

УДК 658.261:621.56

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

В. П. КЛЮЧИНСКИЙ, А. В. ОВСЯННИК

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Создана программа для проведения термодинамического анализа и оптимизации схем тригенерации на органическом цикле Ренкина. Разработана методика для проведения технико-экономического анализа тригенерационных установок. Произведен эксергетический и технико-экономический анализ схем тригенерации. В качестве рабочих тел использованы вода, R410A, изобутан, углекислота. Установлены экономически оптимальные параметры рабочего тела для органического цикла Ренкина. Проведен сравнительный анализ двух вариантов получения холода и диоксида углерода: раздельное (парокомпрессионная холодильная установка для производства холода и углекислотная установка для производства диоксида углерода) и совместное (разработанная установка по производству диоксида углерода и холода). Получены значения статических и динамических сроков окупаемости, внутренней нормы доходности различных вариантов тригенерационных установок.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, тригенерация, эксергетический анализ, экономический анализ, повышение эффективности, низкокипящее рабочее тело, оптимизация, производство углекислоты, эксергетический КПД, снижение выбросов диоксида углерода, хладагент, сверхкритические параметры.

THERMODYNAMIC AND TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF TRIGENERATION PLANTS ON THE RANKINE ORGANIC CYCLE

V. P. KLUCHINSKY, A. V. OVSYANNIK

Educational Institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus

Program has been created for thermodynamic analysis and optimization of trigeneration schemes on the organic Rankin cycle. The methodology for technical and economic analysis of trigeneration plants has been developed. Exergetic and technical-economic analysis of trigeneration schemes was carried out. Water, R410A, isobutane, carbon dioxide were used like working bodies. Economically optimal parameters of the working medium for the Rankin organic cycle have been established. A comparative analysis of two options for the production of cold and carbon dioxide was carried out: separate (steam compression refrigeration plant for the production of cold and carbon dioxide plant for the production of carbon dioxide) and joint (developed plant for the production of carbon dioxide and cold). Values of static and dynamic payback periods, internal rate of return of various variants of trigeneration plants were obtained.

Keywords: Rankin organic cycle, trigeneration, exergetic analysis, economic analysis, efficiency improvement, low-boiling working medium, optimization, carbon dioxide production, exergetic efficiency, reduction of carbon dioxide emissions, refrigerant, supercritical parameters.

Введение

Перспективным методом повышения эффективности генерации различных видов энергии является тригенерация. Централизованное хладоснабжение при тригенерации энергии, согласно [1], приводит к повышению энергоэффективности установок и снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду. Наибольшее распро-

странение получили тригенерационные установки на базе парогазовых установок [2] с применением абсорбционных холодильных машин и парокомпрессионных теплонасосных установок. Другой разновидностью тригенерации стали установки с детандер-генераторными агрегатами [3], использующие для охлаждения холодный природный газ после его расширения в детандере.

В литературе по изучению схем тригенерации мало внимания уделено органическому циклу Ренкина (ОЦР), который находит свое применение в альтернативной энергетике [3]. Использование в рамках тригенерации органического цикла Ренкина (ОЦР) (рис. 1) позволяет повышать эффективность альтернативной энергетике, что в конечном итоге положительно сказывается на экологической безопасности возобновляемых способов получения энергии.

Отличительной особенностью ОЦР (от классического цикла Ренкина) является возможность довольно эффективной его работы при низких температурах рабочего тела (100–300 °С и менее). В настоящее время схемы ОЦР установок представляют собой довольно простую конструкцию, работающую на субкритических параметрах низкокипящего рабочего тела (НКРТ).

Выбор рабочего тела для ОЦР является сложной многокритериальной задачей. Согласно [4], рабочие тела должны соответствовать следующим физиологическим и физико-химическим критериям: быть безопасными для человека и окружающей среды, обладать низкой температурой кипения, приемлемым давлением в конденсаторе, высокой теплотой парообразования, высокой теплопроводностью и теплоотдачей, высокой критической температурой, химической стойкостью, взрывобезопасностью и негорючестью и т. д. Однако помимо вышеперечисленных критериев немаловажную роль играют такие факторы, как стоимость и эффективность рабочего тела [5]. Рабочих тел, отвечающих всем представленным требованиям, не существует.

