

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.т.н. Рогалева Андрея Николаевича  
на диссертацию

**Рамазанова Эльдара Рамазановича**

«Методика параметрической оптимизации бескомпрессорных парогазовых установок с полным улавливанием углекислого газа внутри цикла»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Актуальность выбранной темы исследования определяется сформировавшимися в мировой и российской энергетике и энергомашиностроении тенденциями, связанными сегодня во многом с усилиями, направленными на предотвращение глобальных климатических изменений, в том числе за счет разработки технологий производства электрической энергии и тепла со сниженными (или «нулевыми») выбросами парниковых газов, которые, по одной из существующих гипотез, как раз и являются причиной глобального потепления.

Первоочередным способом борьбы с выбросами является повышение эффективности производства электроэнергии за счет совершенствования и оптимизации структуры и параметров технологических схем энергоустановок. Поэтому расширение базы методов, позволяющих осуществлять поиск решений, обеспечивающих максимум энергоэффективности при соблюдении условия экономической доступности вырабатываемой энергии, является актуальной задачей.

Проведенный соискателем обзор перспективных технологий демонстрирует, что в поиске технических решений и разработке энергоустановок для сокращения выбросов многие исследователи предлагают перейти к использованию нетрадиционных для существующей энергетике рабочих тел. В то время как традиционные энергоустановки в качестве рабочего тела в подавляющем большинстве используют воду или водяной пар, а также воздух или смесь воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив при сравнительно невысоких уровнях давления, то в установках с «нулевым» выбросом часто применяется углекислый газ, находящийся в цикле под высоким давлением в различных фазовых состояниях, гелий и другие рабочие тела.

Одной из таких установок, рассмотренных соискателем в ходе проведенного анализа, является бескомпрессорная парогазовая установка (БКПГУ) с полным улавливанием углекислого газа. Именно на примере такой установки автор решает задачу разработки методики оптимизации и проводит ее апробацию.

Переход на нетрадиционные для энергетики рабочие тела требует расширения инструментальной базы для разработки и исследования новых перспективных циклов, автоматизации проведения этих исследований для ускорения поиска оптимального решения.

В связи с вышеизложенным тема работы, посвященная разработке методики параметрической оптимизации энергоустановки с отличным от воды/пара/воздуха рабочим телом является актуальной.

**Научная новизна** работы заключается в разработке соискателем математической модели, описывающей термодинамические процессы, протекающие в БКПГУ и ее элементах, позволяющей посредством варьирования характеристик элементов БКПГУ, параметров цикла осуществлять поиск их оптимальных значений и их комбинаций при различных внешних условиях. Для обеспечения ускорения процесса проведения оптимизационных исследований автором предложены способы представления термодинамических веществ, входящих в состав рабочего тела, а также модель описания свойств рабочего тела.

**Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**, подтверждается корректной постановкой цели и задач исследования и обоснованным применением известных научных методов. Выносимые на защиту научные положения в полной мере отражены как в диссертации, так и в автореферате. Также обоснованность результатов подтверждается актом о внедрении, представленным научной организацией.

**Достоверность результатов диссертации.**

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием сертифицированных, общепринятых баз данных, фундаментальных законов исследуемых физических явлений и подтверждается высокой точностью соответствия достоверным справочным источникам.

**Практическая значимость диссертации** заключается в следующем:

1. Математические модели и созданные на их основе программно-вычислительные модули могут использоваться при моделировании энергетических комплексов на базе кислородного сжигания топлива. Разработанные модули также могут быть использованы для работы программ, моделирующих системы, где рабочее тело не может быть описано как идеальный газ.

2. Разработанная комплексная математическая модель новой схемы энергетической установки (бескомпрессорной парогазовой установки) и реализующий ее программный комплекс позволяют на начальных стадиях проектных работ выбрать оптимальные параметры термодинамического цикла и сформулировать основные требования к составным частям проектируемой установки.

### **Апробация работы**

Материалы, отражающие содержание диссертации, представлены в 8 печатных работах, в том числе 4 статьи – в рецензируемых научных изданиях международных реферативных баз данных и систем цитирования, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 1 публикация – в издании из перечня РУДН. Апробация материалов осуществлялась достаточно широко на российских и международных научно-практических конференциях. Публикации в должной мере отражают содержание работы.

### **Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Основное содержание диссертации:

Диссертация Рамазанова Эльдара Рамазановича состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обозначена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также выносимые на защиту положения.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору основных тенденций развития в области производства электрической и тепловой энергии. Приводится анализ энергетических комплексов, основанных на кислородном сжигании топлива, среди которых осуществляется выбор объекта исследования – бескомпрессорной парогазовой установки. Проведен обзор существующих программных средств для исследования термодинамических циклов и технологических схем энергетических установок. На основе выполненного аналитического обзора сформулированы задачи исследования.

Вторая глава исследования посвящена разработке математической модели, позволяющей описывать термодинамические свойства рабочего тела рассматриваемой установки. Приводится описание математических моделей для чистых веществ, смеси изменяющегося состава, а также методика моделирования термодинамических процессов на их основе. Для оценки результатов, полученных с помощью разработанных математических моделей, был выполнен анализ соответствия верифицированным справочным данными, который показал хорошую согласованность сравниваемых величин.

В третьей главе диссертационной работы приведено описание комплексной математической модели БКПГУ, системы уравнений, описывающих отдельные элементы рассматриваемой установки.

