На правах рукописи

Наумов Алексей Владимирович

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОНВЕРТИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ В СОСТАВЕ ИНВЕРТОРНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена на кафедре «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Научный руководитель: **Малозёмов Андрей Адиевич**
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории исследований моторно-трансмиссионного блока автомобильной, дорожно-строительной и специальной техники научно-образовательного центра «Энерго- и ресурсоэффективные технологии в дизелестроении для бронетанковой техники и инженерных машин» ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Официальные оппоненты: **Плотников Леонид Валерьевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург
Медведев Геннадий Валериевич,
доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечения предприятий и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», г. Санкт-Петербург

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

Защита состоится «09» апреля 2025 года в 13:30 на заседании диссертационного совета 24.2.437.09 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, ауд. № 1001. Тел/факс (351) 267-93-06, e-mail: dc242437-09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243709-d-21229809/naumov-aleksey-vladimirovich

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, Южно-Уральский государственный университет, Ученый совет.
E-mail: dc242437-09@mail.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.437.09,
доктор технических наук, доцент Абызов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основой малой энергетики Российской Федерации являются более 50 тысяч электростанций (ЭС) суммарной мощностью 17 млн. кВт на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) или 8 % от общей установленной мощности ЭС РФ. В качестве первичных ДВС используются конвертированные серийные дизели, т.е. модификации первоначально предназначенных для работы в составе тракторов, автомобилей, тепловозов, судов и т.д. Конвертация заключается в дефорсировании по частоте вращения до ближайшего значения из стандартного ряда (750, 1000, 1500 мин$^{-1}$ и т.д.) и установке однорежимной системы регулирования. Такой подход не является оптимальным с точки зрения обеспечения максимальной эффективности энергоустановки, в первую очередь, топливной экономичности. В настоящее время средний эксплуатационный расход топлива дизельных ЭС мощностью более 100 кВт составляет 256…665 г/(кВт·ч), что существенно превышает номинальную величину (195…225 г/(кВт·ч)).

«Стратегией научно-технологического развития РФ» предусмотрен переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, формирование новых источников энергии. В «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» указано, что одним из приоритетов является развитие региональной энергетики с увеличением уровня надежности обеспечения энергоресурсами территорий при опережающем развитии распределенной генерации, экономически эффективном использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Одним из способов решения проблемы повышения энергоэффективности средств малой энергетики является создание и внедрение инверторных гибридных энергоустановок, объединяющие дизель-генератор (ДГ), работающий с оптимальной, с точки зрения топливной экономичности, частотой вращения, зависящей от нагрузки, и ВИЭ. Наличие ВИЭ и работа ДГ с переменной частотой вращения предопределяют использование преобразователя частоты тока (инвертора), который обеспечивает показатели качества электрической энергии, соответствующие требованиям к сетям общего назначения.

Снижение частоты вращения, при сохранении номинальной мощности из стандартного ряда (100, 200, 315 кВт и т.д.), влечет повышение крутящего момента, средних и максимальных значений давления и температуры газов в камере сгорания (КС), что негативно отражается на показателях надежности дизеля. Для снижения тепломеханической нагруженности элементов первичного ДВС целесообразно уменьшать геометрическую степень сжатия при одновременном повышении давления наддува. Однако снижение степени сжатия отрицательно влияет на пусковые качества двигателя. Требования к пусковым качествам дизелей в составе стационарных ЭС менее жесткие, чем требования к дизелям других типов. Двигатель в составе ЭС должен пускаться при температуре среды 8 °С и выше, что позволяет обеспечить нормативные значения пусковых качеств при изменении некоторых конструктивных параметров ДВС с учетом более высоких значений показателей топливной экономичности и надежности. Кроме того, для обеспечения пуска могут быть применены электронагреватели воздуха во впускном коллекторе, что оправдано наличием штатной системы аккумулирования электроэнергии высокой емкости.

Степень разработанности темы исследования. Инверторные энергоустановки относительно новое направление в сфере малой энергетики, которое появилось в 90-х годах 20-го века и начало интенсивно развиваться только в 21-м веке. Исследованиями в этой области занимались зарубежные ученые D. Cherus, J.F. Manwell, R. Bram, Z. Chlodnicki, J.H. Lee, J. Leuchter, отечественные – С.Г. Обухов, И.А. Плотников, Б.В. Лукутин, О.С. Хватов и др. В большинстве работ ДВС описан упрощенными математическими моделями (например, полиномиальной регрессией, полученной на основе экспериментальных данных) с двумя входами – момент сопротивления нагрузки и цикловая подача топлива, и одним выходом – частотой вращения коленчатого вала (КВ), а основное внимание уделено электротехнической части.

