ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2022, № 4, с. 31–40

## ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

# МУЛЬТИКАСКАДНЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ БИНАРНЫЕ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ: УТИЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ (180°С)

**© 2022 г. Г. В. Томаров[a], *, А. А. Шипков[a], ***

*[a]ООО "Геотерм-М", ул. Лефортовский Вал, д. 24, Москва, 111250 Россия*

**e-mail: geoatom.m@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.04.2021 г.
После доработки 17.06.2021 г.
Принята к публикации 23.06.2021 г.

Стремление утилизировать сбросное тепло различных промышленных и технологических процессов приводит к поиску новых технических решений и развитию технологий, направленных на преобразование тепловой энергии низкопотенциальных теплоносителей в электрическую. Сегодня одной из наиболее широко распространенных технологий производства электроэнергии на основе использования низкопотенциального тепла является органический цикл Ренкина, реализуемый в бинарных энергоустановках. Повышенный интерес к этим технологиям объясняется тем, что значительные начальные капитальные затраты на создание бинарных установок и их относительно невысокие экономические показатели в большинстве случаев компенсируются низкими эксплуатационными расходами на топливо. Применение мультикаскадных бинарных энергокомплексов может стать одним из путей повышения эффективности утилизации сбросного тепла. Представлены конкретные примеры и перспективные возможности практического использования блочно-каскадных бинарных энергокомплексов с целью утилизировать тепло сбросных теплоносителей различных производств. Изучены особенности мультикаскадных схем, работа которых основана на принципе инкрементального (пошагового) преобразования энергии высокотемпературного геотермального однофазного водного теплоносителя в бинарных энергокомплексах для повышения эффективности использования геотермальных ресурсов. Рассмотрены некоторые результаты расчетных исследований термодинамических показателей и технических характеристик двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов с высокотемпературным (180°С) исходным геотермальным теплоносителем. Проведен анализ технических характеристик двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов в сопоставлении с традиционным одноконтурным бинарным энергоблоком при использовании в качестве рабочего тела различных органических веществ. Показано, что применение двухкаскадной схемы позволяет увеличить количество тепла, передаваемого в бинарный цикл, на 15% по сравнению с однокаскадной схемой, а использование трехкаскадной схемы – на 18.9%. При реализации разработанной методики численного моделирования геотермальных и бинарных контуров можно оптимизировать технологические схемы двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов по максимальной установленной мощности и минимальному удельному расходу исходного геотермального флюида.

*Ключевые слова:* геотермальный теплоноситель, бинарные энергокомплексы, органическое рабочее тело, мультикаскадная схема, удельный расход теплоносителя, сепарат

**DOI:** 10.1134/S0040363622030109

В последние годы активно развиваются бинарные энерготехнологии для утилизации тепла сбросного теплоносителя различных производств. Особенно широко применяются бинарные установки на органическом низкокипящем рабочем теле в целях повышения эффективности использования геотермального теплоносителя при производстве электроэнергии путем утилизации сбросного геотермального сепарата. Эффективность, безопасность и экологичность бинарных установок существенно зависят от выбора рабочего тела и технологической схемы. Одним из возможных направлений повышения эффективности технологий производства электроэнергии с использованием органических веществ могут стать мультикаскадные схемы на основе принципа инкрементального (пошагового) преобразования энергии геотермального однофазного теплоносителя в би-

нарных энергокомплексах. В мировой практике уже существуют практические примеры использования мультикаскадных бинарных энергоустановок. В целях всестороннего изучения особенностей и преимуществ применения блочно-каскадных бинарных технологий выполнены оптимизационные расчетные исследования влияния выбора рабочих тел и значений их параметров в технологическом контуре на основные технико-экономические характеристики двух- и трехконтурных бинарных станций, включая установленную мощность и удельный расход геотермального теплоносителя.

## РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЕ БЛОЧНО-КАСКАДНЫХ БИНАРНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ

Характерной особенностью геотермальных энергосистем и энергоемких предприятий нередко является наличие сбросного тепла, пригодного для производства электроэнергии на основе использования традиционных пароводяных или получающих все более широкое распространение бинарных энергоустановок. Так, при достаточно высокой температуре геотермального двухфазного теплоносителя для повышения эффективности его использования на ГеоЭС с прямым циклом применяются технологии double-flash и triple-flash, т.е. с двумя и тремя давлениями сепарации. В данном случае концентрирование примесей при вскипании жидкой фазы (сепарата) в сепараторах-расширителях становится причиной интенсификации процессов коррозии и образования отложений в рабочем контуре. Применение бинарных технологий для утилизации тепла высокотемпературного геотермального теплоносителя позволит во многих случаях исключить эти и другие проблемы, связанные с агрессивностью геотермальной среды для тепломеханического оборудования.

Один из способов повышения эффективности утилизационных бинарных энергетических установок – применение мультикаскадных технологических схем [1–3]. Примером практической реализации такого подхода может служить создание геотермальной электростанции в г. Kirchstockach (Германия) мощностью 5.5 МВт (рис. 1, *а*), на которой используется теплоноситель температурой 138°С и расходом 120 кг/с. Тепловая схема двухкаскадной ГеоЭС включает в себя два конструктивно одинаковых контура с рабочим телом R-245fa (рис. 1, *б*) [4]. Интеграция дизельного когенерационного двигателя на биотопливе и тепловой солнечной установки с двухкаскадной бинарной электростанцией (БЭС) осуществлена в работе [5]. Эксплуатационные испытания подтвердили работоспособность этого гибридного энергокомплекса, работающего на возобновляемых источниках энергии.

