

УДК 658.264:621.482

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

Кудряшов В.А.

*ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: nigtc@nigtc.ru*

Использование геотермальных ресурсов Камчатского края характеризуется низкой эффективностью и высокими нагрузками на экологию, в связи с этим рациональное использование флюида геотермальных месторождений – актуальная задача. Одним из методов увеличения мощности месторождения является применение теплонасосных установок, которые позволяют повысить тепловую мощность, подаваемую потребителю, за счёт снижения температуры сбросного геотермального теплоносителя. На примере Эссовского месторождения геотермальных вод проведен расчёт возможности повышения эффективности использования геотермальной воды с помощью теплового насоса. Определены наиболее эффективные схемы использования тепловых насосов в схемах геотермального теплоснабжения. Рассмотрены два варианта регулирования тепловой нагрузки: «количественный» и «качественный». При «количественном» способе за счёт тепла сбросной воды подогрев идёт до температуры подающей воды, а покрытие дополнительной тепловой нагрузки происходит за счёт увеличения расхода циркуляции в системе теплоснабжения. В случае же «качественной» регулировки покрытие дополнительной тепловой нагрузки в периоды пика нагрузки происходит за счёт подогрева геотермального теплоносителя в конденсаторе выше температуры воды, поступающей из устья скважины, а расход при этом остаётся неизменным. Проведённый анализ для конкретного микрорайона показал, что «количественный» вариант регулирования («по расходу») с помощью теплонасосной установки более экономичен (в 1,44 раза), чем вариант «качественной» регулировки («по температуре»).

Ключевые слова: геотермальное месторождение, теплоснабжение, тепловые насосы, система регулирования, фреон

**IMPROVING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL
FRIENDLINESS OF THE OPERATION OF GEOTHERMAL
DEPOSITS USING HEAT PUMP INSTALLATIONS**

Kudryashov V.A.

*Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: nigtc@nigtc.ru*

The use of geothermal resources of the Kamchatka Territory is characterized by low efficiency and high loads on the environment, in this regard, the rational use of the fluid of geothermal deposits is an urgent task. One of the methods of increasing the capacity of the field is the use of heat pumping units, which allow to increase the thermal power supplied to the consumer by reducing the temperature of the discharge geothermal coolant. On the example of the Essovsky geothermal water deposit, the calculation of the possibility of increasing the efficiency of using geothermal water using a heat pump was carried out. The most effective schemes of using heat pumps in geothermal heat supply schemes have been determined. Two variants of heat load regulation are considered: "quantitative" and "qualitative". With the "quantitative" method, due to the heat of the waste water, the heating goes up to the temperature of the supply water, and the additional heat load is covered by increasing the circulation flow in the heat supply system. In the case of "qualitative" adjustment, the additional heat load is covered during peak load periods by heating the geothermal coolant in the condenser above the temperature of the water coming from the wellhead, and the flow rate remains unchanged. The analysis carried out for a specific microdistrict showed that the "quantitative" version of regulation ("flow rate") with the help of a heat pump installation, it is more preferable - by 1.44 times than the option of "qualitative" adjustment ("by temperature").

Keywords: geothermal field, heat supply, heat pumps, control system, freon

Геотермальная энергетика на Камчатке развивалась с середины прошлого века, как правило, использовались традиционные схемы теплоснабжения, применяемые для котельных, а геотермальный теплоноситель напрямую использовался в системе отопления. На начальном этапе освоения месторождений тепловой энергии было достаточно и об эффективном использовании и экологии не задумывались. С ростом численности населения возрастила и тепловая нагрузка, и тепла для потребителей

стало не хватать [1], а нагрузка на экологию возрастила.

Эффективность использования теплоносителя разведанных геотермальных месторождений Камчатского края в настоящее время оставляет желать много лучшего. Так, на сегодняшний день используется в основном высокотемпературная часть теплоносителя, добываемого на месторождениях (от 70 до 95 °C), а средне- и низкотемпературная отработанная часть с температурой 35–55 °C сбрасывается в окружающую сре-

ду и не используется. Несмотря на то, что договорами о энергоснабжении установлена температура сброса не более 35 °C, встречаются случаи сброса геотермального теплоносителя с гораздо более высокой температурой, что помимо нерационального использования нарушает экологию в местах слива отработанного теплоносителя. При этом геотермальная вода ещё обладает значительным тепловым потенциалом.