Более подробно процессы в первичных ДВС инверторных энергоустановок исследованы в диссертационных работах О.А. Алешкова (разработан метод синтеза оптимального алгоритма управления частотой вращения КВ с точки зрения топливной экономичности), А.В. Копеина (исследовано влияние переменной частоты вращения КВ на выбросы вредных веществ), А.С. Шикина (разработан метод прогнозирования ресурсных показателей), Р.Р. Гимазетдинова (разработаны методы имитационного моделирования энергоустановок). Результаты этих исследований были расширены и обобщены А.А. Малозёмовым при создании многофункциональных энерготехнологических комплексов. Однако в этих работах не рассмотрены вопросы снижения тепловой и механической нагруженности первичного ДВС и обеспечения гарантированного пуска.

Топливная экономичность энергоустановок определяется эффективностью рабочих процессов и механическими потерями в механизмах и агрегатах ДВС. Тепловая и механическая нагруженность деталей первичного ДВС зависит от динамики рабочих процессов в КС, которые, в свою очередь, зависят от режима функционирования (нагрузки и цикловой подачи топлива). Вопросам влияния степени сжатия на процессы в КС дизеля посвящены работы зарубежных ученых S.G. Tumoney, V. Hariram, R.A. Balia, S. Iliev, отечественных – В.П. Демидова, А.И. Хуциева, М.А. Зленко, Г.Г. Тер-Мкртичьяна, И.А. Яманина, Б.А. Шароглазова, М.Д. Гарипова, В.А. Маркова и др. Однако в этих работах не учитываются особенности функционирования ДВС в составе инверторных энергоустановок, в частности, необходимость ограничения его тепловой и механической нагруженности при реализации оптимального алгоритма управления частотой вращения КВ, обеспечения нормативных пусковых качеств двигателя. Отсутствуют возможность прогнозирования ресурсных показателей и комплексная технико-экономическая оценка затрат на эксплуатацию инверторных энергоустановок в реальных условиях. Существующие математические модели не предусматривают возможность определения рациональных сочетаний геометрической степени сжатия и давления наддува, обеспечивающих одновременное повышение топливной экономичности и снижение тепломеханической нагруженности ДВС в составе инверторных энергоустановок. Основное противоречие, требующее решение при создании инверторных ДГ – противоположное влияние частоты вращения КВ первичного ДВС на показатели его топливной экономичности и тепломеханической нагруженности (при уменьшении частоты вращения расход топлива снижается, а нагруженность увеличивается и наоборот).

Направления исследования, согласно паспорту научной специальности 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели»:

1. Разработка научных основ и экспериментальные исследования термодинамических, механических, тепло- и массообменных, физико-химических, гидрогазодинамических процессов в турбомашинах и поршневых двигателях, исследования общих свойств и принципов функционирования отдельных систем, элементов, вспомогательного оборудования турбомашин и поршневых двигателей;

2. Разработка физико-математических моделей, пакетов прикладных программ, цифровых двойников, методов экспериментальных исследований, теоретические и экспериментальные исследования с целью повышения эффективности, надежности и экологичности рабочих процессов турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования в составе объектов применения.

Объект исследования: взаимосвязанные тепловые, газодинамические, гидродинамические, механические и физико-химические процессы поршневого ДВС в составе инверторной энергоустановки.

Предмет исследования: закономерности влияния процессов ДВС на показатели расхода топлива, тепловой и механической нагруженности, пусковые качества.

Цель исследования: снижение тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки совершенствованием его конструктивных параметров и режимов функционирования.

Задачи исследования:

1. Разработать математические модели процессов в системах и механизмах ДВС, учитывающие особенности конструкции и функционирования в составе инверторной энергоустановки и позволяющие комплексно оценивать показатели топливной экономичности и тепломеханической нагруженности.

2. Выявить зависимости, связывающие конструктивные параметры и режимы функционирования ДВС в составе инверторной энергоустановки и показатели его топливной экономичности, тепломеханической нагруженности и пусковые качества.

3. Обосновать рациональные конструктивные параметры ДВС в составе инверторной энергоустановки, обеспечивающие повышение его топливной экономичности, с учетом ограничений по тепломеханической нагруженности и требований к пусковым качествам.