Важным направлением повышения эффективности отечественных Мутновской и Верхне-Мутновской ГеоЭС прямого цикла, действующих на Камчатке, где имеется в большом количестве сбросной геотермальный теплоноситель в виде сепарата температурой до 160°С [6], является применение утилизационных бинарных энерготехнологий. Такой подход также позволит максимально повысить эффективность использования геотермального теплоносителя при проектировании и создании новых ГеоЭС, работающих на парогидротермах.

Особенности использования бинарных мультикаскадных схем пока мало изучены. Реализация принципа инкрементального (пошагового) преобразования энергии геотермального однофазного водного теплоносителя в блочно-каскадных бинарных энергокомплексах для повышения эффективности использования геотермального тепла требует более детального изучения.

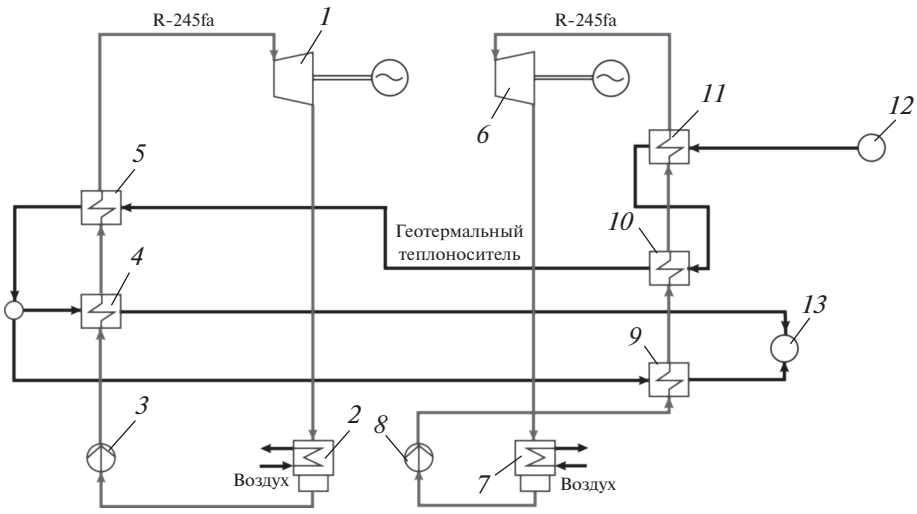
## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХ- И ТРЕХКАСКАДНЫХ БИНАРНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

В данной работе рассмотрены термодинамические показатели и технические характеристики двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов в сравнении с традиционным одноконтурным бинарным энергоблоком при использовании в качестве рабочего тела различных органических веществ. С этой целью разработана методика численного моделирования геотермальных и бинарных циклов этих энергоустановок.

Расчетные исследования процессов теплообмена при передаче тепла в бинарные контуры двух- и трехкаскадных энергокомплексов проводились для исходного геотермального теплоносителя, температура которого (180°С) близка к температуре геотермальных ресурсов, используемых на Мутновской ГеоЭС (п-ов Камчатка). При этом в расчетах использовались комбинации органических рабочих тел (ОРТ) (см. таблицу) в бинарных контурах из различных групп, более детально описанных в работе [7].

На рис. 2 показаны рассматриваемые в работе принципиальные технологические схемы бинарных блочно-каскадных энергокомплексов с двумя и тремя последовательно включенными бинарными установками для утилизации сбросного тепла однофазных геотермальных ресурсов. Каж-

*а*)




*б*)

**Рис. 1.** Двухкаскадная бинарная геотермальная станция в г. Kirchstockach (Германия) [4]: *а* – внешний вид; *б* – тепловая схема.
*1* – турбина; *2* – конденсатор; *3* – насос; *4* – подогреватель; *5* – испаритель для органического цикла Ренкина низкого давления; *6* – турбина; *7* – конденсатор; *8* – насос; *9* – подогреватель 1-й ступени; *10* – подогреватель 2-й ступени; *11* – испаритель для органического цикла Ренкина низкого давления; *12* – производительная скважина; *13* – реинжекционная скважина

дый каскад энергокомплексов состоит из бинарной турбины, питательного насоса, теплообменного оборудования (подогревателя, испарителя, пароперегревателя) и конденсатора.

Расход геотермального теплоносителя определялся из условия обеспечения мощности на клеммах генератора 10 МВт в одноконтурной бинарной установке на наименее эффективном рабочем теле из конкретной группы. В расчетах гидравлические потери не учитывались, минимальные температурные напоры в теплообменном оборудовании принимались равными 10°С, перегрев пара за испарителем – 3°С, температура охлаждающей воды – 10°С.

На рис. 3, *а* и *б* представлены *T*, *Q*-диаграммы исследуемых процессов теплообмена при подводе геотермального тепла в контур для двухкаскадного и трехкаскадного бинарных энергокомплек-

