

---

---

# ТЕХНОЛОГІЇ

---

---

удк 620.9: 621.482

А. А. РЕДЬКО

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛОВ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

---

### 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 8000МВт [1]. Эффективное преобразование геотермальной энергии в электрическую требует создания специального энергетического оборудования. Традиционные энергоустановки на водяном паре (с паровыми турбинами на давление 0,5...0,7МПа) непригодны 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 низкипящих 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.

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.

Первая ГеоЭС мощностью 670кВт с бинарным циклом была запущена в 1967г. в поселке Паратунке (СССР) на полуострове Камчатка [2]. В качестве теплоносителя использовался фреон R12. Температура термальной воды равна 80°C (353,15К). Применялась радиальная турбина с давлением на входе 1,4МПа и на выхлопе 0,8МПа. Удельная выработка электроэнергии равнялась 9,7кДж/кг. В 1992г. разработан проект геотермального модуля мощностью 1,5МВт на хладоне R142В с радиально-осевой двухпоточной турбиной для использования теплоты геотермальной воды с температурой 165°C (438,15К), Давление на входе в турбину 2,5МПа, на выхлопе 0,4МПа, расчетная удельная выработка электроэнергии равнялась 41кДж/кг. В г. Лордерелло (Италия) в 1912г. была разработана бинарная энергетическая станция мощностью 250кВт.

В настоящее время бинарные станции находят широкое применение. На июнь 2004г. в 16 странах в эксплуатации находилось 155 ГеоЭС, вырабатывающие 274МВт энергии, что составляет около 30% от всех работающих ГеоЭС [1,2].

Анализ мировых геотермальных ресурсов показывает, что преобладают месторождения с температурой пластовой воды ниже 150°C (423,15К). В Украине также имеются геотермальные месторождения с температурой 150...180°C (423,15...453,15К), запасы которых позволяют производить около 200 МВт электроэнергии. Однако большая часть месторождений характеризуется температурным режимом ниже 130°C (403,15К).

При температуре греющего теплоносителя 65...150°C (338,15...423,15К) трудно построить паровую энергетическую станцию, которая может иметь эффективные экономические параметры. Как показывает зарубежный опыт, чем ниже температура геотермального источника, тем требуется применение более сложной технологии [3].

Наиболее простые технические решения реализованы в бинарном цикле, показанном на диаграмме давление-энтальпия (P-i) (рис.1).

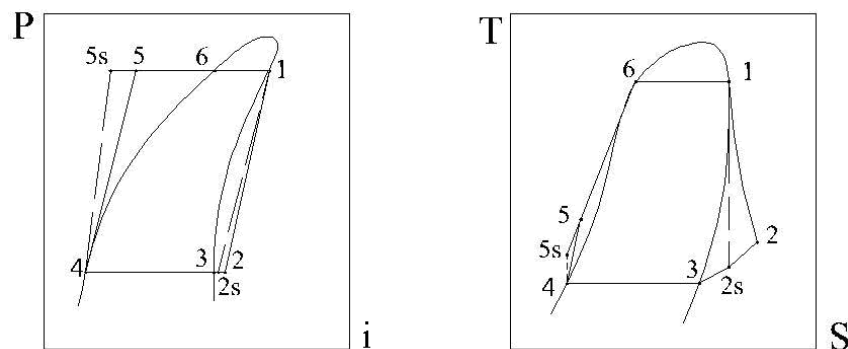


Рис.1. Диаграммы "давление-энтальпия" и "температура-энтропия" бинарного цикла геотермальной станции

Термодинамическую эффективность определяют с помощью следующих показателей. Термодинамический КПД цикла определяется соотношением:

$$\eta_m = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_4}, \quad (1)$$

где  $i_1$  – значение энтальпии в точках цикла.

Степень отбора теплоты от геотермального источника:

$$\frac{Q}{W} = \frac{1}{\eta_m} - 1, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество подведенной теплоты в цикле;

$W$  – полезная работа цикла.

