

На правах рукописи



САДКИН ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ CO₂ ЦИКЛОВ
С КИСЛОРОДНЫМ СЖИГАНИЕМ МЕТАНА**

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Научный руководитель: Щинников Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Тепловых электрических станций, заведующий кафедрой, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Киндра Владимир Олегович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра Инновационных технологий наукоемких отраслей, доцент, г. Москва;

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, профессор, г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита диссертации состоится «28» апреля 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» февраля 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



Боруш Олеся Владимировна
д.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена задачами развития современной тепловой энергетики. К показателям экологичности и энергоэффективности технологий производства электроэнергии предъявляются всё более высокие требования. Получают развитие новые варианты глобальной технологической конкуренции, в которых продукция с высоким углеродным следом, низкой эффективностью или низкими требованиями к выбросу загрязняющих веществ облагается дополнительными налогами и пошлинами. Острота проблемы для России обуславливается ориентированностью энергетики страны на органическое топливо, зависимостью от мировых поставщиков передового оборудования и систем, а также имеющимися и возможными ограничениями на торговлю.

Одним из перспективных направлений развития энергетики на органическом топливе является создание новых кислородно-топливных энергетических установок на основе CO_2 циклов, где углекислый газ используется в качестве рабочего тела. Газообразное топливо сжигается в кислороде, а продукты сгорания являются рабочим телом, которое совершает работу в турбине. В этом случае не требуется применение систем улавливания CO_2 из продуктов сгорания, а его избыток может выводиться из цикла под рабочим давлением и сразу направляться трубопроводным транспортом к месту захоронения в подземном горизонте. Такое техническое решение позволяет практически до нуля снизить выбросы в атмосферу при производстве электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования. В научной литературе использование углекислого газа для нужд энергетики рассматривалось еще в прошлом веке в работах G. Angelino, E.G. Feher, Д.П. Гохштейна, Г.П. Верхивкера. Исследования кислородно-топливных энергетических циклов на углекислом газе и энергоустановок на их основе для производства электроэнергии в мире представлены работами R.J. Allam, J. Fetvedt, D. Freed (США, Великобритания); Е.И. Янтовского (СССР, Германия); E. Martelli, R. Scaccabarozzi (Италия); Z. Zhu, Y. Chen (Китай); исследованиями лаборатории NETL США (С.W. White, N.T. Weiland); австрийским университетом Граца (Н. Jericha, W. Sanz, E. Göttlich, M. Fesharaki); компаниями Net Power, 8 River Capital, Toshiba; в России – работами МЭИ (А.Н. Рогалев, И.И. Комаров, В.О. Киндра); ОИВТ РАН (О.С. Попель, А.С. Косой, Ю.А. Зейгарник).

Вместе с тем обращает на себя внимание разрозненность исследований. Из-за отсутствия масштабной практической реализации значительные

расхождения наблюдаются как при оценке термодинамической и энергетической эффективности установок на основе CO_2 циклов, так и при оценке капиталовложений. В частности, это подтверждается высокой долей дискуссионных и зачастую фрагментарных конференционных материалов в общем числе публикаций. Следовательно, разработка методов термодинамического, энергетического и технико-экономического анализа для установок подобного типа, позволяющих с единых позиций вести сравнение разных вариантов кислородно-топливных CO_2 циклов как между собой, так и с другими известными техническими решениями – актуальна.

Исследование отвечает приоритетному направлению развития науки, технологии и техники РФ: п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика», а также направлению Н2 стратегии научно-технического развития России «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии».

Исследование соответствует паспорту научной специальности 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы», направлениям исследования п. 1, а именно: разработка методов расчета, алгоритмов выбора параметров, показателей качества энергетических установок на органическом топливе в целом и их основного и вспомогательного оборудования; п. 2, а именно: математическое моделирование, численные исследования рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом топливе, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии; п. 3, а именно: разработка, исследование новых технологий для производства электрической энергии, использования органического топлива, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду; п. 7, а именно: исследование влияния технических решений, принимаемых при создании энергетических установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели.

Целью диссертационной работы является определение комплекса показателей эффективности установок на основе кислородно-топливных CO_2 циклов различных конфигураций с использованием в качестве рабочего тела сверхкритического диоксида углерода.

Задачи исследования:

1. Разработка методов термодинамического, энергетического и технико-экономического анализа установок на основе CO_2 циклов разных конфигураций.

2. Анализ влияния параметров рабочего тела в ключевых точках циклов на их термодинамическую эффективность, в том числе с учетом доли обновления рабочего тела и интеграции низкопотенциальных потоков вспомогательных систем.

3. Анализ КПД выработки и отпуска электроэнергии, удельных расходов топлива установками, структуры собственных нужд с установлением поагрегатных зависимостей энергопотребления от термодинамических параметров циклов.

4. Анализ удельных капиталовложений в установки и стоимости производимой электроэнергии. Анализ влияния термодинамических параметров на стоимость агрегатов установок.

5. Сравнение рассматриваемых установок с традиционными и перспективными технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе.

Методы исследования:

1. Метод определения термодинамической эффективности энергетического цикла на основе систем уравнений материального и теплового балансов, фундаментальных положений и законов термодинамики.

2. Энергетические методы определения потерь, собственных нужд, расходов топлива; нормативные методы расчетов энергетического оборудования; методы учета влияния новых элементов оборудования; метод расчетов тепловых схем энергоблоков.

3. Метод степенной параметрической оценки капиталовложений в оборудование энергоблоков электростанций; методы сравнения технологий на основе удельных капитальных затрат; методы приведения сравниваемых объектов к сопоставимому виду.

Научная новизна работы заключается в комплексном рассмотрении принципиальных конфигураций кислородно-топливных энергетических циклов с использованием сверхкритического диоксида углерода в качестве рабочего тела, которые отражают ключевые особенности организации подобных циклов, с использованием единообразного подхода к анализу, а именно: 1. Разработаны методики расчета термодинамической, энергетической и технико-экономической эффективности циклов на сверхкритическом диоксиде углерода с учетом особенностей обновления рабочего тела цикла, непостоянства его состава и количества в ключевых точках цикла. 2. Впервые предложен учет факторов непрерывности обновления рабочего тела и непостоянства его состава. 3. Впервые установлена функциональная взаимосвязь энергетических и технико-экономических показателей от термодинамических параметров установок.

4. Предложены новые технические решения по производству электроэнергии на основе CO₂ циклов с нулевыми выбросами, защищенные патентами РФ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы термодинамического, энергетического и технико-экономического анализа энергетических установок на основе CO₂ циклов.