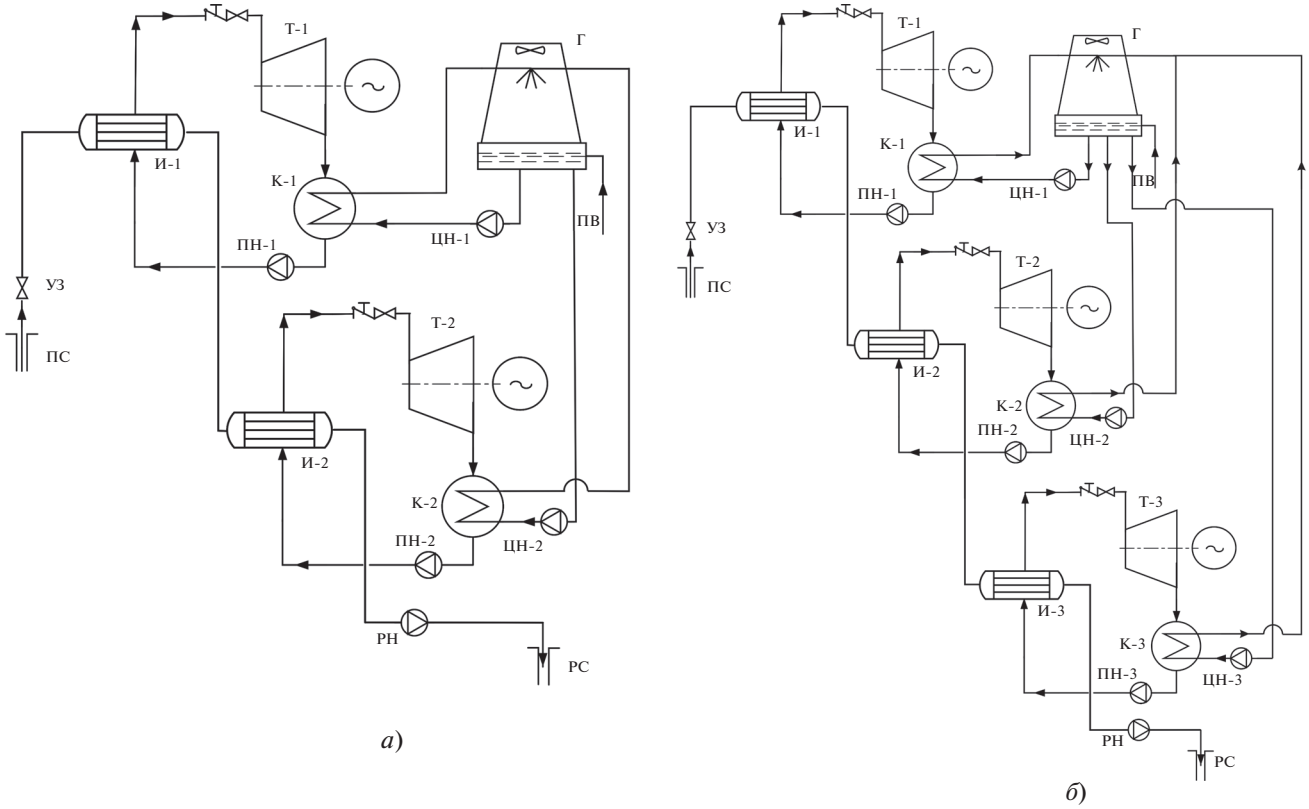



**Рис. 2.** Принципиальные технологические схемы бинарных двух- (*а*) и трехкаскадных (*б*) энергокомплексов для утилизации тепла однофазных геотермальных ресурсов.
ПС – продуктивная скважина; УЗ – устьевая задвижка; каскад: *1* – первый, *2* – второй, *3* – третий; И-1, И-2, И-3 – теплообменники; Т-1, Т-2, Т-3 – турбогенераторы; К-1, К-2, К-3 – конденсаторы; ПН-1, ПН-2, ПН-3 – питательные насосы; ЦН-1, ЦН-2, ЦН-3 – циркуляционные насосы охлаждающей воды; РН – насос реинжекции; РС – реинжекционная скважина; Г – градирня; ПВ – подпиточная вода

сов ($Q$ – тепловая нагрузка, $T$ – температуры греющей и нагреваемой сред). Для первого контура процесс отдачи тепла греющим геотермальным теплоносителем на диаграмме показан линией $AD$ ($AB$ – участок перегрева рабочего тела, $BC$ – испарения, $CD$ – подогрева), для второго – $DG$ ($DE$ – участок перегрева рабочего тела, $EF$ – испарения, $FG$ – подогрева), для третьего – $GJ$ ($GH$ – участок перегрева рабочего тела, $HI$ – испарения, $IJ$ – подогрева). Процесс нагрева, испарения и перегрева ОРТ отражается на диаграмме линиями *1–2–3–4* и *5–6–7–8* для двухкаскадного и *1–2–3–4*, *5–6–7–8* и *9–10–11–12* для трехкаскадного энергокомплексов.

На линии нагрева рабочего тела имеются площадки, примыкающие к точкам *2* и *6*, кото-

Перечень однокомпонентных ОРТ по группам, отражающим безопасность и экологичность работы бинарных установок в блочно-каскадном исполнении

| Группа | Характеристика ОРТ | Органические рабочие тела |
|---|---|---|
| Первая | Нетоксичные, пожаро- и взрывобезопасные | Перфлюорогептан, RC-318, R-218, R-3110 |
| Вторая | Низкотоксичные, пожаро- и взрывобезопасные | R-245fa, пентафторпропан, R-236fa, R-227ea, R-134a, R-32 |
| Третья | Нетоксичные, пожароопасные | Циклобутен, R-600a, R-290, R-152a, R-143a |
| Четвертая | Низкотоксичные, пожаро- и взрывоопасные | Циклобутан, RC-270, R-601, циклопентан, R-600, *n*-гексан, R-601a, R-245ca |

