



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

*федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования*

**«Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ)**

пр-т Ленина, 46, г. Барнаул, 656038

Телефон: (3852) 29-07-10

Факс: (3852) 36-78-64

E-mail: altgtu@list.ru ;

ntsc@desert.secna.ru;

ОКПО 02067824

ОГРН 1022201517854

ИНН/КПП 2224017710/222401001

№ _____
На № _____ от _____

Председателю
диссертационного Совета
Д 212.298.09 на базе
ФГАОУ ВО «Южно-
уральский государственный
университет (НИУ)»

д.т.н., профессору
Рождественскому Ю.В.

454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И. Ленина, 76

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»

д.т.н., профессор
А.М. Марков
« » _____ 2019 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования «Алтайский государственный тех-
нический университет им. И.И. Ползунова» на диссертационную работу Гима-
зетдинова Руслана Раифовича «Разработка методов имитационного моделиро-
вания поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе компонентного
подхода в составе когенерационных энергетических установок», представлен-
ную в диссертационный совет Д 212.298.09 на соискание ученой степени кан-
дидата технических наук по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели»
(технические науки)

1 Актуальность темы исследования

Повышение энергоэффективности средств распределенной энергетики с

поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ПДВС) за счёт внедрения систем утилизации сбросового тепла является стратегически важным направлением развития энергетической отрасли России и экономики в целом. При этом необходимо решить ряд сложных научных и технических задач, связанных с повышением технического уровня ПДВС, предназначенных для работы в составе когенерационных установок (КГУ), в том числе, повысить их топливную экономичность, эффективность систем утилизации, обеспечить выполнение требований нормативных документов к выбросам вредных веществ с отработавшими газами и ресурсным показателям.

Решение этих задач связано с разработкой высокоэффективных методов и программных средств, обеспечивающих достоверное прогнозирование показателей ПДВС и КГУ на различных этапах их жизненного цикла, позволяющих на стадии проектирования выбирать рациональные конструктивные решения. Одним из таких высокоэффективных методов является имитационное моделирование, то есть создание «цифровой копии» двигателя и последующие его виртуальные испытания. Данное направление соответствует концепциям «Индустрии 4.0», «Цифровая экономика», активно продвигаемым Правительством РФ.

Внедрение методов имитационного моделирования ПДВС и КГУ может позволить значительно снизить затраты времени и материальных средств на разработку и создание первичных двигателей, тем самым, повысив конкурентоспособность отечественного двигателестроения. В соответствии с вышеизложенным тема диссертационного исследования Гимазетдинова Р.Р. является актуальной, а её результаты имеют большой теоретический и практический интерес.

2 Оценка структуры и содержания работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Объём диссертации (без приложений) составляет 187 страниц.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы диссертации, показана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и сведения об апробации и публикации результатов работы.

В **первой главе** автором выполнен обзор и анализ текущей ситуации в отрасли малой энергетики, обоснована актуальность разработки КГУ на основе ПДВС. Показано, что применение технологий имитационного моделирования позволит существенно снизить затраты времени и материальных ресурсов на разработку и модернизацию первичных ПДВС для КГУ. Выполнен анализ особенностей функционирования ПДВС в составе КГУ, выявлены факторы, в наибольшей степени влияющие на процессы в системах и механизмах двигателя.

Анализ существующих методов математического моделирования первичных ПДВС в составе КГУ позволил автору выявить основные проблемы, касающиеся детальности описания и трудоемкости расчета, сопряжения математических описаний процессов, относящихся к различным доменам, различного масштаба времени протекания этих процессов, целесообразности применения тех или иных подходов при имитационном моделировании. Автором показано, что существующие методы математического моделирования первичных ПДВС в составе КГУ не в полной мере отвечают потребностям разработчиков, что предопределяет научную составляющую актуальности диссертации.

Необходимо отметить, что Гимазетдиновым Р.Р. при анализе были охвачены аспекты научной проблемы, относящиеся к различным областям физики (газо- и гидродинамика, термодинамика, механика), химии, математического моделирования сложных технических систем. Автор в полной мере владеет информацией, касающейся самых современных и актуальных направления развития методов имитационного моделирования и цифровых технологий в сфере двигателестроения, как в России, так и за рубежом, знает их достоинства и недостатки, умеет грамотно формулировать научные задачи, цели и ограничения исследования, обосновывать целесообразность применения различных подходов и методов.

