

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МУЛЬТИКАСКАДНЫХ БИНАРНЫХ ЦИКЛОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2022 г. Г. В. Томаров<sup>а</sup>, \*, А. А. Шипков<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup> ООО «Геотерм-М», ул. Лефортовский Вал, д. 24, Москва, 111250 Россия

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

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

После доработки 15.03.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Создание эффективных технологий преобразования низкотемпературного тепла в электроэнергию с применением бинарных энергоблоков, работающих по органическому циклу Ренкина, – актуальная проблема современной энергетики. Интерес к этим технологиям неуклонно растет, поскольку они позволяют утилизировать тепло сбросного теплоносителя на различных производствах и геотермальных электростанциях (ГеоЭС). В настоящее время в качестве источников геотермального теплоносителя для выработки электрической энергии все чаще используются низкотемпературные ресурсы, широко распространенные во всем мире. Одним из направлений повышения эффективности бинарных технологий может стать применение мультикаскадных бинарных энергокомплексов, которые представляют собой несколько последовательно включенных бинарных контуров. Благодаря возможности оптимального выбора рабочего тела в каждом контуре обеспечивается наибольшая эффективность отдельного каскада и энергокомплекса в целом. Предварительные оценки показали, что с ростом количества каскадов снижается дополнительная мощность, которую можно получить путем добавления нового каскада. Оптимизационные расчеты были ограничены сравнением двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов с однокаскадным бинарным энергоблоком. Представлены результаты исследований влияния выбора органического рабочего тела и температуры геотермального теплоносителя на технико-экономические характеристики мультикаскадных бинарных энергокомплексов при утилизации геотермального теплоносителя температурой 70°C. Установлено, что с повышением температуры исходного геотермального теплоносителя эффективность передачи тепла в бинарный цикл мультикаскадных энергокомплексов снижается. Показано, что наибольшее снижение удельного расхода геотермального теплоносителя и одновременный рост мощности при переходе от однокаскадного энергоблока к двух- и трехкаскадным энергокомплексам достигаются при невысоких значениях его температуры.

*Ключевые слова:* мультикаскадный бинарный энергокомплекс, бинарный энергоблок, бинарные энерготехнологии, бинарный цикл, электростанция, органическое рабочее тело, геотермальный теплоноситель, мощность, удельный расход

DOI: 10.56304/S0040363622090077

Статья является продолжением публикаций [1, 2], посвященных анализу результатов расчетных исследований моделирования геотермальных мультикаскадных бинарных энергокомплексов. В данной работе рассматриваются вопросы оптимизации мультикаскадных бинарных циклов для утилизации геотермального однофазного теплоносителя температурой 70°C. Определено влияние количества каскадов на прибавку мощности при использовании мультикаскадных бинарных энергокомплексов вместо однокаскадного энергоблока.

Расчеты показали, что с увеличением температуры исходного геотермального теплоносителя эффективность передачи тепла в бинарный цикл

мультикаскадных энергокомплексов снижается. Кроме того, на основе ранее полученных и опубликованных данных, а также представленных в настоящей работе результатов расчетных исследований проведен сравнительный анализ влияния температуры геотермального теплоносителя 70, 120 и 180°C на его удельный расход и мощность при переходе с однокаскадного бинарного энергоблока на двух- и трехкаскадные бинарные энергокомплексы.

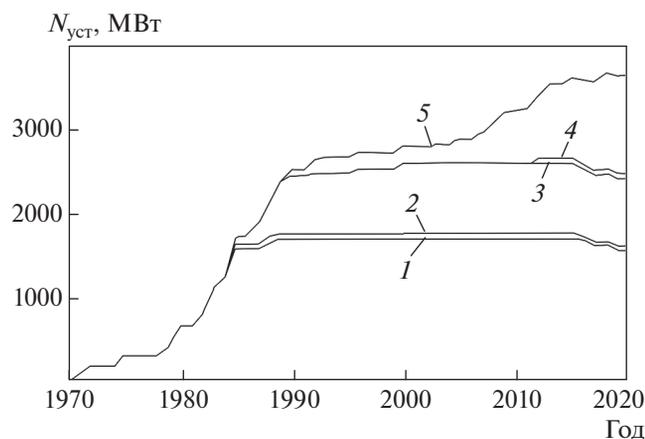
Предварительные оценки параметров, влияющих на капиталовложения и выработку электроэнергии, свидетельствуют о том, что, в отличие от однокаскадного энергоблока, применение двух- и

трехкаскадного бинарных энергокомплексов при строительстве геотермальной электростанции, с одной стороны, приводит к росту капиталовложений, а с другой – к увеличению выработки электроэнергии.

### СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ БИНАРНЫЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

Суммарная установленная мощность геотермальных электростанций в мире с 2010 по 2020 г. возросла на 41% и достигла 15 950 МВт [3]. Прирост мощности ГеоЭС в значительной степени был обеспечен вводом в эксплуатацию бинарных энергоблоков. Труднодоступность высокотемпературных геотермальных ресурсов, расположенных в основном в активных зонах молодого вулканизма, послужила одной из причин активного освоения в последние годы низкотемпературных геотермальных источников с использованием бинарных энерготехнологий. Например, в США за прошедшие 10 лет суммарная установленная мощность  $N_{уст}$  геотермальных бинарных электростанций увеличилась более чем в 2 раза (рис. 1) [4].