В четвертой главе приводится описание подходов к определению оптимальных параметров, изложен подход к поиску рациональных значений основных параметров энергогенерирующего объекта.

Пятая глава посвящена апробации предложенной автором методики на примере БКПГУ. Исследованы характеристики установки с применением разработанных программно-вычислительных модулей. Сформулированы

рекомендации к выбору параметров опытного образца рассматриваемого объекта.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Содержание автореферата отражает основное содержание диссертационной работы.

**По диссертационной работе имеются следующие замечания:**

1. Анализ литературных источников в большой степени посвящен тенденциям развития энергетики, обзору технологий производства энергии. Поскольку целью работы является разработка методики оптимизации, стоило больше внимания уделить вопросам анализа существующих методик, их достоинств и недостатков.

2. В качестве объекта для апробации методики и проведения исследований бала выбрана бескомпрессорная парогазовая установка как наиболее перспективная. При этом сравнение количественных характеристик, позволяющих сделать вывод о перспективности данной технологии, по сравнению с другими, в обзоре не приведено.

3. В результате проведенных исследований БКПГУ на основе разработанной модели показано, что максимальный КПД по выработке электрической энергии составляет 45,5%. В то же время КПД производства электроэнергии установки, работающей по циклу Аллама на газовом топливе, может достигать 54-56%. Поэтому вывод о перспективности выбранной технологий неочевиден.

4. В качестве преимущества БКПГУ, по сравнению с другими типами установок, выделяется возможность отпуска тепловой и электрической энергии. Отпуск тепловой энергии может быть организован и от других установок с низкими выбросами диоксида углерода, что повысит их коэффициент использования топлива. Сопоставления установок в равных условиях – с одинаковым отпуском тепла и электроэнергии – проведено не было. Поэтому вывод о перспективности БКПГУ, основанный только на этом критерии, нельзя считать корректным.

5. Утверждается, что предложенные методы моделирования «обеспечивают требуемую точность» и «высокую скорость вычислительного процесса». Было бы полезно привести сравнения по точности и скорости расчетов по предлагаемой методике и по существующим.

6. В п. 4 новизны отмечено, что построены математические модели как отдельных элементов, так и БКПГУ в целом. Элементами БКПГУ по большей части являются стандартные элементы – теплообменное оборудование, турбины, компрессоры и другое, для которых модели существуют. Было бы полезным отразить новизну разработанных моделей.

7. Из приведенного описания функционирования БКПГУ неясно: с какой целью в камеру сгорания подается водяной пар. Очевидно, что его подача приведет к снижению температуры в камере сгорания и, как следствие, к снижению полноты сгорания.

8. В работе указано, что «на всех исследовавшихся режимах» полнота сгорания топлива принималась постоянной. Необходимо пояснить конструктивное исполнение камеры сгорания и то, как обеспечивается постоянство полноты сгорания при изменении расхода пара в КС. Каков диапазон этих изменений в абсолютном и относительном выражении?

9. В работе отмечено, что «был выбран относительно невысокий уровень расчета». Термин «уровень расчета» требует пояснения. Также было бы желательно в цифрах понять, что такое «относительно невысокий» уровень.

10. В работе отмечается, что глобальным критерием эффективности является себестоимость производства электроэнергии. При этом в главе 5 ряд параметров, оказывающих существенное влияние на указанный критерий, выбран на основе экспертных оценок, в том числе температура перед турбиной, уровень начального давления, единичная мощность. Такой выбор выглядит недостаточно обоснованным.

11. Приведенное в работе утверждение, что «при равных размерах проточной части турбины, мощность пропорциональна давлению» является спорным и требует пояснения.

12. Разработанная автором модель позволяет осуществлять поиск значений эффективности при изменяемых параметрах технологических схем и характеристик ее элементов, определять на основании вариантных оптимизационных расчетов наилучшие сочетания варьируемых параметров, при этом модель не имеет ограничений диапазонов, задаваемых при моделировании варьируемых параметров, что в ряде случаев позволяет получать набор параметров, при котором система может оказаться неработоспособной. При проведении дальнейших исследований и развитии модели автору стоит уделить больше внимания рассмотрению ограничений и допущений модели и учету этих ограничений при проведении моделирования и интерпретации получаемых результатов.

Сделанные замечание не снижают ценности полученных результатов, являются пожеланием к автору по дальнейшему развитию и совершенствованию работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Рамазанова Эльдара Рамазановича «Методика параметрической оптимизации бескомпрессорных парогазовых установок с полным улавливанием углекислого газа внутри цикла» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение

актуальной научной задачи, имеющей важное научное и практическое значение. Полученные автором результаты достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, отвечает критериям п. 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов», утвержденного 23.09.2019 г. Ученым советом РУДН, протокол № 12, а ее автор, Рамазанов Эльдар Рамазанович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

### **Официальный оппонент**

Заведующий кафедрой  
инновационных технологий наукоемких отраслей  
Института энергоэффективности и водородных технологий  
ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»  
доктор технических наук (2.4.5),  
доцент

Рогалев Андрей Николаевич

9 декабря 2022 г.

Подпись А.Н. Рогалева удостоверяю.



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА  
ЦЕНТРА РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ  
Л.И. ПОЛЕВАЯ

Почтовый адрес: 111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,  
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.  
Тел.: 8 (495) 362-75-60,  
E-mail: rogalevan@mpei.ru