

УДК 621.482 : 621.311.29

М.Ю.Швец (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Перспективы использования геотермального теплоносителя для производства электрической энергии в Украине

В статье рассмотрены наиболее перспективные для использования схемы геотермальных электрических установок для природных условий геотермальных месторождений Украины.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальная электростанция, схемы геотермальных установок.

У статті розглянуті найбільш перспективні для використання схеми геотермальних електричних установок для природних умов геотермальних родовищ України.

Ключові слова: геотермальна енергія, геотермальна електростанція, схеми геотермальних установок.

В природных условиях геотермальный теплоноситель (ГТ) характеризуется широким диапазоном температуры, давления, расхода, минерализации, химического состава газа, содержанием механических примесей и др. Это обуславливает необходимость рассмотрения при его использовании большого количества возможных схем преобразования геотермальной энергии в электрическую.

Схемы геотермальных электрических установок можно разделить на четыре основные группы [1, 2]:

1. Паротурбинные, которые используют тепловой потенциал ГТ.
2. Гидротурбинные, использующие гидравлический потенциал ГТ (избыточное давление ГТ).

3. Парогазовые, в которых ГТ используется для увлажнения воздуха, поступающего в камеру сгорания (в результате ГТ охлаждается до температуры мокрого термометра, а КПД возрастает в результате увеличения расхода парогазовой смеси через ГТУ).

4. Комбинированные (геотермально-топливные), в которых тепловой потенциал ГТ используется в цикле топливной энергетической установки, в результате чего уменьшается расход традиционного топлива.

В зависимости от характеристик ГТ основные группы схем геотермальных электрических установок делятся на подгруппы, которые приведены на рис. 1.

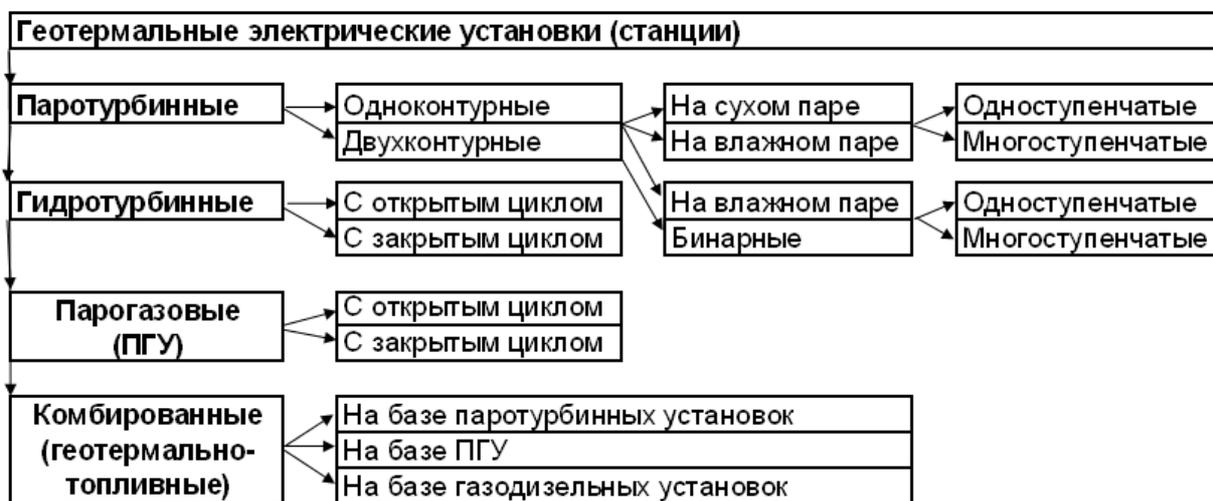


Рис. 1. Классификация геотермальных электрических установок.

Анализ природных условий геотермальных месторождений Украины позволяет определить следующие наиболее перспективные для использования схемы геотермальных электрических установок:

1) Одноконтурные паротурбинные установки с многоступенчатым расширением на влажном паре (требования к ГТ: температура от 160°C (возможно внедрение от 130°C), умеренная минерализация (до 35 г/л) и газонасыщенность, слабая коррозионная активность).