Этот результат достигнут благодаря сооружению бинарных энергоблоков на действующих ГеоЭС. В период с 2015 по 2019 г. новые геотермальные месторождения не разрабатывались. Усилия были направлены на повышение эффективности утилизации сбросного геотермального теплоносителя на основе применения бинарных энерготехнологий, а также на увеличение производительности месторождений, находящихся в эксплуатации. На геотермальную энергетику США в настоящее время приходится около 2% всех возобновляемых источников энергии и около 0,4% общего объема производства электроэнергии в



**Рис. 1.** Рост установленной мощности  $N_{уст}$  ГеоЭС в США за 1970–2020 гг. ГеоЭС: 1 – на перегретом (насыщенном) паре; 2, 3, 4 – с одним, двумя и тремя давлениями расширения соответственно; 5 – бинарные (графики 2–5 построены накопительным итогом от графика 1)

стране. Следует отметить, что развитие возобновляемых источников энергии в странах-лидерах осуществляется при государственной поддержке, в том числе благодаря стимулирующим повышенным тарифам [5].

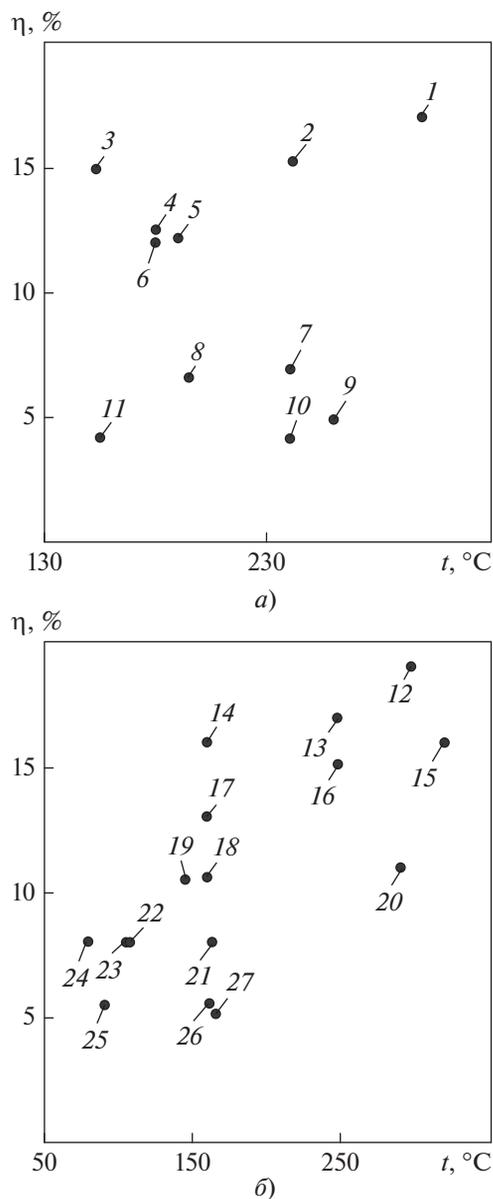
Широкое распространение бинарных энергоблоков в геотермальной энергетике также обусловлено их постоянным совершенствованием и достижением эффективности, сопоставимой с традиционными ГеоЭС, включая геотермальные электростанции прямого цикла. На рис. 2 представлены сведения об эффективности геотермальных электростанций прямого и бинарного циклов [6]. Термодинамическая эффективность (КПД  $\eta$ ) ГеоЭС находится в диапазоне от 4 до 20%, причем при высоких температурах  $t$  геотермального теплоносителя эти показатели увеличиваются.

Следует отметить, что в бинарных энергоблоках используется геотермальный теплоноситель в широком температурном диапазоне (80–325°C), по этому показателю бинарные энергоблоки не уступают геотермальным с прямым циклом.