Для использования данного потенциала в качестве низкотемпературного источника тепла, можно применять теплонасосные установки (ТНУ) [2]. Наиболее рационально в этом случае использовать тепло «отработанной» воды с использованием ТНУ для повышения (регулирования) тепловой нагрузки.

В классических (не геотермальных) системах теплоснабжения используют обычно два основных варианта регулирования (повышения) тепловой нагрузки [3]: «качественное», когда покрытие дополнительной тепловой нагрузки осуществляют за счёт увеличения температуры «подачи» (наиболее распространенный вариант), и «количественное», когда увеличение нагрузки покрывается за счёт повышения расхода теплоносителя. При использовании тепла сбросной отработанной воды с помощью ТНУ возможен как один, так и другой вариант.

Цель исследования – определить наиболее эффективный вариант покрытия тепловой нагрузки (регулирования) в схемах геотермального теплоснабжения, оказывающий минимальное воздействие на экологию при разработке геотермального месторождения.

Материалы и методы исследования

Как правило, при эксплуатации геотермального месторождения в действующих тепловых сетях применяется «количественное» регулирование, при котором тепловая нагрузка регулируется с помощью расхода теплоносителя при постоянной температуре на устье скважины. В некоторых случаях при недостатке тепла в пики потребления используются пиковые котельные [2]. Однако схема с котельными, использующими органическое топливо, нерациональна и наносит вред окружающей среде. Для наиболее эффективного и полного использования геотермального флюида целесообразно использовать тепло отработанного геотермального теплоносителя.

Расчёты производились применительно к конкретной системе геотермального теплоснабжения с. Эссо Быстринского

района Камчатского края. Однако полученные результаты могут быть использованы для широкого круга систем геотермального теплоснабжения.

Место расположения объекта

Эссовское месторождение термальных вод расположено в Центральной части Камчатского полуострова в долине р. Быстрой и ее левого притока р. Уксичан. Месторождение расположено непосредственно в границах с. Эссо Быстринского районного муниципального образования. Климат данного района резко континентальный. Температура воздуха колеблется от +35 °C летом до -40 °C зимой. Расчетная температура воздуха в с. Эссо самой холодной пятидневки -36 °C. Средняя температура отопительного периода – (минус) 3,6 °C. Продолжительность отопительного периода – 276 суток.

Построенные еще в советские годы системы геотермального теплоснабжения основывались на концепциях того времени, когда мало внимания уделялось комплексному и рациональному использованию геотермального теплоносителя. У потребителя используются традиционные тепловые схемы (применяются типовые радиаторы отопления), без тепловых насосов и систем низкотемпературного отопления, вследствие чего температура сброса (по результатам измерений) в среднем составляет 55 °C. Современные системы с использованием низкотемпературных систем, таких как «тёплые полы», «фэнкойлы», в с. Эссо применяются у единичных потребителей, в основном в новых частных домах. Замена всех приборов отопления на современные низкотемпературные потребует коренной реконструкции муниципального жилищного фонда и сетей, что крайне затратно.

Наилучшим способом снижения температуры сброса геотермального теплоносителя с одновременным использованием дополнительного тепла является применение ТНУ. При этом тепловая энергия «обратки» «перекачивается» в «подачу» (подающий трубопровод).

Для системы теплоснабжения с. Эссо рассматривались два варианта регулирования тепловой нагрузки «количественный» и «качественный». При «количественном» способе за счёт тепла сбросной воды подогрев идёт до температуры подающей воды, а покрытие дополнительной тепловой нагрузки происходит за счёт увеличения расхода циркуляции в системе теплоснабжения. В случае же «качественной» регулировки

покрытие дополнительной тепловой нагрузки в периоды пика нагрузки происходит за счёт подогрева геотермального теплоносителя в конденсаторе ТНУ выше температуры воды, поступающей из устья скважины, а расход при этом остаётся неизменным.

