

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Садкина Ивана Сергеевича «Комплексный анализ установок на основе  $\text{CO}_2$  циклов с кислородным сжиганием метана», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности «2.4.5 – Энергетические системы и комплексы».

Диссертационное исследование выполнено в рамках направления применения кислородно-топливных энергетических установок на основе  $\text{CO}_2$  циклов, в которых углекислый газ используется в качестве рабочего тела. В соответствии с базовой технологией газообразное топливо сжигается в кислороде, продукты сгорания выступают рабочим телом, которое совершает работу в турбине. Пока не получены убедительные оценки термодинамической и энергетической эффективности установок на основе  $\text{CO}_2$  циклов, а также капиталовложений. Не созданы разномасштабные стенды для регистрации эксплуатационных параметров при сопоставимых входных условиях. Соответственно, нет возможности переносить разрозненные результаты научных исследований отечественных и зарубежных коллективов в экономику страны. В мировой науке в этом плане задел существенно больше, но тоже пока не так много примеров серийного применения соответствующих установок и блоков. Имеются отработанные технологии в нескольких странах, но на малых объемах и ограниченном списке энергоресурсов. Россия имеет потенциал сделать решения более эффективными и комплексными. Целесообразно квалифицированно определить нишу установок на основе  $\text{CO}_2$  циклов с кислородным сжиганием разных газов в энергетике страны. **Ниша диссертации И.С. Садкина** состоит в создании научной базы энергетических технологий с  $\text{CO}_2$  циклами при кислородном сжигании газовых топлив. **Тематика диссертационных исследований** является, безусловно, актуальной.

**Тема диссертации И.С. Садкина** соответствует приоритетному направлению развития науки, технологии и техники РФ: п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика», 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». Важно, что усилия автора диссертации способствуют решению важнейших задач для экономики России.

Диссертация И.С. Садкина **состоит из введения, пяти глав и заключения.** Целесообразно отметить хорошую структурированность рукописи диссертации и корректное использование автором совокупности разделов и подразделов в каждой главе. В конце диссертации представлены приложения с пояснением подготовленных заявок на РИДы и опытом внедрения результатов исследований. Они применяются в отрасли, образовательной и научной деятельности.

**Во введении** автор сформулировал проблему, на решение которой направлены исследования, и обосновывал целесообразность их проведения с акцентом на применение совокупности экспериментальных и расчетных методов. Обоснована целесообразность комплексных методов и подходов.

**В первой главе** диссертации выполнен 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 тепловой и электрической энергии. Сформулированы основные выводы по главе с выделением ключевых нерешенных в полной мере задач, мотивирующих настоящее диссертационное исследование.

**Во второй главе** представлены методические подходы к исследованию. Разработана методика и алгоритм расчета термодинамической эффективности энергетических циклов на сверхкритическом  $\text{CO}_2$ . Методика расчета основана на системах уравнений материальных и тепловых балансов. Сформулированы основные выводы по главе с обоснованием возможности применения предложенного подхода к сравнению с традиционными широко используемыми и перспективными способами производства тепловой и электрической энергии.

**В третьей главе** приведены результаты термодинамического анализа  $\text{CO}_2$  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. Сформулированы основные выводы по главе.

**В четвертой главе** приведены результаты оценки 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. Сформулированы основные выводы по главе.

**В пятой главе** приведены результаты технико-экономического анализа показателей производства электроэнергии на основе  $\text{CO}_2$  циклов, определены капиталовложения в основное оборудование  $\text{CO}_2$  энергоблоков и себестоимость производимой электроэнергии, мультипликативный эффект в экономике. Сформулированы основные выводы по главе.

**В заключении** представлены укрупненные формулировки выводов по результатам выполненных исследований и обобщений.

**Научная новизна** диссертации И.С. Садкина 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. Предложен учет факторов непрерывности обновления рабочего тела и непостоянства его состава.
3. 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 направленность** диссертации И.С. Садкина заключается в создании инструмента, позволяющего расчетным путем определить термодинамические, расходные и технические показатели, которые требуются для проектирования новых типов энергоблоков. Созданы научные основы для обоснования перехода к углерод-нейтральной технологии производства электроэнергии с использованием  $\text{CO}_2$  цикла. Автором диссертации показано, что по термодинамическим показателям установки на основе  $\text{CO}_2$  циклов сопоставимы с парогазовыми технологиями производства электроэнергии, по затратам электроэнергии собственных нужд уступают освоенным технологиям на органическом топливе, по себестоимости электроэнергии находятся в конкурентной зоне, а по мультипликативному эффекту превосходят их. Сформулированы рекомендации по применению результатов диссертационного исследования в энергетическом секторе страны. Автором подготовлено учебное пособие, которое применяется в НГТУ при обучении специалистов-энергетиков.

**Сформулированные научные положения** диссертационных исследований обоснованы. В тексте автореферата и диссертации приведены результаты, иллюстрирующие правомерность сделанных автором заключений.

**Достоверность полученных автором диссертации результатов** основана на использовании современных экспериментальных методик, высокоточного оборудования, сравнении с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Проводя оценку **научной и практической значимости** основных результатов, положений и выводов, представленных в диссертации, необходимо отметить, что автором выполнена масштабная научно-исследовательская и производственная работа, заслуживающая высокой оценки научного сообщества и специалистов в области энергетических циклов.