2) Двухконтурные бинарные паротурбинные установки (требования к ГТ: температура от 100°C (возможно внедрения от 90°C), допустима высокая минерализация (свыше 35 г/л) и газонасыщенность).

3) Комбинированные геотермально-топливные установки на базе ПГУ, которые могут быть внедрены на месторождениях геотермальных вод с высоким содержанием попутного горючего газа.

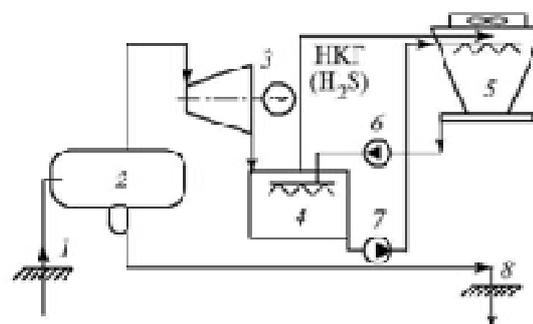
4) Комбинированные геотермально-топливные установки на базе газопоршневых двигателей, которые могут быть внедрены на месторождениях геотермальных вод с содержанием растворенного горючего газа.

Одноконтурные паротурбинные установки [1, 3–5].

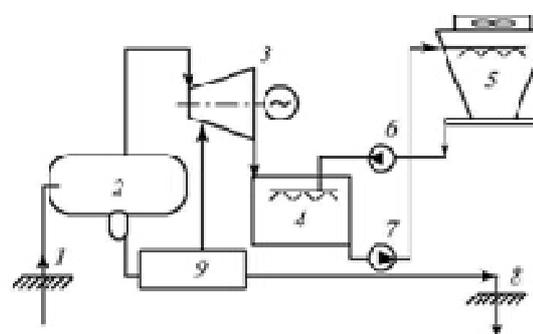
На большинстве действующих ГеоТЭС применяется одноконтурная тепловая схема с конденсационными паротурбинными установками (рис. 2а). Геотермальная пароводяная смесь или влажный пар с неконденсирующимися газами (НКГ) из подъемной скважины 1 подается в сепаратор 2, откуда пар поступает на вход конденсационной турбины 3, а минерализованная вода направляется на реинжекционную скважину 8 для возврата в пласт. Отработанный пар подается в смешивающий конденсатор 4. Применяется обратная система отвода сбросного тепла, включающая циркуляционный насос 6, башенную градирню 5 и конденсатный насос 7. Неконденсирующиеся газы удаляются из конденсатора эжекторами.

Если на месторождениях пароводяного ГТ температура отсепарированной воды достаточно высока (выше 100°C), то можно путем расшире-

ния в расширителе 9 (рис. 2б) получить дополнительный пар, который направляется на промежуточный вход турбины.



а



б

Рис. 2. Схемы одноконтурных паротурбинных установок: а – одноступенчатая; б – двухступенчатая; 1 – подъемная скважина; 2 – сепаратор; 3 – конденсационная турбина; 4 – конденсатор; 5 – градирня; 6 – циркуляционный насос; 7 – конденсатный насос; 8 – нагнетательная скважина; 9 – расширитель.

Это позволяет получить дополнительную работу и тем самым повысить КПД энергоустановки. Таких каскадов теоретически может быть несколько. На практике, однако, возможность применения таких схем ограничивается солеотложением в элементах оборудования в результате повышения концентрации солей выше предельной растворимости. Поэтому применение схем с расширителями возможно лишь при отсутствии массивных солеотложений или при использовании регулярной очистки оборудования.

Двухконтурные паротурбинные геотермальные электростанции [1, 3–6].