Анализ вариантов проводился на примере конкретного объекта, участка тепловой сети микрорайона с. Эссо (действующая тепловая нагрузка – 1,51 Гкал/ч), который обеспечивается геотермальной водой от насосной № 3 (рис. 1).

Результаты исследования и их обсуждение

На основании собранных исходных данных по тепловой сети были проведены тепло-гидравлические расчёты системы отопления с. Эссо и определены нагрузки с помощью отечественной программы ZuluThermo [4]. Анализ схемы теплоснабжения показал недостаток тепловой мощности в пики теплопотребления в объёме 1,64 Гкал/ч (с учётом перспективной нагрузки).

Энергорайон снабжается геотермальной водой от двух скважин 7Д и 8, общий расход от которых составляет 79,7 т/ч (22,14 л/с), от которых, через промежуточную ёмкость геотермальная вода со средневзвешенной температурой 74 °С подаётся насосами потребителям. Отработанная вода с температурой 55 °С по традиционной схеме сбрасывается «на рельеф» (в реку Уксичан). Рассматриваемый энергорайон с. Эссо ощущает недостаток тепловой энергии в сильные морозы, который компенсирует-

ся за счёт дровяных печей у потребителей, что является нерациональным и вызывает много нареканий потребителей. Сравнивались варианты схем применения ТНУ для повышения эффективности работы и снижения экологической нагрузки (температуры сброса) при увеличении тепловой мощности подаваемой потребителям.

Выбор теплоносителя ТНУ. Описание циклов

В качестве теплоносителя при температурах ниже 100 °С рекомендуется использовать вещества, с температурой кипения при атмосферном давлении ниже, чем у воды [5]. В качестве рабочего тела ТНУ был принят распространённый хладагент R 123, имеющий температуру кипения при атмосферном давлении +27,9 °С (1,1,1-трифторметилхлорэтан = Дихлортрифторметилхлорэтан (C2HCl2F3) – критическая точка +183, 68 °С).

При сравнении вариантов приняты следующие допущения: дополнительная тепловая мощность для потребителя, необходимая при регулировке, одинакова, температура и расход теплоносителя из скважины также одинаковы в обоих вариантах, температура теплоносителя за потребителем (температура «обратки») одинакова. Рассматривался самый простой одноконтурный цикл ТНУ, внутрициклические потери ТНУ в обоих вариантах не учитывались. Перепад температур между геотермальной водой и фреоном на входе и выходе теплообменных аппаратов (конденсаторе, испарителе) задавался $\Delta t = 5$ °С – одинаковым для обоих вариантов.

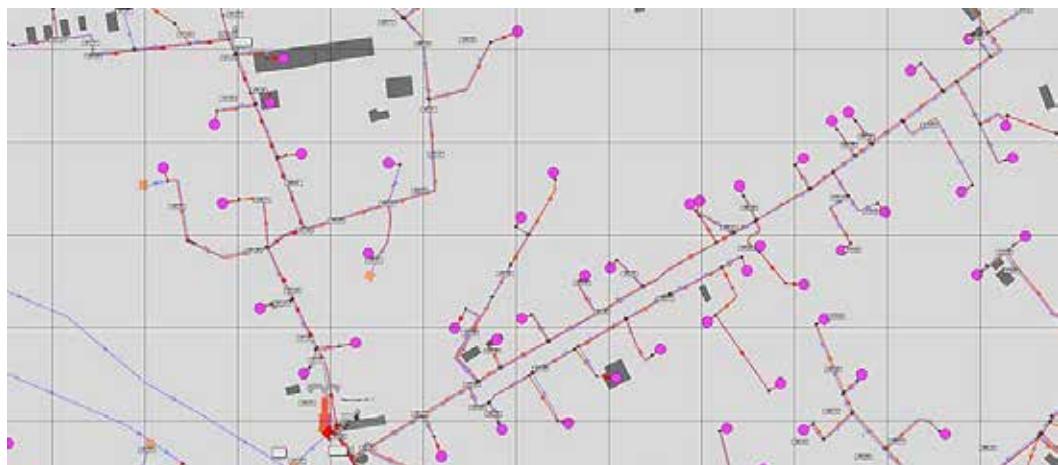


Рис. 1. Участок схемы теплоснабжения энергорайона с. Эссо (Насосная № 3), используемого в качестве примера для анализа вариантов регулировки нагрузки (расчёт нагрузки проведён по программе Zulu)