2. Результаты, связанные с установлением влияния термодинамических параметров циклов на их эффективность, поагрегатную оценку затрат электроэнергии собственных нужд установок и стоимость основного и вспомогательного оборудования.

3. Результаты сравнения исследуемых установок с другими широко распространенными и перспективными технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные методы позволяют расчетным путем определить термодинамические, расходные и технические показатели, которые требуются для проектирования новых типов энергоблоков (в виде параметров и расходов рабочей среды; топлива и окислителя; потоков, выводимых за рамки цикла; оборудования, утилизационных контуров и т.п.).

2. Результаты могут быть использованы при разработке новой и перспективной энергетической техники, отражая оптимальные параметры по критерию достижения наивысшей термодинамической и энергетической эффективности.

3. Совокупность результатов представляет собой научное обоснование перспектив создания углерод-нейтральной технологии производства электроэнергии с использованием CO₂ цикла и создает основу дальнейших более глубоких исследований.

Личный вклад автора заключается в разработке методов исследования и расчетных алгоритмов, проведении расчетов, анализе результатов. Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены лично автором. В совместных публикациях вклад автора равнозначный.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается использованием фундаментальных методов термодинамического анализа энергетических установок, методов анализа на основе законов сохранения энергии и массы, методов технико-экономического анализа и сопоставлением с результатами других исследователей. Математические модели базируются на апробированных и хорошо себя зарекомендовавших подходах для решения задач подобного класса.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях. Международные конференции: «Системные исследования в энергетике» (г. Иркутск, Россия, 2021 г., 2023 г.), «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (г. Саратов, Россия, 2022 г., 2024 г.), «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» (г. Ульяновск, Россия, 2021 г., 2022 г., 2024 г.). Всероссийские конференции: «Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, Россия, 2023 г., 2024 г., 2025 г.), «Теплофизика и физическая гидродинамика» (г. Сочи, Россия, 2024 г.), «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, Россия, 2024 г.), «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, Россия, 2024 г.), «Енисейская теплофизика» (г. Красноярск, Россия, 2023 г., 2025 г.), «Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Сочи, 2021 г.; г. Нижний Новгород, 2023 г.; г. Красноярск, 2025 г., Россия), Всероссийская Школа молодых ученых «Технологическое развитие отраслей ТЭК для достижения углеродной нейтральности экономики России» (г. Москва, Россия, 2023 г.), «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, Россия, 2021 г.).

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования, выполняемые в рамках диссертации, получили поддержку в форме гранта РФФИ № 23-29-00035 «Разработка методических основ создания углерод нейтральных технологий производства электроэнергии на основе CO₂-циклов», 2023-2024 гг.; в рамках программы стратегического развития НГТУ, проект С23-27 «Исследование особенностей обновления рабочего тела и отвода углекислоты на захоронение при работе энергетических циклов на углекислом газе», 2023 г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 36 научных работах, из них: научных статей в рецензируемых изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 2; в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или Scopus – 10; в прочих рецензируемых изданиях – 2; в сборниках научных трудов и материалах конференций – 20. Получено 2 патента на изобретения в РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 130 наименований, 2 приложений. Текст диссертации изложен на 161 странице печатного текста, содержит 50 рисунков, 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен анализ влияния политики декарбонизации и снижения антропогенного воздействия на энергетику на ископаемом топливе, раскрыты особенности применения кислородно-топливных CO_2 циклов в энергетических установках для производства электроэнергии. В основе технологических решений лежит сжигание в камере сгорания метана в кислороде (процесс 5-0) с получением в качестве продуктов сгорания CO_2 и H_2O , из которых образуют рабочее тело цикла, рисунок 1. В процессе 0-1 рабочее тело совершает работу в турбине. Далее в процессе 1-2 обеспечивается передача теплоты в рекуператоре системы регенерации. В процессе 2-3 производят отвод теплоты от цикла в окружающую среду, а в процессах 3'-3'' и 3-4 обеспечивают повышение давления рабочего тела. Процесс 4-5 характеризует нагрев рабочего тела в рекуператоре. Принципиальная схема представлена на рисунке 1б.