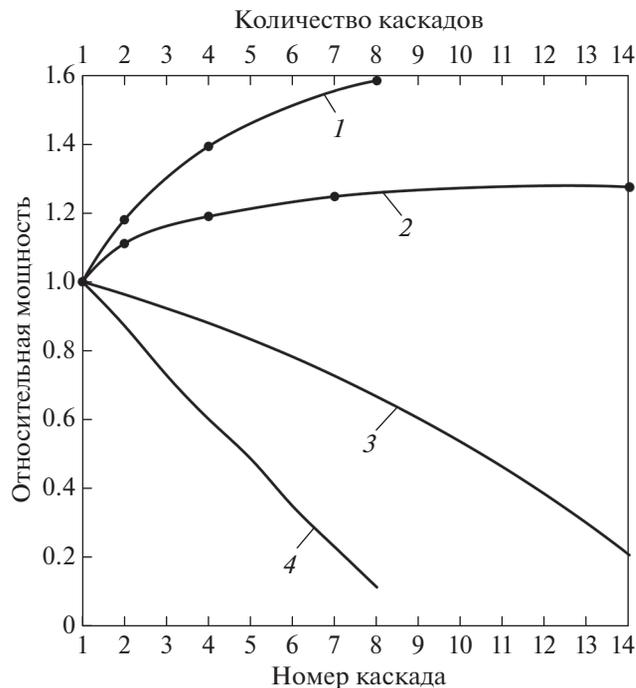
Несмотря на достигнутые в этом направлении успехи, в настоящее время продолжается поиск новых решений по повышению эффективности бинарных энерготехнологий на основе геотермальных ресурсов [7, 8], в том числе мультикаскадных бинарных энергокомплексов [9–11]. Практически важно определить, как количество каскадов влияет на мощность мультикаскадных бинарных энергокомплексов, т.е. какое приращение мощности может обеспечить включение в схему каждого последующего каскада. Результаты такой оценки позволят определить количество каскадов, которым целесообразно ограничиться при выполнении оптимизационных расчетов и решении практических задач.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости относительной мощности мультикаскадных бинарных энергокомплексов и относительной мощности (нетто) каждого отдельного каскада от их количества. Исследования выполнены для геотермального теплоносителя температурой 70 и 120°C, причем рабочим телом во всех контурах в первом случае являлся R601a, а во втором – R600a. Следует отметить, что эти результаты представляют собой оценку зависимости мощности мультикаскадных бинарных энергокомплексов и каждого каскада отдельно от количества каскадов, проведенную без оптимизации выбора рабочего тела в отдельных контурах и разности температур геотермального теплоносителя на входе в каждый каскад и выходе из него.

Как видно на рис. 3, приращение мощности с присоединением каждого дополнительного каскада при утилизации геотермального теплоносителя температурой 70°C существенно больше, чем



**Рис. 2.** Термодинамическая эффективность некоторых геотермальных электростанций прямого цикла с одним давлением расширения (а) и бинарного цикла (б). 1 – Nesjavallavirkjun, 120 МВт (установленная мощность) (Исландия); 2 – Uenotai, 28.8 МВт (Япония); 3 – Olkaria, 45 МВт (Кения); 4 – Los Azufres, 195 МВт (Мексика); 5 – Kizildere, 20 МВт (Турция); 6 – Dieng, 60 МВт (Индонезия); 7 – Sabalan, 36 МВт (Иран); 8 – Takigami, 28 МВт (Япония); 9 – Matsukawa, 50 МВт (Япония); 10 – Onikobe, 12.5 МВт (Япония); 11 – Krafla, 28 МВт (Исландия); 12 – Rotokava, 34 МВт (Новая Зеландия); 13 – Waikareki, 171 МВт (Новая Зеландия); 14 – Miravalles, 15.5 МВт (Коста-Рика); 15 – Ngawa, 75 МВт (Новая Зеландия); 16 – Las Pailas, 41.6 МВт (Коста-Рика); 17 – Heber-1, 6.9 МВт (США); 18 – Heber-2, 48 МВт (США); 19 – Raft River, 6.1 МВт (США); 20 – Amatitlan, 25.2 МВт (Гватемала); 21 – Tuzla, 7.5 МВт (Турция); 22 – Brady, 4.3 МВт (США); 23 – Wabuska, 0.8 МВт (США); 24 – Chena, 2 МВт (США); 25 – Паратунская, 0.7 МВт (СССР); 26 – Doga-2, 9.8 МВт (Турция); 27 – Doga-1, 7.3 МВт (Турция)



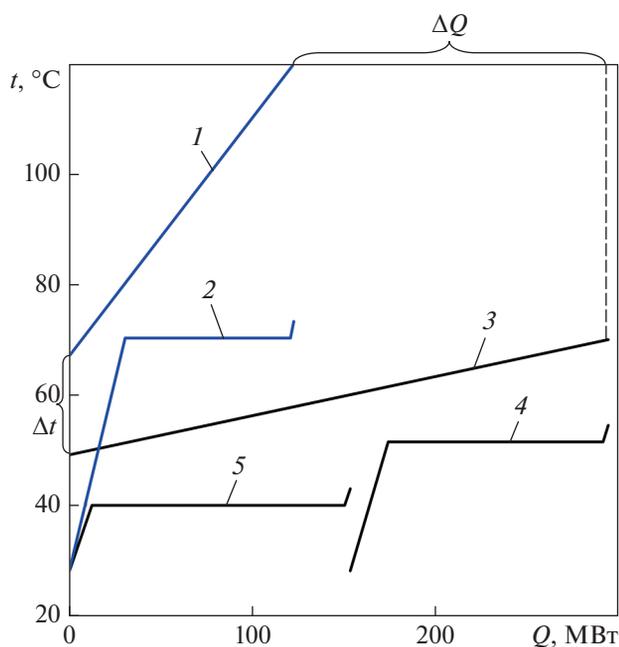
**Рис. 3.** Расчетные зависимости влияния количества каскадов на относительную мощность мультикаскадных бинарных энергокомплексов (кривые 1, 2) и относительную мощность (нетто) каждого каскада (кривые 3, 4). Кривые: 1, 4 – температура геотермального теплоносителя 70°C (рабочее тело во всех контурах R601a); 2, 3 – температура геотермального теплоносителя 120°C (R600a)