**Личный вклад** И.С. Садкина сформулирован развернуто в автореферате и диссертации.

Анализ содержания рукописи и автореферата диссертации И.С. Садкина дает основание для формулирования **замечаний и рекомендаций**:

1. В диссертации и автореферате используются два термина (методы и методики) в отношении разработанных решений в качестве синонимов, например, методы анализа, методики оценки и др. Важно выдержать единую терминологию и определиться, на авторство чего все-таки претендует соискатель.
2. В первой главе диссертации показано, что капиталовложения в основное оборудование и себестоимость вырабатываемой энергии с применением системы с CO<sub>2</sub> циклами находятся в конкурентной зоне с традиционной тепловой энергетикой. Корректность этого тезиса сильно зависит от совокупности энергетических, экономических, эксплуатационных, технологических, сырьевых, климатических, геополитических и иных факторов. Целесообразно их перечислить в главе 1 и обозначить относительный вес, привести конкретные примеры оценок с привязкой к некоторым показательным регионам России и мира.
3. Выбор методов исследований, материалов и диапазонов варьирования входных параметров в главе 2 необходимо обосновать с привязкой к конкретным фактам и аргументам из энергетической отрасли России и мира.
4. В диссертации получены зависимости, отражающие ключевые взаимосвязи выходных параметров с входными. Для применения инженерами важно эти зависимости обработать с применением современных математических подходов и обобщить с целью получения прогностических выражений с указанием конкретных диапазонов их применимости, обосновать правомерность их применения и гарантированную точность.
5. Акцент в диссертации сделан на сжигании метана. В России и мире активно применяют смеси с добавлением к метану совокупности других газов. Природный газ содержит помимо доминирующего метана совокупность других. Для соответствия этим тенденциям целесообразно привести оценки, насколько изменятся ключевые результаты и выводы диссертационной

работы при использовании наиболее реальных для России и мире газовых составов.

6. Предлагаемые автором диссертации решения направлены на разномасштабные по производительности энергетические системы. Целесообразным представляется создание испытательного комплекса для проведения опытных работ с проверкой синергетических эффектов от применения предложенных диссертационных исследований на разных масштабах. Без соответствующей апробации крайне сложно будет доводить результаты работы до реального применения в отрасли.
7. Предложенные в диссертации решения с CO<sub>2</sub> циклами имеют совокупность преимуществ и недостатков по сравнению с традиционными системами. Открытыми остаются вопросы о готовности производственной базы России для перехода к применению предлагаемых автором диссертации решений, могут ли предприятия страны произвести оборудование и технологические линии в целом с учетом действующих ограничений.
8. Экономические показатели работы во всех отраслях промышленности доминируют над всеми остальными критериями. Важно строго описать условия, при которых технологии выработки энергии с CO<sub>2</sub> циклами смогут стать лидерами по экономическим критериям. Интересны оценки не только в рамках России, но и мира в целом. Детальная проработка этого вопроса позволит найти нишу решениям автора диссертации в отрасли не в далекой перспективе, а уже в ближайшее время.

Сделанные замечания **не снижают высокой положительной оценки** диссертационной работы И.С. Садкина и носят в основном рекомендательный характер для развития исследований автора.

**Тема диссертации И.С. Садкина «Комплексный анализ установок на основе CO<sub>2</sub> циклов с кислородным сжиганием метана» соответствует паспорту специальности «2.4.5 – Энергетические системы и комплексы»: п. 1 – разработка методов расчета, алгоритмов выбора параметров, показателей качества энергетических установок на органическом топливе в целом и их основного и вспомогательного оборудования; п. 2 – 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 – разработка, исследование новых технологий для производства электрической энергии, использования органического топлива, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду; п. 7 – исследование влияния технических решений, принимаемых при создании энергетических установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели.

**Содержание автореферата соответствует содержанию рукописи диссертации.**

Результаты диссертационного исследования И.С. Садкина хорошо апробированы на **всероссийских и международных научных конференциях** (в г. Новосибирск, Красноярск, Иркутск, Томск, Москва, Сочи, Ульяновск, Саратов и др.) и **публиковались в журналах**, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций (Energy Conversion and Management, Arabian Journal for Science and Engineering, Applied Thermal Engineering, Journal of Engineering Thermophysics, Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, Теплофизика и Аэромеханика, Научный вестник Новосибирского государственного технического университета и др.). Всего по тематике диссертационных исследований опубликованы более 30 работ, в том числе 2 патента РФ на изобретения.

### **Заключение**

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации И.С. Садкина можно сделать вывод о том, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой приведены результаты решения крупной научно-практической задачи в области определения условий и интегральных характеристик применения установок на основе CO<sub>2</sub> циклов с кислородным сжиганием метана, имеющей существенное значение для сбалансированного по экономике, экологии и технологичности развития энергетики России. Диссертационная работа выполнена в

соответствии с требованиями, предъявляемыми ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а именно пп. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), а ее автор, Садкин Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент, доктор физ.-мат. наук, профессор,  
член-корреспондент РАН,  
профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова,  
заведующий лабораторией тепломассопереноса

Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
Стрижак Павел Александрович  
(3822) 606-102  
pavelspa@tpu.ru

Подпись П.А. Стрижака заверяю  
Ученый секретарь Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета,  
кандидат геолого-минералогических наук  
Новикова Валерия Дмитриевна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30  
т. 8(3822), 701-777, доп. 1910

16.03.2026

*Проект в совет 26.03.2026г.*

*Уч. секретарь ДС ДУ / Горюхи О.В. /*

*С отзывом ознакомлен, 30.03.2026*

- 8 -

*Профессор / Садкин И.С.*