Коэффициент утилизации цикла энергетической станции, определяемый как отношение действительной энергии нетто станции к максимальной теоретической энергии, которую можно получить от геотермального теплоносителя:

$$\eta_y = \frac{W}{m_T [(i_{T'} - i_0) - T_0 (S_{T'} - S_0)]}, \quad (3)$$

где  $W$  – мощность энергетической станции, кВт;

$m_T$  – массовый расход геотермальной воды, кг/с;

$T_0$  – температура охлаждающей воды в конденсаторе или температура мокрого термометра при охлаждении атмосферным воздухом в градирне, К;

$i_0, S_0$  – значения энтальпии, кДж/кг, и энтропии, кДж/(кг·К) геотермального теплоносителя, определяемого при давлении и температуре мокрого термометра атмосферного воздуха;

$i_{T'}, S_{T'}$  – значения энтальпии, кДж/кг, и энтропии, кДж/(кг·К) геотермального теплоносителя при давлении и температуре на входе в теплообменник – испаритель.

**Цель работы** – повышение термодинамической эффективности циклов ГеоЭС.

**Описание тепловой схемы.** Известные технологические схемы ГеоЭС с различными теплоносителями характеризуются ограниченным температурным интервалом (не более 15...25°C) эффективного применения каждого индивидуального рабочего тела и отсутствием таких рабочих тел на весь диапазон от 60°C (333,15 К) до 150°C (423,15 К) [4-6]. Исходя из общей задачи создания универсального энерго модуля ГеоЭС, необходимо разработать тепловую схему и определить параметры основных элементов оборудования, обеспечивающих необходимую выработку электроэнергии при температуре геотермальной воды в указанном интервале.

В [4] приводится тепловая схема блочно-модульной энергоустановки с регенерацией теплоты отработанного пара с применением водоаммиачного рабочего тела. Приведены показатели унифицированной энергоустановки с трехступенчатой турбиной номинальной мощностью 5МВт, а также показатели энергоустановки мощностью 1,5МВт производства Кировского завода при

использовании в качестве рабочего тела низкокипящих веществ. Определены пределы эффективного применения низкокипящих рабочих тел на энергоустановке Кировского завода. Такие теплоносители как изо-пентан, н-пентан, аммиак неприменимы из-за низкого КПД турбины. Хладоны R142В и R134В не позволяют расширить диапазон температур термальной воды за пределы 115...165°C (388,15...438,15 К).

В работе [7] указывается на эффективность каскадных тепловых схем с двумя теплоносителями со ступенчатым использованием теплового потенциального геотермального теплоносителя. Однако не приводятся параметры энергоустановки, не указывается используемый теплоноситель.

Ниже приводится описание модифицированной каскадной регенеративной тепловой схемы ГеоЭС с несколькими рабочими телами и несколькими турбинами (рис.2).