Использование теплоты геотермального теплоносителя для выработки электроэнергии при наличии в нем большого количества минеральных примесей (свыше 35 г/л), а также растворенных агрессивных и неконденсирующихся газов

(свыше 1000 мг/л) в одноконтурных схемах вызывает большие затруднения. Эти затруднения обусловлены следующими причинами:

- а) возможностью заноса проточной части турбин;
- б) интенсивной коррозией оборудования, трубопроводов и арматуры;
- в) ощутимыми энергетическими затратами на поддержание необходимого вакуума в конденсаторе.

Следует отметить, что большинство высокотемпературных геотермальных месторождений Украины характеризуются большой минерализацией, а также высокой газонасыщенностью извлекаемого геотермального теплоносителя.

Проблемы использования высокоминерализованного газонасыщенного геотермального теплоносителя для выработки электроэнергии могут быть решены при применении двухконтурных схем паротурбинных ГеоТЭС, где термальная вода является высокотемпературным теплоносителем, а нагрев, испарение и перегрев рабочего тела термодинамического цикла происходит в теплообменниках поверхностного типа. В связи с неизбежными потерями температурного потен-

циала в теплообменниках, эффективность преобразования геотермальной энергии в работу в двухконтурных геотермальных установках несколько снижается. Однако использование высокоминерализованного газонасыщенного коррозионноактивного теплоносителя для производства электроэнергии часто бывает невозможным без применения двухконтурных схем паротурбинных ГеоТЭС.

Двухконтурные бинарные геотермальные энергоустановки, реализующие паротурбинный цикл, представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведены двухконтурные одноступенчатая (рис. 3а) и двухступенчатая (рис. 3б) схемы, реализующие паротурбинный цикл с низкокипящими жидкостями в качестве рабочего тела во втором контуре. На рис. 4 приведена двухконтурная двухступенчатая схема с двумя рабочими веществами. Источником теплоты высокого потенциала является геотермальный теплоноситель, поступающий из эксплуатационной скважины в испаритель 2 и затем в экономайзер 3. Отработанная термальная вода после экономайзера подается на насос закачки, с помощью которого она возвращается по нагнетательной скважине в термодонный горизонт.

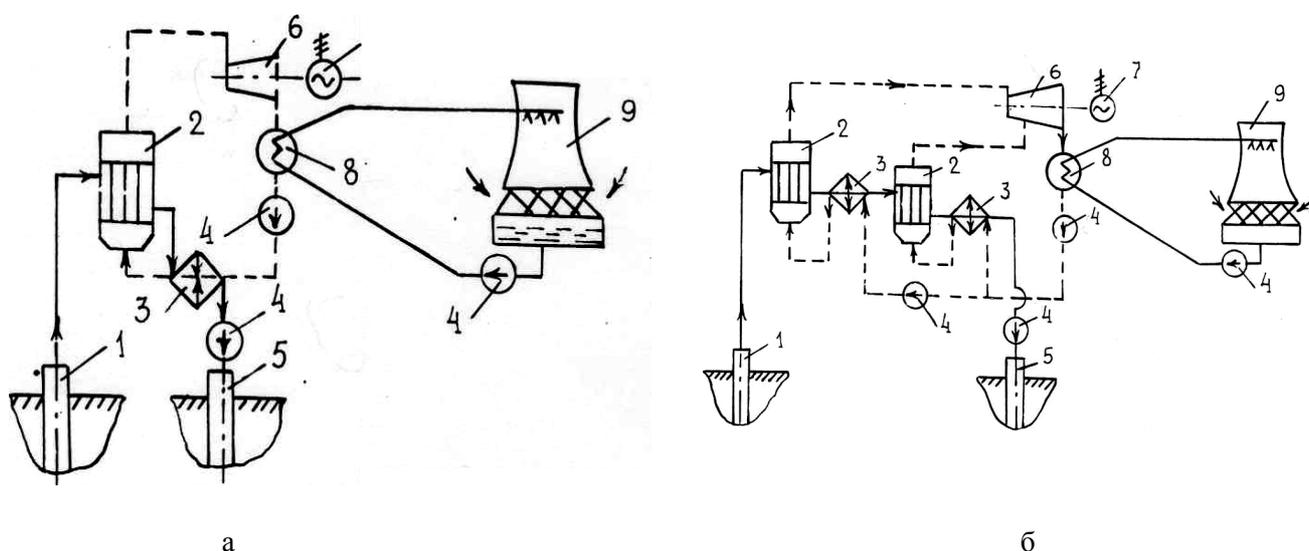


Рис. 3. Двухконтурные бинарные геотермальные энергоустановки:

а – одноступенчатая; б – двухступенчатая; 1 – подъемная скважина; 2 – испаритель; 3 – теплообменник; 4 – насосы; 5 – нагнетательная скважина; 6 – турбина; 7 – генератор; 8 – конденсатор; 9 – градирня.

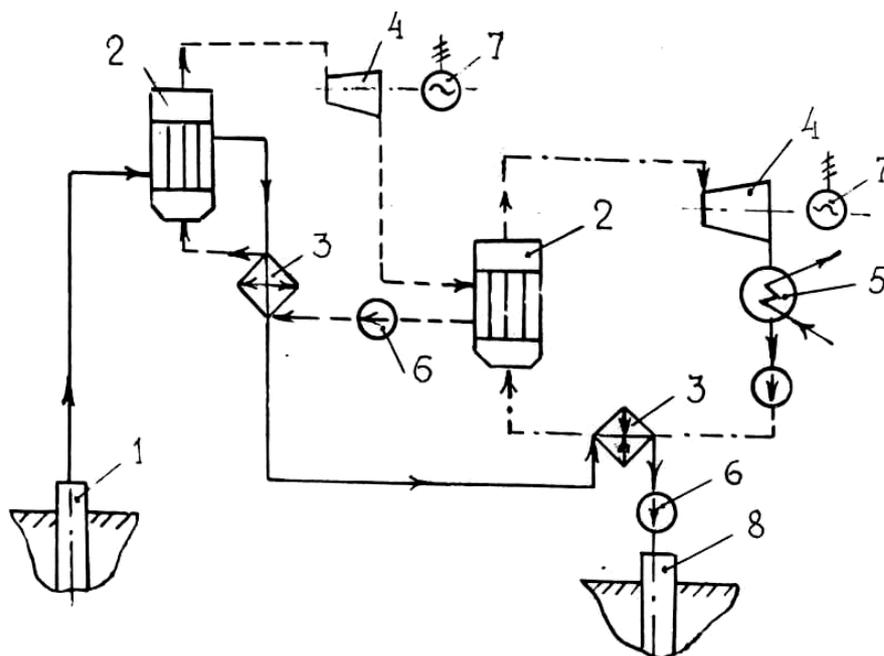


Рис. 4. Двухконтурная бинарная геотермальная установка: 1 – подъемная скважина; 2 – испаритель; 3 – теплообменник; 4 – турбина; 5 – конденсатор; 6 – насосы; 7 – генератор; 8 – нагнетательная скважина.

В настоящее время в мире эксплуатируются или находятся в стадии разработки десятки Гео-ТЭС, реализующих схемы с использованием промежуточных рабочих тел для выработки электроэнергии [6, 7].

Аналізу термодинамічної ефективності двохконтурних схем з низькокиплящими рабочими телами посвящено большое количество работ [2, 8, 9]. Значение показателей термодинамической эффективности двухконтурных геотермальных энергетических установок с низькокиплящими рабочими телами в значительной мере зависит от выбора рабочего тела второго контура. Установлено, что для использования геотермального теплоносителя с заданной начальной температурой можно подобрать рабочее тело, термодинамические свойства которого обеспечивают получение наилучших показателей. На рис. 5 приведены зависимости расчетных показателей двухконтурных геотермальных энергоустановок с использованием в качестве рабочих тел н-бутана (R-600) и н-пентана [8, 9]. На этом же графике представлены результаты расчетов аналогичных показателей для изобутановой (R-600a) геотермальной энергоустановки [10].