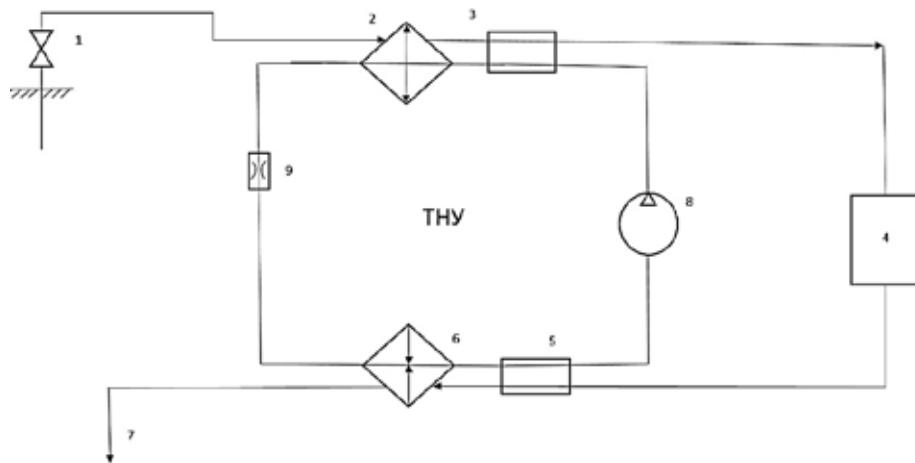


Рис. 2. Схема «качественного» регулирования с использованием ТНУ:

1 – добывная скважина; 2 – конденсатор ТНУ; 3 – пароохладитель фреона;
 4 – обобщённый потребитель тепловой энергии; 5 – пароперегреватель газообразного фреона;
 6 – конденсатор ТНУ; 7 – «сброс на рельеф» отработанного геотермального теплоносителя;
 8 – компрессор ТНУ; 9 – дросселирующее устройство

Вариант «качественного» регулирования приведён на рис. 2. Геотермальная вода поступает из скважины 1, затем подаётся в конденсатор 2 ТНУ, где нагревается от фреона, подогревается в пароохладителе и подаётся потребителю 4. После потребителя теплоноситель поступает последовательно в пароперегреватель 5, испаритель 6 ТНУ, где отдаёт тепло фреону. Далее охлаждённая в испарителе ТНУ геотермальная вода сбрасывается «на рельеф» 7.

Расчёты параметров ТНУ проводились с помощью датской программы CoolPack, включающей базу данных термодинамического состояния различных веществ, в том числе легокипящих. Были построены теоретические циклы для вариантов и определены основные параметры, в том числе и коэффициент трансформации теплового насоса – СОР_{тну}, показывающий, сколько единиц тепловой мощности можно получить с единицы затраченной мощности на привод компрессора. Данный показатель общепринят в качестве критерия эффективности геотермальных систем теплоснабжения [6].

График цикла (lg P и h-диаграмма) для варианта «качественного» регулирования приведён на рис. 3. Точка 1 на графике (рис. 3) характеризует параметры пара фреона перед компрессором, т. 2 – параметры пара после компрессора, т. 2' – параметры фреона на начальной стадии конденсации в конденсаторе, т. 3 – параметры фреона перед дросселем, т. 4 – после дросселя перед

испарителем, т. 4' – после испарителя. Расчётные параметры ТНУ для варианта «качественного» регулирования составили: температура в испарителе 33,1 °C, температура в конденсаторе 100 °C, перегрев пара перед компрессором $\Delta t_{комп} = 16,9$ °C, переохлаждение фреона в конденсаторе перед дросселем $\Delta t_{конд} = 21$ °C. Расчётная температура «обратки», выходящей от потребителя, 55 °C. Температура сброса в окружающую среду +38,1 °C. Расчётный СОР_{тну} для данного варианта равен 5,06.