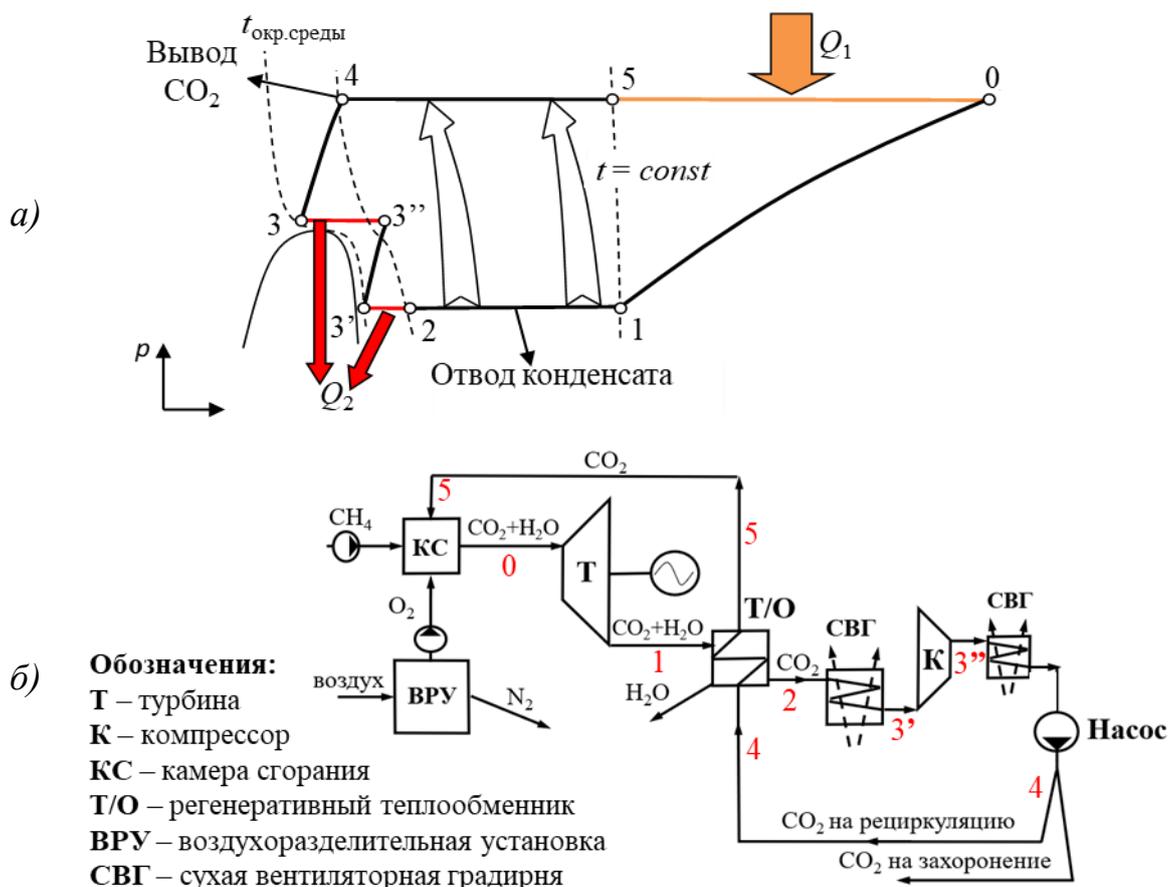


Рисунок 1 – Энергетический цикл на углекислом газе в *Ph*-диаграмме (а) и принципиальная схема установки (б)

На основе обзора литературы показано, что расчетный КПД CO₂ установок может превышать 55% при отсутствии выбросов парниковых газов в атмосферу, но требует высоких параметров рабочего тела: давление 200–300 бар, температура 1100–1200 °С и выше. При этом капиталовложения в основное оборудование и себестоимость вырабатываемой энергии находятся в конкурентной зоне с традиционной тепловой энергетикой, что свидетельствует о перспективности исследований данной технологии генерации электроэнергии.

Во **второй главе** представлены методические подходы к исследованию. Разработана методика и алгоритм расчета термодинамической эффективности энергетических циклов на сверхкритическом диоксиде углерода. Методика расчета основана на системах уравнений материальных и тепловых балансов.

Уравнение материального баланса камеры сгорания:

$$G_{\text{ц.}}^{\text{CO}_2} + G_{\text{под.}}^{\text{CO}_2} + G_{\text{под.}}^{\text{H}_2\text{O}} = 1^{\text{CO}_2} + G_{\text{пар}}^{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

В этом выражении $G_{\text{ц.}}^{\text{CO}_2}$ – количество циркулирующего в контуре CO₂; $G_{\text{под.}}^{\text{CO}_2}$, $G_{\text{под.}}^{\text{H}_2\text{O}}$ – количество подведенной с продуктами сгорания углекислоты и водяных паров; $1^{\text{CO}_2} = G_{\text{ц.}}^{\text{CO}_2} + G_{\text{под.}}^{\text{CO}_2} = 1 \text{ кг}$ – суммарный баланс углекислоты на выходе из камеры сгорания (входе в турбину); $G_{\text{под.}}^{\text{H}_2\text{O}} = G_{\text{пар}}^{\text{H}_2\text{O}}$ – баланс водяных паров на выходе из камеры сгорания.

Уравнение теплового баланса камеры сгорания:

$$(1 - \delta) \cdot h_5 + \delta \cdot Q = 1 \cdot h_0^{\text{CO}_2} + \delta \cdot W \cdot h_0^{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

Уравнение теплообмена между выходящим из турбины и входящим в камеру сгорания потоками при обеспечении работы системы регенерации:

$$(1 - \delta) \cdot (h_5 - h_4) = 1 \cdot (h_1^{\text{CO}_2} - h_2^{\text{CO}_2}) + \delta \cdot W \cdot (h_1^{\text{H}_2\text{O}} - h_2^{\text{H}_2\text{O}}) \quad (3)$$

В выражениях (2)–(3): $\delta = G_{\text{под.}}^{\text{CO}_2}$ – количество углекислоты, подводимой в цикл в камере сгорания при сжигании топлива, от.ед; Q – теплота, выделяемая при генерации 1 кг CO₂ в процессе горения топлива, кДж; $W = G_{\text{пар}}^{\text{H}_2\text{O}}$ – влага, образующаяся при сжигании топлива, необходимого для генерации 1 кг CO₂, кг; h – энтальпия рабочего тела в характерных точках цикла, кДж/кг.

На основе уравнений (2)–(3) и с учетом термодинамических ограничений вида $t_1 \geq t_5$; $t_2 = t_4$; $h = f(t; p; s)$ формируют систему уравнений, решение которой позволяет определить величину обновления рабочего тела, значения термодинамических показателей на входе в камеру сгорания,

требуемые расходы топлива и окислителя. Методика позволяет получать зависимости термодинамической эффективности CO_2 циклов в широком диапазоне температур и давлений рабочего тела. Термическая эффективность цикла определяется как отношение располагаемого теплоперепада за вычетом работы сжатия к подведенной теплоте.

Для оценки энергетической эффективности перспективных CO_2 энергоблоков разработан единообразный подход на основе положений методов энергобалансов, когда каждое преобразование первичной энергии топлива в установке сопровождается потерями в узлах и агрегатах при производстве электроэнергии. В этом случае КПД выработки электроэнергии определяют по выражению:

$$\eta_{\text{э}} = \eta_t \cdot \eta_{\text{кс}} \cdot \eta_{oi}^{\text{CO}_2} \cdot \eta_{\text{эм}}, \quad (4)$$

где η_t – термический КПД цикла; $\eta_{\text{кс}}$ – КПД камеры сгорания; $\eta_{oi}^{\text{CO}_2}$ – внутренний относительный КПД CO_2 -турбины; $\eta_{\text{эм}}$ – электромеханический КПД турбогенератора.

Уравнения затрат электроэнергии в агрегаты собственных нужд опираются на физические параметры рабочих сред и удельные показатели. Методика обеспечивает возможность анализа эффективности производства электроэнергии на базе CO_2 энергоблоков в зависимости от исходных термодинамических параметров цикла. В этом случае КПД-нетто установок и соответствующие расходы условного топлива ($\text{г у.т./кВт}\cdot\text{ч}$) определяют по выражению:

$$\eta_{\text{нетто}} = \eta_{\text{э}} \cdot (1 - k_{\text{с.н.}}), \quad b_{\text{нетто}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{нетто}}}, \quad (5)$$

где $k_{\text{с.н.}}$ – коэффициент затрат электроэнергии на собственные нужды.

Методическая погрешность оценок КПД нетто определена методом обратного энергетического баланса на основе среднеквадратичных отклонений и не превышает 1%.

