

На правах рукописи



Гимазетдинов Руслан Раифович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ
КОМПОНЕНТНОГО ПОДХОДА В СОСТАВЕ
КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

05.04.02 – Тепловые двигатели.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Челябинск – 2019

Работа выполнена на кафедре колесных и гусеничных машин Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Научный руководитель: **Малозёмов Андрей Адиевич**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры колесных и гусеничных машин
ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)», г. Челябинск

Официальные оппоненты: **Еникеев Рустэм Далилович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего
сгорания» ФГБОУ ВО «Уфимский государствен-
ный авиационный технический университет»,
г. Уфа

Руднев Валерий Валентинович
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой Автомобильного транспор-
та, информационных технологий и методики
обучения техническим дисциплинам ФГБОУ ВО
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-
педагогический университет», г. Челябинск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный техниче-
ский университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Защита состоится «27» декабря 2019 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп. Тел/факс: (351) 267-91-23, E-mail: D212.98.09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте <https://www.susu.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

 Лазарев Е. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергетика является системообразующей и стратегически важной для социальной сферы, промышленности, сельского хозяйства и национальной безопасности отраслью экономики РФ. Основные цели и задачи её развития сформулированы в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» (утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р), в том числе, развитие технологий когенерации электрической и тепловой энергии в системах автономного энергообеспечения на основе дизельных и газопоршневых электростанций. В настоящее время их количество достигает 50 тыс., а суммарная вырабатываемая электрическая мощность – 17 млн. кВт. Увеличение доли когенерационных энергоустановок (КГУ), оснащенных системами утилизации сбросового тепла (СУТД) первичных поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС), может дать экономию топлива до 12 % в отрасли малой теплоэнергетики и до 4 % от общей выработки тепла в РФ.

Посланием Президента РФ Федеральному Собранию от 01.12.2016 предусмотрено, что «... необходимо запустить масштабную системную программу развития экономики нового технологического поколения, так называемой цифровой экономики». Цифровая экономика требует максимального сокращения времени на разработку и постановку продукции на производство, что может быть достигнуто заменой дорогостоящих и трудоемких натуральных экспериментов исследованиями, проводимыми с использованием имитационных математических моделей, адекватно описывающих процессы в их системах и механизмах ПДВС в составе КГУ, реализованных в виде программного обеспечения (ПО). Однако в настоящее время такое специализированное отечественное ПО отсутствует, зарубежное имеет высокую стоимость, а его функциональные возможности ориентированы на создание ПДВС и не в полной мере отвечают требованиям разработчиков КГУ.

Степень разработанности темы исследования. Поршневые ДВС, применяемые в составе КГУ, должны учитывать особенности режимов их функционирования и требования нормативно-технических документов к показателям назначения и безопасности. Поэтому для КГУ обычно разрабатываются специальные модификации на базе серийных ПДВС. ПДВС в составе КГУ представляет собой сложную мультидоменную, динамическую, открытую систему, состоящую из множества компонентов, в которых протекают сопряженные процессы, относящиеся к газо-, гидро- и термодинамике, химической кинетике, кинематике и динамике, на которые оказывают влияние процессы в СУТД и режимы электрического и теплового нагружения КГУ.

Рабочие процессы в камере сгорания ПДВС изучались И.И. Вибе, Н.Ф. Разлейцевым, А.С. Лышевским, А.С. Кулешовым, Р.З. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко, Е.А. Лазаревым, А.Е. Свистулой, В.Г. Камалтдиновым, P.J. O'Rourke, N. Nordin, C. Bai, A. Gosman, H. Hiroyasu, G. Woschni, F. Anisits, H.A. Carrant, W. Pitz, V. Golovichev и многими другими.

Вопросами газовой динамики ПДВС занимались ученые: М.М. Вихерт, Ю.Г. Грудский, Б.Х. Драганов, М.Г. Круглов, А.А. Меднов, О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов, В.А. Нефедов, Ю.А. Гришин, Р.Д. Еникеев, А.А. Черноусов, В.Г. Дьяченко, В.Р. Гальговский, В.А. Зенкин, Н. Hiereth, J.D. Annand, G.E. Roe, W.B. Wallace, F.J. Arnau и др.

Термодинамические процессы в системах жидкостного охлаждения ПДВС исследовали Р.М. Петриченко, Н.Х. Дьяченко, Г.Б. Розинблит, А.К. Костин, Б.С. Стефановский, Р.З. Кавтарадзе, Н.Д. Чайнов, Д.О. Онищенко, О.Н. Лебедев и др. Вопросы моделирования гидродинамических процессов в системах охлаждения ПДВС занимались Ф.Л. Ливенцев, А.Я. Якубович, Ю.В. Галышев, В. Luptowski, W.F. Stoecker и др.

Вопросами моделирования гидродинамических процессов в системах смазки ПДВС занимались Ф.Б. Барченко, С.Г. Роганов, Е.А. Шутков, Р.А. Насыров. Механические потери в ПДВС – предмет исследования Д.Д. Матиевского, И.Ф. Ефремова, С.В. Путинцева, С.М. Taylor, S.K. Chen, S.F. Rezek, K.J. Patton, R.G. Nitschke, J. Shayler, D. Leong, M. Murphy и др.

Работы вышеупомянутых ученых содержат результаты теоретических исследований процессов в отдельных системах и агрегатах ПДВС, не связанных между собой в единую сопряженную математическую модель энергоустановки, что не позволяет исследовать их взаимное влияние с достаточной для решения задач создания и совершенствования ПДВС и КГУ степенью достоверности, в особенности на транзитных режимах и при различных масштабах времени процессов.

Вопросам математического моделирования и повышения эффективности энергоустановок с ПДВС, в том числе КГУ, посвящены исследования В.В. Медведева, В.С. Ерышева, Д.Т. Хоанг, О.С. Хватова, P. Skolnik. В них, с целью выравнивания масштабов времени процессов, использовано упрощенное математическое описание ПДВС, как системы с усредненными по циклу параметрами, что не позволяет детально оценить влияние конструкции и режимов функционирования КГУ на показатели быстротекущих процессов ПДВС.