Вторая глава посвящена разработке методов имитационного моделирования ПДВС в составе КГУ. Автором обосновано применение методов многоуровневой декомпозиции, математической формализации компонентов и синтеза компонентных имитационных моделей применительно к ПДВС и КГУ в целом. В основе методов лежит компонентный подход, дающий возможность создавать модели ПДВС и КГУ произвольной структуры. Связи между компонентами унифицированные и ненаправленные, что позволило автору избежать недостатка, присущего многим имитационным моделям, а именно, несовместимости отдельных компонентов.

Компоненты описаны хорошо известными математическими моделями, что повышает степень достоверности результатов исследования. В то же время, применены новые и нетрадиционные подходы, например, прямое численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих кинематику кривошипно-шатунного механизма, или использование удельной энтропии в качестве переменной гидродинамической связи. В совокупности вышеизложенное позволило автору создавать имитационные модели любой структуры, в том числе с ранее неизвестными техническими решениями, что придаёт научным результатам диссертационного исследования высокую степень теоретического обобщения и универсальности при практическом применении.

Несомненной практической значимостью обладает программное обеспечение, разработанное с участием автора, являющееся инструментом для ре-

шения конкретных инженерных задач. Практический выход теоретической части исследования в лучшую сторону отличает диссертацию Гимазетдинова Р.Р. от многих других работ.

В **третьей главе** изложены методики валидации (определения адекватности) разработанных математических моделей и верификации (оценки соответствия заданным требованиям) программного обеспечения, описаны макетный образец КГУ с ПДВС и методика его испытаний, тестовая имитационная модель.

Все методики полностью отвечают требованиям действующих нормативно-технических документов, в том числе к точности измерений, соответствуют задачам диссертационного исследования. Автор продемонстрировал хорошее владение методологией экспериментальных исследований, грамотного анализа и обработки их результатов.

В **четвертой главе** приведены результаты валидации и верификации, которые подтвердили адекватность математических моделей и соответствие программного обеспечения заданным требованиям. Точность определения показателей двигателя и КГУ достаточна для решения практических задач их создания и модернизации, она существенно меньше, чем максимально допустимая погрешность инструментальной оценки, что позволяет заменить натурные испытания имитационным моделированием.

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждена правильным выбором средств и методов измерений, применением только аттестованных приборов и оборудования, стандартных методик обработки результатов.

В **пятой главе** приведены примеры практической апробации основных научных результатов диссертации. С участием автора и с применением созданных математических моделей разработано техническое решение, заключающееся в том, что сердцевины теплообменников охлаждающей жидкости и смазочного масла находятся в общем корпусе контура системы утилизации сбросового тепла двигателя, что позволило упростить конструкцию системы и стабилизировать температурное состояние рабочих сред. Новизна технического решения подтверждена патентом.

Автором обосновано техническое решение, заключающееся в том, что за счёт повышения коэффициента теплоотдачи сердцевины теплообменников системы утилизации сбросового тепла двигателя путем организации пристеночных турбулентных потоков с оптимальной ориентацией её КПД повышен с 54 % до 70 %.

Приведенные в главе данные демонстрируют возможности практической реализации научных результатов диссертационного исследования и дополнительно подтверждают адекватность разработанных математических моделей и методов имитационного моделирования ПДВС в составе КГУ. В конце главы выполнено технико-экономическое обоснование эффективности системы утилизации сбросового тепла двигателя.

В заключении приведены выводы, отражающие основные итоги диссертационной работы. Приведенные результаты четко сформулированы, конкретны, соответствуют целям и задачам исследования, отражают её научную новизну, практическую ценность и перспективы дальнейшей разработки.

3 Новизна полученных результатов

Научной новизной обладают методы имитационного моделирования ПДВС произвольной структуры, учитывающие особенности их функционирования в составе КГУ, основанные на компонентном подходе и отличающиеся от известных:

- математическим описанием компонентов и процессов в ПДВС и КГУ, реализующим декларативный подход при их математической формализации и создании программного обеспечения;

- использованием ненаправленных связей между компонентами при синтезе имитационных моделей ПДВС и КГУ, описанных уравнениями баланса потенциальных и потоковых фазовых переменных;

- применением граничных условий, отражающих особенности режимов функционирования КГУ с ПДВС в составе автономных систем энергоснабжения.