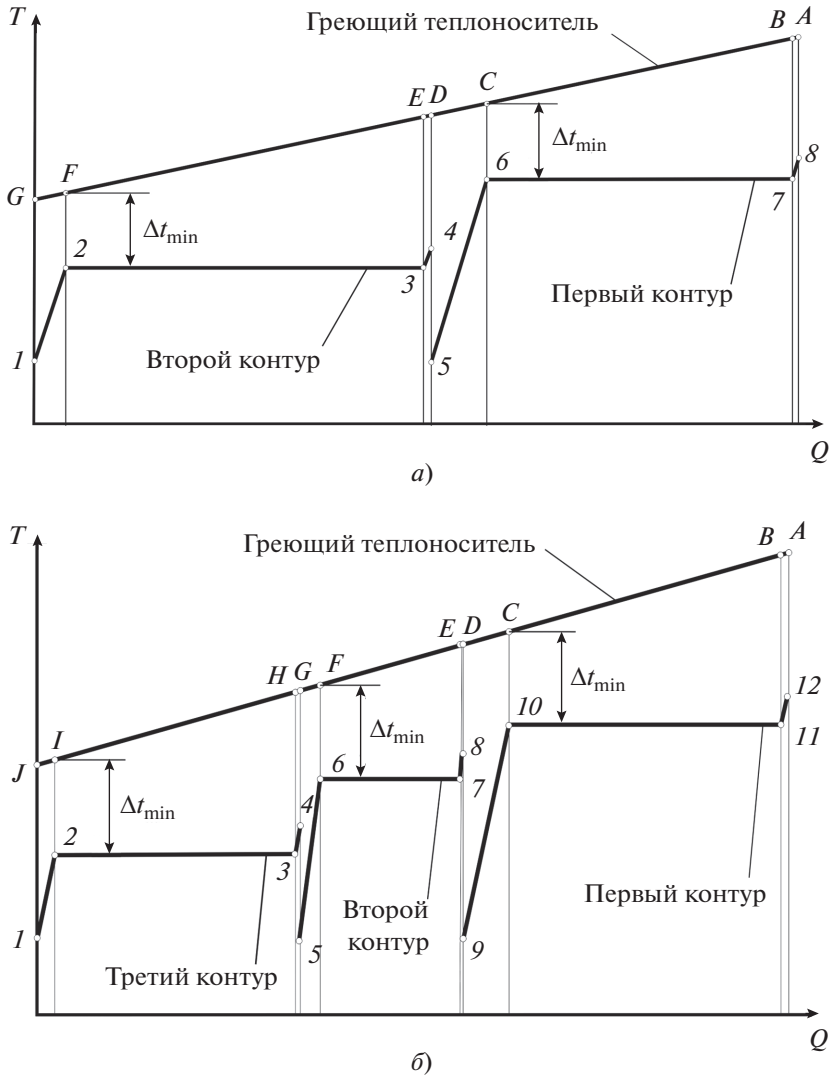



**Рис. 3.** *T*, *Q*-диаграммы теплообмена при подводе тепла в парогенераторе двухкаскадного (*а*) и трехкаскадного (*б*) бинарного энергокомплекса

рые определяют значения минимальных температурных напоров $\Delta T_{\min}$, ограничивающих теплообмен между двумя средами. Очевидно, что $\Delta T_{\min}$ всегда больше нуля согласно второму началу термодинамики. Это, с одной стороны, ограничивает максимальный отбор тепла от греющего теплоносителя, а с другой – влияет на энергетическую эффективность термодинамического цикла.

Точки *2* и *6* соответствуют минимальному температурному напору между греющим и подогреваемым теплоносителями, значение которого в том числе определяет проектные параметры технологической схемы и теплообменного оборудования. Так, уменьшение $\Delta T_{\min}$ ведет к росту поверхностей теплообмена и, как следствие, к увеличению массогабаритных характеристик оборудования и его стоимости. На практике весьма востребованы инженерные подходы к оценке $\Delta T_{\min}$, как, например, хорошо зарекомендовавший себя упрощенный метод, изложенный в работе [8].

В рамках данной работы при участии ОИВТ РАН и поддержке Минобрнауки РФ были выполнены исследования процессов теплообмена в технологических схемах одно-, двух- и трехкаскадных энергокомплексов. На рис. 4 представлены результаты расчета влияния количества тепла, передаваемого в бинарные циклы, на значения температуры геотермального флюида и органического рабочего тела в одноконтурном бинарном энергоблоке и двухкаскадном энергокомплексе с использованием веществ первой группы RC-318 и

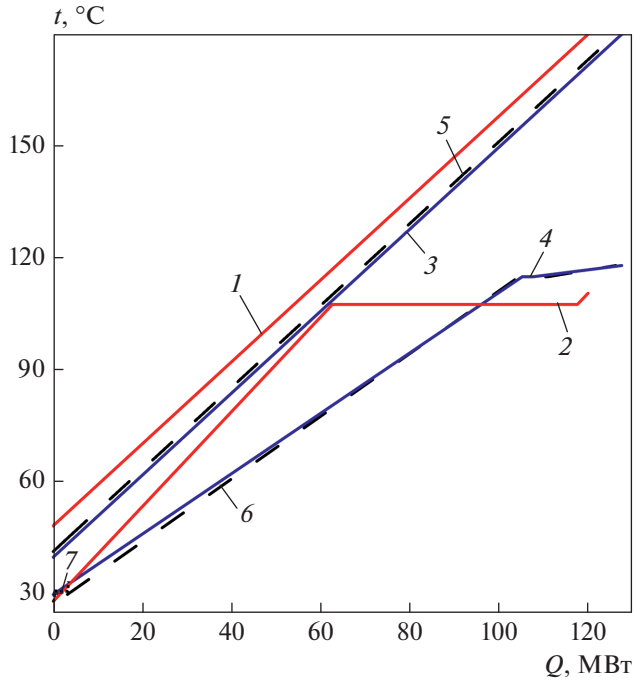



**Рис. 4.** Влияние количества тепла, отдаваемого однофазным геотермальным теплоносителем с использованием RC-318 (*1*) и $C_7F_{16}$ (*3*) в качестве рабочих тел в бинарные циклы, на значение температуры геотермального флюида и органического тела в однокаскадной (сплошные линии) и двухкаскадной (штриховые линии) схеме.
*1*, *3*, *5* – геотермальный сепарат; *2* – RC-318; *4* – $C_7F_{16}$; *6* – RC-318 в первом каскаде; *7* – $C_7F_{16}$ во втором каскаде

