

УДК [621.311.24+621.482](477)

А.Е. Денисова, д-р техн. наук, проф.,
Е.А. Ильина, магистр,
Одес. нац. политехн. ун-т

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МОНАРНОЙ И БИНАРНОЙ ГЕОТЭС ДЛЯ УСЛОВИЙ УКРАИНЫ

Введение. С каждым днем потребность перехода к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии увеличивается все больше и больше. Ограниченность запасов угля, рост его стоимости и пагубное влияние на экологию вынуждает искать новые пути освоения энергии. Одним из таких путей является развитие геотермальной энергетики. В последние годы резко увеличиваются объемы и расширяются области использования геотермальных ресурсов. В энергетическом балансе многих стран геотермальные технологии начинают преобладать, а доля геотермальной энергетики в мировом энергетическом балансе с каждым днем увеличивается.

Геотермальные электростанции, уступая ветровым по суммарной установленной мощности, существенно превосходят их по выработке электроэнергии, что свидетельствует о высокой эффективности геотермальных энергетических технологий. Коэффициент использования мощности на современных ГеоТЭС в 3...4 раза выше, чем в энергоустановках, работающих на солнечной, ветровой и приливной энергии. Стоимость, произведенной на современных ГеоТЭС электроэнергии, в среднем на 30 % меньше, чем на солнечных, и в 10 раз ниже, чем на ветровых электростанциях [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что на начало 2005 г. геотермальные электростанции работали в 24 странах мира, а их суммарная мощность достигала 8910,7 МВт. За последние 30 лет ежегодный прирост мощностей составляет 7 %.

В таблице приведены страны, в которых геотермальная электроэнергия составляет значительную долю в общем производстве электроэнергии [3, 4].

Производство электроэнергии на ГеоТЭС

Страна	Установленная мощность ГеоТЭС, МВт (%)	Выработка электроэнергии на ГеоТЭС, ГВтч/год (%)
Филиппины	1931 (16,2)	8630 (21,5)
Республика Эль Сальвадор	105 (15,4)	550 (20,0)
Кения	127 (15,0)	1100 (20,0)
Никарагуа	78 (17,0)	308 (17,2)
Исландия	202 (13,0)	1433 (4,7)
Коста-Рика	162 (7,8)	1170 (10,2)
Новая Зеландия	435 (5,1)	3600 (6,1)
Индонезия	797 (3,0)	6085 (5,1)

По оценкам различных экспертов и международных организаций суммарная мощность ГеоТЭС в мире с учетом известных запасов парогидротермальных месторождений и прогнозов роста цен на органическое топливо в обозримой перспективе (до 2030 г.) может возрасти до 40...70 ГВт и составить около 0,4 % от всех генерирующих мощностей в мире [5].

Анализируя литературные источники, можно сделать вывод, что наиболее быстрыми темпами будет вестись строительство бинарных ГеоТЭС на низкотемпературных рабочих телах. В отдаленной перспективе возможно экономически эффективное использование и петротермальных

DOI 10.15276/opu.1.45.2015.12

© А.Е. Денисова, Е.А. Ильина, 2015

ресурсов, технологии освоения которых разрабатываются в ряде стран мира [6]. Но так как эта проблема до сих пор не решена в нашей стране, необходим анализ целесообразности развития данного вида энергетики для различных месторождений с разными параметрами геотермального теплоносителя.

Целью работы является анализ эффективности работы монарной и бинарной ГеоТЭС для условий Украины, а также перспективы использования данных схем и развития геотермальной энергетики в целом.

Изложение основного материала. Так как Украина имеет значительные запасы термальных вод в Закарпатье, в Крыму, Прикарпатье и др. регионах, их уже сегодня целесообразно использовать не только для теплоснабжения, а и для производства электроэнергии. На Закарпатье есть уникальное место в районе с. Зашелочи с изотермой сухих пород 200 °С на глубине 4 км, а в западной части полуострова Крым на той же глубине есть вода с температурой 250 °С. Этих запасов вполне достаточно для работы небольших геотермальных электрических станций.

Существующие геотермальные электростанции представляют собой установки, работающие по циклу Ренкина. Рабочим телом в паровой турбине может быть либо водяной пар, получаемый непосредственно из геотермального флюида (одноконтурная или монарная установка), либо при невысокой температуре флюида двухконтурные (бинарные) установки с низкокипящим рабочим телом во втором контуре.

Принцип действия преобразования геотермальной энергии в тепловую и электрическую энергии рассмотрен на примере монарной (одноконтурной) геотермальной энергоустановки (ГеоЭУ).

При наличии месторождений с высокотемпературными парогидротермами (>150°С) преобразование теплоты геотермального теплоносителя в электроэнергию производится при помощи монарных (одноконтурных) энергоустановок, в тепловую схему которых входят обычные протитовдавленческие или конденсационные турбины.