В работах М.В. Малиованова, Р.Н. Хмельёва и Э.С. Темнова ПДВС рассмотрен как мультидоменная система с ненаправленными связями, аналогичный подход использован в коммерческом ПО AVL Boost, Ricardo Wave, GT-Suite, AmeSim и др. Однако реализованные в них математические модели не предназначены для расчета ПДВС в составе КГУ, содержащих СУТД, процессы в которых должны быть сопряжены, не включают граничные условия, отражающие особенности режимов функционирования электрических и тепловых сетей. Связи между компонентами ПДВС являются ненаправленными и традиционный императивный (основанный на последовательных алгоритмах) подход к математическому моделированию не отражает физическую сущность процессов.

Поршневой двигатель не является конечным продуктом, он всегда работает в составе машины (энергоустановки, транспортного средства и т.д.), поэтому

при создании и совершенствовании ПДВС необходимо учитывать особенности конструкции объекта применения, режимов и условий функционирования. Поршневые двигатели в составе КГУ имеют разнообразную структуру (число цилиндров, конфигурацию механизмов, схему систем охлаждения, смазки, СУТД и т.д.), включают разнообразные, в том числе ранее неизвестные, технические решения и не могут быть с достаточной точностью описаны в рамках одной универсальной параметризованной математической модели.

Вышеперечисленное негативно отражается на эффективности (качестве и трудоемкости) научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию и совершенствованию ПДВС для КГУ, так как вынуждает разработчиков выполнять большое количество натурных испытаний.

ПДВС в составе когенерационных установок, как и другие составляющие КГУ являются сложными динамическими системами и аналитическое решение систем уравнений, описывающих их основные показатели (например, параметров назначения, безопасности и энергоэффективности) с учетом разнообразия структуры, является нецелесообразным. При создании и совершенствовании ПДВС в составе КГУ более рационально применение метода имитационного моделирования, т.е. создание «цифрового двойника» ПДВС и КГУ в целом, его исследование, выбор рациональных конструктивных и регулировочных параметров при различных граничных условиях, соответствующих особенностям эксплуатации.

«Цифровая экономика» выдвигает следующие дополнительные требования к создаваемым в ходе научно-исследовательских работ математическим моделям:

- реализация моделей в виде ПО, как практического инструмента решения инженерных задач, методы создания математических моделей должны быть ориентированы на современные методы программирования;
- создание унифицированных математических описаний основных компонентов моделей, их объединение в библиотеки, должно обеспечивать возможности тиражирования и многократного использования;
- обеспечение сопряжения разрабатываемых математических моделей с существующими, такими как модели ПДВС, СУТД, электрогенератора и системы управления в составе КГУ, применением унифицированных связей.

Область исследования (согласно п. 3 паспорта научной специальности 05.04.02 – тепловые двигатели): разработка математических моделей и программ для исследований тепловых двигателей и их систем, обеспечивающих надежное прогнозирование жизненного цикла двигателя.

Объект исследования: взаимосвязанные тепловые, газодинамические, гидродинамические, механические и физико-химические процессы ПДВС в составе КГУ.

Предмет исследования: закономерности взаимного влияния процессов в ПДВС в составе КГУ и в КГУ в целом.

Цель исследования: разработать методы имитационного моделирования ПДВС и элементов КГУ для их создания и совершенствования, в целях повышения эффективности и конкурентоспособности КГУ в целом.

Задачи исследования:

1) Адаптировать принципы имитационного моделирования к процессам в ПДВС, работающим в составе КГУ на основе компонентного подхода.

2) Реализовать методы:

- многоуровневой декомпозиции применительно к ПДВС и КГУ;
- математической формализации компонентов ПДВС и КГУ;
- синтеза компонентных имитационных моделей ПДВС в составе КГУ.

3) Использовать разработанные методы имитационного моделирования и математические модели компонентов и связей в виде ПО, предназначенного для создания, совершенствования и повышения конкурентоспособности ПДВС в составе КГУ и КГУ в целом.

4) Выполнить валидацию тестовой имитационной модели по результатам экспериментальных исследований ПДВС и макетного образца КГУ с использованием разработанного ПО.

5) Апробировать методы имитационного моделирования, математические модели компонентов и связей при разработке технических решений по совершенствованию КГУ с ПДВС.

Научные результаты обладающие **новизной** составляют методы имитационного моделирования ПДВС в составе КГУ произвольной структуры с различными конструктивными решениями, учитывающие особенности функционирования, 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 ПО;

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

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

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные методы имитационного моделирования применительно к ПДВС в составе КГУ и КГУ в целом дают возможность решения широкого спектра научных проблем, связанных с их созданием и совершенствованием.

Практической значимостью обладают:

- разработанное программное обеспечение для имитационного моделирования когенерационной энергетической установки с поршневым двигателем

внутреннего сгорания (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610874 от 18.01.2019), которое может быть использовано при решении инженерных задач по созданию и совершенствованию ПДВС и КГУ в целом;

- техническое решение по совершенствованию СУТД ПДВС – теплообменник СУТД в системе охлаждения и смазки ПДВС в общем корпусе (патент РФ на полезную модель № 183358 от 19.09.2018), позволяющее упростить конструкцию СУТД при сохранении стабильных показателей температуры масла и охлаждающей жидкости ПДВС.

На защиту выносятся: методы имитационного моделирования ПДВС в составе КГУ, основанные на компонентном подходе:

- многоуровневой декомпозиции ПДВС в составе КГУ;
- математической формализации компонентов;
- синтеза компонентных имитационных моделей ПДВС в составе КГУ.

Методология и методы исследования включают расчетно-теоретические методы, основанные на известных и широко апробированных зависимостях теории ПДВС, газовой динамики и термодинамики, химической кинетики, математического моделирования сложных динамических систем, которые были уточнены для учета особенностей конструкции и режимов функционирования в составе КГУ. Для валидации математических моделей и ПО проведены экспериментальные исследования ПДВС и макетного образца КГУ.

Достоверность результатов подтверждена валидацией разработанных математических моделей и ПО с использованием данных экспериментальных исследований ПДВС и макетного образца КГУ, применением аттестованного в установленном порядке испытательного оборудования и методов стендовых испытаний, соответствующих действующим нормативно-техническим документам, сопоставлением результатов с данными других исследователей.