Выполненный Гимазетдиновым Р.Р. анализ существующих методов имитационного моделирования ПДВС и КГУ позволил обосновать применение компонентного, объектно-ориентированного и системного подхода для решения задач диссертационного исследования. Эти подходы были адаптированы с учетом особенностей режимов и внешних условий функционирования ПДВС в составе КГУ, в том числе: выполнена декомпозиция обобщенной математической модели ПДВС, компоненты интерпретированы с учетом особенностей конструктивного исполнения ПДВС и КГУ, выделены общие методы и свойства компонентов для всех основных доменов ПДВС и КГУ, выделены и унифицированы связи между компонентами.

Хотя использованные автором уравнения, лежащие в основе математических моделей компонентов, и методы имитационного моделирования сложных технических систем известны, новизну результатов диссертационного исследования характеризуют следующие признаки: совокупность компонентов, из которых состоит имитационная модель, интерпретированных с учетом конструктивных особенностей ПДВС и КГУ, включающая граничные условия, отражающие особенности режимов функционирования КГУ с ПДВС в составе автономных систем энергоснабжения; взаимосвязь компонентов (уравнений) модели, учитывающая особенности функционирования ПДВС в составе КГУ. Поэтому новизна научных результатов диссертации не вызывает сомнения.

4 Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации

Значимый теоретический результат исследования – методы многоуровневой декомпозиции ПДВС в составе КГУ, математической формализации компонентов и синтеза компонентных имитационных моделей ПДВС в составе КГУ. Разработанные методы дают возможность создания имитационных моделей, применимых для решения широкого спектра научных задач, связанных с созданием и совершенствованием ПДВС и КГУ, включая: обоснование выбора схемных решений КГУ, необходимости внесения тех или иных конструктивных изменений в ПДВС, предварительную оценку эффективности новых технических решений, оптимизацию режимов функционирования КГУ в составе автономных систем энергоснабжения и т.д.

Несомненной практической значимостью обладает разработанная с участием автора программа для имитационного моделирования когенерационной энергетической установки с поршневым двигателем внутреннего сгорания, которая может быть использована при решении инженерных задач по созданию и совершенствованию первичных ПДВС и КГУ.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждена их внедрением в ООО «ЧТЗ-Уралтрак», при адаптации дизелей типа ЧН13/15 для работы в составе КГУ и в Южно-Уральском государственном университете при проведении расчетов дизелей типа 12ЧН13/15 и 6ЧН15/16 в рамках выполнения хоздоговорных работ и государственных контрактов.

5 Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных научных результатов обусловлена применением поверенных и аттестованных, в соответствии с действующими нормативно-техническими документами, средств измерений, стандартизованных методик испытаний двигателей и энергоустановок, методик тестирования программного обеспечения.

Автором используются общепризнанные и многократно апробированные математические модели, описывающие процессы в системах и механизмах двигателя. Результаты имитационного моделирования сравниваются с экспериментальными данными и данными других ученых, а также с результатами расчетов, выполненных с применением широко распространенных в двигателестроительной отрасли программных продуктов.

Результаты диссертационного исследования обсуждались на научных конференциях и семинарах, они с достаточной полнотой изложены в трех журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

6 Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области поршневого двигателестроения в части касающейся совершенствования методов математического (в том числе имитационного) моделирования процессов ПДВС и объектов их применения, создания отечественного конкурентоспособного программного обеспечения для расчета ПДВС.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано при решении конкретных инженерных задач по совершенствованию ПДВС и КГУ. Его применение позволит существенно снизить затраты времени и средств на проведение натурных испытаний и конструкторско-доводочных работ.

7 Замечания по диссертационной работе

В целом диссертационная работа Гимазетдинова Р.Р. заслуживает высокой оценки. В качестве замечаний можно отметить следующие:

1. В материалах диссертации и автореферате не приведено сравнение результатов расчетов, выполненных с применением разработанных с участием автора математических моделей и программного обеспечения, и известных программных продуктов (например, фирм AVL, Ricardo и др.), где реализованы методы имитационного моделирования.