Для варианта «количественного» регулирования (рис. 4): геотермальный теплоноситель подавался потребителю 4, а дополнительный объём геотермальной воды подогревался в конденсаторе 2 от температуры «обратки» до температуры, подаваемой от скважины 1 потребителю 4. Часть потока отработанного теплоносителя направлялась из «обратки» потребителю 4, предварительно отдав часть тепла в пароперегревателе фреона 5, в испаритель 6, где отбиралась тепловая энергия от геотермального теплоносителя, после испарителя 6 охлаждённый теплоноситель сбрасывался на рельеф 7. Для преодоления гидравлического сопротивления системы при увеличении расхода в данном варианте в схему входился дополнительный насос 10, мощность насоса определялась исходя из сопротивления конкретной сети по результатам гидравлического расчёта с помощью программы ZuluThermo [4].

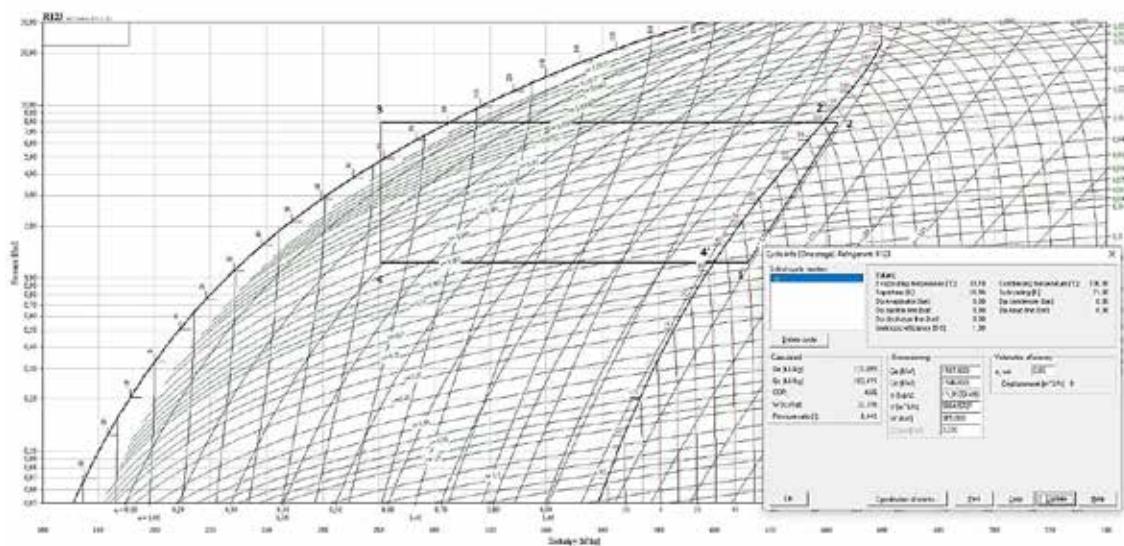


Рис. 3. Цикл теплонасосной установки (ТНУ) с основными параметрами рабочего тела (R123) для варианта «качественного» регулирования: т. 1 – параметры пара фреона перед компрессором, т. 2 – параметры пара после компрессора, т. 2' – параметры фреона на начальной стадии конденсации в конденсаторе, т. 3 – параметры фреона перед дросселем, т. 4 – после дросселя перед испарителем, т. 4' – после испарителя.