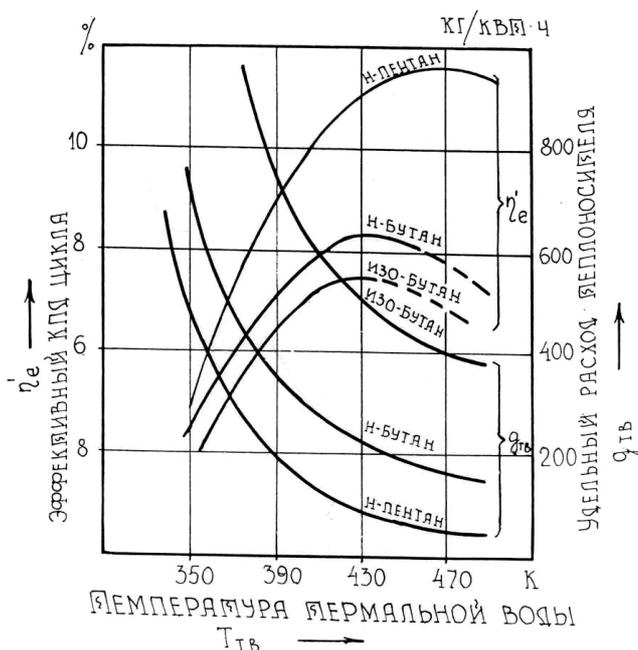


Рис. 5. Расчетные энергетические показатели функционирования бинарных геотермальных систем.

Комбинированные топливно-геотермальные установки.

Как указывалось ранее, к комбинированным относятся энергетические установки, которые используют энергию двух источников: химиче-

ски связанную энергию органического топлива и теплоту геотермального теплоносителя. Такие установки могут базироваться на основе традиционных схем паротурбинных, газотурбинных или дизельных двигателей. В отдельных случаях дополнение традиционных схем энергоустановок устройствами для использования теплоты геотермального источника позволяет снизить расход органического топлива и повысить эффективный КПД установки.

Использование геотермальной теплоты в системе регенеративного подогрева питательной воды паротурбинной теплоэнергетической установки [2, 11] представлено на рис. 6. Как видно из приведенной схемы, геотермальный теплоноситель используется в качестве греющей среды в противоточном водо-водяном подогревателе питательной воды, который устанавливается взамен регенеративного подогревателя. При достаточно высоких параметрах греющей геотермальной среды нагрев питательной воды можно осуществлять в последовательно установленных подогревателях более высоких ступеней до температуры, отличающейся от начальной температуры греющей среды на величину температурного напора, т.е. на 7-10°C.

Следует, однако, отметить, что замена 2-3

регенеративных подогревателей низкого давления геотермальными теплообменниками подогрева питательной воды в схемах конденсационных паротурбинных установок позволяет повысить их мощность, либо снизить расход топлива, не более чем на 2%. Поэтому применение такой схемы может быть оправдано при получении положительных результатов технико-экономических расчетов, основанных на конкретных исходных данных. Очевидно, что для реализации такой схемы необходимо наличие источника геотермальной теплоты в непосредственной близости от эксплуатируемой либо проектируемой тепловой электростанции.

Комбинированные топливно-геотермальные энергоустановки с газотурбинными двигателями.

Для производства электроэнергии на базе газовой-геотермальных месторождений предлагается технология, реализующая комбинированный газопаровой цикл, предусматривающий утилизацию теплоты уходящих газов для выработки пара [12], а также использование теплоты высокотемпературного геотермального теплоносителя, который после охлаждения возвращается в подземные продуктивные водонасыщенные горизонты.