Цель работы – провести термодинамический и технико-экономический анализ схем тригенерации на ОЦР.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основании современных представлений о тригенерации разработать схемы тригенерационных турбоустановок на ОЦР.
2. Выбрать наиболее подходящий метод термодинамического анализа схем тригенерации.
3. Создать программу для термодинамического анализа схем тригенерации и провести анализ предложенных схем тригенерационных турбоустановок.
4. Разработать методику экономического анализа схем тригенерации на ОЦР и провести экономический анализ предложенных схем тригенерационных установок.

Основная часть

Схемы тригенерационных установок

На основании современных представлений о тригенерации для анализа предложены схемы тригенерационных установок, включающие в качестве источников энергии газотурбинную установку, котел-утилизатор на вторичных тепловых энергетических ресурсах, котлоагрегат; для подогрева теплоносителя – газовойдяной теплообменный аппарат (ТО); для производства электрической энергии – турбоустановку на водяном паре (классический цикл Ренкина (КЦР)), турбоустановку на ОЦР; для производства холода – установку по производству диоксида углерода и холода и парокомпрессионную холодильную установку (ПКХУ). Пример такой схемы представлен на рис. 1.

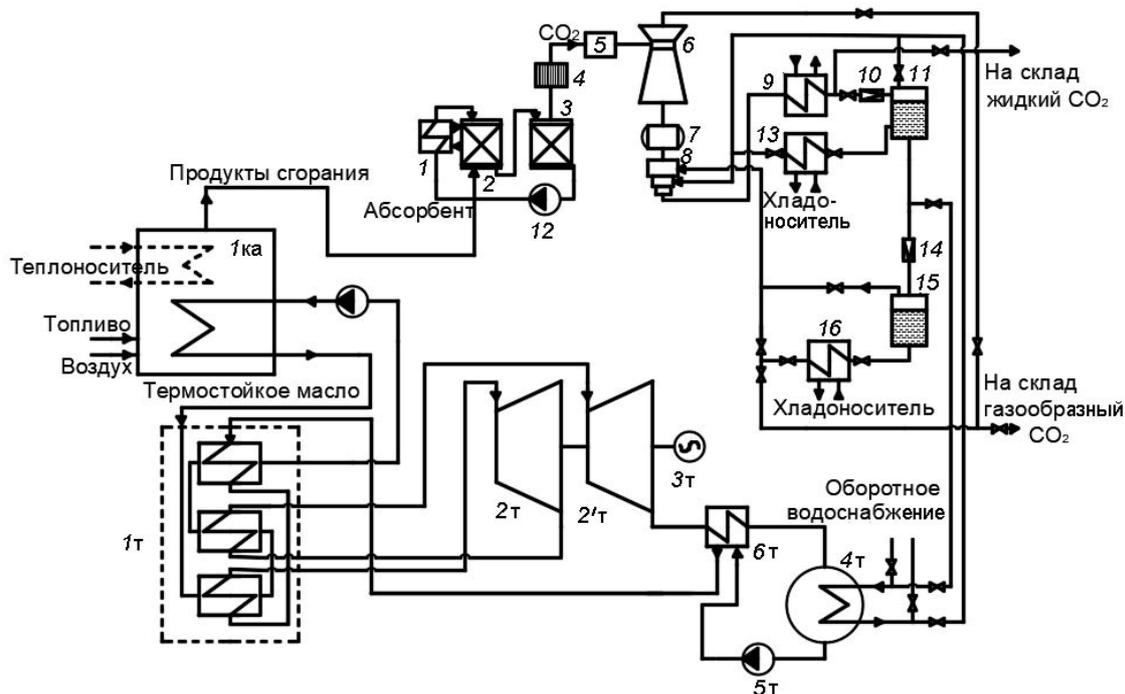


Рис. 1. Схема тригенерационной установки на ОЦР

На рис. 1 приведены следующие элементы: 1ка – котлоагрегат (КА); 1т – теплообменный аппарат; 2т и 2'т – соответственно цилиндр высокого и низкого давления турбины; 3т – турбогенератор; 4т – конденсатор; 5т – насос; 6т – регенеративный ТО; 1 – ТО; 2 – абсорбер (происходит поглощение диоксида углерода моноэтаноламином); 3 – десорбер (происходит выделение диоксид углерода из моноэтаноламина); 4 и 5 – соответственно отделитель брызг диоксида углерода и его осушитель; 6 – инжектор; 7 – сборный бак; 8 – углекислотный компрессор; 9 – конденсатор холодильной установки; 10, 14 – дросселирующее устройство; 11, 15 – отделитель паров НКРТ; 12 – насос моноэтаноламина; 13, 16 – испарители двух температурных уровней.