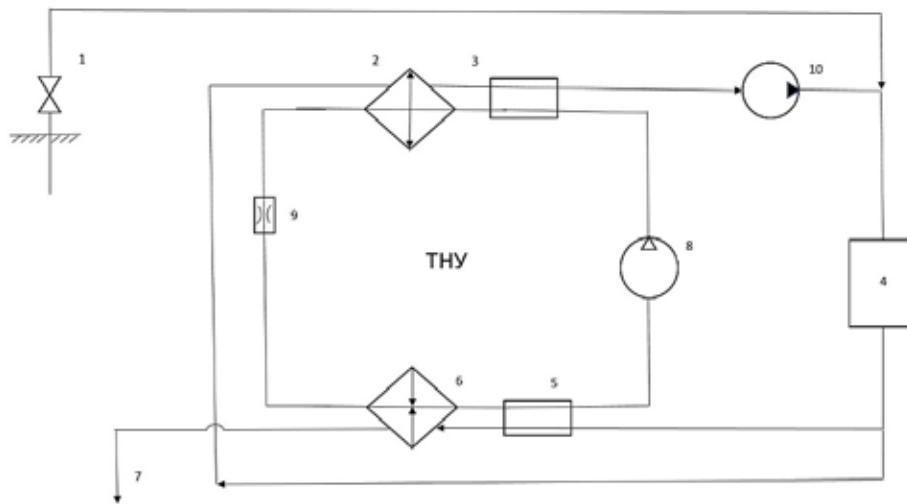


Рис. 4. Схема «количественного» регулирования с использованием ТНУ:
 1 – добывающая скважина; 2 – конденсатор ТНУ; 3 – пароохладитель фреона;
 4 – обобщённый потребитель тепловой энергии; 5 – пароперегреватель фреона;
 6 – конденсатор ТНУ; 7 – «сброс на рельеф» отработанного геотермального теплоносителя;
 8 – компрессор ТНУ; 9 – дросселирующее устройство; 10 – насос

Геотермальный теплоноситель в объёме 88,06 т/ч направлялся в конденсатор 2, где нагревался за счёт конденсации фреона до требуемой температуры. График цикла ($\lg P$ и h -диаграмма) для варианта «количественного» регулирования приведён на рис. 5. Точка 1 на графике (рис. 5) характер-

изирует параметры пара фреона перед компрессором, т. 2 – параметры пара после компрессора, т. 2' – параметры фреона на начальной стадии конденсации в конденсаторе, т. 3 – параметры фреона перед дросселем, т. 4 – после дросселя перед испарителем, т. 4' – после испарителя.

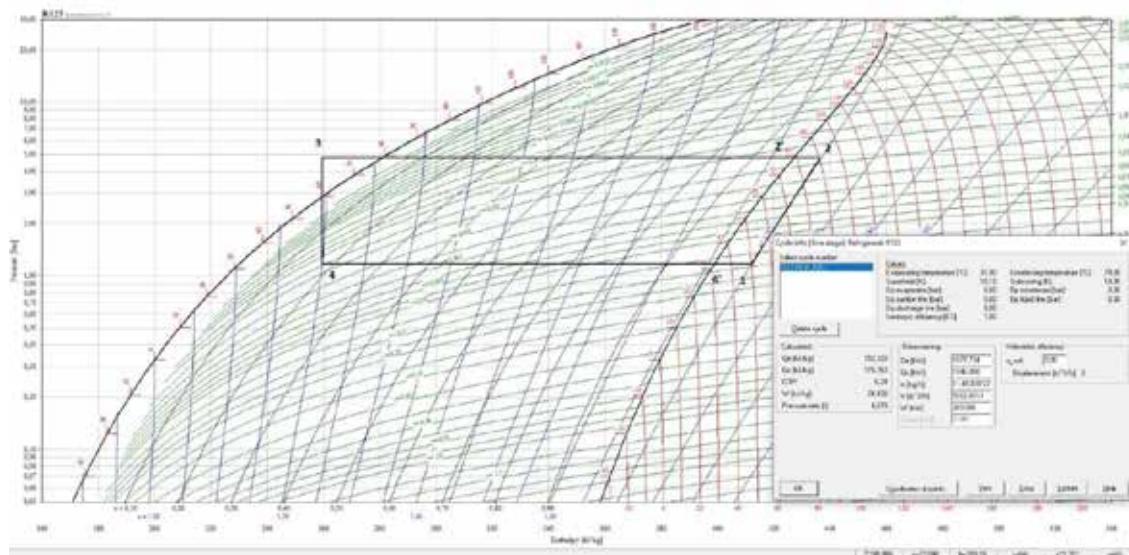


Рис. 5. Цикл теплонасосной установки (ТНУ) с основными параметрами рабочего тела ($R123$) для варианта «количественного» регулирования. Обозначения аналогично рис. 3.

Расчётные параметры ТНУ для варианта «количественного» регулирования составили: температура в испарителе 31,9 °C, температура в конденсаторе 79 °C, перегрев пара перед компрессором до температуры 50 °C, переохлаждение фреона в конденсаторе перед дросселем Δt конд = 19 °C.

Температура сброса геотермальной воды в окружающую среду $+36,9^{\circ}\text{C}$. Расчётный СОР_{так} для данного варианта равен 7,23.