теплоносителя температурой 120°C. Так, разница в увеличении относительной мощности для двухкаскадного бинарного комплекса составляет около 30%, а для четырехкаскадного – более 50%. При этом очевидна тенденция уменьшения прибавки относительной мощности с ростом количества каскадов. Это наглядно отражают кривые 3 и 4 на рис. 3, которые показывают, какую относительную мощность (нетто) добавляет каждый последующий присоединенный каскад. Так, прибавка относительной мощности с ростом количества каскадов снижается особенно активно для геотермального теплоносителя температурой 120°C и при восьми каскадах составляет менее 10%.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно проводить оптимизационные исследования прежде всего для двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов, некоторые результаты которых рассмотрены далее.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ 70°C

Важная характеристика геотермальных бинарных энергоблоков – количество тепла, пе-



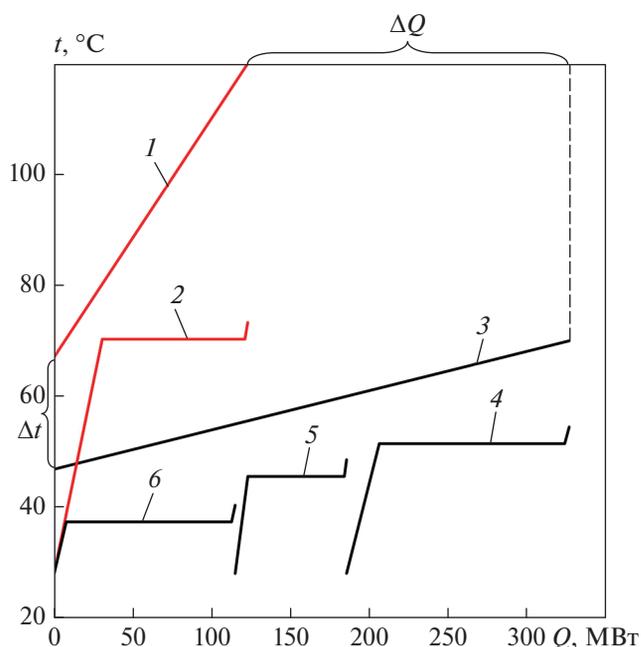
**Рис. 4.**  $t, Q$ -диаграмма теплообменников одно- (кривые 1 и 2) и двухкаскадной (кривые 3–5) схемы утилизации тепла однофазного геотермального теплоносителя температурой 70°C с использованием во всех каскадах вещества R601a.

1 – геотермальный теплоноситель температурой 120°C в однокаскадной схеме; 2 – R601a в однокаскадной схеме (120°C); 3 – геотермальный теплоноситель температурой 70°C в двухкаскадной схеме; 4 – R601a в первом каскаде двухкаскадной схемы; 5 – R601a во втором каскаде двухкаскадной схемы.

$\Delta Q$  – прирост передаваемого количества тепла в двухкаскадном бинарном энергокомплексе

редаваемого от первоисточника (геотермального теплоносителя) рабочему телу бинарного контура в подогревателе-испарителе-пароперегревателе. Применение мульткаскадных бинарных энергокомплексов позволяет увеличить эффективность передачи геотермального тепла в органический цикл. Авторами данной работы совместно со специалистами ОИВТ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ были выполнены расчетные оптимизационные исследования технологических схем мульткаскадных бинарных энергокомплексов.

На рис. 4 представлены результаты расчетов в виде  $t, Q$ -диаграммы теплообменников (подогревателей-испарителей-пароперегревателей) одно- (кривые 1 и 2) и двухкаскадного (кривые 3–5) энергокомплексов, предназначенных для утилизации тепла однофазного геотермального теплоносителя температурой 70°C с использованием в качестве рабочего тела в обоих каскадах низко-токсичного пожаро- и взрывоопасного вещества R601a. Установлено, что в данном случае применение двухкаскадной схемы при температуре гео-



**Рис. 5.**  $t, Q$ -диаграмма теплообменников одно- (кривые 1 и 2) и трехкаскадной (кривые 3–5) схемы утилизации тепла однофазного геотермального теплоносителя температурой 70°C с использованием вещества R601a в качестве рабочего тела в трех каскадах.

1 – геотермальный теплоноситель температурой 120°C в однокаскадной схеме; 2 – R601a в однокаскадной схеме; 3 – геотермальный теплоноситель температурой 70°C в трехкаскадной схеме; 4, 5, 6 – R601a в первом, втором и третьем каскаде соответственно

термального теплоносителя 70°C, по сравнению с однокаскадной схемой с теплоносителем, имеющим температуру 120°C, позволяет увеличить количество передаваемого тепла от исходного геотермального теплоносителя в бинарный контур на 140% и снизить температуру геотермального флюида на выходе из энергокомплекса с 67 до 49°C. Прирост передаваемого количества тепла в двухкаскадном бинарном энергокомплексе показан на рис. 4 отрезком  $\Delta Q$ .