$C_7F_{16}$ в качестве рабочих тел первого и второго каскада соответственно. В данном случае применение двухкаскадной схемы вместо традиционной однокаскадной позволяет увеличить количество тепла, передаваемого от греющего теплоносителя, примерно на 10 МВт, а также снизить температуру сепарата на выходе энергоблока с 50 до 40°С, что положительно сказывается на эффективности утилизации тепла геотермального теплоносителя и на экологическом состоянии окружающей среды.

Исследования влияния выбора ОРТ на значения температуры потоков рабочей среды бинарных контуров в зависимости от количества тепла, передаваемого от геотермального теплоносителя через парогенератор в бинарные циклы трехкаскадного энергокомплекса при использовании вещества первой группы R-3110 в качестве рабочего тела первого, второго и третьего каскадов, показали, что применение трехкаскадной схемы позволяет увеличить количество передаваемого в цикл БЭС тепла на 14.7%.

Применение трехкаскадной схемы, по сравнению с однокаскадной, при использовании в качестве рабочих тел $C_7F_{16}$ и R-3110 в контуре однокаскадной, а также $C_7F_{16}$ в первом и втором, а R-3110 в третьем каскаде трехкаскадного энергокомплекса также обеспечивает рост количества тепла, переданного от геотермального теплоносителя, и снижение температуры сепарата на выходе из энергокомплекса.

## УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ БЛОЧНО-КАСКАДНЫХ БИНАРНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

Удельный расход геотермального теплоносителя (в данном случае – сепарата) для выработки единицы мощности в значительной степени определяет эффективность использования геотермальных ресурсов в блочно-каскадных бинарных энергоблоках. В результате проведенных расчетных исследований были выявлены оптимальные условия для достижения минимального удельного расхода геотермального сепарата для двух- и трехкаскадной схем бинарных энергокомплексов.

На рис. 5 для примера показано расчетное поле значений удельного расхода сепарата (нетто) $g_c$ от его температуры на выходе из первого $t_{c1}$ и второго $t_{c2}$ каскадов трехкаскадного энергокомплекса при использовании в качестве рабочих тел $C_7F_{16}$ для первого, второго и RC-318 для третьего каскада. Установлено, что в данном случае минимальное значение удельного расхода сепарата (нетто) $g_{c\,min}$ однофазного геотермального теплоносителя составляет 15.4 (кг/с)/МВт.

Расчеты показывают, что температурные зависимости удельного расхода сепарата и мощности двух- и трехкаскадных энергокомплексов имеют противоположные тенденции. Поэтому результаты данных исследований дают возможность определить условия компромисса между достижением наибольшей мощности и снижением минимальных значений удельного расхода сепарата при создании блочно-каскадных бинарных энергокомплексов.

В процессе расчетных исследований установлено, что наименьшие значения удельного расхода (нетто) однофазного геотермального теплоносителя $g_{c\,min}$ достигаются при использовании веществ третьей группы. В данном случае $g_{c\,min}$ составляет 13.7 (кг/с)/МВт.

В результате проведенных исследований были получены данные об изменении удельного расхода сепарата (нетто) для одно-, двух- и трехкаскадных энергокомплексов по сравнению с