Методы термодинамического анализа

Наиболее распространенными методами термодинамического анализа, согласно [6], являются метод тепловых балансов, эксергетический метод и энтропийный метод. Обзор методов термодинамического анализа представлен в таблице, из которой следует, что наиболее подходящим является метод эксергетического анализа, позволяющий определять эффективность отдельных элементов установки и учитывать ценность различных видов энергии.

Обзор методов термодинамического анализа

Метод тепловых балансов	Эксергетический метод	Энтропийный метод
Определяется термический КПД	Определяется эксергетический КПД	Определяется эксергетический КПД
В основе лежит первый закон термодинамики	Учитывает второй закон термодинамики	Основывается на рассмотрении только эксергии теплового потока
Не учитывает различное качество энергии	Ценность энергии зависит от окружающей среды	Невозможно определение КПД отдельных элементов. Отсутствует качественная оценка потерь

Программа для термодинамического анализа схем тригенерации

Для проведения термодинамического расчета и последующего анализа схем тригенерации с учетом проведенных исследований и разработанных математических моделей элементов схемы [3], [7], базирующихся на методе эксергетического анализа [8], создана программа (рис. 2), позволяющая рассчитывать все предложенные схемы тригенерационных установок, выбирать различные НКРТ для ОЦР и ПКХУ, определять эксергетически оптимальные параметры НКРТ.

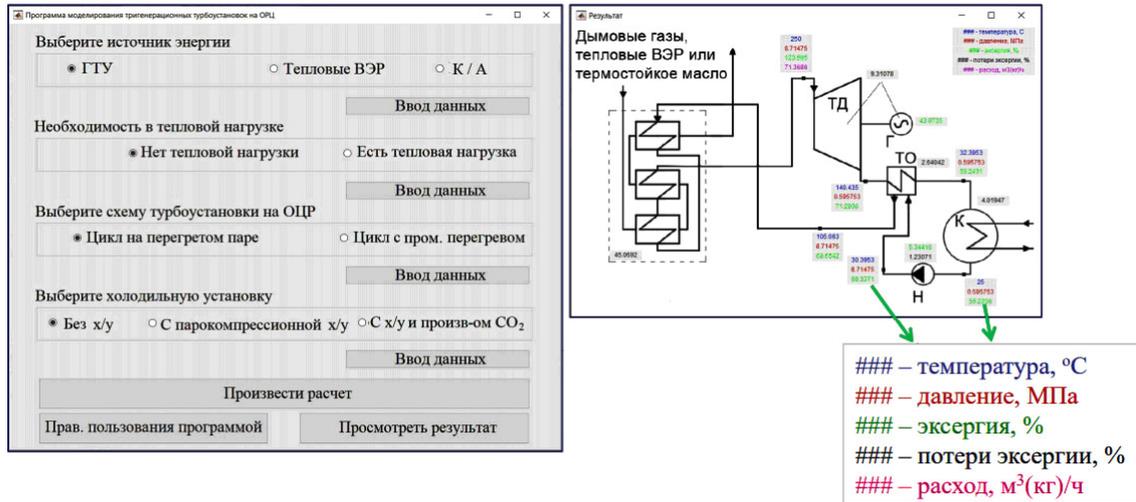


Рис. 2. Программа для эксергетического анализа тригенерационных турбоустановок

Условия термодинамического и технико-экономического анализа

Для термодинамического и технико-экономического анализа необходимы следующие условия: температура окружающей среды – 288 К; атмосферное давление – 101,325 кПа; количество тепла, получаемого с топливом и ВЭР ГТУ, КА либо котла-утилизатора, – 9940 кВт; необходимое количество тепловой энергии – 1000 кВт; температура теплоносителя (выход/вход) – 423/343 К; количество холода (уровень 1) – 200 кВт; количество холода (уровень 2) – 300 кВт; температура холода (уровень 1) – 277 К; температура холода (уровень 2) – 255 К; количество вырабатываемой жидкой углекислоты – 0,19 т/ч; количество вырабатываемой газообразной углекислоты – 0,38 т/ч. В качестве рабочих тел использовались R410A, изобутан, диоксид углерода и как альтернатива ОЦР – вода.