Применение трехкаскадной схемы, по сравнению с традиционной однокаскадной, дает возможность в большей степени увеличить приращение передаваемого количества тепла от геотермального теплоносителя к рабочему телу. На рис. 5 представлена расчетная  $t, Q$ -диаграмма теплообменников однокаскадного (кривые 1 и 2) и трехкаскадного (кривые 3–6) энергокомплексов утилизации тепла однофазного геотермального теплоносителя с температурой 70 и 120°C при использовании в качестве рабочего тела в трех каскадах вещества R601a.

Трехкаскадная схема при температуре геотермального теплоносителя 70°C позволяет увеличить количество геотермального тепла, передаваемого в бинарный цикл, на 166% по сравнению с

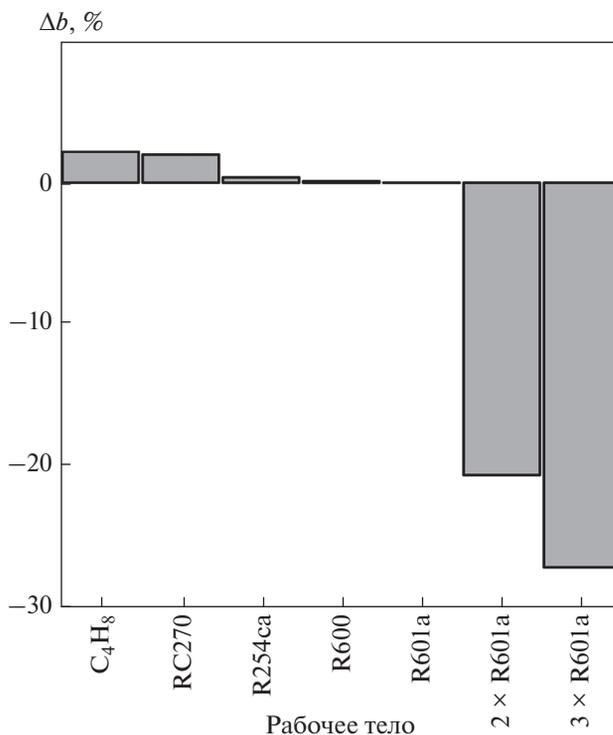
однокаскадной схемой с геотермальным теплоносителем температурой 120°C. При этом температура геотермального теплоносителя на выходе из трехкаскадного энергокомплекса по сравнению с однокаскадным бинарным энергоблоком уменьшается с 67 до 47°C, что существенно снижает тепловое загрязнение окружающей среды.

Анализ полученных результатов и ранее выполненных комплексных исследований параметров, влияющих на эффективность утилизации геотермального теплоносителя [1, 2], показал, что с повышением температуры исходного геотермального теплоносителя эффективность передачи тепла в бинарный цикл мультикаскадных энергокомплексов снижается. Для сравнения, при начальной температуре исходного геотермального теплоносителя 120°C применение двухкаскадной схемы позволяет увеличить количество тепла, передаваемого в бинарный цикл, на 37% по сравнению с однокаскадной, а при 180°C – только на 15%. Аналогичная тенденция снижения прироста количества тепла сохраняется и при использовании трехкаскадной схемы.

#### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ЕГО УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД И МОЩНОСТЬ МУЛЬТИКАСКАДНЫХ БИНАРНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

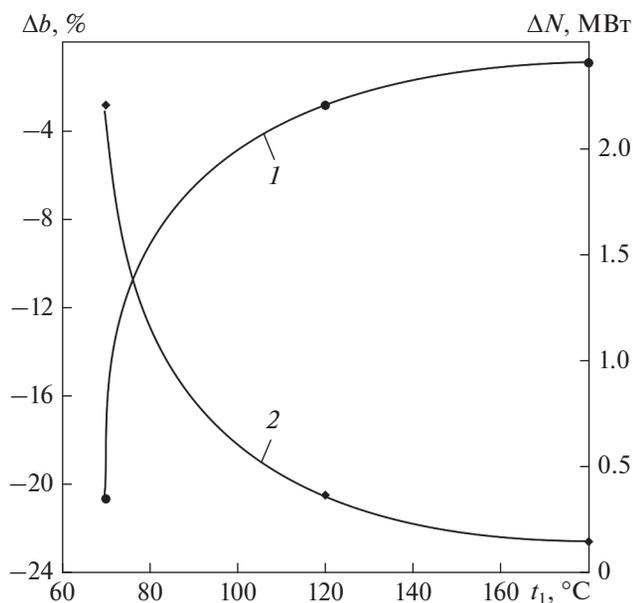
Одна из основных технических характеристик геотермальных энергоблоков, определяющих эффективность использования первичного источника тепла, – удельный расход геотермального теплоносителя на единицу вырабатываемой мощности. При выполнении расчетных исследований была проведена оценка изменения удельного расхода геотермального теплоносителя при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока к двух- и трехкаскадным бинарным энергокомплексам. При этом для сравнения предварительно определялся и принимался в качестве базового однокаскадный бинарный энергоблок с наиболее эффективным рабочим телом, применение которого позволяет максимально снизить удельный расход геотермального теплоносителя.