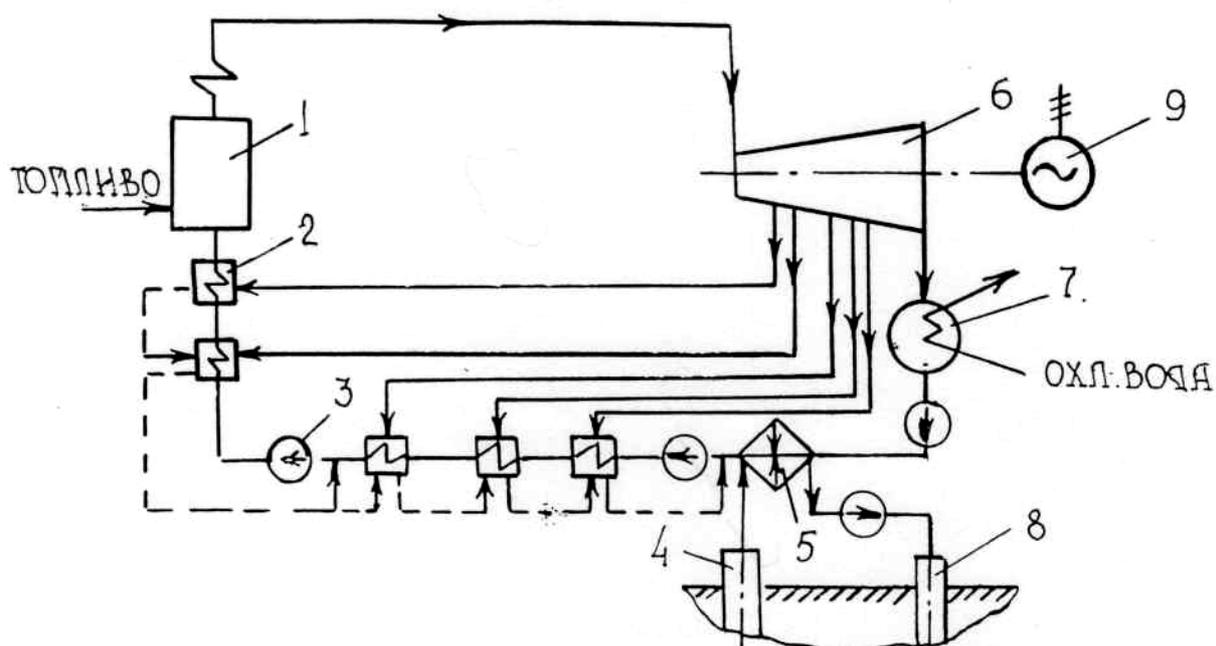


Рис. 6. Схема использования геотермальной теплоты в системе ТЭС.

Комбинированная газопаротурбинная установка (рис. 7) включает в себя: газотурбинный двигатель с двухступенчатым компрессором 1, 2; камеру сгорания 3; газовую турбину 4 с электрогенератором 5; парогенератор 8; контактный конденсатор-газоотделитель 9; сборник конденсата 10; холодильник 11.

Установка дополнительно содержит геотермальную систему, куда входит эксплуатационная скважина 15, сепаратор-газоотделитель 16, камера накопления газа 17, теплообменник 18, насос 19 и закачивающая скважина 20.

Работа комбинированной газопаротурбинной установки происходит следующим образом:

Воздух, поступающий в газопаротурбинный двигатель, сжимается и поступает в камеру сгорания 3, куда также подается на сжигание газ из камеры накопления газа 17 и сепаратора-газоотделителя 16. Для повышения мощности установки сюда же поступает пар.

После камеры сгорания газы направляются в турбину для выработки электроэнергии, а затем, пройдя парогенератор 8 и конденсатор-

газоохладитель 9, выбрасываются в атмосферу.

Вода, поступившая из сборника конденсата 10 в парогенератор 8, преобразуется в пар.

В контактном конденсаторе-газоохладителе уходящие газы охлаждаются, отделяется конденсат, который поступает в сборник конденсата 10, а дальше по трубопроводу 13 попадает в холодильник 11 или по водопроводу 14 в парогенератор 8 через теплообменник 18. Из холодильника насосом 12 вода опять направляется в контактный конденсатор-газоохладитель 9.