Апробация результатов:

Основные результаты работы были доложены на конференциях:

- X международная научно-практическая конференция ЦНК МНИФ «Общественная наука» 12 октября 2017 г., г. Санкт-Петербург;
- VII всероссийская научно-практическая конференция научных, научно-педагогических работников и аспирантов «Управление в современных системах», 14 декабря 2017 г., г. Челябинск;
- II всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения», 22 марта 2018 г., г. Челябинск.

Результаты исследования внедрены:

- 1) ООО «ЧТЗ-Уралтрак» – при адаптации дизелей типа ЧН13/15 для работы в составе КГУ.

2) ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – при проведении расчетов дизелей типа 12ЧН13/15 и 6ЧН15/16 в рамках выполнения хоздоговорных работ и государственных контрактов.

Внедрение подтверждено актами.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 12 печатных работах, в том числе: 3 – издания из перечня ВАК по специальности 05.04.02, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 191 стр. машинописного текста, 66 рисунков, 17 таблиц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 253 источников и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, оценена степень её разработанности, приведены объект и предмет исследования, научная новизна и практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен анализ тенденций развития энергетики РФ и проблем, стоящих перед производителями КГУ на базе первичных ПДВС. Показано, что в рыночных условиях производители стремятся максимально снизить время на расчет и конструктивную разработку первичных ПДВС и СУТД, уменьшить вероятность ошибок. Это может быть достигнуто применением специализированного ПО, позволяющего быстро создать и с высокой степенью точности и детальности рассчитать имитационную модель ПДВС для КГУ любой конструктивной схемы.

Сформулированы ограничивающие параметры имитационных моделей, основанные на действующих нормативно-технических документах с требованиями к параметрам назначения, безопасности и энергоэффективности первичных ПДВС и КГУ. Показано, что граничные условия для разрабатываемых имитационных моделей обусловлены условиями теплообмена компонентов (включая ПДВС и СУТД) с окружающей средой, механической нагрузкой на ПДВС (зависящей от электрической нагрузки), тепловой нагрузкой на СУТД.

Выполненный анализ (рисунок 1) показал, что наличие СУТД оказывает существенное влияние на процессы практически всех систем и механизмов ПДВС и, соответственно, на все параметры назначения, безопасности и энергетической эффективности КГУ.

В существующих в настоящее время математических моделях ПДВС в составе КГУ указанные противоречия не решены, но эти модели можно использовать в качестве основы для разрабатываемых методов имитационного моделирования.

В конце первой главы сформулированы научная задача, цель, гипотеза, задачи, основные этапы и методология исследования.

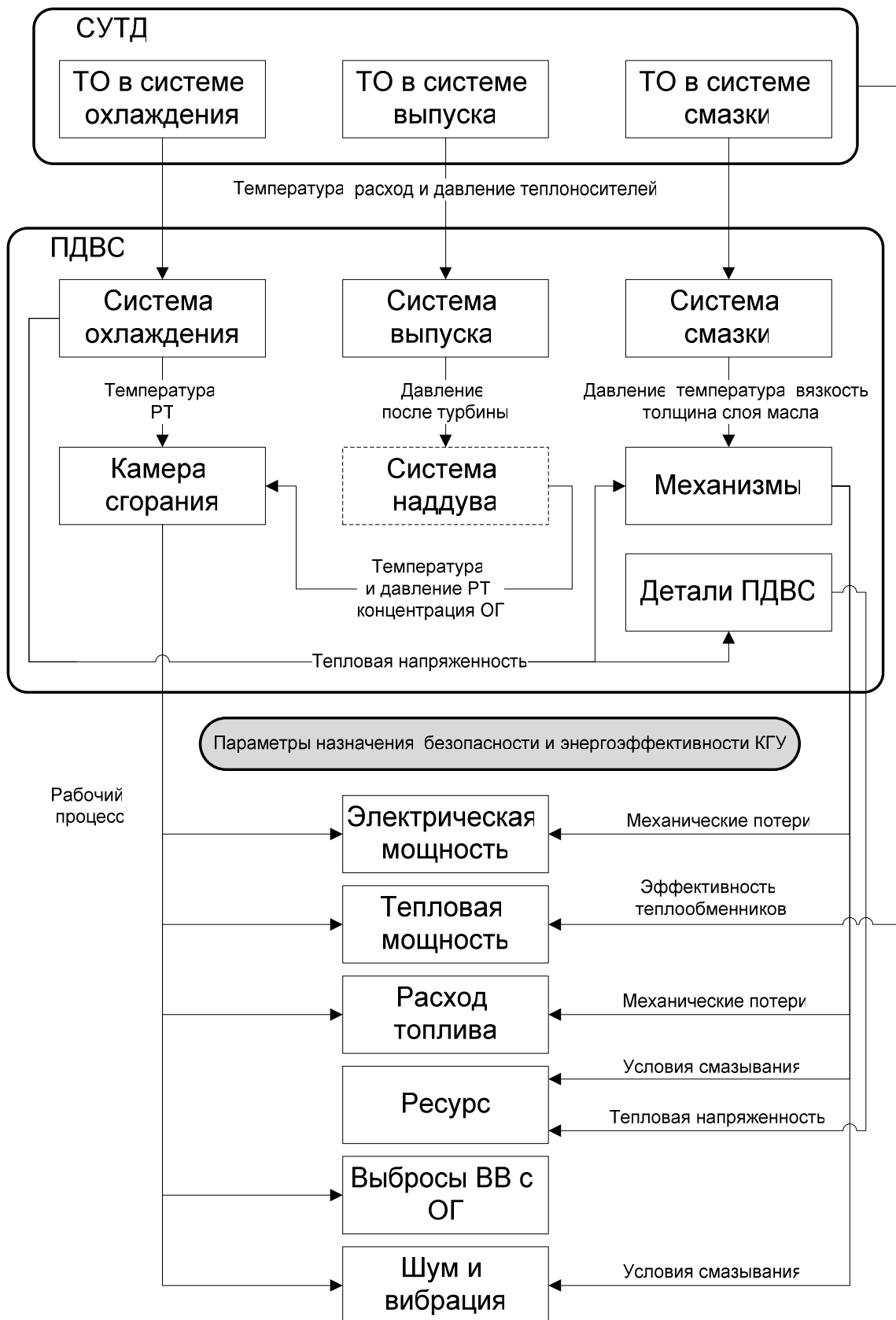


Рисунок 1 – Влияние процессов СУТД на процессы ПДВС и параметры назначения, безопасности и энергетической эффективности КГУ

Во **второй главе** разработаны методы имитационного моделирования ПДВС в составе КГУ.