Термодинамический анализ тригенерационных турбоустановок на органическом цикле Ренкина

При помощи разработанной программы произведен расчет схем тригенерационных турбоустановок на ОЦР. Результаты расчета представлены на рис. 3 с использованием следующих сокращений: ОЦР(R410A) на ПП* – ОЦР на перегретом паре с субкритическими параметрами, в скобках указано НКРТ; ОЦР(R410A) на ПП – ОЦР на сверхкритических, термодинамически оптимальных параметрах; ОЦР(R410A) с ПрП – ОЦР с промежуточным перегревом; ХУ – используемая для получения холода установка; Б/О или С/О – соответственно охлаждение конденсатора ОЦР оборотной водой или охлаждение конденсатора ОЦР НКРТ.

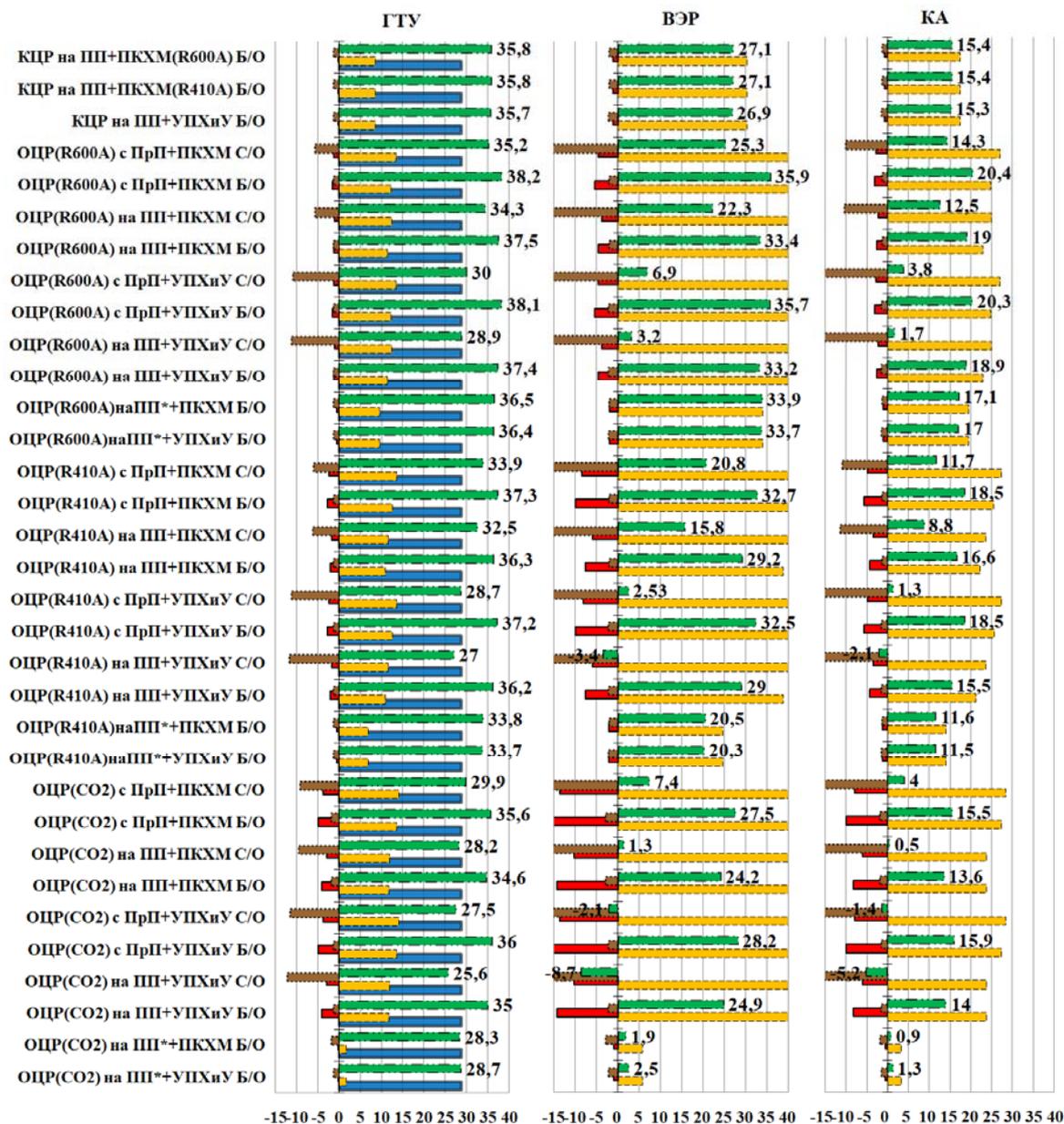


Рис. 3. Эксергетический баланс вырабатываемого и потребляемого в тригенерационной установке электричества, %:

- – эксергия вырабатываемого в тригенерационной установке электричества;
- – эксергия вырабатываемого в ОЦР/КЦР электричества;
- – эксергия вырабатываемого в ГТУ электричества;
- – эксергия потребляемого насосом ОЦР/КЦР электричества;
- – эксергия потребляемого холодильной установкой электричества

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что применение предложенных в [3], [7] методов повышения эффективности ОРЦ (повышение параметров рабочего тела и использование промежуточного перегрева) положительно сказывается на эффективности всей тригенерационной установки, а схемы с ОЦР становятся более эффективными, чем схемы с КЦР.

Охлаждение конденсатора ОЦР НКРТ дает дополнительный прирост вырабатываемого в ОЦР электричества, однако увеличиваются затраты электричества в холодильном цикле, что в целом отрицательно сказывается на эффективности всей

тригенерационной установки. В результате затраты на охлаждение конденсатора ОЦР НКРТ меньше для схем с промежуточным перегревом и для схем с ГТУ (уменьшается количество циркулирующего в ОЦР НКРТ).

Также установлено, что эксергетическая эффективность цикла с КА ниже, чем с ГТУ.

Методика технико-экономического анализа тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина

Для технико-экономического анализа ОЦР и созданных на его основе схем тригенерации необходимо определить следующие экономические показатели: статический и динамический сроки окупаемости, а также внутреннюю норму доходности.

Для определения данных показателей следует найти стоимость установки (капиталовложения). Для вычисления стоимости ОЦР на сверхкритических параметрах и (или) с промежуточным перегревом предложена формула

$$S_y^{\text{ORC}^*} = S_y^{\text{ORC}}(1 - k^v) + S_y^{\text{ORC}}(1 - k^v) \times \\ \times \left(1 + (t^{\text{ORC}} - t_0^{\text{ORC}})k^t + (p^{\text{ORC}} - p_0^{\text{ORC}})k^p + k^{pp} \right),$$

где k^v – коэффициент, учитывающий стоимость вспомогательного оборудования (оборудование, стоимость которого не зависит от повышения параметров рабочего тела и использования промежуточного перегрева); t^{ORC} – температура рабочего тела в ОЦР на сверхкритических параметрах; t_0^{ORC} – температура рабочего тела в классическом ОЦР; k^t – коэффициент влияния температуры на стоимость ОЦР, принимаем $k^t = 0,0005$ ед./К; p^{ORC} – давление рабочего тела в ОЦР на сверхкритических параметрах; p_0^{ORC} – давление рабочего тела в классическом ОЦР; k^p – коэффициент влияния промежуточного перегрева на стоимость ОЦР, принимаем $k^p = 1,5 \cdot 10^{-5}$ ед./кПа [8]; k^{pp} – коэффициент влияния давления на стоимость ОЦР, принимаем $k^{pp} = 0,06$ ед.

Сложность также вызывает расчет стоимости установки по производству диоксида углерода и холода, которую можно представить как стоимость углекислотной установки и стоимость дополнительных элементов:

$$S^{\text{XиY}} = S_b^y + \left(\left(\sum_{j=1}^m s_{yj}^{\text{XиY}} P_j^{\text{XиY}} - s_{yj}^y P_j^y \right) + S_d^{\text{XиY}} \right) k_r^{\text{XиY}},$$

где S_b^y – стоимость углекислотной установки; $s_{yj}^{\text{XиY}}$ – удельная стоимость j -го элемента (конденсатор и т. д.) в установке для производства диоксида углерода и холода; $P_j^{\text{XиY}}$ – мощность j -го элемента (конденсатор и т. д.) в установке для производства диоксида углерода и холода; s_{yj}^y – удельная стоимость j -го элемента (конденсатор и т. д.) в установке для производства диоксида углерода; P_j^y – мощность j -го элемента (конденсатор и т. д.) в установке для производства диоксида углерода; $S_d^{\text{XиY}}$ – стоимость дополнительно устанавливаемого оборудования (испарители, дросселирующие устройства и т. д.) для одновременного производства диоксида углерода и холода; $k_r^{\text{XиY}}$ – коэффициент увеличения стоимости оборудования на пусконаладочные и другие работы.