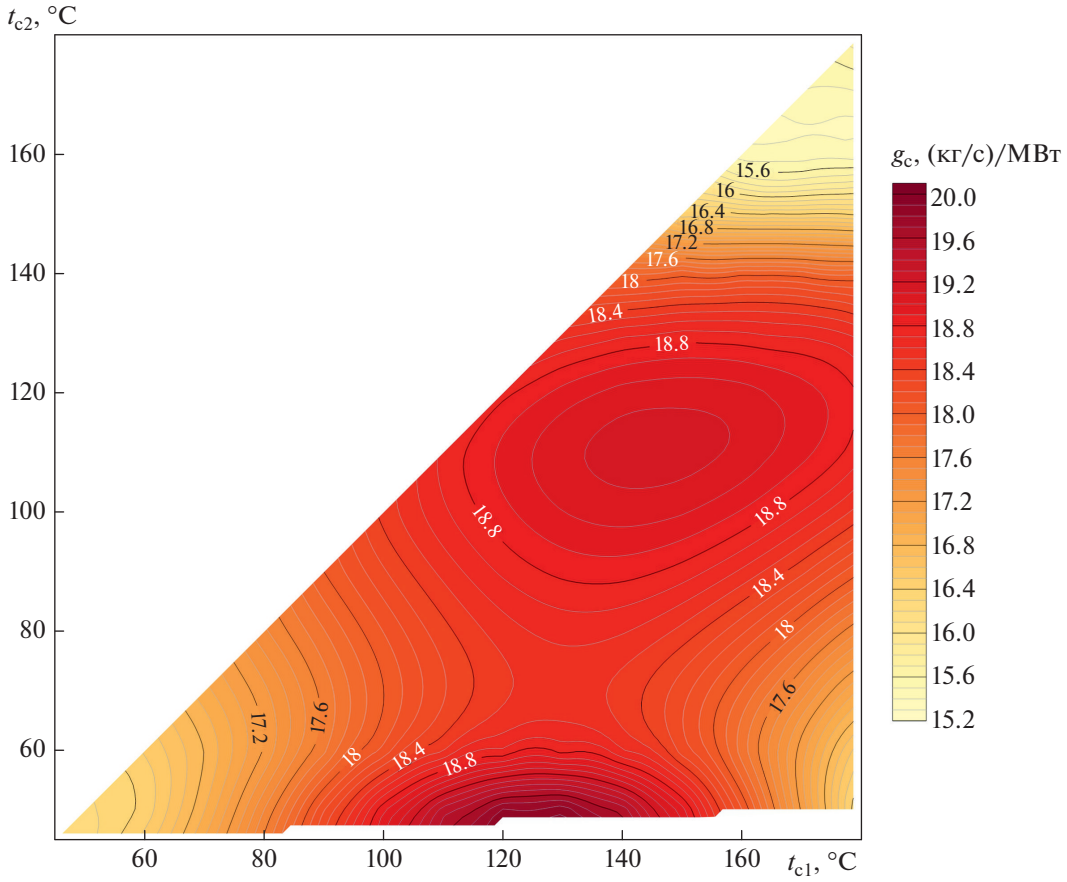



**Рис. 5.** Зависимость удельного расхода сепарата (нетто) от температуры сепарата после первого и второго каскадов трехкаскадного энергокомплекса при использовании веществ первой группы $C_7F_{16}$, $C_7F_{16}$ и RC-318 в качестве рабочих тел первого, второго и третьего каскада соответственно

оптимальной одноконтурной бинарной установкой при использовании различных ОРТ в бинарных циклах для утилизации высокотемпературного (180°С) геотермального сепарата. Так, на рис. 6 представлена гистограмма, отражающая изменения $g_c$ по сравнению с оптимальной схемой одноконтурной бинарной энергоустановки при использовании различных органических веществ четвертой группы в бинарных контурах мультикаскадных энергокомплексов. Установлено, что при использовании веществ четвертой группы наиболее эффективна трехкаскадная схема со следующими рабочими телами в бинарных контурах: RC-270 для первого и второго каскадов и RC-601a для третьего. При этом повышение эффективности утилизации геотермального теплоносителя по сравнению с одноконтурной схемой составляет более 4%.

Применение органических веществ первой и третьей групп в качестве рабочих тел в бинарных контурах двух- и трехкаскадных энергокомплексов позволяет снизить удельный расход геотермального теплоносителя на 2–3% по сравнению с одноконтурным бинарным энергоблоком.

## МОЩНОСТЬ ОТДЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ И ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ В ЦЕЛОМ

Температура геотермального теплоносителя на выходе из каскадов косвенно влияет как на мощность отдельных каскадов, так и на общую мощность двух- и трехкаскадных бинарных энергоустановок. На рис. 7 представлены расчетные зависимости мощности брутто, нетто и потребляемой на собственные нужды двухкаскадного энергокомплекса от температуры сепарата на выходе из первого каскада при использовании веществ первой группы $C_7F_{16}$ и RC-318 в качестве рабочего тела в первом и втором каскаде соответственно. Там же для сравнения приведены результаты аналогичных исследований для традиционного одноконтурного бинарного блока.

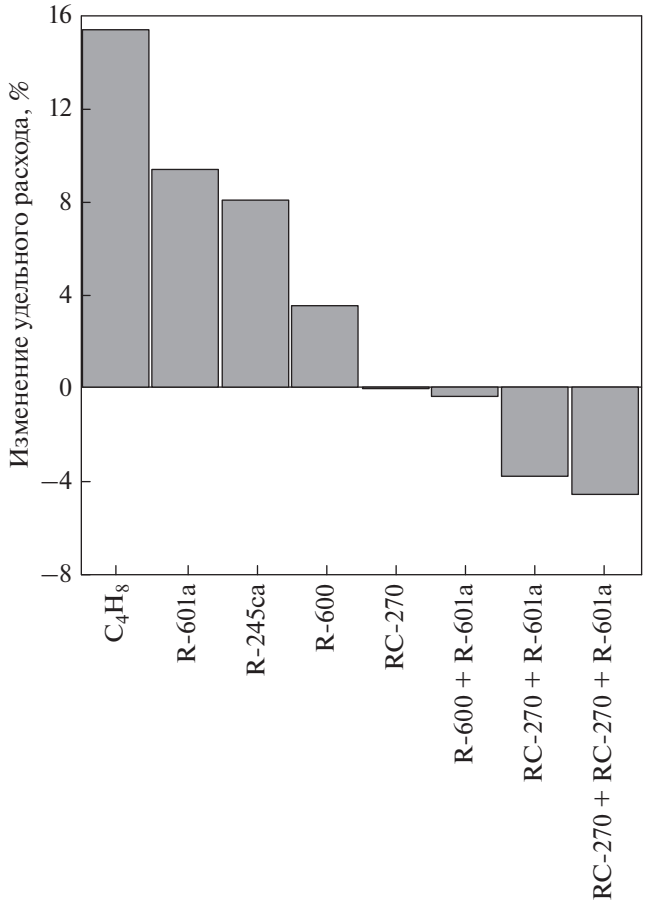



**Рис. 6.** Гистограмма расчетных значений изменения удельного расхода сепарата (нетто) для различных рабочих тел четвертой группы веществ, используемых в одноконтурной БЭС и каскадах блочно-каскадного энергокомплекса