На рис. 1 показана тепловая схема монарной (одноконтурной) геотермальной энергоустановки.

Принцип действия такой установки заключается в том, что из эксплуатационной скважины горячая геотермальная вода направляется в сепаратор пара, а из сепаратора — в сетевой подогреватель, где ее теплота используется для теплофикации, а затем закачивается насосом обратно в пласт. Пар от сепаратора направляется к турбине, которая, в свою очередь, приводит в действие электрогенератор. Отработавший в турбине пар направляется в конденсатор, в который циркуляционным насосом закачивается холодная вода извне. Образовавшийся конденсат сливается в ближайший водоем.

В таких установках полный коэффициент полезного действия составляет приблизительно 15 %. Если использовать горячую воду, которая отделяется в сепараторе, для нужд теплоснабжения, то возможно повысить полезное использование геотермального ресурса до 50 % и более.

Существенным недостатком одноконтурных ГеоТЭС является присутствие в геотермальном паре неконденсирующихся газов, которые не отделяются в сепараторе. По этой причине в конденсаторе невозможно создать глубокий вакуум и тепловыпад в турбине оказывается заниженным.

Наиболее распространенными и доступными являются месторождения низкотемпературных термальных вод (50...150 °С). Преобразование теплоты таких теплоносителей в электроэнергию в данном случае возможно с помощью двухконтурных энергоустановок. Эта же технология используется и в случае содержания в теплоносителе большого количества солей и неконденсирующихся газов. При этом теплоноситель, движущийся в первом контуре, передает теплоту рабочей жидкости второго контура, связанного с турбиной. В качестве рабочего тела второго контура используется низкокипящая жидкость (например изопентан). При относительно низких температурах плотность пара низкокипящей жидкости во втором контуре значительно выше плотности водяного пара при той же температуре, что обеспечивает большую удельную выработку электроэнергии двухконтурной энергоустановкой на низкокипящих рабочих телах и относительно меньшие массу и габариты по сравнению с одноконтурной, работающей на водяном паре тех же параметров [7].

На рис. 2 представлена тепловая схема двухконтурной (бинарной) геотермальной энергоустановки.

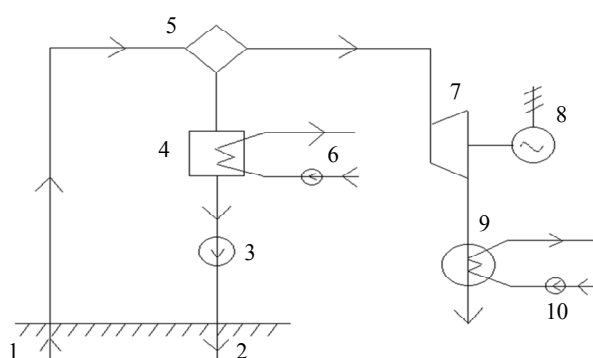


Рис. 1. Тепловая схема монарной (одноконтурной) ГеоЭУ: 1 — эксплуатационная скважина; 2 — нагнетательная скважина; 3 — насос; 4 — сетевой подогреватель; 5 — сепаратор; 6 — насос; 7 — турбина; 8 — электрогенератор; 9 — конденсатор; 10 — циркуляционный насос

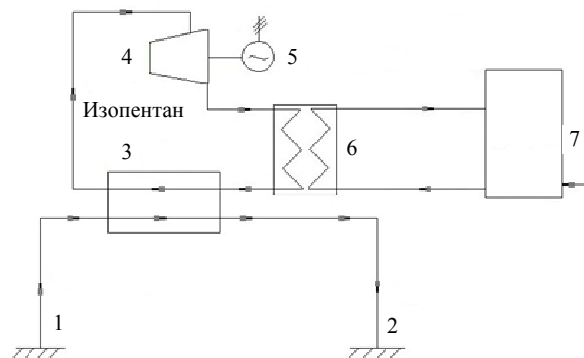


Рис. 2. Тепловая схема двухконтурной (бинарной) ГеоЭУ: 1 — эксплуатационная скважина; 2 — нагнетательная скважина; 3 — теплообменник; 4 — турбина; 5 — генератор; 6 — конденсатор; 7 — градирия

Принцип действия такой установки заключается в том, что в первичном цикле геотермальная вода из нагнетательной скважины движется в геотермальной циркуляционной системе, отдавая теплоту от пласта поверхностному теплообменнику, и охлажденная закачивается насосом обратно в нагнетающую скважину. Во втором контуре перегретая вода в теплообменнике нагревает низкокипящую рабочую жидкость (изопентан), которая циркулирует в замкнутой петле трубопровода. В результате получается пар высокого давления, который приводит в действие турбину. Генератор превращает механическую энергию в электрическую и передает ее в сеть. В свою очередь, отработанный пар поступает в конденсатор, где охлаждается водой из градирии, и уже охлажденная геотермальная жидкость возвращается в теплообменник.