Для определения капиталовложений в оборудование разработан метод на основе степенной параметрической функции. При помощи коэффициентов и показателей степени устанавливают взаимосвязь между стоимостью и термодинамическими параметрами, расходными и энергетическими характеристиками, видом исполнения оборудования и другими факторами. Методика позволяет задачу дискретной оценки стоимости преобразовать в нахождение функциональной зависимости.

Общий вид уравнения для определения капиталовложений может быть представлен следующим выражением:

$$K = k_0 \prod_i c_i \prod_j \left(\frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j} \cdot S, \quad k = K / N \quad (7)$$

В этом выражении k_0 – базовые значения капиталовложений, \$; c_i – коэффициенты приведения, учитывающие вид исполнения оборудования; x_j^0 , x_j – базовое и фактическое значения термодинамического, расходного или энергетического параметра или показателя; n_j – показатель степени; S – фактор инфляции; k – удельные капиталовложения в установку, \$/кВт; N – установленная мощность, кВт.

Такой подход позволяет с единых позиций вести анализ разных технических решений при реализации CO₂ циклов. Позволяет вести сравнение различных вариантов исполнения CO₂ циклов как между собой, так и с традиционными широко используемыми и перспективными способами производства электроэнергии.

В **третьей главе** диссертации представлен термодинамический анализ CO₂ циклов различной архитектуры, рисунок 2. Приведены зависимости термического КПД, теплоперепада, доли обновления рабочего тела от параметров входа рабочего тела в турбину и параметров окончания процесса расширения, выполнен анализ влияния системы регенерации циклов и подвода тепла низкого потенциала на показатели термической эффективности в условиях кислородного сжигания метана.

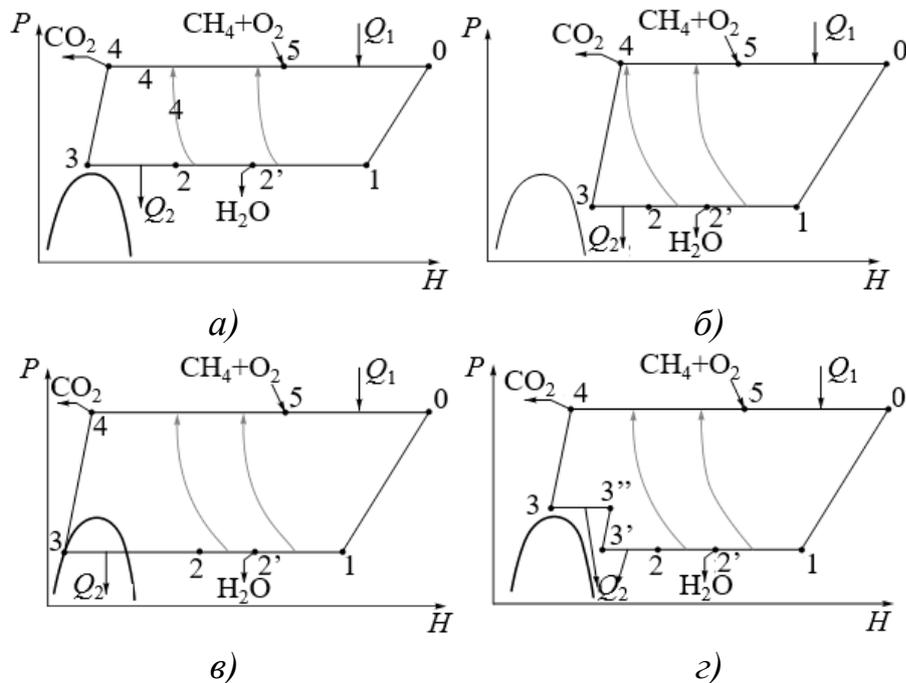


Рисунок 2 – Варианты исполнения CO₂ цикла

Вариант 1 – цикл, расположенный в зоне сверхкритических параметров CO₂, с одноступенчатым подъемом давления насосом, рисунок 1а. Цикл

предложен в НГТУ и запатентован. Вариант 2 – цикл с одноступенчатым подъемом давления компрессором, рисунок 1б. Цикл представляет теоретический интерес и предложен в НГТУ. Вариант 3 – цикл с конденсацией углекислоты и одноступенчатым подъемом давления насосом, рисунок 1в. Вариант 4 – цикл с двухступенчатым повышением давления компрессором и насосом, рисунок 1г.

Результаты расчетов термодинамических характеристик циклов при изменении параметров рабочего тела в широких диапазонах представлены на рисунке 3. Термический КПД циклов превышает 65%.