При работе геотермальной системы газ и термальная вода из скважины 15 поступает в сепаратор-газоотделитель 16, где разделяется на газ и термальную воду. Далее газ идет в камеру сгорания 3, а геотермальная вода – в геотермальный теплообменник 18, где отдает теплоту конденсату перед парогенератором 8, а затем насосом 18 закачивается в скважину 20.

Таким образом, используя теплоту термальной воды для подогрева конденсата перед парогенератором, можно уменьшить тепловую нагрузку на парогенератор.

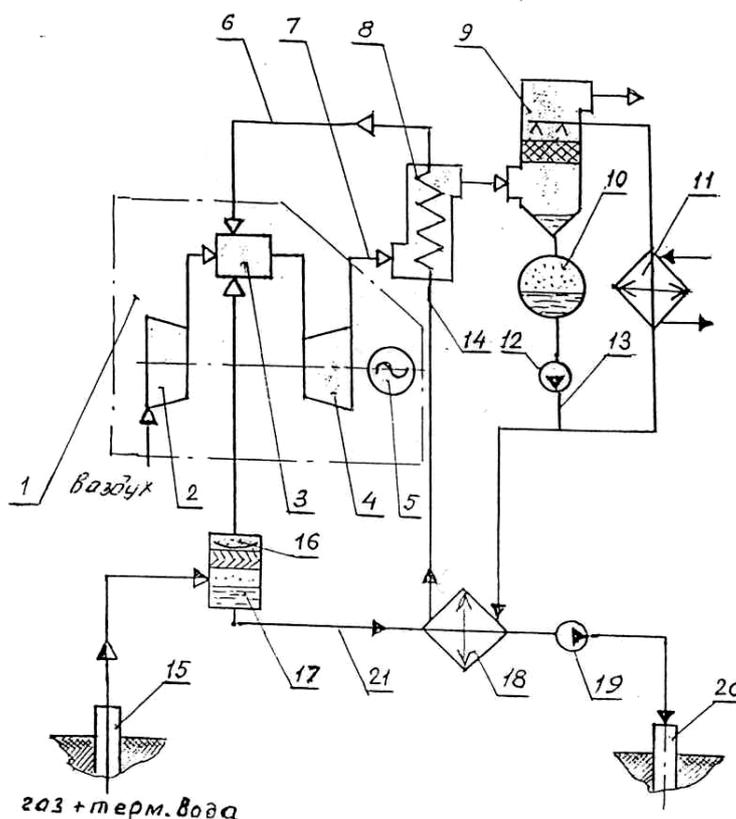


Рис. 7. Схема комбинированной топливно-геотермальной энергоустановки с газотурбинными двигателями.

Комбинированные топливно-геотермальные энергоустановки с газопоршневыми двигателями.

Для покрытия электрических и тепловых нагрузок потребителей предложена следующая технологическая схема комбинированной геотермально-топливной установки на базе газопоршневых двигателей (рис. 8) [13, 14]. Термальная вода, содержащая газ, поступает в сепаратор (С), где проходит разделение фаз на термальную воду и газ. Электроэнергия получается путем сжигания газа в газопоршневых двигателях (ГПД), оборудованных когенерационной установкой (КУ), в состав которой входят маслоохладитель, водоохладитель и теплоутилизатор.

Для подогрева сетевой воды в теплообменнике (ТГ) используется термальная вода, а в сетевом подогревателе (МП) – циркуляционная. Циркуляционная вода, проходя через когенерационную установку, утилизирует сбросную теплоту газопоршневого двигателя. Затем циркуляционная вода поступает в теплообменник системы теплообеспечения и отдает свое тепло сетевой воде.