4. Обосновать эффективность технического решения, заключающегося в снижении степени сжатия при одновременном повышении давления наддува, с учетом необходимости обеспечения требуемых пусковых качеств ДВС в составе инверторной энергоустановки.

Научные результаты, обладающие **новизной**:

– уравнения, связывающие термический КПД цикла Тринклера со степенью сжатия поршневой части и компрессора и максимальным давлением цикла;

– уравнения для определения относительного изменения периода задержки воспламенения топлива в камере сгорания, показателя характера тепловыделения в уравнении И.И. Вибе и критерия теплонапряженности дизеля от относительного изменения геометрической степени сжатия и давления наддува;

– выявленные, по результатам стендовых испытаний дизеля 4ЧН15 / 20,5 со степенью сжатия 12,5, 13,5, 14,5 и различными турбокомпрессорами, зависимости показателей топливной экономичности и тепломеханической нагруженности от его конструктивных и режимных параметров;

– выявленная, по результатам испытаний дизеля 4ЧН15/20,5 со степенью сжатия 14,5 и 12,5 в климатической камере, зависимость его пусковых качеств от степени сжатия и мощности электронагревателей во впускном коллекторе при различных температурах окружающей среды.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в том, что выполнено теоретическое обобщение и экспериментальное исследование процессов в системах и механизмах конвертированного первичного ДВС на режимах эксплуатации инверторного ДГ, что дает возможность их использования при решении широкого спектра научных задач в области энергетического машиностроения, связанных с повышением топливной экономичности, надежности, обеспечением пусковых качеств ДВС в составе энергетических установок.

Практической значимостью обладают:

– техническое решение, заключающееся в снижении степени сжатия при одновременном повышении давления наддува, с учетом обеспечения требуемых пусковых качеств ДВС в составе инверторной энергоустановки;

– методы расчетного и экспериментального определения рациональных величин степени сжатия и давления наддува ДВС в составе инверторной энергоустановки;

– рекомендации по способам обеспечения требуемых пусковых качеств ДВС в составе инверторной энергоустановки;

– программное обеспечение «Программный класс для определения влияния степени сжатия на показатели рабочих процессов в камере сгорания дизеля».

Результаты исследования могут найти практическое применение при создании модификаций ДВС для работы в составе инверторных энергоустановок.

На защиту выносятся: вышеперечисленные научные результаты исследования, обладающие научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Методология и методы исследования включают расчетно-теоретические методы, основанные на известных и широко апробированных зависимостях теории поршневых ДВС, газо- и термодинамики, математического моделирования сложных динамических систем, стандартные и оригинальные методы стендовых и пусковых испытаний ДВС. Критерием эффективности решений являлось снижение затрат на топливо и расходование ресурса инверторной энергоустановки при условии обеспечения пусковых качеств ДВС в условиях эксплуатации.

Достоверность результатов подтверждена валидацией разработанных математических моделей с использованием данных экспериментальных исследований, применением аттестованного испытательного оборудования и методов стендовых и пусковых испытаний, соответствующих нормативно-техническим документам, сопоставлением результатов с данными других исследователей.

Апробация результатов:

Основные результаты работы были доложены на конференциях:

– Возобновляемая энергетика, энерго- и ресурсосбережение «International Ural Conference on Green Energy», г. Челябинск, 2018 г.;

– II Всероссийская научно-практическая конференция научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения», г. Челябинск, 2018 г.;

– 70, 71, 72, 73, 75 научные конференции «Наука ЮУрГУ», г. Челябинск, 2018…2023 гг.;

– XV-XVI Международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения», г. Москва, 2018 г.;

– III, V, VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Транспортные средства специального назначения: разработка, производство и модернизация», г. Омск, 2019, 2021, 2024 гг.;

– V Всероссийская научно-практическая конференция «Калашниковские чтения», г. Ижевск, 2019 г.;

– Международная научно-практическая конференция «100 лет Отечественному танкостроению», г. Омск, 2020 г.;

– Международная молодежная научно-практическая конференция «Роль военной науки в развитии оборонно-промышленного комплекса и подготовке кадров», г. Омск, 2020 г.;

– IV Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 2021 г.;

– IV Всероссийская научно-практическая конференция «Умные технологии в современном мире», г. Челябинск, 2021 г.;

– Всероссийская научная конференция с международным участием «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития», г. Челябинск, 2023 г.