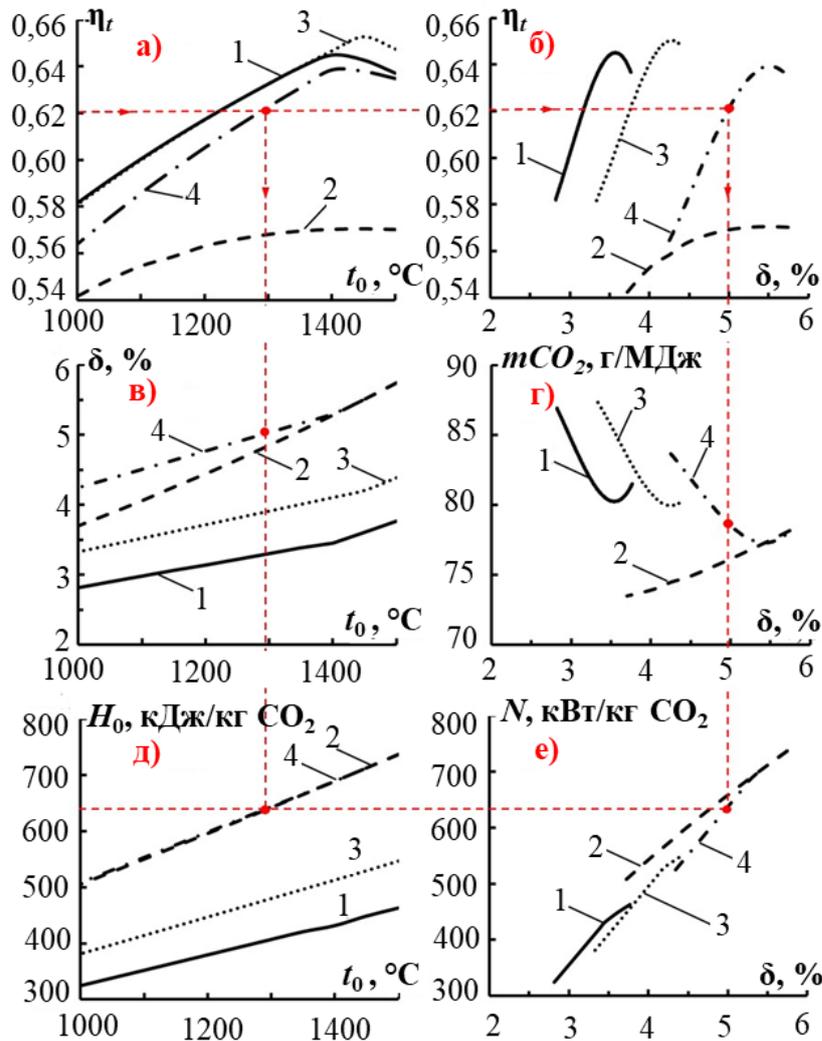


Рисунок 3 – Влияние температуры входа рабочего тела в турбину (t_0) и доли обновления рабочего тела (δ) на характеристики CO_2 циклов:

η_t – термический КПД; δ – доля обновления рабочего тела; m_{CO_2} – удельное образование CO_2 ; H_0 – располагаемый теплоперепад; N – удельная мощность. 1–4 – варианты исполнения CO_2 цикла в соответствии с рисунком 2

Наиболее высоким термическим КПД обладают циклы с повышением давления насосом. Изменение температуры входа на 50 °С или давления на 10–15% ведет к изменению термического КПД цикла на 1%. При этом CO_2 циклы имеют выраженный максимум эффективности, после которого термический КПД начинает снижаться с ростом параметров, что вызвано особенностями обновления рабочего тела в камере сгорания и сходимостью балансов системы регенерации.

Доля обновления составляет 2,7–4,5% в диапазоне температур 1000–1100 °С в зависимости от конфигурации; растет с увеличением параметров рабочего тела и достигает 3,5–5,5% при

1500 °С. Наибольшую долю обновления рабочего тела имеют циклы, включающие компрессор в системе повышения давления. Наименьшую – циклы с насосом.

Система регенерации CO₂ циклов является одним из ключевых элементов достижения высоких показателей эффективности. При температурах рабочего тела на уровне 1000–1200 °С вклад водяных паров в регенеративный нагрев составляет 3–17% при их массовом содержании 2–4%. Доля теплового потока, подведенного через систему регенерации составляет более 50% от суммарного потока теплоты, подведенного к рабочему телу, рисунок 4. Система регенерации обеспечивает нагрев рабочего тела до уровня ~2/3 от температуры входа в турбину, рисунок 5.

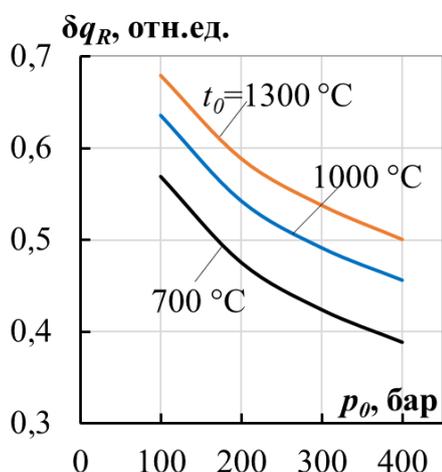


Рисунок 4 – Относительный тепловой поток, подводимый к рабочему телу через систему регенерации

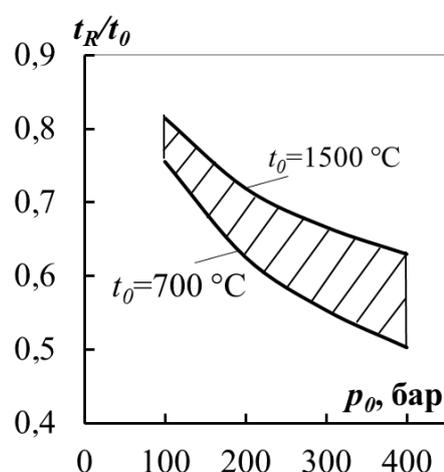


Рисунок 5 – Отношение температур на входе в камеру сгорания и выходе из нее

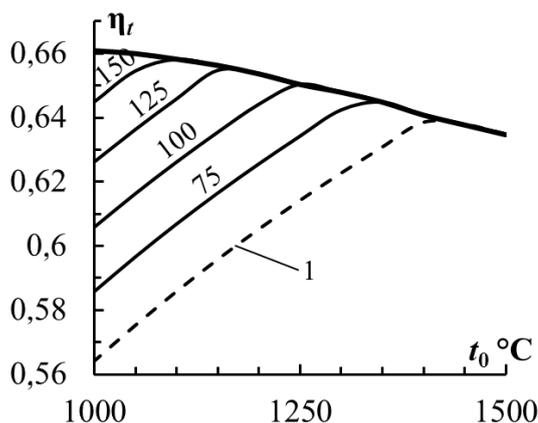


Рисунок 6 – Влияние нагрева рабочего тела перед регенератором на термический КПД цикла, вариант 4.

Цифры на графике – температура нагрева перед системой регенерации; 1 – цикл без дополнительного нагрева

Установлено, что за счет подвода низкопотенциальной теплоты, например, от криогенной воздухоразделительной установки по производству кислорода, КПД цикла может быть повышен. Повышение температуры CO₂ перед входом в основной регенератор на каждые 25 °С за счет подвода такого тепла ведет к росту эффективности цикла на ~2%, рисунок 6.

В четвертой главе анализируется КПД выработки и отпуска электроэнергии, удельные расходы топлива, затраты электроэнергии на собственные нужды CO₂ энергоблоков в зависимости от их архитектуры и термодинамических параметров с учетом влияния фактора подвода низкопотенциальной теплоты за счет интеграции тепловых потоков воздухоразделительной установки и системы регенерации CO₂ цикла. Ведется сравнение CO₂ установок с традиционными ТЭС.

КПД выработки электроэнергии (с учетом работы сжатия, по аналогии с определением КПД ГТУ) для рассматриваемых вариантов составляет 59,5–62% при температурах 1200–1250 °С (для вариантов 1, 3 и 4), что согласуется с результатами других авторов и превосходит аналогичный показатель для ПГУ на базе газовых турбин серий Н, F, рисунок 7. Вариант 2 менее эффективен из-за работы компрессора.

