



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЭС

К.т.н., доцент Мартынов А.В.<sup>1</sup>, ассист. Никифорова Д.В.<sup>1</sup> (ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ")

**АННОТАЦИЯ.** В настоящее время в России сложилась очень сложная ситуация. С одной стороны, постоянно растут потребности в энергии, а с другой, этот рост влечет за собой все большее ухудшение экологии. Одним из направлений производства тепла и электроэнергии является геотермальное энергоснабжение из глубинных скважин. Преимущество геотермальной энергии заключается в том, что она может быть использована повсеместно. Суммарная геотермальная энергия, поступающая из недр Земли к ее поверхности, оценивается в 32000 ГВт. Для использования гео- и петротермального тепла Земли целесообразно создавать экологически чистые двухконтурные ГеоТЭС с одной скважиной. При оценке реальной эффективности ГеоТЭС необходимо учитывать внутренние потери работоспособности энергии.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** энергетика; геотермальная энергетика; испаритель фреон-вода; тепло Земли.

Основными факторами при работе энергетических установок являются их эффективность, надежность и экологичность. Предельное значение коэффициента надежности, к которому необходимо стремиться, составляет  $k_n = 1$ . Такое значение имеет КПД идеальной ТЭС, работающей по циклу Карно  $\eta = 1$ .

В настоящее время эффективность энергетических установок в промышленности и ЖКХ весьма низкая. В России на единицу выпускаемой продукции затрачивается в 3 раза больше энергии, чем в передовых капиталистических странах Европы, Америки, Канады, Японии и т.д. [1]

Низкая эффективность энергоустановок косвенно связана с неправильной оценкой многими авторами их КПД. Так, например, КПД котла оценивается в 80÷90% – это не верно [2]. Такие высокие значения, приписываемые КПД, никакого отношения к истинным значениям КПД не имеют. Также неверно оцениваются КПД тепловых электростанций по величине  $(T - T_{oc}) / T$ , подсчитываемой для идеального цикла Карно. Эта величина ( $\tau = (T - T_{oc}) / T$ ) является всего лишь коэффициентом работоспособности, т.е. целевым коэффициентом [3–6]. Все целевые коэффициенты базируются на энергетических балансах (I закон термодинамики) установок, которые не учитывают внутренние потери работоспособности энергии [6].

Только КПД, базирующиеся на II законе термодинамики, учитывают внутренние потери энергии, определяемые через полученные ( $E_{пол}$ ) и затраченные ( $E_{затр}$ ) значения эксергии, отражают реальную эффективность энергетических установок [6]

$$\eta = \frac{E_{пол}}{E_{затр}}$$

Поэтому, неверная, заведомо завышенная оценка КПД является отрицательным фактором,

влияющим на процесс повышения эффективности энергоустановок. Действительно, зачем повышать КПД, если он и так высокий (90%) [2].

Очевидно, что для повышения эффективности энергоустановок и, в частности ТЭС, необходимо уменьшать затраты работоспособной энергии на привод установок. Такому направлению соответствует создание геотермальных ТЭС, для работы которых не требуются затраты топлива, газа и т.д., так как горячая вода отводится из Земли.

Некоторые авторы считают, что геотермальные ТЭС имеют низкий КПД [7]. Здесь опять сказывается неверный подход в оценке КПД ТЭС по величине коэффициента работоспособности  $\tau$ .

Для расчета КПД геотермальной ТЭС рассмотрим схему (рис. 1) для производства 1 МВт электроэнергии за счет тепла воды (при  $t = 110^\circ\text{C}$ ), отведенной из скважины Земли глубиной  $H = 1 \div 3$  км. Теплоноситель (вода), поступая в обсадную трубу геотермального теплообменника I, нагревается до температуры грунта у основания скважины и по подъемной трубе поднимается к поверхности. Теплая вода поступает в испаритель II фреонового цикла, охлаждается и с помощью геотермального насоса возвращается в скважину. Фреон, поступая в испаритель, нагревается до температуры кипения и испаряется, пар подается в турбину III, где и вырабатывается электроэнергия. Далее пар фреона из турбины идет в конденсатор IV, где конденсируется и с помощью циркуляционного насоса опять подается в испаритель. Холодная вода от градирни V идет в конденсатор. Циркуляция обеспечивается насосом холодной воды.