На рис. 6 представлена гистограмма расчетных значений изменения удельного расхода (нетто) исходного геотермального теплоносителя температурой 70°C при использовании в качестве рабочего тела в мультикаскадных бинарных энергокомплексах различных органических низкоокисных, пожаро- и взрывобезопасных веществ. Примененные двух- и трехкаскадные схем с хладагентом R601a в качестве рабочего тела в контурах обеспечивает снижение удельного расхода геотермального теплоносителя температурой 70°C. В данном случае базовым был определен однокаскадный бинарный энергоблок с рабочим телом R601a.

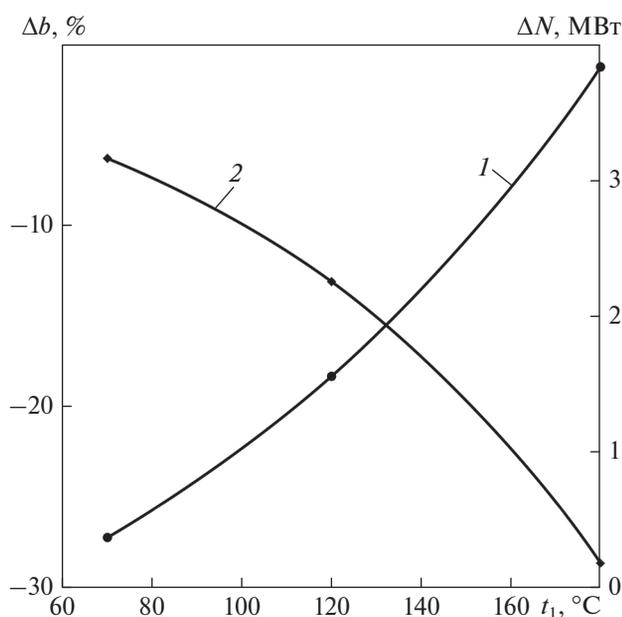


**Рис. 6.** Гистограмма расчетных значений изменения удельного расхода (нетто)  $\Delta b$  исходного геотермального теплоносителя температурой 70°C при использовании различных органических низкоокисных, пожаро- и взрывобезопасных веществ в качестве рабочего тела в мультикаскадных бинарных энергокомплексах. 2×R601a – изопентан использован в качестве рабочего тела в и в первом, и во втором каскаде двухкаскадной схемы; 3×R601a – изопентан использован в каждом каскаде трехкаскадной схемы

Анализ полученных ранее [1, 2] и представленных в данной работе результатов расчетных исследований при температурах геотермального теплоносителя 70, 120 и 180°C показывает, что наибольшее снижение удельного расхода (нетто) при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока к двухкаскадному при использовании эффективного рабочего тела R601a почти на 21% достигается при температуре геотермального теплоносителя 70°C (рис. 7). При температуре исходного геотермального теплоносителя 120°C при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока (рабочее тело R143a) к двухкаскадному (рабочее тело R32) снижение удельного расхода теплоносителя составит около 3%. Наименьший эффект снижения удельного расхода (нетто) при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока (эффективное рабочее тела R600a) к двухкаскадному бинарному энергоблоку (рабочее тело в первом контуре R600a, во втором – R143a), составляющий около 1.0%, отмечается при температуре геотермального теплоносителя 180°C.



**Рис. 7.** Зависимость расчетных значений изменения удельного расхода (нетто)  $\Delta b$  (кривая 1) и мощности (нетто)  $\Delta N$  (кривая 2) двухкаскадного бинарного энергокомплекса от температуры исходного геотермального однофазного теплоносителя  $t_1$  по сравнению с однокаскадным бинарным энергоблоком



**Рис. 8.** Зависимость расчетных значений изменения удельного расхода (нетто)  $\Delta b$  (кривая 1) и мощности (нетто)  $\Delta N$  (кривая 2) трехкаскадного бинарного энергокомплекса от температуры исходного геотермального однофазного теплоносителя  $t_1$  по сравнению с однокаскадным бинарным энергоблоком

Аналогичная тенденция наблюдается при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока к трехкаскадному бинарному энергокомплексу. Наибольшее расчетное значение снижения удельного расхода (нетто) геотермального теплоносителя температурой  $70^\circ\text{C}$ , превышающее 27%, достигается при использовании в качестве рабочего тела R601a во всех контурах трехкаскадного бинарного энергокомплекса (рис. 8). В данном случае сравнение выполнено для базового однокаскадного бинарного энергоблока с этим же рабочим телом.

При температуре исходного геотермального теплоносителя  $120^\circ\text{C}$  снижение его удельного расхода (нетто) в трехкаскадном бинарном энергокомплексе с рабочим телом R600 во всех контурах составило более 18%. В качестве базового был принят однокаскадный бинарный энергоблок, в котором используется то же рабочее тело R600.