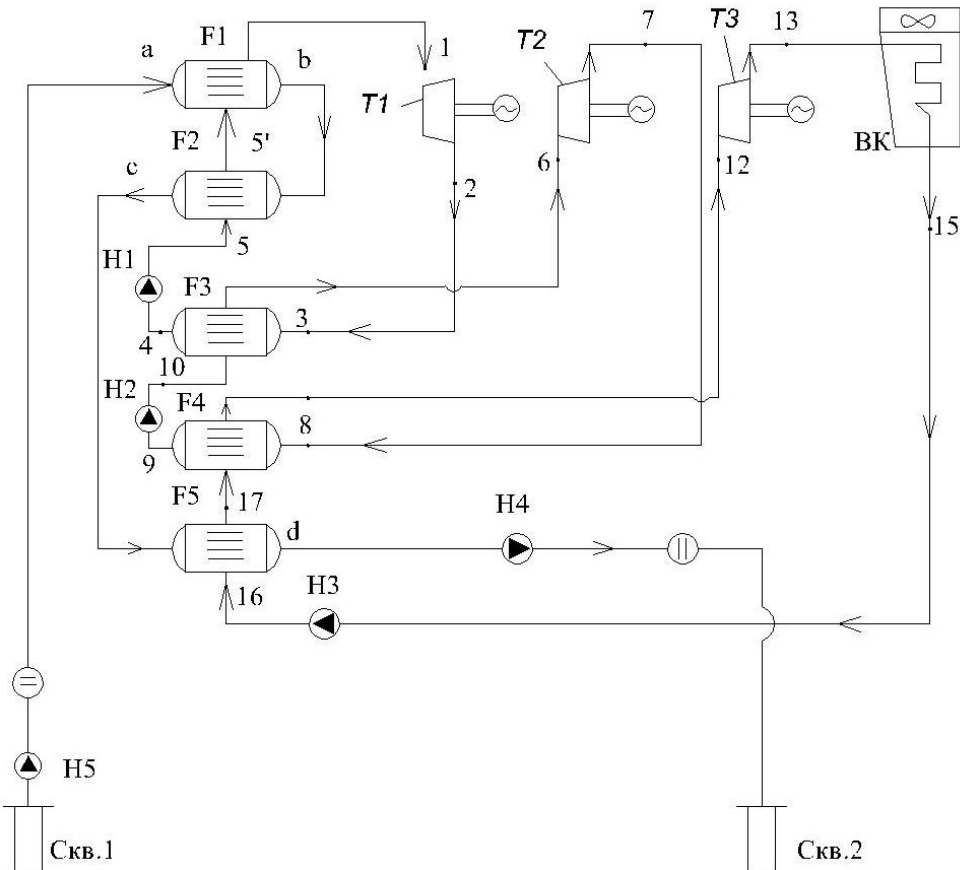


Рис.2. Каскадная тепловая схема ГеоЭС

F1, F2 - теплообменники для нагрева Ж1 в сверхкритическом цикле;

F3, F4 - рекуператоры-испарители Ж1 и Ж2;

F5 - теплообменник-рекуператор; BK - воздушный конденсатор Ж3;

H1, H2, H3 - насосы Ж1, Ж2, Ж3;

H4 - нагнетательный насос; H5 - эксплуатационный насос;

T1, T2, T3 - турбины; Сква.1, Сква.2 - эксплуатационная и нагнетательная скважины

Отличием каскадного цикла является применение трех жидкостей, при этом два цикла являются докритическими, а один – сверхкритическим, что позволяет расширить температурный интервал. Основное преимущество разрабатываемого цикла состоит в применении различных жидкостей, наиболее эффективных в различных температурных интервалах в диапазоне от 60°C (333,15 К) до 150°C (423,15 К), а также создание эффективного теплообмена (обеспечение минимальных необратимых теплотерь в теплообменниках) между теплоносителями и геотермальной водой, на что указывает характер кривых нагрева – кипения рабочих жидкостей и охлаждения геотермальной воды (рис.3) как показано на диаграмме температура-теплопередача (Т-Q).

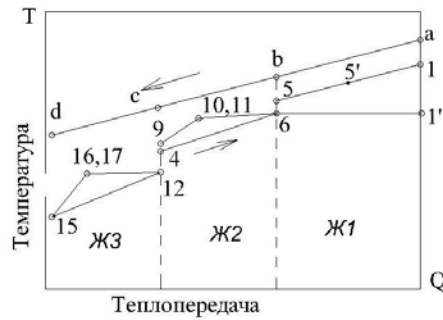


Рис.3. Диаграмма "температура-теплопередача" каскадного и бинарного циклов (a-b-c-d - кривая охлаждения термальной воды; 4-6-1' - нагрев теплоносителя в докритическом цикле; 15-16-17-4-9-10-11-6-5-5'-1 - нагрев теплоносителя в каскадном цикле)

**Результаты расчетов параметров цикла.** Принимается, что температура геотермальной воды на входе в теплообменник  $F_1$  имеет значение  $150^{\circ}\text{C}$  ( $423,15\text{K}$ ). Температура конденсации соответственно равна  $30^{\circ}\text{C}$  ( $303,15\text{K}$ ). Расчеты выполнены для простого бинарного докритического цикла с одной рабочей жидкостью - хладон R142 и каскадного цикла с тремя жидкостями (Ж1 – R142, Ж2 – R12, Ж3 – R22), приведенного на диаграмме (давление-энтальпия) (рис.4). Номера точек простого бинарного и каскадного циклов показаны на рис.1 и рис.4.

