



СИБИРСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ | SIBERIAN  
FEDERAL  
UNIVERSITY

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный университет»

660041, Красноярский край,  
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 1  
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-82-14  
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 102240213746  
ИНН/КПП 2463011853/246301001

доцент  
Капулин  
Рович  
6 г.

16.03.2026 № 51  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**ОТЗЫВ**

ведущей организации ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» о диссертационной работе Садкина Ивана Сергеевича «Комплексный анализ установок на основе CO<sub>2</sub> циклов с кислородным сжиганием метана», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – энергетические системы и комплексы

**Актуальность темы выполненной работы.** В настоящее время энергетика России остаётся ориентированной на использование органического топлива, одновременно зависящая от импорта передового оборудования и технологий, а также сталкивающаяся с существующими и потенциальными ограничениями в сфере международной торговли по причине использования такого фактора как «углеродный след». В контексте совершенствования теплоэнергетических технологий, основанных на сжигании органического топлива, приоритетное внимание уделяется разработке и внедрению передовых энергоблоков. В этой связи актуальность темы диссертации, посвящённой изучению кислородно-топливных энергетических циклов с применением диоксида углерода в качестве рабочего тела, определяется возрастающими требованиями к экологической безопасности и энергоэффективности процессов генерации электричества на органических топливах, а также общемировой целью снижения антропогенных выбросов парниковых газов, не вызывает сомнений.

**Целью работы** является определение комплекса показателей эффективности установок на основе кислородно-топливных CO<sub>2</sub> циклов различных конфигураций с использованием в качестве рабочего тела сверхкритического диоксида углерода соответствует выбранной теме диссертации. Для достижения цели были поставлены и решены адекватно сформулированные задачи, что позволило получить ряд важных научных результатов и перспективных для использования на практике.

**Значимость для науки полученных результатов** заключается в следующем:

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  $\text{CO}_2$  циклов с нулевыми выбросами, защищенные патентами РФ.

**Практическая значимость результатов работы.** Представленные результаты обогащают понимание кислородно-топливных технологий, нацеленных на создание экологически чистых энергетических установок, работающих на ископаемом топливе, с полным отсутствием атмосферных выбросов, а также способствуют изучению энергетических циклов, где в качестве рабочего вещества используется углекислый газ. Созданные методики дают возможность с помощью расчетов определять термодинамические, расходные и эксплуатационные параметры, которые необходимы для проектирования энергетических блоков с  $\text{CO}_2$ , включая специфику рабочей среды, параметры топлива и окислителя, а также учитывая потоки, выводимые за пределы цикла, характеристики оборудования и контуры утилизации. Итоговая совокупность результатов закладывает научную базу для развития углеродно-нейтральных технологий генерации электроэнергии на основе цикла с  $\text{CO}_2$ , открывая путь для последующих, более детальных изысканий.

**Достоверность результатов проведенных исследований** обеспечена:

1. 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.

2. Применением математических моделей, базирующихся на апробированных и хорошо зарекомендовавших подходах для решения задач подобного класса.

3. Оценкой методической погрешности определения эффективности энергоблоков и величины капиталовложений при оценке технико-экономических показателей.

**Содержание выполненной 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.

*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  $\text{CO}_2$  циклов в энергетических установках для производства электроэнергии. В основе базовых технологических решений лежит сжигание в камере сгорания газообразного топлива (метана) в кислороде с получением в качестве продуктов сгорания  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , из которых образуют рабочее тело цикла.

На основе обзора литературы показано, что расчетный КПД  $\text{CO}_2$  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 прогнозируемые многими авторами, научно-исследовательскими и проектными коллективами 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. Создана методика и алгоритм расчета термодинамической эффективности энергетических циклов на сверхкритическом диоксиде углерода. Методика расчета основана на системах уравнений материальных и тепловых балансов. Для оценки энергетической эффективности перспективных  $\text{CO}_2$  энергоблоков предложен единообразный подход на основе положений методов энергобалансов, когда каждое преобразование первичной энергии топлива в установке сопровождается потерями в узлах и агрегатах при производстве электроэнергии. Уравнения затрат электроэнергии в агрегаты собственных нужд опираются на физические параметры рабочих сред и удельные показатели. Для определения капиталовложений в оборудование представлен метод на основе степенной параметрической функции. При помощи коэффициентов и показателей степени устанавливается взаимосвязь между стоимостью и термодинамическими параметрами, расходными и энергетическими характеристиками, видом исполнения оборудования и другими факторами. Использование выявленных методических подходов обеспечивает единую основу для анализа разнообразных технических реализаций  $\text{CO}_2$ -циклов, а также позволяет проводить сопоставление различных их вариантов не только между собой, но и с традиционными, широко применяемыми, а также перспективными методами генерации электрической энергии.