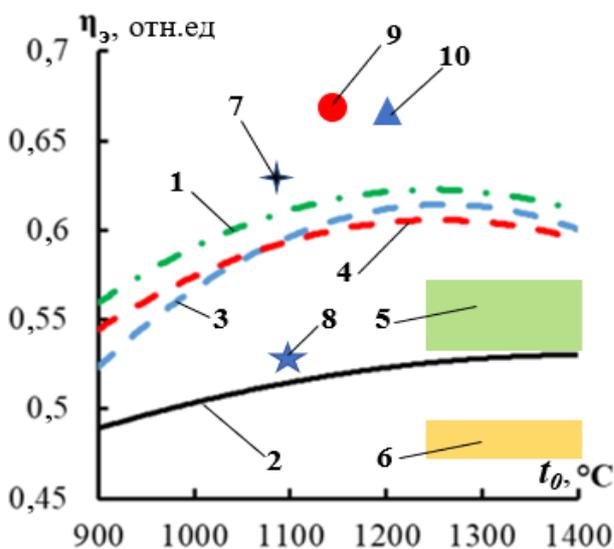


Рисунок 7 – КПД выработки электроэнергии: 1–4 – варианты исполнения CO₂ энергоблока 5 – ПГУ без улавливания CO₂; 6 – ПГУ с улавливанием CO₂; 7 – оценки МЭИ; 8 – оценки ОИВТ РАН; 9 – оценки Graz University; 10 – оценки NETL

37–43% для чисто компрессорного варианта. Во всех случаях рост температуры ведет к росту КПД нетто, при этом выявлен максимум эффективности при температуре 1200–1250 °С. Рост давления слабо влияет на КПД отпуска электроэнергии для вариантов 1, 2, 3. Выявлен максимум эффективности для варианта 4 при значении давления 300 бар.

При отнесении работы сжатия рабочего тела к вспомогательным системам коэффициент собственных нужд составляет 23–27% для бескомпрессорных вариантов цикла и 28–47% для вариантов с компрессорным повышением давления рабочего тела, рисунок 8а. Основной вклад в собственные нужды установок на основе CO₂ циклов составляют затраты электроэнергии на производство кислорода (12,5–14,5%) и на привод компрессоров в случае их применения: от 8–11% до 23–32% в зависимости от схемы повышения давления рабочего тела.

КПД отпуска электроэнергии для бескомпрессорных вариантов CO₂ циклов достигает 51% против

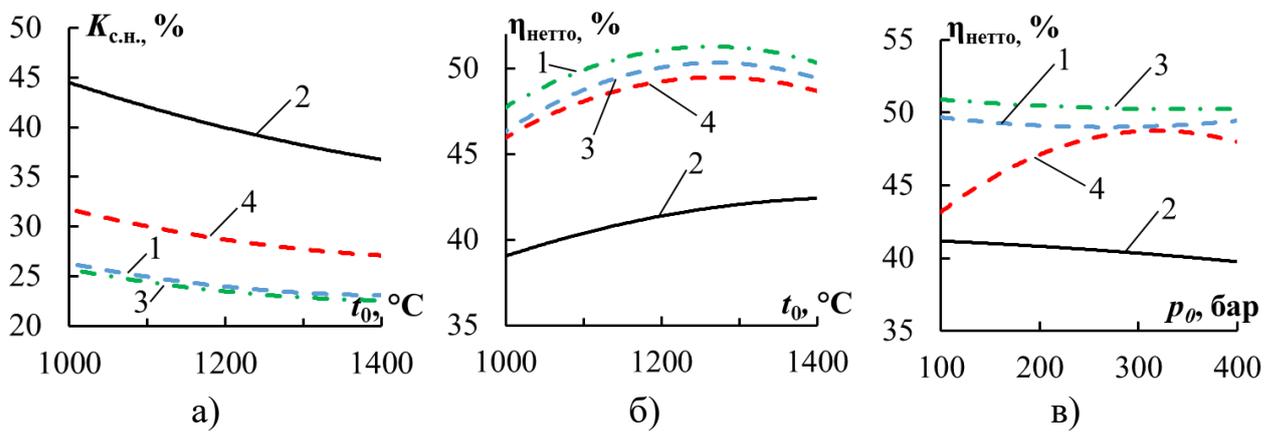


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента собственных нужд (а) и КПД нетто от температуры рабочего тела при давлении 30 МПа (б) и давления рабочего тела при температуре 1200 °С: 1–4 - варианты CO₂ цикла

Минимальный удельный расход условного топлива показывает достижимость показателя в 0,25 кг у.т./кВт·ч отпущенной электроэнергии при температуре около 1200 °С, рисунок 9. По этому показателю CO₂ энергоблоки уступают только ПГУ на основе перспективных газовых турбин серий НА, HL и JAC, однако температура входа для последних на 300–500 °С выше.

По затратам энергии собственных нужд CO₂ циклы уступают всем традиционным способам получения электроэнергии на органическом топливе, в том числе и технологиям ПГУ с внутрицикловой газификацией угля, что обуславливается высокими затратами электроэнергии на производство кислорода и системы повышения давления.

В пятой главе рассматриваются технико-

экономические показатели производства электроэнергии на основе CO₂ циклов: определяются капиталовложения в основное оборудование CO₂ энергоблоков и себестоимость производимой электроэнергии, оценивается мультипликативный эффект в экономике.

Удельные капиталовложения в установки мощностью 100 МВт на основе CO₂ циклов составляют 2060–2650 \$/кВт в зависимости от вида цикла

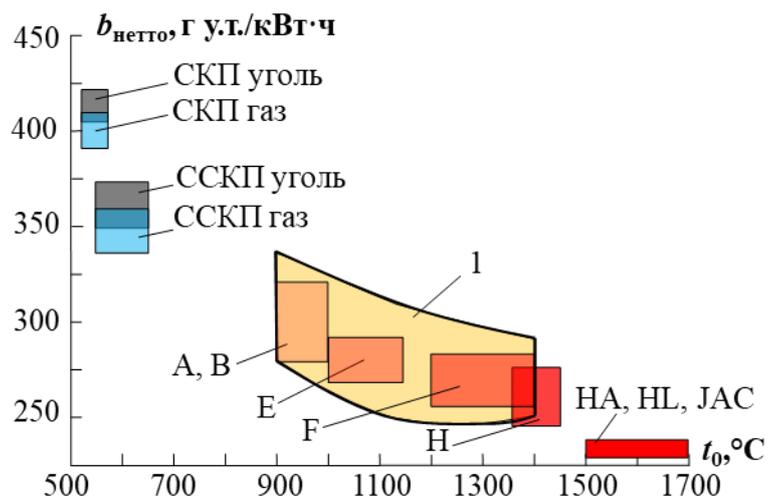


Рисунок 9 – Удельный расход условного топлива для разных технологий производства электроэнергии на органическом топливе: 1 – энергоблоки на основе CO₂ циклов

и параметров входа рабочего тела в турбину, рисунок 10. Наименьшими показателями удельной стоимости обладает вариант цикла 4: 2060–2300 \$/кВт, что сопоставимо с паросиловыми установками. В общем случае удельные капиталовложения лежат в диапазоне значений 1900–2800 \$/кВт. Увеличение единичной мощности энергоблока со 100 до 500 МВт ведет к уменьшению показателя удельных капиталовложений до 30% в зависимости от рассматриваемой схемы цикла.