Технико-экономический анализ схем тригенерационных установок

На первом этапе построены зависимости статического срока окупаемости ОЦР с котлоагрегатом (рис. 1) от давления рабочего тела (R410A) перед турбиной при различных температурах рабочего тела (250; 235; 220; 205 °С). Результаты расчета представлены на рис. 4, а. Полученные результаты свидетельствуют о том, что повышение температуры рабочего тела влечет не только повышение термодинамической эффективности ОЦР, но и положительно отражается на его экономической эффективности. Для каждой температуры рабочего тела существуют свои экономически оптимальные давления, которые совпадают с термодинамически оптимальными давлениями.

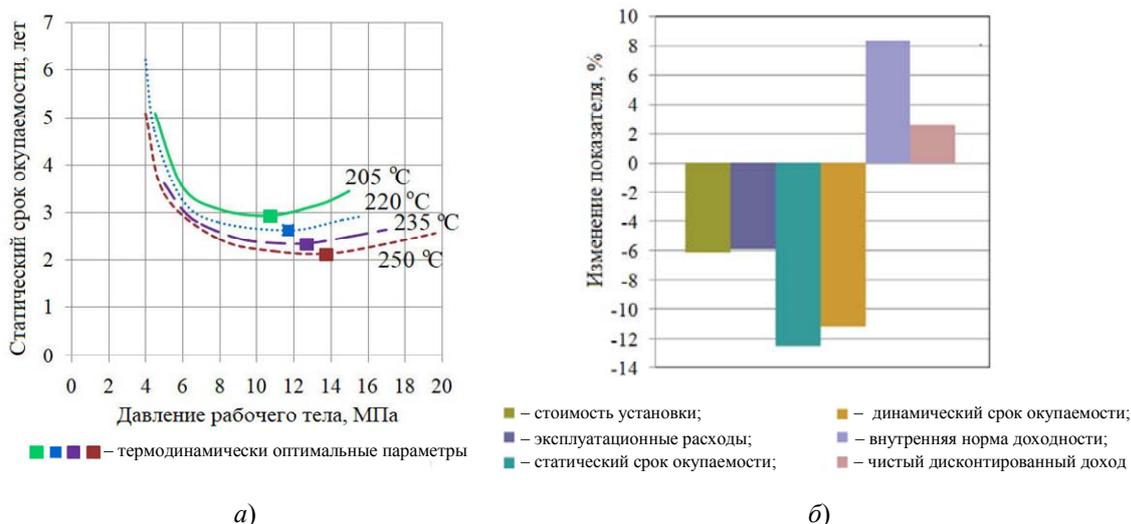


Рис. 4. Экономический анализ:
 а – влияние параметров рабочего тела на срок окупаемости ОЦР;
 б – при совместном производстве диоксида углерода и холода в одном аппарате

Результаты сравнительного анализа двух способов получения холода и диоксида углерода даны на рис. 4, б, из которого следует, что предложенная схема установки по совместному производству диоксида углерода и холода (УПДУиХ) обладает лучшими экономическими показателями (простой срок окупаемости снижается более чем на 12 %, динамический срок окупаемости снижается на 11 %, а внутренняя норма доходности увеличивается на 8 %).

Результаты расчетов экономических показателей исследуемых схем тригенерации представлены в виде гистограмм на рис. 5.

Проанализировав рис. 5, можно увидеть, что разработанная схема по совместному производству диоксида углерода и холода более экономически выгодна для всех схем тригенерационных установок.

Применение ОЦР на докритических параметрах в схемах тригенерации не всегда экономически целесообразно по сравнению с применением классического цикла Ренкина, так, например, для R410A срок окупаемости в два раза выше, чем для цикла Ренкина на воде, а срок окупаемости ОЦР на изобутане – на 6 % ниже.

Экономическая эффективность схем тригенерации на сверхкритических параметрах низкокипящего рабочего тела и с промежуточным перегревом для R410A и изобутана выше, чем схем тригенерации с классическим циклом Ренкина на субкритических параметрах.