Процесс фреонового цикла гео ТЭС мощностью  $N_э = 1$  МВт представлен в T-S диаграмме на рис. 2. Исходные данные для расчета цикла (фреон 11) [5]:

$$\begin{array}{ll} t_1 = 100^\circ\text{C} & p_1 = 0,6 \text{ МПа} \quad h_1 = 1010 \text{ кДж/кг} \\ t_2^1 = 30^\circ\text{C} & p_2^1 = 0,13 \text{ МПа} \quad h_2^1 = 980 \text{ кДж/кг} \\ t_2 = 50^\circ\text{C} & p_2 = 0,13 \text{ МПа} \quad h_2 = 986 \text{ кДж/кг} \\ t_3 = 30^\circ\text{C} & p_3 = 0,13 \text{ МПа} \quad h_3 = 795 \text{ кДж/кг} \end{array}$$

<sup>1</sup> 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 тел.: 8(495)362-75-53

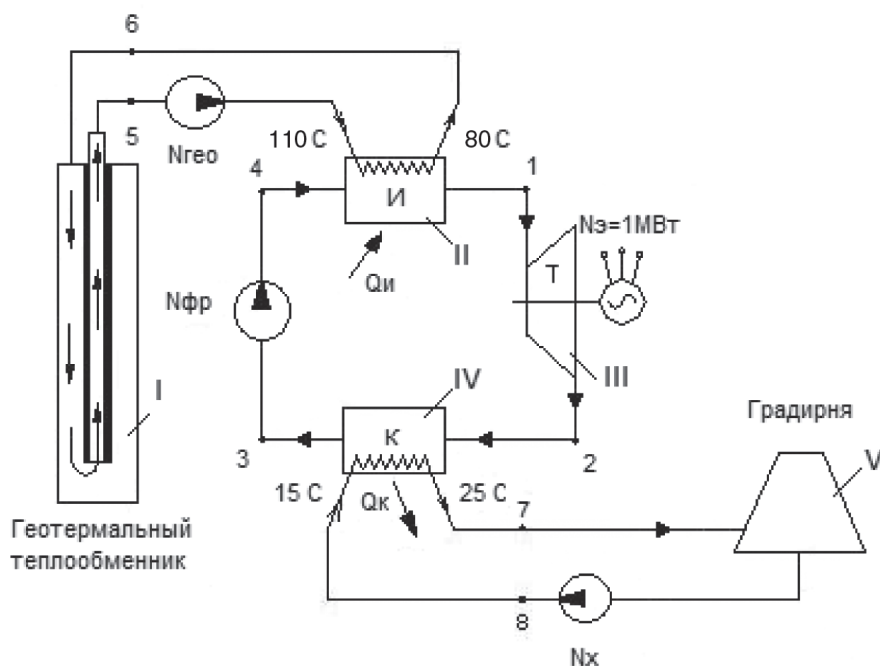


Рис.1. Схема гео ТЭС: И – испаритель; К – конденсатор; Т – турбина;  $N_x$  – мощность насоса на прокачку холодной воды на градирню;  $N_э$  – электрическая мощность турбины,  $N_{гео}$  – мощность насоса на прокачку воды из геотермального теплообменника,  $N_{фр}$  – мощность насоса на прокачку фреона в цикле.