Наименьшее расчетное значение снижения удельного расхода (нетто) (около 1%) при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока к трехкаскадному бинарному энергокомплексу отмечается для исходного геотермального теплоносителя температурой  $180^\circ\text{C}$  при использовании в качестве рабочего тела в первом и втором контурах R601a, в третьем — R143a. Базовым энергоблоком был принят однокаскадный бинарный, в котором применяется рабочее тело R600a.

Таким образом, наиболее выгодным в отношении минимизации удельного расхода (нетто) геотермального теплоносителя является переход от однокаскадного бинарного энергоблока к мультикаскадному бинарному энергокомплексу при низких значениях его (теплоносителя) температуры. Причем большее снижение его удельного расхода (нетто) достигается в трехкаскадном бинарном энергокомплексе. Уменьшение удельного расхода геотермального теплоносителя способствует продлению срока эксплуатации геотермального месторождения.

Авторами данной работы был выполнен анализ результатов расчетных исследований влияния перехода от однокаскадного бинарного энергоблока к мультикаскадному бинарному энергокомплексу установленной мощности (нетто) при различных температурах исходного геотермального теплоносителя  $70, 120$  [2] и  $180^\circ\text{C}$  [1]. Было определено, что при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока мощностью  $10.0$  МВт к двухкаскадному бинарному энергокомплексу мощность (нетто) энергоустановки увеличивается на  $2.3$  МВт (т.е. на 23%) при температуре исходного геотермального теплоносителя  $70^\circ\text{C}$ , на  $0.35$  МВт — при  $120^\circ\text{C}$  и на  $0.17$  МВт — при  $180^\circ\text{C}$  (см. рис. 7), а при переходе к трехкаскадному бинарному энергокомплексу — на  $3.15$  МВт при  $70^\circ\text{C}$  и на  $2.2$  МВт при  $120^\circ\text{C}$  (см. рис. 8). Наименьший прирост мощности (нетто), равный  $0.18$  МВт, наблюдается

при переходе к трехкаскадному бинарному энергокомплексу при температуре исходного геотермального теплоносителя 180°C.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ И ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Предварительная оценка влияния применения мультикаскадных бинарных энергокомплексов по сравнению с однокаскадными на капитальные затраты на сооружение ГеоЭС и выработку ими электроэнергии проводилась с учетом тенденций изменения стоимостных показателей, приведенных в [12]. По этим данным удельная стоимость работ по бурению и обустройству скважин составляет ориентировочно 100.5 тыс. дол. США за 1.0 дм<sup>3</sup>/с производимого геотермального теплоносителя. При этом стоимость 1 кВт установленной мощности однокаскадного бинарного энергоблока равняется 3500 дол., двухкаскадного бинарного энергокомплекса – 4200 дол., а трехкаскадного может быть оценена в 4700 дол.

С учетом сказанного при температуре исходного геотермального теплоносителя 70°C капиталовложения (с учетом работ по бурению и обустройству скважин, а также стоимости энергетического оборудования) в сооружение ГеоЭС с однокаскадным бинарным энергоблоком на рабочем теле R601a (мощностью брутто 9.0 МВт) составят 370 млн дол., с двухкаскадным бинарным энергокомплексом на том же рабочем теле (мощностью брутто 11.4 МВт) – 387 млн дол., а с трехкаскадным бинарным энергокомплексом с тем же рабочим телом (мощностью брутто 12.4 МВт) – 397 млн дол. Таким образом, капитальные затраты на сооружение ГеоЭС (с учетом всех дополнительных затрат) при использовании двухкаскадного бинарного энергокомплекса возрастут на 4.4% по сравнению с однокаскадным, выработка электроэнергии увеличится более чем на 26%.

Строительство геотермальной электростанции с трехкаскадным бинарным энергокомплексом приведет к росту капиталовложений, по сравнению с однокаскадным энергоблоком, примерно на 7%, а выработка электроэнергии увеличится на 37%. Из этого следует, что при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока к двух- или трехкаскадному бинарному энергокомплексу срок окупаемости проекта по сооружению ГеоЭС не увеличится.

Нужно отметить, что проведенные расчеты отражают укрупненную предварительную оценку, позволяющую качественно судить о возможной целесообразности применения мультикаскадных бинарных энергокомплексов в геотермальной энергетике. Безусловно, для определения экономической эффективности конкретного проекта ГеоЭС

с мультикаскадными бинарными энергокомплексами потребуются более детальный расчет, в котором будут учитываться условия залегания подземных вод, сложности проведения буровых и строительных работ, а также качество геотермального теплоносителя, доступность холодного источника, структура финансирования и др.

### ВЫВОДЫ

1. Расчетные исследования показывают, что переход от однокаскадного бинарного энергоблока мощностью 10 МВт к двух- и трехкаскадным бинарным энергокомплексам позволяет повысить эффективность использования тепла геотермального теплоносителя, особенно при утилизации низкотемпературных геотермальных источников. Так, при переходе от однокаскадного бинарного энергоблока к двухкаскадному бинарному энергокомплексу наибольшее снижение удельного расхода (нетто) геотермального теплоносителя – на 21% достигается при его температуре 70°C, на 3% при 120°C и на 1% при 180°C. Трехкаскадный бинарный энергокомплекс, по сравнению с однокаскадным, дает возможность снизить удельный расход теплоносителя на 27% при его температуре 70°C, на 18% при 120°C и на 1% при 180°C.

