

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского университета «МЭИ» **Киндры Владимира Олеговича** на диссертационную работу **Садкина Ивана Сергеевича** «**Комплексный анализ установок на основе CO₂ циклов с кислородным сжиганием метана**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы (технические науки)»

1. Актуальность темы диссертации.

Сегодня в мире особое внимание уделяется вопросам повышения энергоэффективности и экологической безопасности энергоемких отраслей. Получают развитие новые варианты глобальной технологической конкуренции, в которых продукция с высоким углеродным следом облагается дополнительными налогами и пошлинами. Острота проблемы для России обуславливается ориентированностью энергетики страны на использование органического топлива.

Одним из перспективных направлений развития энергетики на органическом топливе является создание новых кислородно-топливных энергетических установок на основе CO₂ 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 CO₂ 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.

В связи с вышеперечисленным диссертационная работа **Садкина Ивана Сергеевича** является **актуальной** для определения комплекса показателей эффективности установок на основе кислородно-топливных циклов различных конфигураций с использованием в качестве рабочего тела сверхкритического диоксида углерода.

2. Оценка содержания диссертации и степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Представленная на отзыв диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов по работе и 2 приложений. Общий объем исследования содержит 161 страницу текста, 50 рисунков, 19 таблиц. Список литературы включает 130 наименований.

Во введении автором описана проблема, обоснована актуальность ее решения, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе автором представлен анализ влияния политики декарбонизации и снижения антропогенного воздействия на углеводородную энергетику. Обоснована необходимость развития низкоуглеродных генерирующих установок на территории РФ. Проведен анализ потенциала захоронения диоксида углерода на существующих месторождениях нефти и газа. Рассмотрены основные кислородно-топливные энергетические циклы, а также раскрыты особенности их применения.

Согласно обзору литературы технико-экономическая эффективность кислородно-топливных циклов выше, чем у традиционных тепловых энергоустановок с интегрированными системами улавливания и захоронения диоксида углерода, что подтверждает перспективность исследований данной технологии генерации электроэнергии.

Во второй главе автором представлены методические подходы к исследованию. Разработаны методики и алгоритмы расчета термодинамической и энергетической эффективности кислородно-топливных энергетических циклов, а также подход к определению капиталовложений в перспективное оборудование на основе диоксида углерода, не имеющее рыночных аналогов, на основе термодинамических, конструктивных и технологических параметров энергоблока. Методика определения термодинамической эффективности основана на классических системах уравнений материальных и тепловых балансов и содержит развитую систему учета факторов непостоянства количества и состава рабочего тела в ключевых точках цикла, фактора непрерывного обновления и отвода части рабочего тела, фактора зависимости состава рабочего тела от состава сжигаемого топлива. В основе методики определения энергетической эффективности лежат положения методов энергобалансов, когда каждое преобразование первичной энергии топлива в установке сопровождается потерями в каждом узле и агрегате при производстве электроэнергии. В основе метода определения стоимости оборудования лежит применение степенной параметрической функции.

В третьей главе приведены зависимости термического КПД, теплоперепада, эмиссии CO_2 и доли обновления рабочего тела от параметров входа рабочего тела в турбину и параметров окончания процесса расширения для четырех энергетических циклов:

1. Закритический кислородно-топливный цикл, полностью расположенный в зоне сверхкритических параметров CO_2 , с одноступенчатым подъемом давления насосом. Данный цикл запатентован автором диссертационной работы.
2. Закритический кислородно-топливный цикл с одноступенчатым подъемом давления компрессором.
3. Закритический кислородно-топливный цикл с конденсацией углекислоты и одноступенчатым подъемом давления насосом (цикл Allam-Z).
4. Закритический кислородно-топливный цикл с двухступенчатым повышением давления компрессором и насосом (цикл Аллама).

В ходе термодинамического исследования автором были сформированы рекомендации по выбору структуры и параметров кислородно-топливных циклов.

В четвертой главе представлены результаты энергетического анализа четырех CO_2 циклов. В ходе исследований энергетической эффективности было установлено, что КПД отпуска электроэнергии для вариантов бескомпрессорных CO_2 циклов достигает 51% против 37-43% для компрессорного варианта. Показано, что основной вклад в собственные нужды CO_2 циклов составляют затраты электроэнергии на производство кислорода и на привод компрессоров. Также установлено, что за счет подвода низкопотенциальной теплоты, например, от криогенной воздухоразделительной установки по производству кислорода, КПД цикла может быть повышен. Повышение температуры CO_2 перед входом в основной регенератор на каждые 25°C за счет подвода такого тепла ведет к росту эффективности цикла на $\sim 2\%$.

В пятой главе проведена поагрегатная оценка удельных капиталовложений в перспективные энергоблоки на основе CO_2 циклов. Установлено, что удельная стоимость

воздухоразделительной установки составляет 24–29% от полной стоимости оборудования энергоблока. В ходе технико-экономического анализа углекислотной турбины установлено, что повышение температуры на выходе из камеры сгорания на 100°C приводит к повышению стоимости турбины на 10–14%.