Погрешность расчёта для обоих вариантов составила не более 0,2 %.

Для анализа и сравнения вариантов данные сведены в таблицу.

Основные параметры циклов ТНУ для вариантов регулирования (энергорайон «Насосная № 3», с. Эссо Быстринского района Камчатского края)

	Вариант 1 «качественное» регулирование	Вариант 2 «количественное» регулирование
Действующая тепловая нагрузка потребителя, Гкал/ч	1,51	1,51
Дополнительная тепловая нагрузка, Гкал/ч	1,674	1,674
Расход геотермальной воды со скважины, т/ч	79,7	79,7
Температура геотермальной воды на устье скважины скважины, °C	74	74
Температура в «подающем» трубопроводе после конденсатора ТНУ, °C	95	74
Температура в «обратном» трубопроводе после потребителя, °C	55	55
Температура отработанной геотермальной воды (на выходе из испарителя), («сброс» на рельеф), °C	38,1	36,9
Температура геотермальной воды на входе в испаритель, °C	55	55
Температура геотермальной воды на входе в конденсатор, °C	74	55
Температура геотермальной воды на выходе из конденсатора, °C	95	74
Мощность электропривода компрессора, кВт	385,0	269,1
Мощность электропривода насоса для перекачки дополнительного объёма теплоносителя, кВт	0	15
Коэффициент трансформации теплового насоса (COP_{THV})	5,06	7,23

Для обоих вариантов суммарная нагрузка при регулировании увеличивалась до 3,184 Гкал/ч, но при этом энергозатраты для варианта «количественного» регулирования (мощность электроприводов вместе с перекачивающим насосом) составили 284,1 кВт, в то время как для варианта «качественного» – значительно выше, 387,3 кВт. Таким образом, вариант 2 оказался более предпочтителен.

Заключение

Повышение эффективности использования флюида геотермальных месторождений – актуальная задача. Одним из методов увеличения мощности месторождения является применение ТНУ, которые позволяют повысить тепловую мощность за счёт снижения температуры сбросного геотермального теплоносителя.

Сравнение эффективности циклов производилось применительно к конкретной системе геотермального теплоснабжения с. Эссо Быстринского района Камчатского края, однако полученные результаты могут быть использованы для широкого круга систем геотермального теплоснабжения.

Проведённый анализ работы систем геотермального теплоснабжения для конкретного микрорайона с. Эссо показал, что «количественный» вариант регулирования («по расходу») с ТНУ более предпочтителен (в 1,44 раза), чем вариант «качественной» регулировки («по температуре») для данной сети. Вариант «количественного»

регулирования («по расходу») более предпочтителен и с позиции эффективности цикла ТНУ, и с позиции экологичности, поскольку он имеет более низкую температуру «сбросной» воды.

Для повышения эффективности эксплуатации геотермальных месторождений, использующих в схемах теплоснабжения ТНУ для повышения тепловой мощности, и снижения температуры «сброса», рекомендуется применять вариант «количественного» регулирования.

Список литературы

1. Кириюхин А.В., Сугробов В.М. Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65. DOI: 10.31857/S0203-03062019650-652.
2. Богуславский Э.И. Освоение тепловой энергии недр: монография. СПб.: Наукомкие технологии, 2020. 435 с.
3. Рафальская Т.А., Мансуров А.Р., Мансурова И.Р. Исследование переменных режимов работы систем централизованного теплоснабжения при качественно-количественном регулировании // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 2. С. 79–91. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.07.
4. ZuluThermo – моделирование гидравлических режимов в тепловых сетях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.politerm.com/products/thermo/zuluthermo/> (дата обращения: 23.08.2022).
5. Леонов В.П., Воронов В.А., Апсит К.А., Ципун А.В. Цикл Ренкина с низкотемпературным источником теплоты // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. Вып. 2. [Электронный ресурс]. URL:<http://engjournal.ru/catalog/pmce/mpr/1368.html>. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-2-1368.
6. Бутузов А.В Геотермальное теплоснабжение с использованием тепловых насосов. Российский опыт // Энергосбережение. 2022. № 2. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8047 (дата обращения: 03.08.2022).