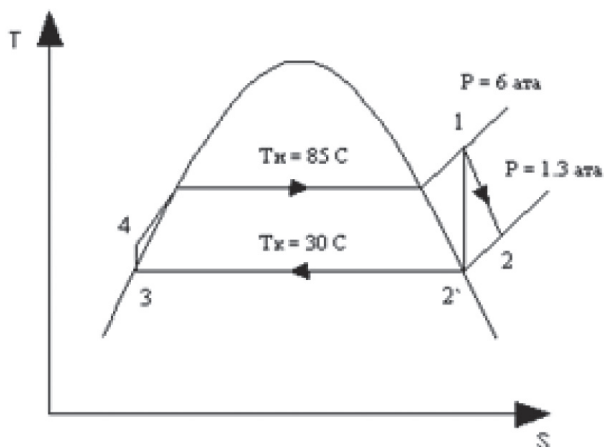


Рис. 2. На TS диаграмме представлен цикл по выработке электроэнергии на низкокипящем рабочем агенте (ф-11).

$$t_4 = 35^\circ\text{C} \quad p_4 = 0,6 \text{ МПа} \quad h_4 = 795,5 \text{ кДж/кг}$$

Удельная работа идеальной турбины:

$$L_T^u = h_1 - h_2' = 1010 - 980 = 30 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Реальная работа турбины:

$$L_T = h_1 - h_2 = L_T^u \cdot \eta_T = 30 \cdot 0,8 = 24 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная тепловая нагрузка на конденсатор:

$$q_k = h_2 - h_3 = 986 - 795 = 191 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная тепловая нагрузка на испаритель:

$$q_u = h_1 - h_4 = 1010 - 795,5 = 214,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Расход фреона:

$$G_\phi = \frac{N_э}{\eta_T \cdot \eta_{эм} \cdot L_T} = \frac{1000}{0,8 \cdot 0,9 \cdot 24} = 57,87 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Мощность фреонового насоса:

$$N_{фр} = \frac{G_\phi \cdot H}{102 \cdot \eta_H} = \frac{57,87 \cdot 47}{102 \cdot 0,7} = 38,09 \text{ кВт}$$

Тепловая нагрузка на конденсатор:

$$Q_k = q_k \cdot G_\phi = 191 \cdot 57,87 = 11053 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

Тепловая нагрузка на испаритель:

$$Q_u = q_u \cdot G_\phi = 214,5 \cdot 57,87 = 12415 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

Расход горячей воды:

$$G_2 = \frac{Q_u}{C_p \cdot (t_5 - t_6)} = \frac{12415}{4,19(110 - 80)} = 98,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход холодной воды в градирне:

$$G_x = \frac{Q_k}{C_p \cdot (t_7 - t_8)} = \frac{11053}{4,19(25 - 15)} = 263,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Мощность циркуляционного насоса холодной воды:

$$N_x = \frac{G_x \cdot H_{хв}}{102 \cdot \eta_H} = \frac{263,8 \cdot 10}{102 \cdot 0,7} = 36,9 \text{ кВт}$$

Мощность геотермального насоса:

$$N_{гео} = \frac{G_1 \cdot H_G}{102 \cdot \eta} = \frac{98,6 \cdot 52,75}{102 \cdot 0,7} = 72,8 \approx 73 \text{ кВт}$$

где потеря давления на прокачку геотермальной воды  $\Delta p = 5,27 \text{ атм} = 52,75 \text{ м в.ст.}$

Суммарная мощность насосов:

$$\sum N_n = N_{\text{geo}} + N_x + N_{\text{фр}} = 73 + 38,09 + 36,9 = 147,9 \approx 148 \text{ кВт}$$

Эффективность геотермальной ТЭС оценивается величиной КПД:

$$\eta = \frac{N^э}{E_{qn} + \sum N} = \frac{1000}{2532,66 + 148} = 0,373,$$

где  $E_q$  – работоспособность (эксергия) геотермального тепла.

$$E_q = Q_n \cdot (\tau_q)_z = 12415 \cdot 0,204 = 2532,66 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

Коэффициент работоспособности тепла, переданного в испарителе:

$$(\tau_q)_z = \frac{T_r - T_{oc}}{T_{oc}} = \frac{368 - 293}{368} = 0,204$$

$$T_r = \frac{T_5 + T_6}{2} = \frac{110 + 80}{2} = 95^\circ\text{C} (368\text{K})$$

Отсюда видно, что КПД при постоянной мощности  $N^э$  ГеоТЭС зависит:

- 1) от величины  $E_q$  геотермального тепла и
- 2) от суммарной  $^q$  мощности  $\sum N_n$ , затрачиваемой на собственные нужды (перекачивающие насосы и т.п.).