Результаты. В двухконтурных установках неконденсирующиеся газы в паровом контуре отсутствуют, поэтому в конденсаторе обеспечивается более глубокий вакуум, и термический КПД установки возрастает по сравнению с одноконтурной. На выходе из парогенератора оставшаяся теплота геотермальных вод может также использоваться для нужд теплоснабжения [7].

Схемы (рис. 1 и 2) относительно просты по конструкции и в эксплуатации. Поскольку во втором контуре двухконтурной установки циркулирует очищенная вода, проблем с коррозией и солеотложением меньше. Устройства очистки здесь необходимы в основном для первого контура, что значительно проще и экономически выгоднее по сравнению с первой схемой. Полный коэффициент полезного действия современных двухконтурных паротурбинных ГеоЭС составляет 17...27 % [8].

Выводы. И монарная, и бинарная энергоустановки имеют как достоинства, так и недостатки. Так как в Украине в целом преобладают залежи низкопотенциальных термальных ресурсов при температуре подземных вод менее 200 °С, то при таком низком уровне температур более эффективными являются двухконтурные ГеоТЭС, работающие на низкокипящем рабочем теле. Одноконтурные энергоустановки являются перспективными в Закарпатье и Крыму, где на глубине 4 км термальная вода достигает температуры 250 °С. Учитывая сегодняшние цены на энергоресурсы, стоимость электроэнергии, выработанной на геотермальной электростанции, в 1,5 раза ниже, чем на тепловой электростанции такой же мощности, которая работает на угле. Если использовать тепловые отходы ГеоТЭС для теплоснабжения населенных пунктов и промышленных потребностей, то рентабельность станции увеличивается вдвое. Так как отработанная термальная вода закачивается назад в подземные пласты, это обеспечивает экологическую чистоту местности и стабильность технологического цикла. Кроме того, на таких станциях полностью отсутствуют вредные выбросы в атмосферу, что также играет большую роль в защите окружающей среды.

Литература

1. Ільїна, К.О. Перспективи використання геотермальних ресурсів України / К.О. Ільїна, А.Є. Денисова // Вісн. НТУ “ХПІ”. Сер.: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. — 2014. — № 16(1059). — С. 30 — 35.
2. Ильина, Е.А. Паротурбинные геотермальные установки для энергосберегающих технологий / Е.А. Ильина, А.Е. Денисова // Техніка та технологія харчових виробництв. — 2012. — Вип. 8. — С. 23 — 25.
3. Bertani, R. World geothermal power generation in the period 2001–2005 / R. Bertani // *Geothermics*. — 2005. — Vol. 34, Issue 6. — PP. 651 — 690.
4. DiPippo, R. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* / R. DiPippo. — 3rd Edition. — Oxford, UK; Waltham, MA: Butterworth Heinemann, 2012. — 624 p.
5. Алхасов, А.Б. Современное состояние и перспективы развития геотермальной энергетики / А.Б. Алхасов // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов: материалы Шк. молодых ученых, 17–21 сент. 2006 г. — Махачкала, 2006. — С. 4 — 11.
6. Попель, О.С. Состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии в мире энергетики / О.С. Попель // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов: материалы Шк. молодых ученых, 17–21 сент. 2006 г. — Махачкала, 2006. — С. 12 — 31.
7. Применение двухконтурных паротурбинных энергоустановок на низкокипящих рабочих телах в условиях геотермальных месторождений Украины / А.А. Долинский, В.Н. Клименко, Б.Д. Билека, Е.П. Васильев // Пром. теплотехника. — 2000. — Т. 22, № 3. — С. 30 — 42.
8. Аспекти оцінки та освоєння геотермальних ресурсів України / Ю.П. Стародуб, В.М. Карпенко, В.М. Стасенко [та ін.] // Геодинаміка. — 2012. — № 2(13). — С. 95 — 105.