Обоснованы общие принципы имитационного моделирования первичных ПДВС и КГУ, основанные на подходах:

- компонентном – имитационная модель ПДВС и КГУ составляется из готовых библиотечных компонентов с ненаправленными связями между собой;
- объектно-ориентированном – из математического описания первичного ПДВС и КГУ выделяются компоненты и связи, реализующие аналогичные методы преобразования данных;
- системном – первичный ПДВС и КГУ рассматриваются как динамические системы с изменяемой структурой, состояние которой декларативно описывается системой алгебраических и дифференциальных уравнений.

Сформулированы требования к имитационной модели (и, соответственно, ПО), которая должна позволять описывать транзитные, мультидоменные и сопряженные процессы различного масштаба времени.

Разработаны методы:

- многоуровневой декомпозиции ПДВС в составе КГУ;
- математической формализации компонентов;
- синтеза компонентных имитационных моделей ПДВС в составе КГУ.

Метод декомпозиции ПДВС и КГУ основан на выделении функционально законченных элементов конструкции, из которых может быть составлена библиотека типовых компонентов. Каждому компоненту ставится в соответствие математическое описание его методов и свойств, а также определяются его интерфейсы, связывающие с другими компонентами.

Каждый компонент может представлять достаточно сложный объект, поэтому декомпозиция применяется иерархически, при этом на нижнем уровне системной иерархии выделяются элементы, являющиеся носителями свойств и методов с точки зрения генерации, расходования, преобразования, передачи и накопления энергии.

Каждый компонент имитационной модели обменивается со связанными компонентами (включая компоненты граничных условий) мощностью $N(t)$:

$$N(t) = f(t) \cdot e(t), \quad (1)$$

где: $f(t)$ и $e(t)$ – потоковая и потенциальная фазовая переменная, соответственно; t – время.

Объединение компонентов осуществляется в виде топологических уравнений баланса потенциальных переменных:

$$\sum_{i=1}^i e_i = 0, \quad (2)$$

и непрерывности потоковых переменных:

$$\sum_{j=1}^j f_j = 0. \quad (3)$$

Полная модель представляет собой систему алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений, связывающих фазовые переменные. Для реализации компонентного подхода используется метод ненаправленных графов связей, которые представляют совокупность элементов, соответствующих элементарным типам преобразования энергии: источники/стоки энергии, аккумуляторы, диссипативные элементы и собственно преобразователи. Для элемента графа уравнение мощности (1) дополняется уравнением энергии:

$$E(t) = E(t_0) + \int_{t_0}^t N(t) dt \quad (4)$$

и аналогичными уравнениями обобщенных перемещения и импульса.

За время $\Delta t = t - t_0$ через связь (которая тоже является объектом) и соответствующий порт компонента передается энергия:

$$\Delta E = E(t) - E(t_0) = \int_{t_0}^t N(t) dt. \quad (5)$$

В соответствии с вышеизложенным подходом была выполнена декомпозиция обобщенной имитационной модели ПДВС в составе КГУ и выделены связи. Переменные, входящие в систему уравнений (1...5), были интерпретированы для элементов ПДВС и КГУ и сгруппированы по базовым доменам (газо-, гидро – и термодинамика, динамика механизмов).

Метод математической формализации ненаправленно связанных компонентов основан на декларативном подходе, который отличается от традиционного императивного тем, что математическое описание компонентов ПДВС и СУТД, представляет собой спецификацию решения задачи, включающую алгоритмические конструкции, описывающие наиболее часто используемые методы их решения.

Созданы математические описания компонентов ПДВС и КГУ. Например, компонент «постоянный объём газа» описывается системой уравнений массового, энергетического балансов и состояния:

$$\sum_{p=1}^p \left(\frac{dH_p}{dt} - \frac{dG_p}{dt} \cdot u(T, \vec{C}) \right) + \sum_{i=1}^i \left(\frac{dQ_{ini}}{dt} \right) + \sum_{j=1}^j \left(\frac{dQ_{out j}}{dt} \right) + \frac{dU}{dt} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{dG}{dt} + \sum_{p=1}^p \left(\frac{dG_p}{dt} \right) + \sum_{i=1}^i \left(\frac{dG_{ini}}{dt} \right) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dG_i}{dt} = \sum_{p=1}^p \left(\frac{dG_p}{dt} \cdot f(C_i) \right), \quad (8)$$

$$G = \sum_{i=1}^i G_i, \quad (9)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dU}{dt} \cdot \frac{1}{c_v(T, \vec{C}) \cdot G}, \quad (10)$$

$$P = \frac{T \cdot G \cdot R}{V}, \quad (11)$$

где: H – энтальпия газа; G_i – масса i -го компонента газа; T – температура газа; \bar{C} – вектор концентрации компонентов; U – внутренняя энергия газа; u – удельная внутренняя энергия газа; V – объём газа; c_v – удельная массовая теплоемкость газа при постоянном объёме; R – газовая постоянная; i и j – номер внутреннего и внешнего источника или стока энергии, соответственно; $\frac{dQ_{in\ i}}{dt}$ и $\frac{dQ_{out\ j}}{dt}$ – поток энергии через внутренний или внешний источник или сток, соответственно; p – номер связи.

В качестве независимых переменных, определяющих состояние газодинамической системы, удобно использовать давление и температуру, поэтому, вместо традиционной для графов эксергии S , в уравнении (6) применена энтальпия:

$$\frac{dH}{dt} = T \cdot \frac{dS}{dt} + V \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{dQ}{dt} + V \cdot \frac{dP}{dt}, \quad (12)$$

где: dQ – количество теплоты, подведенной к системе.

В соответствии с объектно-ориентированным подходом, компонент «переменный объём газа» наследует все методы «постоянного объёма газа», при этом, в уравнение (6) добавлено выражение для определения работы газа – $P \frac{dV}{dt}$ (см. уравнение (12)). Компонент «цилиндр» наследует все методы «переменного объёма газа», при этом в уравнение (6) включено выражение для определения тепловыделения при сгорании топлива, а в уравнения массового баланса (7...9) – выражения, учитывающие образование продуктов сгорания и расходование воздуха.