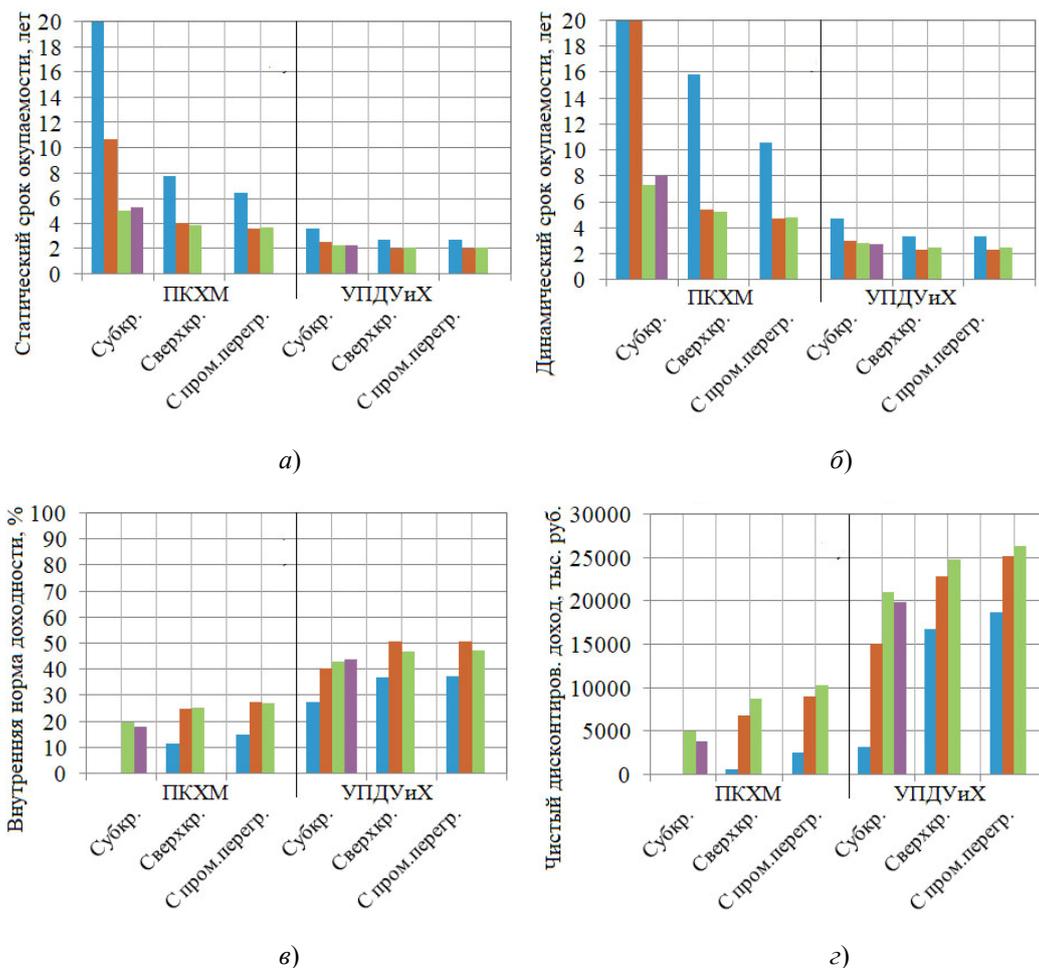


Рис. 5. Гистограммы экономических показателей схем тригенерации:
 а – статический срок окупаемости; б – динамический срок окупаемости;
 в – внутренняя норма доходности; г – чистый дисконтированный доход;
 ■ – диоксид углерода; ■ – R410A; ■ – изобутан; ■ – вода

Разработанные схемы тригенерационных установок на ОЦР с производством диоксида углерода позволяют повысить эффективность схем тригенерации (дополнительно выработать 21 % электрической энергии); снизить выбросы диоксида углерода в окружающую среду на 4243 т в год (за счет изъятия диоксида углерода из дымовых газов и его использования в технологических либо коммерческих целях), а также добиться более низкого срока окупаемости тригенерации (2,3 года против 8,0 лет для тригенерационных установок с классическим циклом Ренкина и парокомпрессионной холодильной установкой).

Заключение

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Централизованное хладоснабжение и тригенерация приводят к повышению эффективности генерации различных видов энергии, а следовательно, к снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду. В рамках тригенерации используются как классический, так и органический циклы Ренкина. Наибольшее распространение в литературе получил классический (водяной) цикл Ренкина, органический же представлен не столь широко. В настоящее время схемы ОЦР установок представляют собой довольно простую конструкцию, работающую на субкритических параметрах рабочего тела. Выбор рабочего тела для ОЦР является сложной

многокритериальной задачей. Рабочие тела должны соответствовать целому ряду критериев, а также обладать низкой стоимостью и высокой эффективностью. Рабочих тел, отвечающих всем представленным требованиям, нет. При выборе рабочих тел приходится искать компромиссные решения между экологическими, теплофизическими и экономическими факторами.