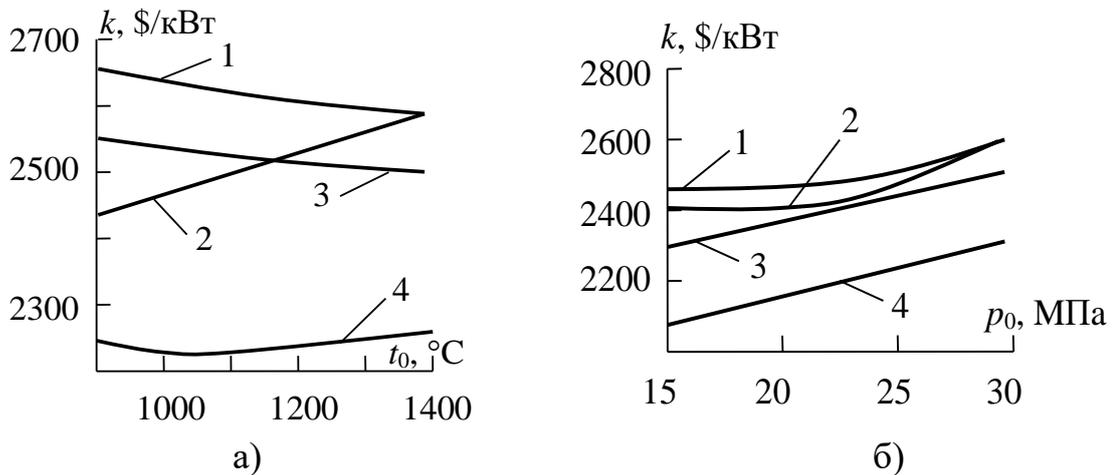


Рисунок 10 – Удельные капиталовложения в установки мощностью 100 МВт в зависимости от температуры (а) и давления (б) рабочего тела: 1–4 – варианты CO₂ цикла

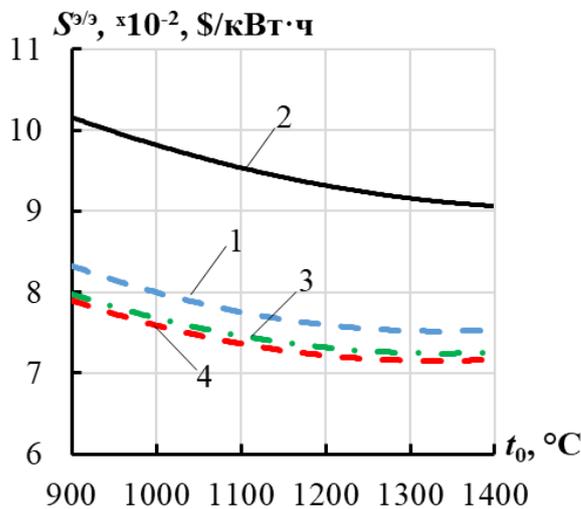


Рисунок 11 – Себестоимость электроэнергии на основе CO₂ энергоблоков в зависимости от температуры рабочего тела при давлении 300 бар: 1–4 – варианты исполнения CO₂ цикла

Стоимость воздухоразделительной установки для производства кислорода составляет 24–29% от полной стоимости оборудования. Вторым по величине вложений является теплообменное оборудование с долей стоимости около 20%. На стоимость CO₂-турбины определяющую роль оказывает

температура рабочего тела, ее увеличение на 100 °С ведет к росту стоимости CO₂-турбины на 10–14%.

При цене природного газа 100 \$/тыс. м³ себестоимость производимой электроэнергии на основе CO₂ энергоблоков составляет 7,1–8,2 цента за кВт·ч для вариантов, характеризующихся ограниченным использованием компрессора и 9–10 центов для энергоблока на основе цикла 2 с компрессорным повышением давления, рисунок 11. Наименьшей себестоимостью обладают энергоблоки на базе цикла с двухступенчатым повышением давления. Для всех вариантов себестоимость снижается с ростом температуры рабочего тела вплоть до 1200 °С, после чего температура мало влияет на себестоимость. Увеличение цены газа на каждые 100 \$/тыс. м³ влечет рост себестоимости электроэнергии на ~2 цента за кВт·ч для всех вариантов.

Мультипликативный эффект прироста в смежных отраслях при реализации CO₂ энергоблока сопоставим с величиной прямых инвестиций в создание новой ПГУ. При первоначальных капиталовложениях 2000–2300 \$/кВт эффект прироста смежных отраслей составляет 300–1500 \$/кВт при различной доле импорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан комплекс методов термодинамического, энергетического и технико-экономического анализа установок на основе CO₂ циклов. В основе метода термодинамического анализа лежат уравнения материальных и тепловых балансов с учетом факторов непрерывного обновления рабочего тела и изменения его термодинамических свойств по мере движения в цикле. В основе энергетического анализа лежат положения метода энергобаланса, когда каждое преобразование энергии топлива в установке сопровождается потерями, а эффективность отпуска электроэнергии определяется затратами энергии собственных нужд. В основе метода технико-экономического анализа лежат уравнения на основе степенной параметрической функции.