Результаты исследования внедрены:

– ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – при выполнении поисковых и хоздоговорных работ в области средств малой и возобновляемой энергетики, поршневых ДВС;

– ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» – при выполнении НИОКР по модернизации серийных энергоустановок ДГУ-60С/100С и первичных дизелей для них;

– Филиал ФГКВОУ ВО «Военная академия МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва» МО РФ в г. Омске) – при выполнении НИОКР по совершенствованию силовых и энергетических установок специального назначения;

– ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» – в учебном процессе.

Внедрение подтверждено актами.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 26 печатных работах, в том числе: 3 входящих в перечень ВАК, 2 индексируемых в базе SCOPUS, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 190 с. машинописного текста, 89 рисунков, 7 таблиц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 272 источников и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, оценена степень её разработанности, приведены объект и предмет исследования,

сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнены обзор и анализ современного состояния разработки и производства поршневых ДВС для средств малой и возобновляемой энергетики, исследований в области совершенствования инверторных ДГ, особенностей функционирования дизелей в их составе, методов обеспечения нормативных пусковых качеств поршневых ДВС, методов математического моделирования процессов первичных дизелей в составе энергоустановок.

Показано, что разработка и внедрение инверторных энергоустановок является актуальным направлением развития малой энергетики, так как снижение частоты вращения КВ при уменьшении нагрузки ДГ позволяет существенно (до 25…30 %) снизить удельный расход топлива. В РФ серийное производство таких установок отсутствует, что снижает энергоэффективность экономики и усугубляет технологическое отставание от зарубежных стран. Это связано с нерешенностью ряда научно-технических проблем, включая проблему роста максимальных величин температуры и давления газов в КС на режимах пониженной частоты вращения КВ, ведущих к снижению надежности ДВС.

Сформулирована научная проблема, решаемая в исследовании: разрешение противоречия, заключающегося в противоположном влиянии частоты вращения КВ ДВС в составе инверторной энергоустановки на показатели его топливной экономичности и тепломеханической нагруженности. Предложена гипотеза исследования: научная проблема может быть решена путем снижения геометрической степени сжатия двигателя при одновременном повышении давления наддува, с учетом необходимости обеспечения нормативных значений пусковых качеств. Сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Основными критериями тепловой и механической нагруженности двигателя, принятыми в диссертации, являются: максимальные значения давления и температуры рабочего цикла; температура характерных точек поршня и отработавших газов до и после турбины, обобщенный критерий тепломеханической напряженности.

Вторая глава посвящена совершенствованию методов математического моделирования процессов дизеля в составе инверторной энергоустановки.

Для выявления общих закономерностей влияния конструктивных параметров и режимов функционирования ДВС в составе инверторного ДГ на показатели его рабочего процесса, был выполнен анализ термического КПД цикла Тринклера. Предложена и обоснована зависимость КПД от степени сжатия поршневой части (ε) и компрессора (ε_c) с учетом ограничения максимального давления:

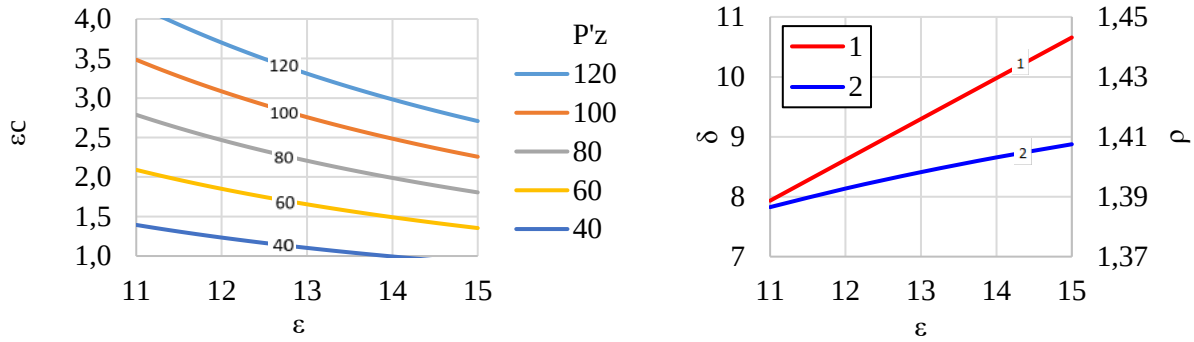
$$\eta_t = 1 - \frac{\varepsilon \cdot \left(\frac{\varepsilon_c^{1-k}}{\delta^k} - \frac{\varepsilon_c^{2-k}}{P'_z} \right)}{k \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta} - 1 \right) - \frac{\varepsilon^k \cdot \varepsilon_c}{P'_z} + 1}, \qquad (1)$$

где k – показатель адиабаты; δ – степень последующего расширения; P'_z – относительное максимальное давление цикла (относительно давления газов перед компрессором).