*В третьей главе* диссертации представлен термодинамический анализ  $\text{CO}_2$  циклов различной архитектуры. 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.

*В четвертой главе* анализируется КПД выработки и отпуска электроэнергии, удельные расходы топлива, затраты электроэнергии на собственные нужды  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  цикла. Ведется сравнение  $\text{CO}_2$  установок с традиционными ТЭС.

*В пятой главе* рассматриваются технико-экономические показатели производства электроэнергии на основе  $\text{CO}_2$  циклов: определяются капиталовложения в основное оборудование  $\text{CO}_2$  энергоблоков и себестоимость производимой электроэнергии, оценивается мультипликативный эффект в экономике.

*В заключении* диссертационной работы Садкина И.С. формулируются основные результаты выполненных исследований.

*Приложения* диссертационной работы включают: акты об использовании результатов диссертации, патенты на изобретения.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертационной работы.

**Полнота опубликованных результатов и апробация работы** – основные результаты диссертации представлены на 20 конференциях всероссийского и международного уровней и опубликованы в 36 научных работах, из них: 2 статьи в рецензируемых журналах из перечня рекомендованных ВАК РФ; 10 – в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus; 2 – в прочих рецензируемых изданиях; 2 патента на изобретение; 20 работ в материалах всероссийских и международных конференций. Публикации отражают содержание диссертации в полном объеме.

**Замечания:**

1. В диссертации рассматриваются базовые варианты циклов. Хотелось бы понимать, есть ли и каков потенциал их термодинамического совершенствования?

2. В работе не отражен процесс подбора материалов, не ясна степень их готовности, доступность на рынках энергомашиностроения РФ и мира.

3. В сводных таблицах 4.1 и 5.3 при анализе энергетических и технико-экономических показателей приводится CO<sub>2</sub>-установка мощностью 100 МВт. Для российской энергетики данный диапазон мощности характеризуется теплофикационными установками на базе паровых турбин. Есть ли перспективы применения рассматриваемых циклов в области теплофикации?

4. В качестве топлива для анализа эффективности принят метан. Однако в энергобалансе РФ среди ТЭС преобладает природный газ. Как переход с метана на другое топливо повлияет на показатели установок?

5. В вопросе практической реализации технологии кислородно-топливных CO<sub>2</sub>-циклов приведена опытно-промышленная установка Net Power с параметрами 300 бар 1150 °С. Существуют ли иные примеры энергетического оборудования, работающего на углекислом газе в качестве рабочего тела?

6. Техничко-экономические оценки проведены при помощи степенной параметрической функции. Как в этом случае учитывается влияние инфляции, динамика рынков, ценовая конъюнктура?

7. В тексте диссертации имеются опечатки и стилистические ошибки.

**Заключение**

Указанные вопросы и замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Садкина И.С. «Комплексный анализ установок на основе CO<sub>2</sub> циклов с кислородным сжиганием метана» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение научной задачи по созданию научно-методической базы для разработки углерод-нейтральных технологий производства электроэнергии на основе органического топлива, имеющей существенное значение для теории и практики развития энергетической отрасли в условиях глобальной декарбонизации и стратегии низкоуглеродного развития энергетики.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.5 – энергетические системы и комплексы и соответствует критериям, установленным п. 9–14 «Положения о

присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Садкин Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.5 – энергетические системы и комплексы.

Отзыв на диссертацию Садкина И.С. обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры теплотехники и гидрогазодинамики политехнического института ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», протокол № 4 от 13.03.2026 г. (присутствовало 16 человек, проголосовали: за – 16, против – нет – единогласно).

Председатель заседания –

зав. кафедрой теплотехники и гидрогазодинамики ПИ СФУ,

Почетный работник науки и техники РФ,

профессор, д-р техн. наук по специальностям:

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

01.02.05 – механика жидкости, газа

Кулагин Владимир Алексеевич

Секретарь заседания –

доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики ПИ СФУ,

канд. физ.-мат. наук по специальности

01.04.14 – теплофизика и молекулярная физика.

доцент

Истягина Елена Борисовна

13.03.2026 г.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10, <http://www.sfu-kras.ru/>, тел.: +7 (391) 244-86-25, E-mail: [office@sfu-kras.ru](mailto:office@sfu-kras.ru), Тел. 8 902 991-89-27; E-mail: [v.a.kulagin@mail.ru](mailto:v.a.kulagin@mail.ru)

Проставил в совет 31.03.2026 г.  
Уч. секретарь ДС БИУ Борущи О.В.

С отзывом ознакомлен, 06.04.2026 г.

Посетел / Садкин И.С.