Значения теплофизических и термодинамических параметров рабочих теплоносителей приведены в [8]. Значения расчетных параметров в характерных точках циклов приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Бинарный простой докритический цикл

Состояние	P, МПа	T, К	i, кДж/кг	S, кДж/(кг·К)
1	4,5	418,15	710,0	4,85
2	0,4	303,15	645,0	4,84
2 <sub>s</sub>	0,4	303,15	643,5	4,80
3	0,4	303,15	450,0	4,80
4	0,4	303,15	450,0	4,80
5	4,5	303,15	450,0	4,80
5 <sub>s</sub>	4,5	303,15	448,0	4,80

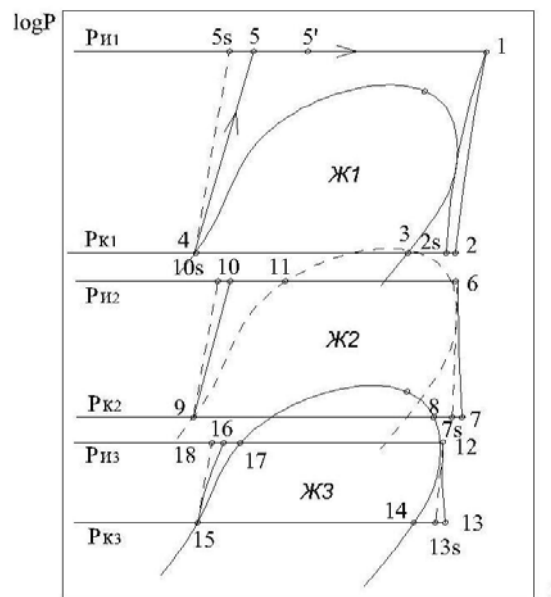


Рис.4. Бинарный каскадный цикл с рекуператорами и тремя жидкостями (Pи1, Pи2, Pи3 – соответственно давление испарения жидкостей, Pк1, Pк2, Pк3 – давление конденсации)

## Каскадный цикл с тремя жидкостями

Состояние	P, МПа	T, К	i, кДж/кг	S, кДж/(кг·К)
Сверхкритический цикл Ж1- R142				
1	4,5	418,15	710,0	4,85
2	2,2	373,15	685,0	4,82
2 <sub>s</sub>	2,2	373,15	683,0	4,82
3	2,2	373,15	680,0	4,80
4	2,2	373,15	540,0	4,80
5	4,5	373,15	540,0	4,80
5 <sub>s</sub>	4,5	373,15	538,2	4,80
Докритический цикл, Ж2 - R12				
6	3,25	373,15	575,0	4,50
7	1,40	333,15	560,0	4,51
7 <sub>s</sub>	1,40	333,15	558,1	4,49
8	1,40	333,15	558,0	4,48
9	1,40	333,15	445,0	3,75
10	3,25	333,15	455,0	3,75
10 <sub>s</sub>	3,25	333,15	453,0	3,73
Докритический цикл, Ж3 – R22				
11	2,2	333,15	620,0	4,66
12	1,2	333,15	610,0	4,66
12 <sub>s</sub>	1,2	333,15	608,0	4,51
13	1,2	333,15	608,0	4,50
14	1,2	333,15	430,0	4,50
15	2,2	333,15	430,0	4,50
15 <sub>s</sub>	32,2	333,15	328,0	4,48

Массовый расход теплоносителя в бинарном цикле определяется согласно зависимости:

$$m(i_3 - i_2) = C_B \left[ (T'_T - (T_S + \Delta T)) \right], \quad (4)$$

$$m(i_2 - i_1) = C_B \left[ (T_S + \Delta T) - T''_T \right], \quad (5)$$

где  $C_B$  – теплоемкость термальной воды, кДж/кг·К;

$T'_T, T''_T$  - температура термальной воды соответственно на входе и выходе из ГеоЭС, К;

$\Delta T$  - минимальный температурный напор в теплообменнике – испарителе, К.