2. Проведен термодинамический анализ 4 вариантов исполнения CO₂ цикла, отличающихся способом повышения давления рабочего тела и наличием/отсутствием его конденсации. Показано, что увеличение/снижение температуры входа на 50 °С ведет к увеличению/снижению термического КПД цикла на 1%; увеличение/снижение начального давления на 10–15% ведет к увеличению/снижению термического КПД на 1%; доля обновления рабочего тела составляет 2,7–4,5% при температуре входа 1000–1100 °С и растет до 3,5–5,5% с ее ростом до 1500 °С; доля теплового потока, подведенного к рабочему телу через систему регенерации составляет более

50% от суммарного потока теплоты, а нагрев рабочего тела обеспечивается до уровня $\sim 2/3$ от температуры входа; вклад водяных паров в регенеративный нагрев составляет 3–17%; повышение температуры рабочего тела перед регенератором за счет подвода низкопотенциальной теплоты на каждые 25 °С ведет к росту термической эффективности цикла на $\sim 2\%$. Генерация углекислоты на захоронение не превышает 90 г/МДж выработанной энергии.

3. Определены энергетические показатели установок на основе CO₂ циклов. Показано, что КПД отпуска электроэнергии достигает 51% для бескомпрессорных вариантов, а минимальный расход топлива может быть обеспечен в 0,25 кг у.т./кВт·ч при температуре входа 1200 °С. По этому показателю CO₂ установки уступают только ПГУ на основе газовых турбин серий НА, НЛ, JAC. Коэффициент собственных нужд CO₂ установок для бескомпрессорных вариантов находится на уровне 23–27% и 28–47% для вариантов с компрессорным повышением давления рабочего тела, при этом основной вклад в собственные нужды составляют затраты на производство кислорода и привод компрессоров.

4. Показано, что удельные капиталовложения в установки на основе CO₂ циклов составляют 1900–2800 \$/кВт в зависимости от вида технологической схемы, параметров входа и единичной мощности установок. Показано, что стоимость воздухоразделительной установки для производства кислорода составляет 24–34% от полной стоимости, а увеличение начальной температуры на 100 °С ведет к увеличению стоимости CO₂ турбины на 10–14%. Себестоимость электроэнергии составит 7–10 центов/кВт·ч.

5. Показано, что по термодинамическим показателям установки на основе CO₂ циклов сопоставимы с парогазовыми технологиями производства электроэнергии, по затратам электроэнергии собственных нужд уступают всем освоенным технологиям на органическом топливе, по себестоимости электроэнергии находятся в конкурентной зоне, а по мультипликативному эффекту превосходят их.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1. Садкин И.С. Новая технология на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля / М.Е. Таценко, И.С. Садкин, П.А. Щинников // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – №27 (6). – С. 124-134. (УБС 2, Категория К2)

2. **Садкин И.С.** Энергетические особенности CO₂-циклов при кислородном сжигании метанола / П.А. Щинников, И.С. Садкин, О.В. Боруш, Р.В. Романенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – №26 (4). – С. 150-159. (УБС 2, Категория К2)

Патенты:

3. **Садкин И.С.** Патент на изобретение №2810854. Дата государственной регистрации в Реестре изобретений 06 июля 2023 г., Опубликовано: 28.12.2023 Бюл. № 1 / И.С. Садкин, П.А. Щинников; заявитель ФГБОУ ВО НГТУ.

4. **Садкин И.С.** Патент на изобретение №2816145. Дата государственной регистрации в Реестре изобретений 06 июля 2023 г., Опубликовано: 26.03.2024 Бюл. № 9 / И.С. Садкин, П.А. Щинников; заявитель ФГБОУ ВО НГТУ.

Публикации в прочих рецензируемых изданиях:

5. **Садкин И.С.** Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂-циклов при кислородном сжигании метана / С.В. Алексеенко, П.А. Щинников, И.С. Садкин // Теплофизика и Аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 89-98. (УБС 2, Категория К1)

6. **Садкин И.С.** Поагрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции / П.А. Щинников, А.А. Францева, И.С. Садкин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – № 2-3 (79). – С. 123-138. (УБС 4, Категория К2)

Публикации в изданиях, входящих в международную базу Scopus:

7. **Sadkin I.S.** Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO₂ power plants / I.S. Sadkin, O.V. Borush, P.A. Shchinnikov // Energy Conversion and Management. – 2025. – Vol. 323. – Art. No. 119266. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119266 (УБС 1, Q1)

8. **Sadkin I.S.** Influence of the proportion of the working fluid renewal on semi-closed oxy-fuel sCO₂ power cycles efficiency indicators / I.S. Sadkin, P.A. Shchinnikov // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2025. – Vol. 50. – P. 4753–4769. DOI: 10.1007/s13369-024-09286-x (УБС 1, Q1)

9. **Sadkin I.S.** Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO₂ power cycles with oxygen combustion of methane / I.S. Sadkin, P.A. Shchinnikov // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. No. 121301. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301 (УБС 1, Q1)

10. **Sadkin I.S.** On temperature of working fluid supply to combustion

chamber in CO₂ power cycles with oxy-combustion of methane / I.S. Sadkin, E.M. Korepanova, P.A. Shchinnikov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2023. – Vol. 32. – P. 816-823. DOI: 10.1134/S1810232823040136 (УБС 2, Q3)

11. **Sadkin I.S.** Cost analysis of the boiler unit of coal power units depending on the initial steam pressure and the availability of flue gas purification systems / I.S. Sadkin, A.P. Shipitsina, P.A. Shchinnikov // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2023. – Vol. 66, № 5. – P. 478-492. DOI: 10.21122/1029-7448-2023-66-5-478-492 (УБС 2, Q3)

12. **Sadkin I.S.** Assessment of the economic efficiency of using gas from underground coal gasification at traditional power plants and prospects for the technology under decarbonization conditions / P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2022. – No. 10-1. – P. 182-193. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_182. (УБС 2, Q2)

13. **Sadkin I.** Influence of external supply of low-grade heat on thermal efficiency of sCO₂ power cycles / I. Sadkin, P. Shchinnikov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 459. – Art. No. 07009. DOI: 10.1051/e3sconf/202345907009

14. **Sadkin I.S.** Influence of the initial parameters on the thermodynamic efficiency of carbon dioxide power cycles / P.A. Shchinnikov, I.S. Sadkin, A.P. Shchinnikov, N.F. Cheganova, N.I. Vorogushina // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2150. – Art. No. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/2150/1/012011

15. **Sadkin I.** Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration / P. Shchinnikov, O. Borush, A. Frantseva, I. Sadkin // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289. – Art. No. 02001. DOI: 10.1051/e3sconf/202128902001

16. **Sadkin I.S.** Evaluation of capital investments in energy equipment of a power plant by a power function / P.A. Shchinnikov, A.A. Frantseva, I.S. Sadkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. - Vol. 1652. – Art. No. 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012024

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
Заказ Р-05130. Подписано в печать 17.02.2026 г.