Термодинамика «твердых» компонентов описывается уравнением Фурье-Кирхгофа, которое приведено к виду обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка, например, для стенки цилиндра, имеющего вид:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = \alpha_{w1} \cdot (T_{w1} - T_l) + \lambda \cdot \frac{T_{i+1} - 2 \cdot T_i + T_{i-1}}{h^2} + \alpha_{wN} \cdot (T_{wN} - T_g), \quad (13)$$

где: ρ – плотность; c – удельная массовая теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; i и N – номер и число узлов расчетной сетки, соответственно; h – шаг между узлами; α_{wi} и α_{wN} – коэффициенты конвективного теплообмена с противоположных сторон стенки; T_l – температура охлаждающей жидкости (ОЖ); T_g – температура газов в цилиндре.

Аналогично формализовано математическое описание других компонентов ПДВС и СУТД. Математические модели гидродинамических компонентов (систем смазки, охлаждения, СУТД и др.) учитывают несжимаемость жидкости. Модели турбины и компрессора основаны на системе уравнений баланса энтальпии газа. Генератор – синхронная явнополюсная машина с

короткозамкнутым ротором (используемая в большинстве энергоустановок с ПДВС).

Особенностью математического описания компонентов кривошипно-шатунного механизма ПДВС является то, что их линейные и угловые скорости и ускорения определяются численным дифференцированием по времени, например, угловая скорость коленчатого вала:

$$w = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (14)$$

угловое ускорение:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\sum^p M_p}{J}, \quad (15)$$

где: J – момент инерции; M_p – момент для каждой связи.

Угол поворота φ не задается явно, как функция от времени, а вычисляется путём решения системы уравнений (14) и (15).

Функциями выделены зависимости, не относящиеся к базовым доменам:

- динамика тепловыделения в КС ПДВС описывается уравнением И.И. Вибе с коэффициентами, определяемыми согласно G. Woschni и F. Anisits, либо рассчитывается по методике Н.Ф. Разлейцева;

- физические свойства сред определяются с применением полиномиальных регрессионных зависимостей от температуры;

- период задержки воспламенения – по уравнению Н.Н. Wolfer;

- коэффициент теплоотдачи от стенок КС к рабочему телу – по модифицированной фирмой AVL методике G. Woschni;

- потери на трение в механизмах ПДВС вычисляются в зависимости от температуры и вязкости масла методом SLM (J. Shayler, D. Leong, M. Murphy);

- динамика теплообмена между контурами СУТД рассчитывается методом LMTD (среднелогарифмического перепада температур).

Дополнительно математически формализованы модели граничных условий, включая тепловую и электрическую нагрузку, изменяющиеся согласно типовым графикам нагружения, и атмосферные условия, а также мультидоменные компоненты, например, блок цилиндров.

Разработанный метод математической формализации позволяет включать в имитационную модель ПДВС в составе КГУ компоненты, описывающие разнообразные, в том числе ранее неизвестные технические решения.

Метод синтеза имитационных моделей основан на компоновке компонентов, входящих в её состав, и их связывания унифицированными балансовыми уравнениями, интерпретированными для соответствующих компонентам доменов. Например, газодинамическая связь будет описываться системой уравнений:

$$\sum_{p=1}^p \left(\frac{dG_p}{dt} \right) = 0, \quad (16)$$

$$P_1 = P_2 = \dots = P_p, \quad (17)$$

где: $\frac{dG}{dt}$ – массовый расход газа через связь (потокковая переменная);

P – давление (потенциальная переменная); p – номер связи.

Дополнительно через газодинамическую связь передаются значения переменных температуры, вектора концентрации компонентов и удельной энтальпии газа, с учетом направления потока. То есть газодинамическая связь является физической и информационной. Вместо абсолютной энтальпии используется удельная, т.е. плотность её потока, в связи с тем, что площадь контакта компонента является параметром компонента, а не связи.

Разработанный метод синтеза позволяет создавать имитационные модели ПДВС и КГУ произвольной структуры, с различными, в том числе ранее неизвестными, конструктивными решениями. Имитационная модель может включать тысячи алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений, поэтому было разработано ПО, как инструмент для решения практических задач создания и совершенствования первичных ПДВС и КГУ (свидетельство о регистрации № 2019610874 от 18.01.2019).

В **третьей главе** разработана методика валидации тестовой имитационной модели первичного ПДВС, макетного образца КГУ и испытаний ПО.

Разработан и изготовлен макетный образец КГУ на основе ПДВС типа 4ЧН15/20,5 и теплообменников ОЖ и масла типа ВХД/МХД и отработавших газов (ОГ) для целей валидации тестовой имитационной модели (рисунок 2). Разработана методика валидации тестовой имитационной модели КГУ с ПДВС, включающая методику экспериментальных исследований макетного образца КГУ, и методика проведения тестовых расчетов с использованием имитационной модели (рисунок 3).

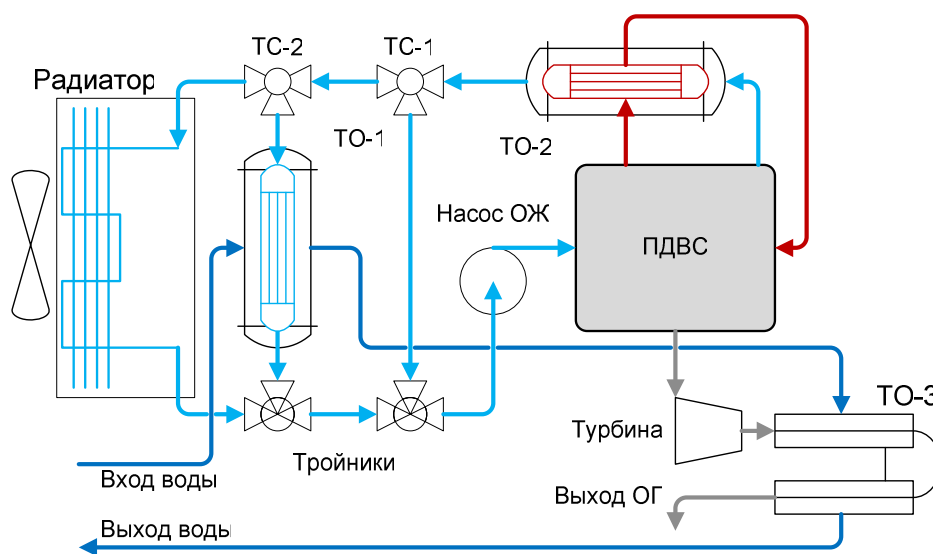


Рисунок 2 – Схема макетного образца КГУ:

→ – внешний контур; → – ОЖ ПДВС; → – масло; → – ОГ;
 ТС – термостаты; ТО – теплообменники

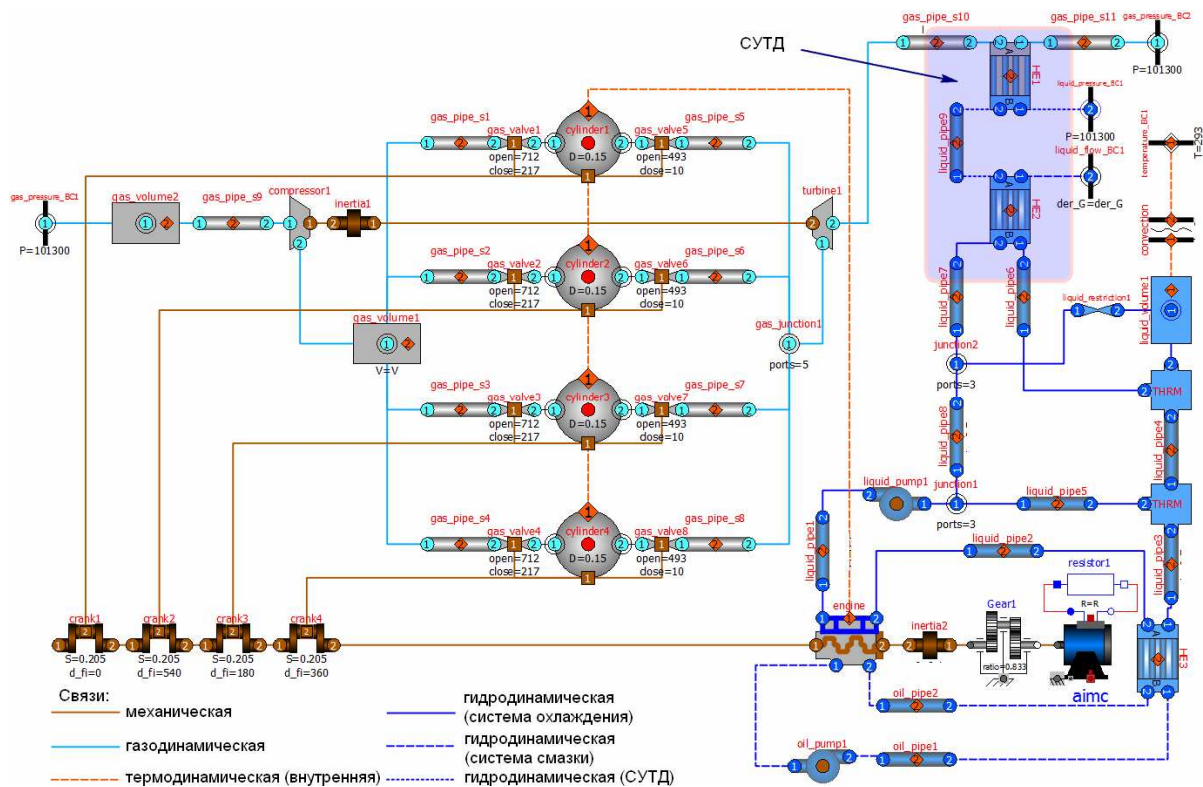


Рисунок 3 – Графическая схема тестовой имитационной модели макетного образца КГУ с ПДВС в окне редактора ПО

В четвертой главе приведены результаты валидации тестовой имитационной модели КГУ с ПДВС и испытаний ПО.

Тепловая нагрузка имитировалась с учетом СНиП 41-01-2003. Электрическая нагрузка задавалась степенями – 0, 25, 50, 75, 100 % от номинальной. Испытания проведены в аккредитованной Росстандартом лаборатории АО «НИИ Автотракторной техники», что гарантирует соблюдение метрологических требований и достоверность результатов. Разработана методика испытаний ПО (по ГОСТ 19.301-79) для подтверждения соответствия его функциональных возможностей заявленным требованиям.

Проведены экспериментальные исследования первичного ПДВС и макетного образца КГУ. Выполнена валидация имитационной модели КГУ с ПДВС с использованием экспериментальных данных (примеры – на рисунках 4 и 5), которая подтвердила адекватность математических моделей компонентов, используемых для имитационного моделирования. Коэффициенты парной корреляции расчетных и экспериментальных данных – не ниже 0,97.

Проведены испытания ПО для создания имитационных моделей ПДВС и КГУ, которые подтвердили соответствие его функциональных возможностей заявленным требованиям. Время расчета процессов в ПДВС соизмеримо с зарубежным (не полным) аналогом – AVL Boost. Сравнение индикаторных диаграмм, полученных с применением разработанного ПО и AVL Boost показало их практически полную сходимость.

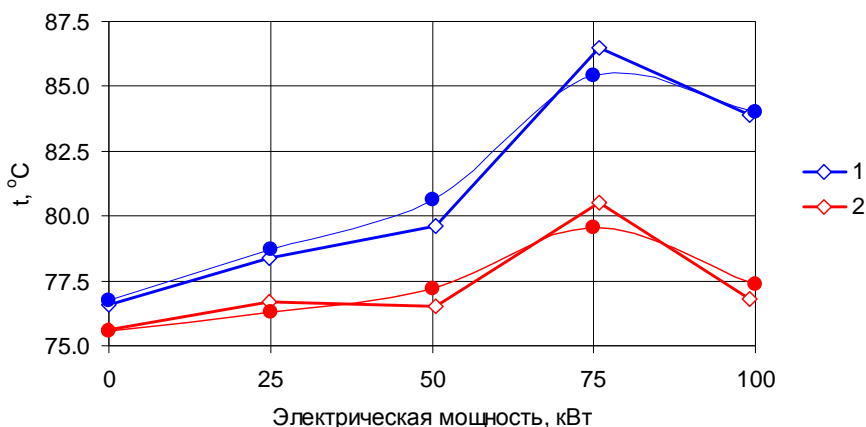


Рисунок 4 – Температура сред КГУ (см. рисунок 2):
 1 – ОЖ на выходе ТО-1, 2 – масло на выходе ТО-2; \diamond – эксперимент;
 \bullet – расчет