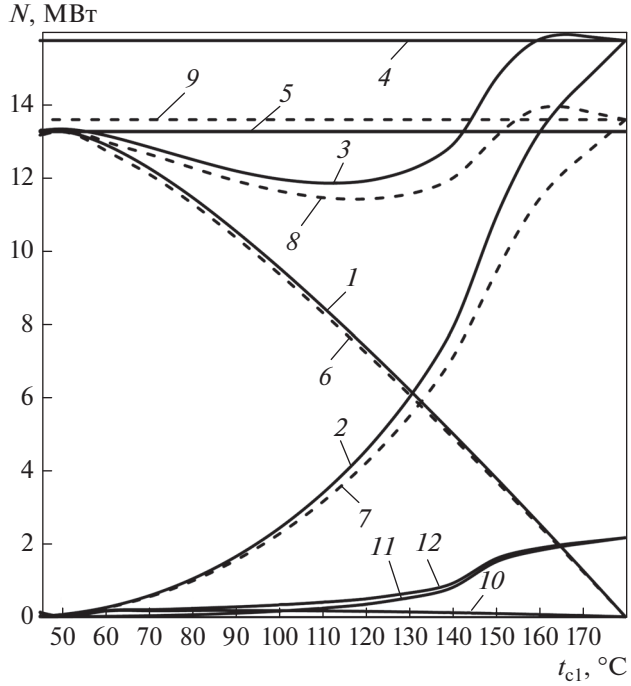



**Рис. 7.** Зависимость мощности брутто $N_{брутто}$, нетто $N_{нетто}$, собственных нужд $N_{с.н}$ и суммарной мощности турбин брутто $\sum N_{брутто}$ и нетто $\sum N_{нетто}$ двухкаскадного энергокомплекса от температуры сепарата на выходе из первого каскада $t_{c1}$ при использовании веществ первой группы $C_7F_{16}$ и RC-318 в качестве рабочего тела в первом и втором каскаде соответственно.
*1*, *2* – $N_{брутто}$ турбин первого и второго каскадов; *3* – $\sum N_{брутто}$ двухкаскадного энергокомплекса; *4* – максимально возможная $N_{брутто}$ однокаскадной схемы при использовании RC-318 в качестве рабочего тела; *5* – максимально возможная $N_{брутто}$ однокаскадной схемы при использовании $C_7F_{16}$ в качестве рабочего тела; *6, 7* – $N_{нетто}$ турбин первого и второго каскадов; *8* – $\sum N_{нетто}$ двухкаскадной схемы; *9* – максимально возможная $N_{нетто}$ однокаскадной схемы при использовании RC-318 в качестве рабочего тела; *10*, *11* – мощности питательных насосов первого и второго каскадов; *12* – $N_{с.н}$ двухкаскадной схемы

Расчеты показывают, что при начальной температуре геотермального сепарата 180°C и использовании $C_7F_{16}$ в первом каскаде и RC-318 во втором оптимальное значение температуры сепарата на выходе из первого контура, соответствующее наибольшей мощности энергокомплекса, составляет 167°C. При этом мощность брутто и нетто энергоустановки при использовании данной двухкаскадной схемы больше, чем одноконтурной, на 2.2 и 0.5 МВт соответственно. Минимальные значения суммарной мощности (нетто и брутто) двухкаскадного энергокомплекса достигаются в диапазоне температур сепарата из первого каскада 110–120°C.

На рис. 8 показаны зависимости мощности (нетто) трехкаскадного энергокомплекса от температуры геотермального теплоносителя на выходе из первого $t_{c1}$ и второго $t_{c2}$ каскадов при использовании в качестве рабочих тел $C_7F_{16}$ для первого, второго и RC-318 для третьего каскада. В данном случае оптимальное значение температуры сепарата на выходе из второго контура, обеспечивающее максимальное значение $N_{нетто}$, составляет 164°C. С уменьшением температуры сепарата на выходе из первого каскада $t_{c1}$ с 179.9 до 120.0°C мощность энергокомплекса снижается, при дальнейшем уменьшении температуры мощность растет и при 60°C достигает 13.2 МВт. При этом температура на выходе из второго каскада $t_{c2}$ равняется 50°C. Вид полученных расчет-

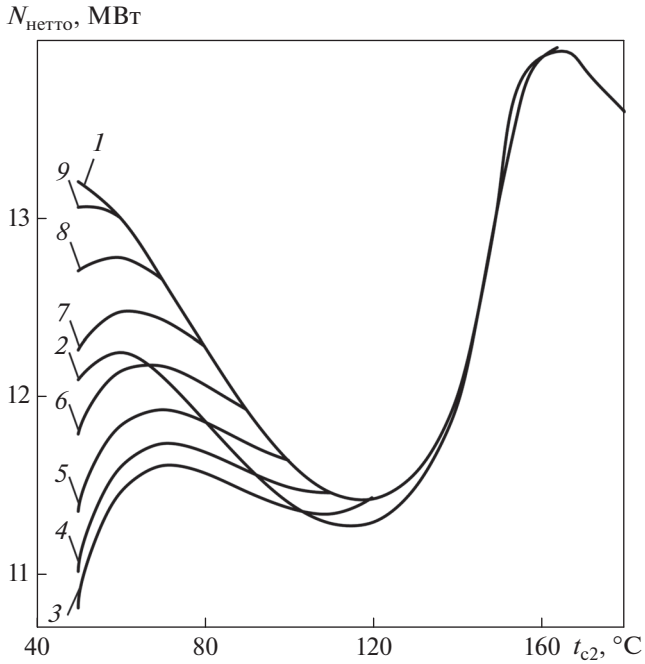



**Рис. 8.** Зависимость $N_{нетто}$ трехкаскадного энергокомплекса от температуры геотермального теплоносителя на выходе из первого и второго каскада при использовании веществ первой группы $C_7F_{16}$, $C_7F_{16}$ и RC-318 в качестве рабочих тел первого, второго и третьего каскада соответственно.
$t_{c1}$, °C: *1* – 179.9; *2* –164; *3* – 120; *4* – 110; *5* – 100; *6* – 90; *7* – 80; *8* – 70; *9* – 60