Из рис. 3 видно, что при уменьшении затрат мощности на собственные нужды КПД станции значительно возрастает. Так, например, можно использовать специальные покрытия в трубе обсадной колонны, уменьшающие потери на трение, что приведет к уменьшению затрачиваемой мощности на прокачку теплоносителя [8].

Отсюда видно, что суммарная мощность насосов не должна превышать 30–35% от электрической мощности ТЭС. С уменьшением  $\sum N_n / N^э$  с 35% до 10% энергетическая эффективность ТЭС возрастает примерно на 3% (с 34,7% до 38%).

## Выводы

1. Геотермальная ТЭС обладает высокой энергетической эффективностью с КПД, равным 38÷34%.
2. Система производства тепла от геотермальной воды полностью замкнута, следовательно, в атмосферу не производится никаких вредных вы-

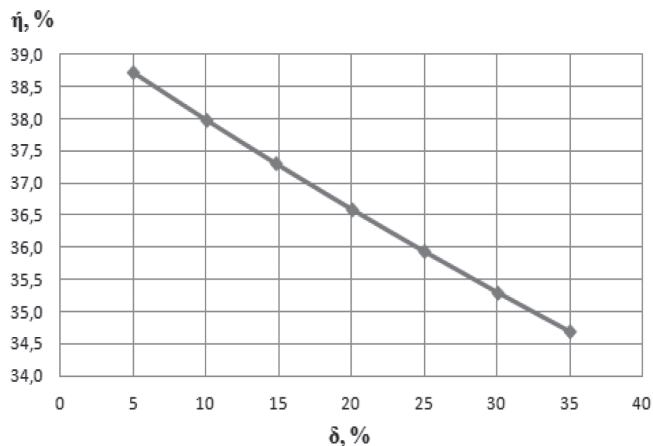


Рис. 3. Зависимость КПД петротермальной ТЭС ( $\eta$ ) от суммарных затрат на собственные нужды ( $\delta = \sum N_n / N^э$ ).

бросов, т.е. создается экологически чистая и безопасная система производства тепловой и электрической энергии.

3. Геотермальные ТЭС обладают большей надежностью по сравнению с обычными ТЭС, из-за отсутствия котельного и вспомогательного оборудования.

Работа поддержана Р.Ф.Ф.И (грант № 11-08-00936/12)

## Литература

1. Медведев Д.А. «Вперед Россия». «Российская газета», федеральный выпуск №4995 (171) от 11 сентября 2009 г.
2. Хлебалин Ю.М. Теплофикация и второй закон термодинамики. Промышленная энергетика, 2009 г., №10
3. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М: Энергоатомиздат, 1981 г.
4. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М: Энергия, 1973 г.
5. Мартынов А.В. Установки для трансформации тепла и охлаждения. М: Энергоатомиздат, 1989 г.
6. Мартынов А.В., Никифорова Д.В. Надежность и энергоэффективность установок, аппаратов и систем. «Надежность и безопасность энергетики», 2009 г., №4(7)
7. Поваров О.А., Дубков О.М., Никольский А.И. Использование геотермальной энергии – надежный, дешевый и экологически чистый способ производства электроэнергии и тепла. «Теплоэнергетика», 2007 г., №8.
8. Рыженков В.А., Седлов А.С. Использование поверхностно-активных веществ для снижения гидравлического сопротивления трубопроводов систем теплоснабжения. «Вестник МЭИ», 2008 г., №1.