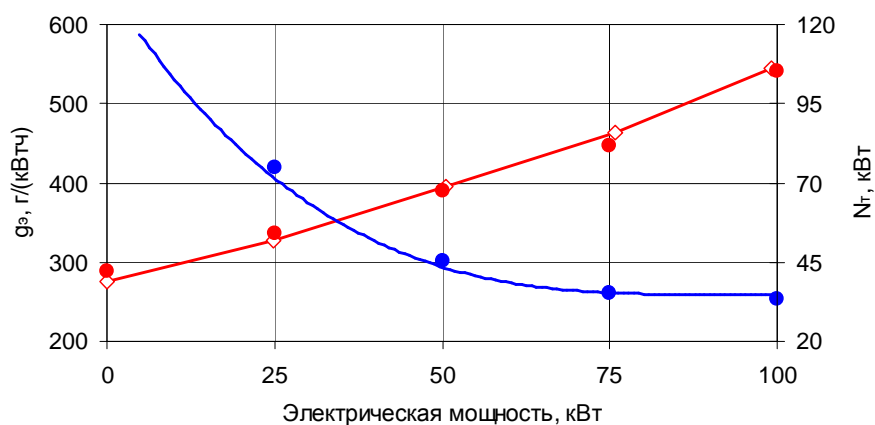


Рисунок 5 – Удельный расход топлива (—) КГУ, приведенный к электрической мощности, и суммарная тепловая мощность СУТД (—):
 \diamond – эксперимент; \bullet – расчет

В пятой главе выполнена апробация методов имитационного моделирования, математических моделей компонентов и связей, разработаны технические решения с целью совершенствования КГУ с ПДВС.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность и целесообразность ранее неизвестного технического решения (Патент РФ на полезную модель № 183358 от 19.09.2018), заключающегося в том, что сердцевин, включенные в контуры систем смазки и охлаждения, находятся в общем корпусе, благодаря чему нет необходимости в устройствах для дополнительного регулирования температуры масла и в жидкостно-масляном теплообменнике (рисунок 6).

С использованием имитационной модели разработана конструкция СУТД для дизель-генератора ДГА-315, КПД которой повышен до 70 %, против 54 % у серийной (рисунок 7), за счёт повышения коэффициента теплоотдачи сердцевин-

ны теплообменников СУТД организацией пристеночных турбулентных потоков с оптимальной ориентацией.

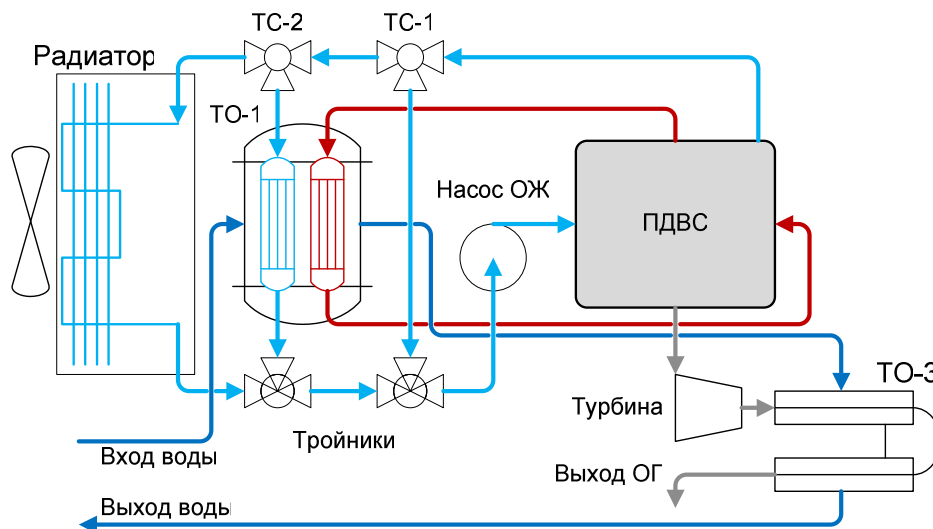
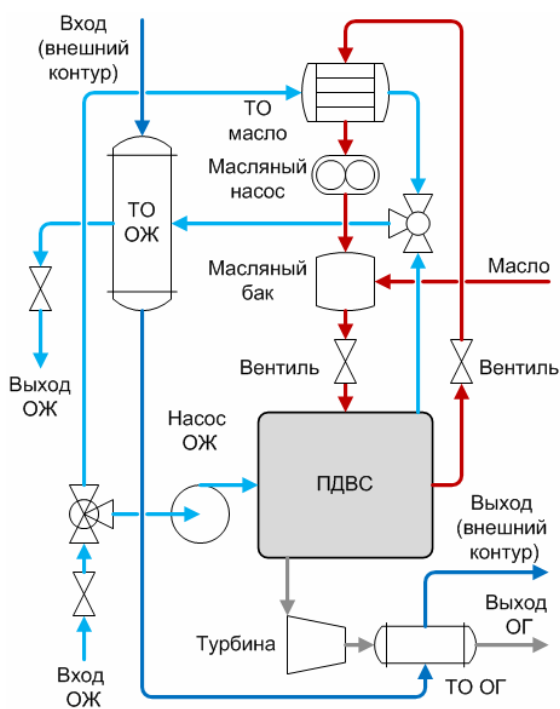


Рисунок 6 – Схема макетного образца КГУ:

→ – внешний контур; → – ОЖ ПДВС; → – масло; → – ОГ;
 ТС – термостаты; ТО – теплообменники



а)



б)

Рисунок 7 – СУТД ПДВС ДГА-315:
 а) утилизационные блоки; б) общая схема

Выполнена оценка экономического эффекта внедрения СУТД (на примере энергоустановки ДГА-315). Расчет показал, что экономический эффект внедрения СУТД составит 2,826 млн. руб./год, срок окупаемости СУТД – 1 год и 7 мес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Для имитационного моделирования процессов и систем поршневых двигателей внутреннего сгорания в составе когенерационных энергоустановок целесообразно применение компонентного, системного и объектно-ориентированного подходов с использованием ненаправленных графов связей, декларативного описания мультидоменных, транзиентных математических моделей компонентов и связей между ними.