Выведено уравнение для определения максимального значения термического КПД при различных величинах степени сжатия поршневой части и компрессора при ограничении максимального давления цикла (рисунок 1а):

$$\eta_{t\,max} = 1 - \left(\frac{P'_z}{\varepsilon^{k-1}}\right)^{1-k} \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^k - 1}{k \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta} - 1\right)}. \qquad (2)$$

Выявлены зависимости предельных величин степеней повышения давления (ρ) и последующего расширения (δ), исходя из условия роста максимально возможной величины термического КПД при снижении степени сжатия поршневой части (рисунок 1б). При δ ниже графика (1) и ρ выше графика (2), при снижении ε увеличивается его термический КПД с сохранением величины P_z.

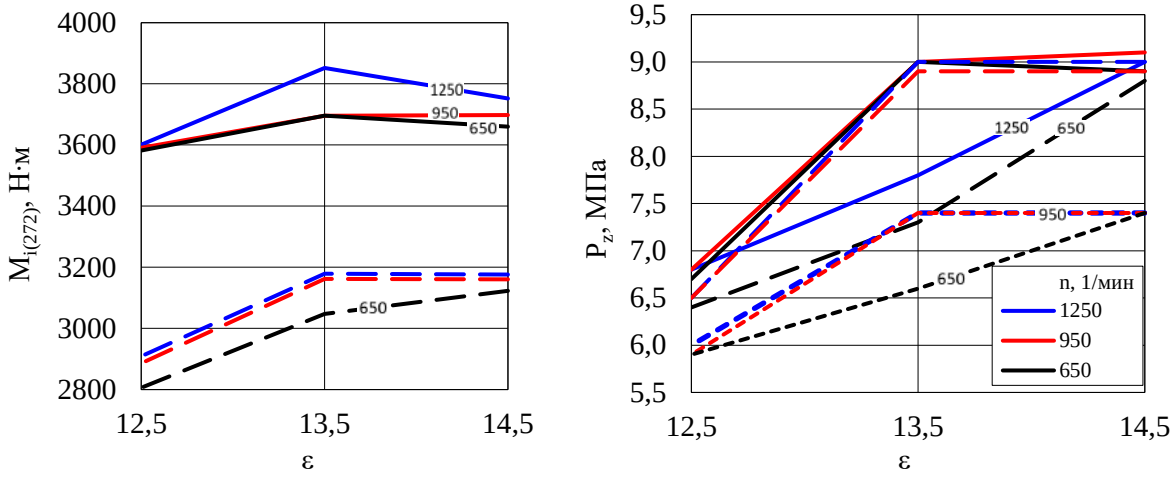


а) б)

Рисунок 1 – Сочетание ε_c и ε, при которых достигается максимальное значение термического КПД для различных величин относительного максимального давления цикла (а); зависимость предельных величин δ (1) и ρ (2) от ε из условия роста максимально возможной величины термического КПД при снижении ε (б)

С применением CFD-модели (*OpenFOAM*), установлено, что уменьшение геометрической степени сжатия дизеля 4ЧН15/20,5 с 14,5 до 13,5 при прочих равных условиях не приводит к уменьшению индикаторного крутящего момента, а в отдельных случаях (например, на режиме номинальной частоты вращения и максимальной цикловой подачи топлива) влечет увеличение индикаторного крутящего момента на величину до 2,7 % (рисунок 2а) вследствие изменения газодинамических условий в КС (уменьшение завихренности и турбулентности потоков газа) влекущее смещение основной фазы горения топлива далее за ВМТ.

Уменьшение степени сжатия дизеля 4ЧН15/20,5 с 14,5 до 13,5, при прочих равных условиях, ожидаемо влечет снижение максимального давления газов на величину до 13 % (рисунок 2б). Кроме того, как установлено CFD-расчетом, снижаются выбросы большинства нормируемых вредных веществ с отработавшими газами (оксидов азота – на 2 %, сажевых частиц – в 2 раза, углеводородов – почти до нуля), рост выбросов оксидов углерода II не превышает допустимых норм.