References

1. Iliina, E.A. and Denysova, A.E. (2014). Prospects of geothermal resources use in Ukraine. *Bulletin of National Technical University “KhPI”: Innovation researches in students’ scientific work*, 16, 30-35.
2. Iliina, E.A. and Denysova, A.E. (2012). Steam turbine plants for geothermal energy-saving technologies. *Techniques and Technology of Food Production*, 8, 23-25.
3. Bertani, R. (2005). World geothermal power generation in the period 2001-2005. *Geothermics*, 34(6), 651-690.
4. DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* (3rd Ed.). Oxford, UK; Waltham, MA: Butterworth Heinemann.
5. Alkhasov, A.B. (2006). Current state and prospects of development of geothermal energy. In A.B. Alkhasov (Ed.), *Proceedings of Young Scientists School “Actual Problems of Development of Renewable Energy Resources”* (pp. 4-11). Makhachkala: Institute of Geothermal Problems, DSC of RAS.
6. Popel, O.S. (2006). State and prospects of development of renewable energy sources. In A.B. Alkhasov (Ed.), *Proceedings of Young Scientists School “Actual Problems of Development of Renewable Energy Resources”* (pp. 12-31). Makhachkala: Institute of Geothermal Problems, DSC of RAS.
7. Dolinsky, A.A., Klimenko, V.N., Bileka, B.D. and Vasilev, E.P. (2000). The application of double-circuit steam turbine power installations under conditions of geothermal deposits in Ukraine. *Industrial Heat Engineering*, 22(3), 30-42.
8. Starodub, Yu.P., Karpenko, V.M., Stasenko, V.M., Nikoriuk, M.S., Karpenko, A.V. and Rybchak, V.L. (2012). Aspects of assessment and developing of geothermal resources in Ukraine. *Geodynamics*, 2, 95-105.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

А.Є. Денисова, К.О. Ільїна. **Аналіз ефективності роботи монарної і бінарної ГеоТЕС для умов України.** З кожним днем все більше зростає дефіцит природного газу і вугілля. У зв'язку з цим велика увага приділяється нетрадиційним джерелам енергії. Геотермальна електроенергетика є однією з самих економічно ефективних технологій. Новітні енергетичні технології з використанням геотермальних ресурсів відрізняються екологічною чистотою і за ефективністю наближаються до традиційних. Метою дослідження є аналіз ефективності роботи монарної та бінарної ГеоТЕС для умов України. В роботі розглянуто перспективи розвитку геотермальної енергетики України та інших країн. Представлено принципи теплових схем монарної та бінарної енергоустановок, а також принцип їх дії. Розглянуто переваги й недоліки таких схем. Проведено аналіз ефективності роботи монарної і бінарної ГеоТЕС для умов України. Цінність дослідження та практичне значення результатів роботи полягає у тому, що для України монарні і бінарні ГеоТЕС є дуже перспективними, але кожна схема для своїх умов.

Ключові слова: нетрадиційна енергетика, геотермальна енергоустановка, електроенергія, монарна і бінарна енергоустановки, низькокипяче робоче тіло, парогідротерми, енергоефективність.

А.Е. Денисова, Е.А. Ильина. Анализ эффективности работы монарной и бинарной ГеоТЭС для условий Украины. С каждым днем увеличивается дефицит природного газа и угля. В связи с этим большое внимание уделяется нетрадиционным источникам энергии. Геотермальная электроэнергетика является одной из самых экономически эффективных технологий. Новейшие энергетические технологии с использованием геотермальных ресурсов отличаются экологической чистотой и по эффективности приближаются к традиционным. Целью исследования является анализ эффективности работы монарной и бинарной ГеоТЭС для условий Украины. В работе рассмотрены перспективы развития геотермальной энергетики Украины и других стран. Представлены принципиальные тепловые схемы монарной и бинарной энергоустановок, а также принцип их действия. Рассмотрены преимущества и недостатки таких схем. Проведен анализ эффективности работы монарной и бинарной ГеоТЭС для условий Украины. Ценность исследования и практическое значение работы заключается в том, что для Украины монарные и бинарные ГеоТЭС являются очень перспективными, но каждая схема для своих условий.

Ключевые слова: нетрадиционная энергетика, геотермальная энергоустановка, электроэнергия, монарная и бинарная энергоустановки, низкикипящее рабочее тело, парогидротермы, энергоэффективность.

A.E. Denysova, E.A. Ilina. Performance analysis of monary and binary geothermal power plants operation for Ukraine conditions. Every day the shortage in natural gas and coal does increase. In this respect, a great attention is paid to alternative energy sources, and geothermal electrical power generation represents one of the most cost-effective technologies. New power generation technologies using geothermal resources are ecologically clean and are close approaching to traditional ones from the efficiency point of view. This research aim is to analyze the efficiency of monary and binary geothermal power plants operation under actual conditions in Ukraine. Authors discuss prospects for the geothermal power engineering development in Ukraine and other countries. The principal thermal diagrams of monary and binary power plants are represented, as well as their operational principle considering these schemes advantages and disadvantages. Effected is an analysis of such stations performances under conditions of Ukraine. This research value and practical significance are related to the fact that for Ukraine both monary and binary geothermal power plants are very promising, but each engineering solutions should strictly follow its specific functional conditions.

Keywords: non-conventional power engineering, geothermal power generating unit, electrical power, monary and binary geothermal power plants, work body with low boiling point, steam-hydrothermal units, energy efficiency.

Поступила в редакцию 9 февраля 2015 г.