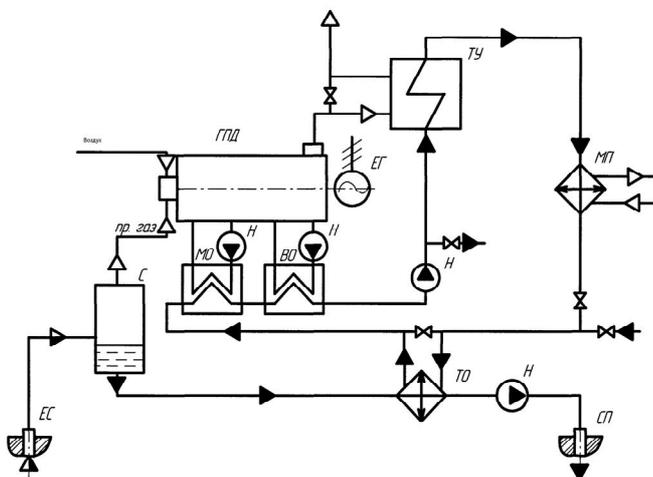


Рис. 8. Схема комбинированной геотермально-топливной установки на базе газопоршневых двигателей: ЕС, ПС – подъемная и нагнетательная скважины; С – сепаратор; ГПД – газопоршневой двигатель; ЕГ – генератор; ТУ – теплоутилизатор; ТО – теплообменник; Н – насос; МП – потребитель теплоты.

Выводы. В статье рассмотрены наиболее

перспективные для использования схемы геотермальных электрических установок для природных условий геотермальных месторождений Украины.

1. Дикий Н.А. Энергоустановки геотермальных станций. – К.: Вища школа, 1989. – 198 с.
2. Белодед В.Д. Комплексная оптимизация геотермальных энергоустановок и систем – Автореферат. дис. канд. техн. наук. – К., 1983. – 24 с.
3. Geothermal Power Stations by L.Y. Bronicki Encyclopedia of Physical Science & Technology – December 2003.
4. Геотермальные электростанции (ГеоЭС)[Электронный ресурс]/ Васильев В.А, Тарнижевский Б.В.// Режим доступа: www.gisee.ru/articles/geothermic-energy/19412/ (1.12.13)
5. E974 – 00 Standard Guide for Specifying Thermal Performance of Geothermal Power Systems, ASTM – 2006. – 4 р.
6. Integrated Combined Cycle Units Geothermal Power Plants [Электронный ресурс] // http://www.ormat.com/solutions/Geothermal_Integrated_Combined_Cycle (1.12.13)
7. Трусов В.П., Гайдаров Г.М., Забарный Г.Н. Техника и технология геотермальной энергетики. Камчатский комплексный отдел отдела института ВНИПИГеотерм. – Петропавловск-Камчатский, 1991. – 139 с.
8. Шуриков А.В. Термодинамические процессы в геотермальных системах и установках. Автореферат. дис. докт. техн. наук. – К., 1988. – 28 с.
9. Дикий М.О. Поновловальні джерела енергії / Підручник.– К.: Вища школа, 1993. – 315 с.
10. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия "Негоциант", 2006. – 712 с. (с приложением)
11. Белодед В.Д. Эффективность использования низкопотенциальной геотермальной теплоты на тепловых электростанциях. – Обзор, УкрНТИ, 1992. – 43 с.
12. Романов В.И., Кривуца В.А. Комбинированная газотурбинная установка мощностью 16-25 МВт с утилизацией тепла отходящих газов и регенерацией воды из пароводяного потока // Теплоэнергетика – 1996. – №4. – С. 27–30.
13. Швец М.Ю., Горохов М.И., Олейниченко В.Г. Разработка системы осушки газа геотермальной экспериментальной мини-ГЭС "Сивашская-1" в пос. Медведевка (Джанкойский район, АР Крым) // Материалы IV Международной конференции "Нетрадиционная энергетика XXI века". – АР Крым, 2003. – С. 231–232.
14. Хворов М.М., Швец М.Ю., Барило А.А. Використання альтернативних джерел енергії в системах комунального енергопостачання // Відновлювана енергетика. – 2006.– № 2. – С. 66–71.