а) б)

Рисунок 2 – Расчетная зависимость среднего (в диапазоне ±136 гр. ПКВ) индикаторного момента 1-го цилиндра (а) и максимального давления сгорания (б) дизеля 4ЧН15/20,5 от степени сжатия (цикловая подача топлива: ——— – 200 мг; — — — – 150 мг; - - - – 100 мг)

Разработана феноменологическая математическая модель процессов в КС дизеля для оценки влияния различных факторов на расход топлива, тепловую и механическую нагруженность, которая, в отличие от известных, включает новые уравнения для определения относительного изменения показателей процессов в зависимости от степени сжатия:

– периода задержки воспламенения (ПЗВ) топлива в КС:

$$\frac{\tau_i}{\tau_i'} = \left(\frac{\varepsilon_0'}{\varepsilon_0}\right)^{1.392}, \quad (3)$$

где τ_i – ПЗВ; ε_0 – общая степень сжатия поршневой части и компрессора; «'» – референсное значение.

– показателя характера тепловыделения m в уравнении И.И. Вибе:

$$\frac{m}{m'} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right)^{0.84} \cdot \left(\frac{P_k}{P_k'}\right)^{\frac{1}{n_k}}, \quad (4)$$

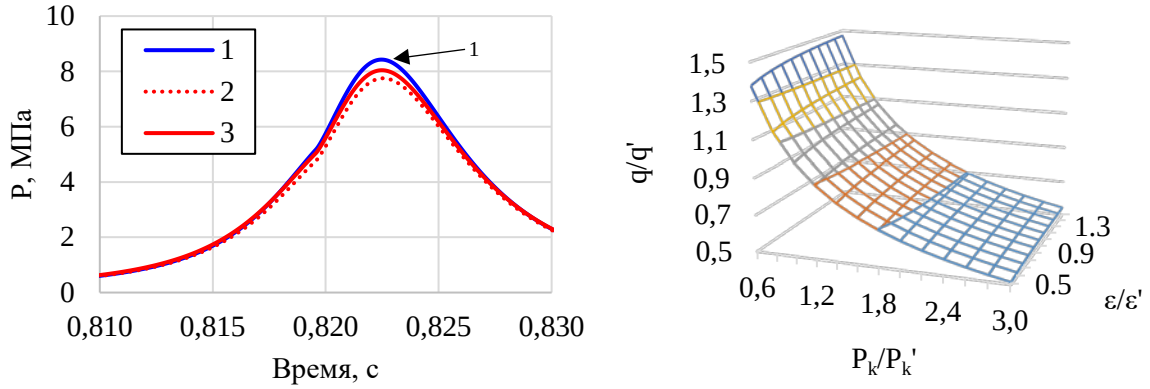
где P_k – давление наддува; n_k – показатель политропы сжатия газов в компрессоре.

– обобщенного критерия теплонапряженности дизеля (q):

$$\frac{q}{q'} = \left(\frac{\varepsilon' \cdot P_k' \cdot (\varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot P_k \cdot (\varepsilon' - 1)}\right)^b, \quad (5)$$

где b – показатель степени, зависящий от рассматриваемой поверхности.