2. Использование двухкаскадной схемы с геотермальным теплоносителем температурой 70°C вместо однокаскадной схемы с теплоносителем температурой 120°C позволяет увеличить количество передаваемого в бинарный контур тепла на 140% и снизить температуру геотермального флюида на выходе из энергокомплекса с 67 до 49°C, а применение трехкаскадной схемы при температуре геотермального теплоносителя 70°C – увеличить количество геотермального тепла, передаваемого в бинарный цикл, на 166% и снизить температуру геотермального флюида на выходе из энергокомплекса с 67 до 47°C.

3. Наибольший прирост мощности (нетто) при использовании двухкаскадного бинарного энергокомплекса вместо однокаскадного мощностью 10 МВт составляет 2.3 МВт при температуре исходного геотермального теплоносителя 70°C, а при применении трехкаскадного бинарного энергокомплекса – 3.15 МВт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация высокотемпературного теплоносителя (180°C) // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 31–40. <https://doi.org/10.1134/S0040363622030109>
2. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация среднетемпературного теплоносителя (120°C) //

- Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 49–57.  
<https://doi.org/10.1134/S004036362205006X>
3. **Huttner G.W.** Geothermal power generation in the World 2015–2020 update report // Proc. of the World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland, 26 April–2 May 2020.
  4. **2021** U.S. geothermal power production and district heating market report / J.C. Robins, A. Kolker, F. Flores-Espino, W. Pettitt, B. Schmidt, K. Beckers, H. Pauling, B. Anderson. National Renewable Energy Laboratory, 2021.
  5. **Фортв В.Е., Попель О.С.** Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–16.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363614060022>
  6. **2020** International conference on energy science and engineering thermophysics // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Changchun, China, 21–23 Aug. 2020.
  7. **Повышение** эффективности использования геотермальных ресурсов на основе применения комбинированного энергоблока с бинарной установкой на сбросном сепарате Мутновской ГеоЭС / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, А.И. Никольский, В.Н. Семенов // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 31–35.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363615120115>
  8. **Thermo-economic** analysis and optimization selection of ORC system configurations for low temperature binary-cycle geothermal plant / X. Liu, M. Wei, L. Yang, X. Wang // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 125. P. 153–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.016>
  9. **Shokati N., Ranjbar F., Yari M.** Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study // Renewable Energy. 2015. V. 83. P. 527–542.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.069>
  10. **Nami H., Nemati A., Fard F.J.** Conventional and advanced exergy analyses of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC) // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 122. P. 59–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.011>
  11. **Zhang Y., Gong L., Hung T.C.** Innovative arrangements of multiple organic Rankine cycles to effectively generate power from the medium-to-low grade of heat source // Appl. Therm. Eng. 2021. V. 193. 116960.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116960>
  12. **Geothermal** binary power plants. Preliminary study of low temperature utilization, cost estimates and energy cost. Reykjavik: Verkis Consulting Engineers, 2014.

## Results from Optimization Studies of Multistage Binary Cycles for Utilization of Low-Temperature Geothermal Heat Carrier

**G. V. Tomarov<sup>a, \*</sup> and A. A. Shipkov<sup>a, \*</sup>**

<sup>a</sup> *OOO Geoterm-M, Moscow, 111250 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: geotom.m@gmail.com*

**Abstract**—The creation of efficient technologies for converting low-temperature heat into electricity using binary power units operating on the organic Rankine cycle is an urgent problem of modern energy. Interest in these technologies is steadily growing since they make it possible to utilize the heat of waste coolant in various industries and geothermal power plants (GeoPPs). Currently, low-temperature resources, which are widespread throughout the world, are increasingly used as sources of geothermal coolant for generating electrical energy. One of the ways to increase the efficiency of binary technologies can be the use of multicascade binary energy complexes, which are several binary circuits connected in series. Due to the possibility of optimal selection of the working fluid in each circuit, the highest efficiency of an individual cascade and the energy complex as a whole is ensured. Preliminary estimates showed that the additional power that can be obtained by adding a new cascade decreases as the number of cascades increases. Optimization calculations were limited to comparing two- and three-stage binary power complexes with a single-stage binary power unit. The results of studies into the influence of the choice of an organic working fluid and the temperature of a geothermal coolant on the technical and economic characteristics of multicascade binary energy complexes with the utilization of a geothermal coolant with a temperature of 70°C are presented. It has been established that the efficiency of heat transfer to the binary cycle of multicascade energy complexes decreases with an increase in the temperature of the initial geothermal coolant. It is shown that the greatest decrease in the specific consumption of the geothermal coolant and the simultaneous increase in power during the transition from a single-stage power unit to two- and three-stage power complexes are achieved at low values of its temperature.

**Keywords:** multicascade binary energy complex, binary power unit, binary energy technologies, binary cycle, power plant, organic working fluid, geothermal coolant, power, specific consumption