мощность, кВт/(кг/с)	2,989/4,027	7,094/7,816	20,456/22,533	30,539/34,378	9,067/9,236
Удельный расход рабочего тела, кг/с	0,797/0,882	1,515/1,675	1,515/1,675	–	–

* Вариант Б: давление в испарителе 1600 кПа; вариант Б1: давление в испарителе 1400 кПа.

Таблица 4. Значение удельной электрической мощности и КПД цикла геотермальной энергетической станции с несколькими жидкостями (вариант Б2; $\Delta t_n = 5$ К)

Параметр	I ступень R142в	II ступень R134а	III ступень R22	Суммарная мощность, кВт/(кг/с)	КПД _ц , %
Удельная электрическая мощность, кВт/(кг/с)	6,05	22,78	39,97	68,8	16,57
Удельный расход рабочего тела, кг/с	0,9261	1,667	2,0355	–	–

Таблица 5. Термодинамические параметры циклов ГеоЭС

Точки цикла	P , кПа	T , °C	V , м ³ /кг	I , МДж/кг	S , кДж/(кг·°C)
1	1500	125	0,01831	-4915,4353	1,633316
2	1065	112,831	0,026617	-4922,5158	1,639449
4	1065	67,446	$10,71 \cdot 10^4$	-5140,1070	1,009333
5	1500	67,955	$10,68 \cdot 10^4$	-5139,5588	1,009669
5'	1500	83,100	$11,32 \cdot 10^4$	-5115,5680	1,078458
6	1800	107,831	0,01426	-8721,4876	1,915033
7	845	83,327	0,03103	-8736,1085	1,928800
9'	845	33,234	$8,510 \cdot 10^4$	-8958,7520	1,214016
9	845	32,970	$8,503 \cdot 10^4$	-8959,1583	1,212690
10	1800	33,781	$8,467 \cdot 10^4$	-8958,2030	1,213074
11	1800	62,672	$57,47 \cdot 10^4$	-8842,3716	1,564343
12	3540	78,327	0,005396	-5817,6323	1,862273
13	913	20,015	0,02361	-5839,8139	1,881188
15	913	20	$8,241 \cdot 10^4$	-6010,0008	1,300674
16	3540	22,277	$8,179 \cdot 10^4$	-6007,4539	1,302023
17	3540	28	$8,324 \cdot 10^4$	-6000,2937	1,326026
17'	3540	28,262	$8,331 \cdot 10^4$	-5999,9610	1,327131
B1	350	130	$10,85 \cdot 10^4$	-15383,7498	4,297487
B2	350	88,1	$10,44 \cdot 10^4$	-15569,0887	3,812191
B3	350	83,011	$10,40 \cdot 10^4$	-15591,3061	3,750252
B4	350	38,448	$10,02 \cdot 10^4$	-15784,3906	3,171155
B5	350	35,070	$10,00 \cdot 10^4$	-15798,9653	3,124126

B_1 – B_5 – температура геотермальной воды, °C.

При понижении давления в испарителе до 1400 кПа мощность увеличивается.

Зависимость удельного расхода геотермальной воды от температуры показана на рис. 4. Как видно, удельный расход геотермальной воды для одноступенчатой ГеоЭС составляет около 150–200 кг/(кВт·ч). Удельный расход геотермальной воды в многоступенчатой ГеоЭС снижается до 52 кг/(кВт·ч), что более чем в 3 раза меньше по сравнению с одноступенчатой энергетической станцией.

Выводы

Численные результаты термодинамического анализа модифицированной геотермальной энергетической станции с несколькими теплоносителями для температурного интервала геотермальной воды 60–130 °C (333,15–403,15 K) показали увеличение выработки удельной электрической мощности в 2,0–2,3 раза по сравнению ГеоЭС с одноступенчатым бинарным циклом.

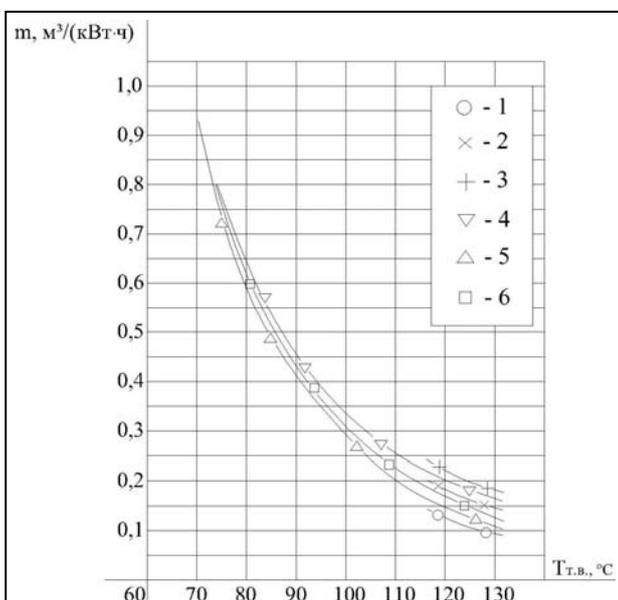


Рис. 4. Зависимость расхода геотермальной воды от температуры:

1 – изобутан ($T_k = 7$ °C, $\Delta t_{мин} = 10$ K), 2 – изобутан ($T_k = 30$ °C, $\Delta t_{мин} = 10$ K), 3 – изобутан ($T_k = 30$ °C, $\Delta t_{мин} = 20$ K), 4 – R142b ($T_k = 25$ °C, $\Delta t_{мин} = 10$ K); 5 – R13b1 ($T_k = 25$ °C, $\Delta t_{мин} = 10$ K); 6 – 20% R142b +

Литература

1. *Lund J. W.* Wide direct uses of geothermal energy 2000 / J. W. Lund, D. H. Freeston // Proc. of the World Geothermal Congr. 2000. – Kyushu – Tohoku. – Japan, May 28. – June 10. 2000.
2. *Povarovo.* Geothermal power engineering in Russia Today / Povarovo // Proc. World Geothermal Congress 2000. – Kyushu – Tohoku. – Japan, May 28. – June 10. 2000.
3. *Di Pippo R.* Geothermal Power Plants: Principles, Applicatijns and Case Studies / R. Di Pippo // Oxford OX516B, UK. – 2005. – 450 p.
4. *Абдулатотов И. М.* Преобразование геотермальной энергии в электрическую с использованием во вторичном контуре сверхкритического цикла / И. М. Абдулатотов, А. Б. Алхасов // Теплоэнергетика. – 1998. – № 4. – С. 53–57.
5. *Редько А. А.* Анализ термодинамических параметров циклов геотермальных электрических станций / А. А. Редько // Энергетика: экономика, технологии, экология. – Киев: НТУУ «КПИ». – 2009. – № 2. – С. 65–78.
6. *Васильев В. А.* Расчет параметров унифицированной геотермальной энергоустановки на водоаммиачной смеси / В. А. Васильев, А. В. Кратнов, И. Г. Говорков // Теплоэнергетика. – 1996. – № 5. – С. 27–32.

Поступила в редакцию
02.01.10