2. Наиболее подходящим для термодинамического анализа схем тригенерации является метод эксергетического анализа, позволяющий определять эффективность отдельных элементов установки и учитывать ценность различных видов энергии.

3. Разработаны схемы тригенерационных установок, дающие возможность получать электричество, холод, теплоту и диоксид углерода. Создана программа, рассчитывающая данные схемы тригенерации, термодинамический анализ которых позволяет сделать следующие выводы:

- применение предложенных методов повышения эффективности ОЦ (повышение параметров рабочего тела и использование промежуточного перегрева) положительно сказывается на эффективности всей тригенерационной установки, а схемы с ОЦР становятся более эффективными чем схемы с КЦР;

- охлаждение конденсатора ОЦР низкокипящим рабочим телом дает дополнительный прирост вырабатываемого в ОЦР электричества, однако увеличиваются затраты электричества в холодильном цикле, что в целом отрицательно сказывается на эффективности тригенерационной установки;

- затраты на охлаждение конденсатора ОЦР низкокипящим рабочим телом меньше для схем с промежуточным перегревом и для схем с ГТУ (уменьшается количество циркулирующего в ОЦР рабочего тела).

4. Для проведения технико-экономического анализа схем тригенерации разработана методика, учитывающая увеличение стоимости ОЦР за счет повышения температуры и давления рабочего тела перед турбиной и использования промежуточного перегрева, а также позволяющая вычислять стоимость установки по получению диоксида углерода и холода.

5. Установлено, что повышение температуры рабочего тела в ОЦР положительно отражается на его экономической эффективности. Для каждой температуры рабочего тела существуют свои экономически оптимальные давления, которые совпадают с термодинамически оптимальными давлениями.

6. Разработанная схема установки по совместному производству диоксида углерода и холода обладает лучшими экономическими показателями (простой срок окупаемости снижается более чем на 12 %, динамический срок окупаемости уменьшается на 11 %, а внутренняя норма доходности увеличивается на 8 %), чем ее альтернатива – раздельное получение диоксида углерода (в углекислотной установке) и холода (в пароконденсационной установке).

7. В результате технико-экономического анализа тригенерационных установок с котлоагрегатом установлено следующее:

- схема совместного производства диоксида углерода и холода более экономически выгодна независимо от схемы тригенерационной установки;

- применение ОЦР на докритических параметрах в схемах тригенерации не всегда экономически целесообразно по сравнению с применением классического цикла Ренкина, так, например, для R410A срок окупаемости в два раза выше, чем для цикла Ренкина на воде, а срок окупаемости ОЦР на изобутане – на 6 % ниже;

- экономическая эффективность схем тригенерации на сверхкритических параметрах низкокипящего рабочего тела и с промежуточным перегревом для R410A и изобутана выше, чем классического цикла Ренкина на субкритических параметрах.

8. Разработанные схемы тригенерационных установок на ОЦР с производством диоксида углерода позволяют повысить эффективность схем тригенерации (дополнительно выработать 21 % электрической энергии); снизить выбросы диоксида углерода в окружающую среду на 4243 т в год (за счет изъятия диоксида углерода из дымовых газов и его использования в технологических либо коммерческих целях); добиться более низкого срока окупаемости тригенерации (2,3 года против 8,0 лет для тригенерационных установок с классическим циклом Ренкина и пароконденсационной холодильной установкой).

Литература

1. Baumann, D. *Energiewirtschaftliche Bewertung der dezentralen Kraft–Warme–Kalt–Kopplung* : dis. / D. Baumann. – Dusseldorf : VDI-Verlag, 2004.
2. Клименко, А. В. Особенности комбинированного производства электроэнергии тепла и холода на базе парогазовой установки / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 11–15.
3. Trigeneration units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1683, № 042010.
4. Утилизация сбросной теплоты технологических процессов промышленного предприятия с целью выработки электроэнергии / А. Л. Шубенко [и др.] // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 7. – С. 23–29.
5. On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance / M. Z. Stijerovic [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2012. – Vol. 36. – P. 406–413.
6. Казаков, В. Г. Термодинамические методы анализа в энергоиспользующих процессах : учеб. пособие / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, О. С. Смирнова. – СПб. : ГТУРП, 2011. – 93 с.
7. Овсянник А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – № 6 (63). – С. 554–562.
8. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела ; под ред. В. М. Бродянского. – М. : Энергия, 1968. – 279 с.

Получено 30.03.2020 г.