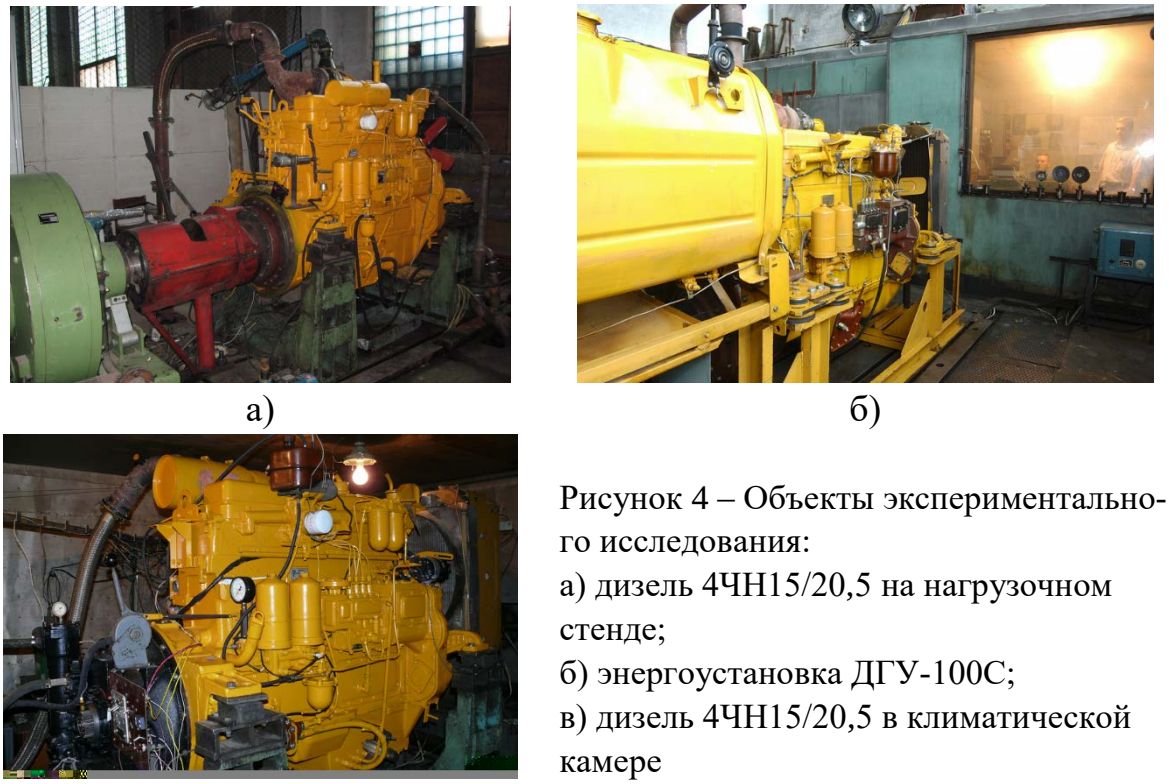
С применением разработанной феноменологической модели определено влияние различных факторов на тепловую и механическую нагруженность дизеля инверторной энергоустановки, в том числе, доказано, что одновременное уменьшение геометрической степени сжатия и увеличение давления наддува влекут уменьшение нагрузок на основные детали и величины критерия теплонапряженности (рисунок 3).



а) б)

Рисунок 3 – Давление газов в КС (n = 950 мин$^{-1}$): 1) ε = 14,5, P_k/P_k' = 1, N_e/N_e' = 1; 2) ε = 13,5, P_k/P_k' = 1, N_e/N_e' = 0,898; 3) ε = 13,5 P_k/P_k' = 1,06, N_e/N_e' = 1; зависимость относительной величины критерия теплонапряженности поршня от степени сжатия (ε' = 14,5) и давления наддува (б)

В **третьей главе** разработана методика экспериментального исследования первичного конвертированного дизеля. Объектом экспериментального исследования являлся дизель 4ЧН15/20,5 (Д 180) (рисунок 4а), выпускаемый ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» по ТУ 23.108-274-99, конвертированная модификация которого Д 180.000-5 используется в качестве первичного в составе энергоустановки ДГУ-100С (рисунок 4б).



а) б)

в)

Рисунок 4 – Объекты экспериментального исследования:
а) дизель 4ЧН15/20,5 на нагрузочном стенде;
б) энергоустановка ДГУ-100С;
в) дизель 4ЧН15/20,5 в климатической камере

При проведении анализа, дополнительно использовались ранее полученные ОАО «НИИ АТТ» результаты стендовых испытаний дизеля 4ЧН15/20,5 в

В **четвертой главе** приведены результаты натурных испытаний первичного конвертированного дизеля 4ЧН15/20,5 и их анализ.

Валидация разработанной феноменологической модели показала, что коэффициент детерминации расчетных и экспериментальных данных, определенный стандартными средствами MS Excel, составила R^2=0,97, что является достаточным для прогнозных инженерных расчетов (рисунок 5).