2. Уравнение Фурье-Кирхгофа (выражение 2.53) представлено в частных производных, в то время как математическая модель основана на решении системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений с применением решателя DASSL (differential / algebraic system solver). Из текста диссертации не понятно, каким образом система уравнений Фурье-Кирхгофа для сеточной модели твердого тела решалась с помощью решателя DASSL.

3. Как известно, программы, созданные на языке моделирования Modelica, работают существенно медленнее, чем написанные, например, на языках C++ или Fortran. Возможно, было бы целесообразнее разработать программное обеспечение с применением более «быстрых» языков программирования.

4. Информация, представленная в заключении по диссертационному исследованию, крайне лаконична и практически не содержит количественных оценок, касающихся эффективности разработанных автором методов имитационного моделирования и математических моделей компонентов и связей в виде ПО, предназначенных для создания, совершенствования и повышения конкурентоспособности ПДВС в составе КГУ и КГУ в целом.

5. Одной из центральных задач, которые перед собой ставит автор для достижения целей диссертационного исследования, является адаптация принципов имитационного моделирования к процессам в ПДВС, работающим в со-

ставе КГУ на основе компонентного подхода. Однако, по представленным материалам сложно оценить личный вклад автора в методы имитационного моделирования ПДВС в составе КГУ с различными конструктивными решениями и отличие от известных методик моделирования.

6. Математическая модель ПДВС, описанная автором в тексте диссертации, не включает блоки, связанные с моделированием топливоподачи, систем автоматического регулирования и управления процессами ПДВС, других систем и механизмов (например, механизма газораспределения). Видимо, эти вопросы автор будет планировать и развивать в дальнейших исследованиях.

7. На стр. 134 диссертационного исследования автор приводит расчетные и экспериментальные индикаторные диаграммы дизеля 4ЧН15/20.5, видимо, в качестве элемента валидации разработанной математической модели ПДВС, утверждая, что они (диаграммы) практически полностью совпадают для всех режимов работы двигателя. В связи с этим требуют пояснения вопросы, а именно: все же для каких конкретно режимов работы проводились расчетно-экспериментальные исследования (скоростных, нагрузочных, других) и какова степень адекватности эксперимента и модели рабочего процесса дизеля.

8. К сожалению, в работе имеются отдельные неточности: путаница с номерами формул и ссылками на литературные источники, коэффициент теплопроводности в уравнении Фурье λ почему-то назван коэффициентом теплопередачи.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической ценности выполненных автором исследований и не ставят их под сомнение.

Заключение

В целом необходимо отметить, что диссертационное исследование выполнено автором самостоятельно, обладает внутренним единством, диссертация изложена грамотным техническим языком, оформлена в полном соответствии с требованиями ВАК. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели», так как в ней изложены результаты разработки математических моделей и программ для исследований тепловых двигателей и их систем, обеспечивающих надежное прогнозирование его жизненного цикла. Требования к публикации основных результатов в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, соблюдены. В тексте даны ссылки на источники информации и авторов. Содержание автореферата полностью соответствует диссертации в части основных положений, результатов и выводов.

Диссертационная работа Гимазетдинова Р.Р. «Разработка методов имитационного моделирования поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе компонентного подхода в составе когенерационных энергетических

установок» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача разработки методов создания имитационных моделей поршневых двигателей внутреннего сгорания в составе когенерационных установок, что позволяет повысить эффективность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по их созданию и модернизации.

Таким образом, диссертация соответствует критериям, установленным п.п. 9...14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а её автор, Гимазетдинов Руслан Раифович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели».

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» (протокол № 3 от 26.11.2019).

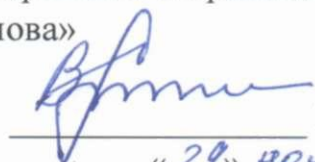
Отзыв составлен:

д.т.н., профессором
Свистулой Андреем Евгениевичем,
заведующим кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»
ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова»


А.Е. Свистула
«29» ноября 2019 г.

Докторская диссертация защищена по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

д.т.н., профессором
Синицыным Владимиром Александровичем,
профессором кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»
ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова»


В.А. Синицын
«29» ноября 2019 г.

Докторская диссертация защищена по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Адрес организации: 656038, Алтайский кр., г. Барнаул, пр. Ленина, 46
Рабочий телефон: +7(3852)29-07-10
Адрес эл. почты: altgtu@list.ru