С учетом изменения капитальных вложений энергоблока, автором было установлено, что себестоимость производимой электроэнергии на основе CO₂ энергоблоков составляет 7,1-8,2 цента за кВт·ч, причем для вариантов цикла с ограниченным использованием компрессора данная величина составляет 9-10 центов. Себестоимость снижается по мере роста температуры рабочего тела для всех вариантов исполнения цикла. Наименьшей себестоимостью обладают энергоблоки на базе цикла Allam и цикла Allam-Z.

Можно заключить, что автор достаточно полно рассмотрел все научно-технические аспекты, связанные с решением поставленных задач, и достиг цели исследования.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы и результаты проведенного научного исследования.

3. Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что предложены новые 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. Предложены новые технические решения по производству электроэнергии на основе CO₂ циклов с нулевыми выбросами, защищенные патентами РФ.

4. Степень обоснованности научных положений результатов обеспечивается:

- использованием фундаментальных методов термодинамического анализа энергетических установок;
- использованием методов технико-экономического анализа и сопоставлением с результатами других исследователей;
- применением математических моделей кислородно-топливных циклов, которые базируются на апробированных подходах для решения задач подобного класса.

5. Значимость результатов для науки и практики.

Научная значимость работы заключается в развитии методов термодинамического, энергетического и технико-экономического анализа энергоустановок на CO₂-циклах, установлении влияния их термодинамических параметров на эффективность, оценке затрат на собственные нужды и стоимости оборудования, а также в сравнении исследуемых установок с другими перспективными технологиями генерации на органическом топливе. Совокупность полученных результатов создает научное обоснование перспектив углерод-нейтральной технологии производства электроэнергии и служит основой для дальнейших углубленных исследований.

Практическая значимость заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при создании перспективных кислородно-топливных энергоблоков и энергетической техники с оптимальными параметрами, обеспечивающими наивысшую энергетическую и экономическую эффективность.

6. Замечания по диссертационной работе

1. При моделировании автор не учитывал потери на охлаждение высокотемпературных углекислотных турбин, а также задался слишком «оптимистичными» показателями эффективности проточных частей турбомашин (в частности, КПД насоса принят равным 90%, КПД CO₂ турбины – 92%), что привело к завышению полученных оценок энергоэффективности для рассматриваемых в работе кислородно-топливных циклов.
2. Автором не указано ни то, как были получены безразмерные коэффициенты из таблиц 2.6 и 2.7, ни то, из какого литературного источника они взяты, хотя именно на этих коэффициентах строится дальнейшая экономическая оценка капиталовложений.
3. По результатам расчетов, представленных в диссертационной работе, запатентованная автором тепловая схема кислородно-топливного цикла проигрывает существующим кислородно-топливным циклам как в энергетическом, так и экономическом плане, что ставит под сомнение целесообразность дальнейшего развития данной технологии без выявления нишевых преимуществ, не учтенных в сравнительном анализе.
4. На рисунке 4.2 автор сравнивает «КПД выработки электроэнергии» рассматриваемых кислородно-топливных циклов с «термическим КПД» кислородно-топливного цикла Грац, что нарушает принцип сопоставимости.
5. В работе присутствует дублирование описания рассматриваемых кислородно-топливных циклов на стр. 63-64 и стр. 88-91.

Приведенные замечания не снижают положительной оценки диссертации и значимости полученных результатов. Соискатель проявил высокие профессиональные качества при моделировании кислородно-топливных циклов. Основные результаты опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базу цитирования Scopus. Содержание автореферата соответствует тексту диссертации. Данная работа является важным трудом для обеспечения развития высокоэффективной и экологически чистой энергетики в Российской Федерации.

7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати. По теме диссертации соискателем опубликовано 2 публикации в изданиях перечня ВАК Минобрнауки; 10 публикаций в зарубежном издании, индексируемая в базе данных Scopus; 20 публикаций в различных всероссийских и международных конференциях; 2 публикации в прочих рецензируемых изданиях. Также соискателем получено 2 патента на изобретения в РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Садкина Ивана Сергеевича «Комплексный анализ установок на основе CO₂ циклов с кислородным сжиганием метана» представляет собой завершённую научно-квалификационную исследовательскую работу, выполнена с использованием современных методов исследования, направлена на решение актуальной научной задачи повышения экологической безопасности тепловых станций в РФ. По актуальности, объёму, уровню выполненных исследований и полноте публикаций работа отвечает требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в п. 9, 10, 11, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 в редакции от 16.10.2024 «О порядке присуждения ученых степеней») к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, соответствует паспорту специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы». Соискатель **Садкин Иван Сергеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,
доцент кафедры
инновационных технологий
наукоемких отраслей
федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национального исследовательского
университета «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва,
вн. тер. г. муниципальный
округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д. 14
Телефон: +7 495 362-70-01 (ректор);
+7 495 362-75-60 (справочная)
Электронный адрес: universe@mpei.ac.ru
<https://mpei.ru>

В.О. Киндра

«06» апреля 2026 г.

Подпись Киндры В.О. заве
Проректор по науке и инн
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Комаров Иван Игоревич

Поступил в совет 08.04.2026 г.
Уч. секретарь ДС ВСУ / Комаров И.И.

С отзывом ознакомлен 09.04.2026 г.

Садкин И.С.