ных кривых обусловлен перераспределением мощности между отдельными каскадами при изменении значений температуры ОРТ на выходе из первого и второго каскадов.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика позволяет на основе численного моделирования геотермальных и бинарных циклов оптимизировать технологические схемы двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов по максимальной установленной мощности и минимальному удельному расходу исходного геотермального флюида.

2. Установлено, что применение двухкаскадной схемы дает возможность увеличить количество тепла, передаваемого в бинарный цикл, на 15% по сравнению с однокаскадной схемой и снизить температуру геотермального сепарата на выходе из энергоустановки с 70 до 53°C (когда в первом контуре рабочее тело RC-270, во втором – R-601a).

3. Технологическая трехкаскадная схема обеспечивает увеличение количества передаваемого тепла в бинарный цикл почти на 19% и снижение температуры геотермального сепарата на выходе из энергокомплекса с 70 до 48.6°C (когда в первом и втором контурах рабочее тело RC-270, а в третьем – R-601a).

4. Повышение эффективности утилизации тепла геотермального теплоносителя составляет 9.4% в трехкаскадном энергокомплексе с использованием в качестве рабочего тела R-32 во всех трех каскадах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **White M.T., Read M.G., Sayma A.I.** Making the case for cascaded organic Rankine cycles for waste-heat recovery // Energy. 2020. V. 211. P. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118912

2. **Kanoglu M.** Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant // Geothermics. 2020. V. 31. Is. 6. P. 709–724. https://doi.org/10.1016/S0375-6505(02)00032-9

3. **Gnutek Z., Bryszewska-Mazurek A.** The thermodynamic analysis of multicycle ORC engine // Energy. 2001. V. 26. Is. 12. P. 1075–1082. https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00070-6

4. **Heberle F., Jahrfeld T., Brüggemann D.** Thermodynamic analysis of double-stage organic Rankine cycles for low-enthalpy sources based on a case study for 5.5 MWe power plant Kirchstockach (Germany) // Proc. of the World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 19–25 April 2015. www.geothermal-energy.org

5. **Small** hybrid solar power system / M. Kane, D. Larrain, D. Favrat, Y. Allani // Energy. 2003. V. 28. Is. 14. P. 1427–1443. https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00127-0

6. **Геотермальная** энергетика: справ.-метод. изд. / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семенов, А.А. Шипков. М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015.

7. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой подогрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 63–72. https://doi.org/10.1134/S0040363619110067

8. **Yohanis Y.G., Popel O.S., Frid S.E.** A simplified method of calculating heat flow through a two-phase heat exchanger // Appl. Therm. Eng. 2005. V. 25. Is. 14–15. P. 2321–2329. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.12.011

# Multistage Geothermal Binary Energy Complexes: Disposal of a High Temperature Heater (180°C)

**G. V. Tomarov[a], * and A. A. Shipkov[a], ***

[a] *OOO Geotherm-M, Moscow, 111250 Russia*

**e-mail: geoatom.m@gmail.com*

**Abstract**—The desire to utilize waste heat from various industrial and technological processes leads to the search for new technical solutions and the development of technologies aimed at converting the thermal energy of low-grade heat carriers into electrical energy. Today, one of the most widespread technologies for generating electricity based on the use of low-grade heat is the organic Rankine cycle, which is implemented in binary power plants. The increased interest in these technologies is explained by the fact that significant initial capital costs for the creation of binary plants and their relatively low economic performance are in most cases offset by low operating costs for fuel. The use of multistage binary power complexes can become one of the ways to increase the efficiency of waste heat utilization. Specific examples and promising possibilities for the practical use of block-cascade binary power complexes in order to utilize the heat of waste heat carriers of various industries are presented. The features of multistage schemes are studied, the operation of which is based on the principle of incremental (step-by-step) energy conversion of a high-temperature geothermal single-phase water heat carrier in binary energy complexes to increase the efficiency of using geothermal resources. Some results of computational studies of thermodynamic indicators and technical characteristics of two- and three-stage binary power complexes with a high-temperature (180°C) initial geothermal coolant are considered. The analysis of the technical characteristics of two- and three-stage binary energy complexes is carried out in comparison with the traditional single-circuit binary power unit when using various organic substances as a working fluid. It is shown that the use of a two-stage scheme makes it possible to increase the amount of heat transferred to a binary cycle by 15% in comparison with a single-stage scheme, and the use of a three-stage scheme by 18.9%. When implementing the developed methodology for numerical modeling of geothermal and binary circuits, it is possible to optimize the technological schemes of two- and three-stage binary power complexes according to the maximum installed power and minimum specific consumption of the initial geothermal fluid.

*Keywords:* geothermal heat carrier, binary energy complexes, organic working fluid, multistage scheme, specific heat carrier consumption, separat