2) Реализация имитационного моделирования процессов и систем поршневых двигателей внутреннего сгорания в составе когенерационных энергоустановок основана на применении разработанных методов, включающих:

- многоуровневую декомпозицию применительно к поршневым двигателям внутреннего сгорания в составе когенерационных установок;
- математическую формализацию компонентов поршневых двигателей внутреннего сгорания и когенерационных установок;
- синтез компонентных имитационных моделей поршневых двигателей внутреннего сгорания в составе когенерационных установок.

Разработанные методы базируются на:

- математическом описании компонентов и процессов в поршневых двигателях внутреннего сгорания и когенерационных установках, реализующем декларативный подход при их математической формализации и создании программного обеспечения;
- применением ненаправленных связей между компонентами при синтезе имитационной модели;
- определением и реализацией граничных условий, отражающих особенности режимов функционирования когенерационных энергоустановок произвольной структуры с поршневыми двигателями внутреннего сгорания в составе автономных систем энергоснабжения.

3) Разработано программное обеспечение для создания и совершенствования поршневых двигателей внутреннего сгорания и когенерационных установок (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019610874 от 18.01.2019). При валидации тестовой модели макета когенерационной установки выявлена адекватность математических моделей компонентов (коэффициенты парной корреляции расчетных и экспериментальных данных – не ниже 0.97).

4) С использованием методов имитационного моделирования разработаны технические решения по совершенствованию дизеля в составе когенерационной установки:

- разработана новая конструкция жидкостно-масляного теплообменника с объединением в общем корпусе сердцевины теплообменников систем смазки и охлаждения дизеля для исключения необходимости дополнительного регулирования температуры масла (Патент РФ на полезную модель № 183358 от 19.09.2018);

- усовершенствована система утилизации теплоты в дизель-генераторе ДГА-315, КПД которой повышен до 70 %, против 54 % у серийной, за счёт повышения коэффициента теплоотдачи сердцевины теплообменников СУТД организацией пристеночных турбулентных потоков с оптимальной ориентацией.

5) Дальнейшая разработка темы исследования осуществляется в следующих направлениях: расширение и совершенствование библиотеки компонентов поршневых двигателей внутреннего сгорания и когенерационных установок, создание технологии «цифровых двойников» на основе разработанных методов имитационного моделирования, использование методов оптимизации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Малозёмов, А.А. Разработка математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневых ДВС / А.А. Малозёмов, В.С. Кукис, **Р.Р. Гимазетдинов** // Двигателестроение. – 2018. – № 3. – С. 3–9.

2. **Гимазетдинов, Р.Р.** Дизель-генераторная установка с утилизацией сбросовой теплоты поршневого ДВС / Р.Р. Гимазетдинов, А.А. Малозёмов, В.С. Кукис // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 2. – С. 3–7.

3. Малозёмов, А.А. Снижение механической и тепловой напряженности первичного конвертированного тракторного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса / А.А. Малозёмов, В.С. Кукис, **Р.Р. Гимазетдинов**, А.В. Наумов // Вестник УГАТУ, 2018. – Т. 22. – № 2 (80). – С. 25–33.

Патенты и программы:

4. Когенерационная энергетическая установка / А.А. Малозёмов, **Р.Р. Гимазетдинов**, В.С. Кукис, А.В. Наумов, Г.А. Савиновских, Д.А. Новикова. Патент РФ на полезную модель № 183358. Выдан 19.09.2018.

5. Программа для имитационного моделирования когенерационной энергетической установки с поршневым двигателем внутреннего сгорания (цифровой двойник) / **Р.Р. Гимазетдинов**, А.А. Малозёмов, В.С. Кукис, Г.А. Малозёмов // Номер регистрации свидетельства: 2019610874. Дата регистрации: 18.01.2019. Бюл. № 1.

В других изданиях:

6. **Гимазетдинов, Р.Р.** Разработка когенерационной установки на базе электростанции ДГУ-100С / Р.Р. Гимазетдинов, А.А. Малозёмов, В.С. Кукис, А.Н. Кондрашев // Известия Оренбургского государственного университета. – 2018. – № 2 (70). – С. 144–146.

7. **Гимазетдинов, Р.Р.** Проблемы и перспективы имитационного моделирования когенерационных энергетических установок на основе поршневых двигателей внутреннего сгорания / Р.Р. Гимазетдинов, А.А. Малозёмов, В.С. Кукис // Научный диалог: Вопросы точных и технических наук. Сборник

научн. тр., по материалам X международной научно-практической конференции 12 октября 2017 г. ЦНК МНИФ «Общественная наука», 2017. – С. 31–37.

8. **Гимазетдинов, Р.Р.** Разработка имитационной модели для целей управления когенерационной энергетической установкой в составе НПЛ-комплекса / Р.Р. Гимазетдинов, В.С. Кукис, А.А. Малозёмов // Управление в современных системах: сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников и аспирантов. – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2017. – С. 120–124.

9. **Гимазетдинов, Р.Р.** Математическая модель термостата в составе имитационной модели когенерационной установки / Р.Р. Гимазетдинов, А.А. Малозёмов, В.С. Кукис, Г.А. Савиновских // Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения: сборник трудов II Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2018. – С. 12–19.

10. **Гимазетдинов, Р.Р.** Расчетная оценка основных параметров газовой модификации дизеля с камерой сгорания ЦНИДИ для когенерационной установки / Р.Р. Гимазетдинов // Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения: сборник трудов II Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2018. – С. 20–26.

11. **Гимазетдинов, Р.Р.** Имитационное моделирование когенерационных энергетических установок с поршневым ДВС в качестве первичного двигателя / Р.Р. Гимазетдинов // Вестник Сибирского отделения академии военных наук. – Омск, 2018. – Вып. 46. – С. 105–116.

12. **Гимазетдинов, Р.Р.** Цифровой двойник когенерационной энергоустановки с поршневым двигателем / Р.Р. Гимазетдинов // International Independent Scientific Journal. – Krakov, 2019. – Vol.1. – № 5. – С. 52–55.