Принимается, что  $\Delta T = 5$ .

Удельная мощность, развиваемая турбиной  $N_{\odot}$ , определяется по формуле:

$$N_{\odot} = \eta_{\odot} m(i_3 - i_4), \quad (6)$$

где  $\eta_{\odot}$  - относительный электрический КПД турбины;

$i_1, i_2, i_3, i_4$  – значение энтальпии теплоносителя в соответствующих точках цикла (рис.1 и рис.4, табл. 1, 2).

Удельная мощность (нетто) определяется по формуле:

$$N_{\text{ЭН}} = N_{\odot} - \frac{(P_{\text{И}} - P_{\text{К}}) \cdot V_{\text{К}} \cdot m}{\eta_{\text{Н}}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{И}}, P_{\text{К}}$  – соответственно давление теплоносителя в испарителе и конденсаторе, МПа;

$V_{\text{К}}$  – удельный объем конденсатора, м<sup>3</sup>/кг;

$\eta_{\text{Н}}$  - КПД питательного насоса.

Принимается, что  $\eta_{\odot} = 0,85, \eta_{\text{Н}} = 0,8$ .

Анализ результатов расчетов показывает, что наименьшие значения удельной мощности и наибольшие массогабаритные размеры – у энергоустановки с теплоносителем аммиаком (т.к. давление испарения, на котором теплоноситель поступает в турбину, у аммиака значительно выше, чем у других рабочих тел).

Для температурного интервала геотермальной воды 100...200°C (373,15...473,15 К) преимущества имеют энергоустановки с теплоносителями изобутан, водоаммиачная смесь и анизотропная смесь (90% изобутан, 10% изопентан), органические жидкости [6].

Для температур геотермальной воды ниже 150°C (423,15 К) имеют преимущества хладоны (R142, R134a и др.)

Результаты расчетов показывают эффективность цикла, включающего в себя несколько энергоустановок с различными теплоносителями, оптимальными для данного температурного интервала. Так, суммарная удельная мощность каскадной энергоустановки составляет 72,4кВт. По сравнению с энергоустановкой на хладоне R142B (N=41,6кВт) в том же температурном интервале удельная мощность превышает в 1,74 раза. Термический КПД каскадной ГеоЭС составляет около 14,5...15%, что несколько выше, чем термический КПД простой бинарной станции, составляющий около 10...12%.

Таблица 3

Значение удельной мощности энергоустановки (N, кВт·с/кг), массового расхода m (кг/с), давления испарения P<sub>и</sub> (МПа) низкотемпературных теплоносителей

Теплоноситель	P <sub>и</sub>	m	N
Аммиак	4,16	0,24	35,7
Изобутан	2,1	0,65	41,2
Смесь (90% изобутан, 10% изопентан)	1,82	0,52	39,3
Хладон R142B	1,75	1,46	41,6
Каскадный цикл:			
- хладон R142;	2,1	1,1	28,3
- хладон R12;	1,24	2,3	29,3
- хладон R22	1,25	1,72	14,8

**Выводы**

Выполненные расчетные исследования показывают перспективность предлагаемой модифицированной тепловой схемы каскадной энергоустановки в производстве электроэнергии при использовании теплоты геотермальных вод с температурой 60...150°C (333,15...423,15 К). Выбор рабочих теплоносителей определяется в результате оптимизации технико-экономических параметров каскадного цикла.

**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. -450с.
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 контуре 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. -232с.