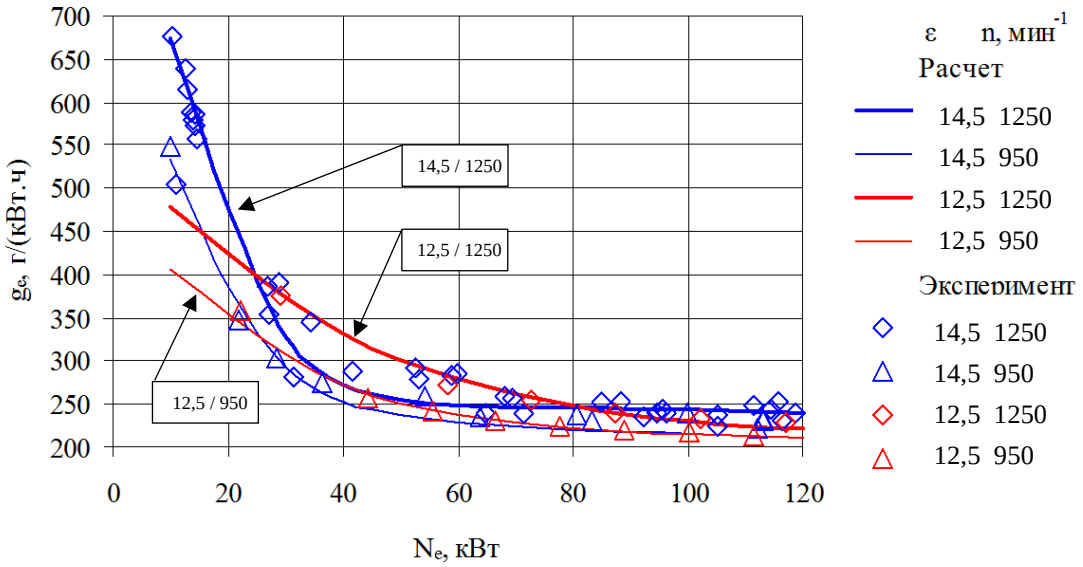


Рисунок 5 – Оценка сходимости расчетных и экспериментальных значений удельного эффективного расхода топлива дизеля 4ЧН15/20,5

Определен алгоритм оптимального регулирования частоты вращения КВ первичного дизеля 4ЧН15/20,5, который учитывает КПД электротехнической части ДГ и может быть описан системой уравнений:

$$\begin{cases} n = n_{min}, \quad \text{при } N_э \le 75\text{кВт} \\ n = 29.87 \cdot N_e - 1718, \quad \text{при } 75\text{кВт} < N_э < 95\text{кВт}. \\ n = n_{nom}, \quad \text{при } N_э > 95\text{кВт} \end{cases} \qquad (6)$$

где n_{min} и n_{nom} – минимально допустимая и номинальная частота вращения КВ, соответственно; $N_э$ – электрическая нагрузка.

Подтверждено, что реализация оптимального алгоритма управления частотой вращения КВ первичного дизеля 4ЧН15/20,5 позволяет существенно (на 10…25 % в диапазоне мощностей 10…70 кВт) снизить эксплуатационный расход топлива инверторной энергоустановкой (рисунок 6).

Рост удельного расхода топлива, при уменьшении степени сжатия с 14,5 до 12,5 при одновременном повышении давления наддува, не превышает 8 % на режиме номинальной частоты вращения КВ и 2 % при 950 мин$^{-1}$, что меньше, чем экономия топлива, полученная при переходе на режим переменной частоты вращения.

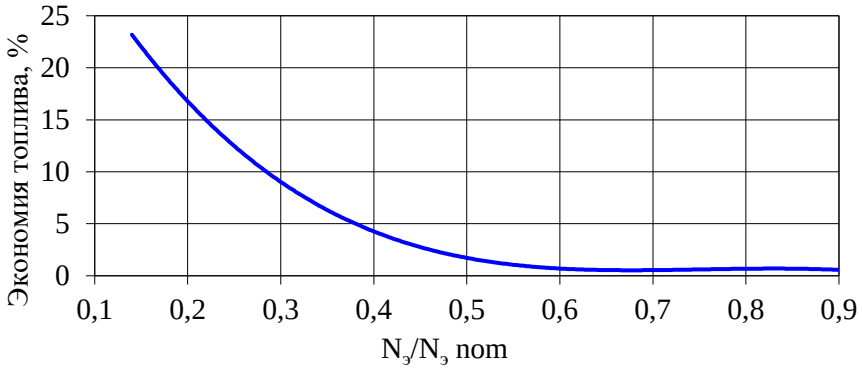


Рисунок 6 – Потенциальная экономия топлива при эксплуатации инверторного ДГ на базе дизеля 4ЧН15/20,2 по сравнению с серийной ДГУ-100С ($N_{э\ nom}$ – номинальная электрическая нагрузка)

При этом, на режиме 950 мин$^{-1}$ P_z уменьшается на величину до 1…1,5 МПа (рисунок 7), температура отработавших газов перед турбиной снижается на 50…100 °С, температура поршня над первым поршневым кольцом уменьшается на 35…45 °С (рисунок 8).

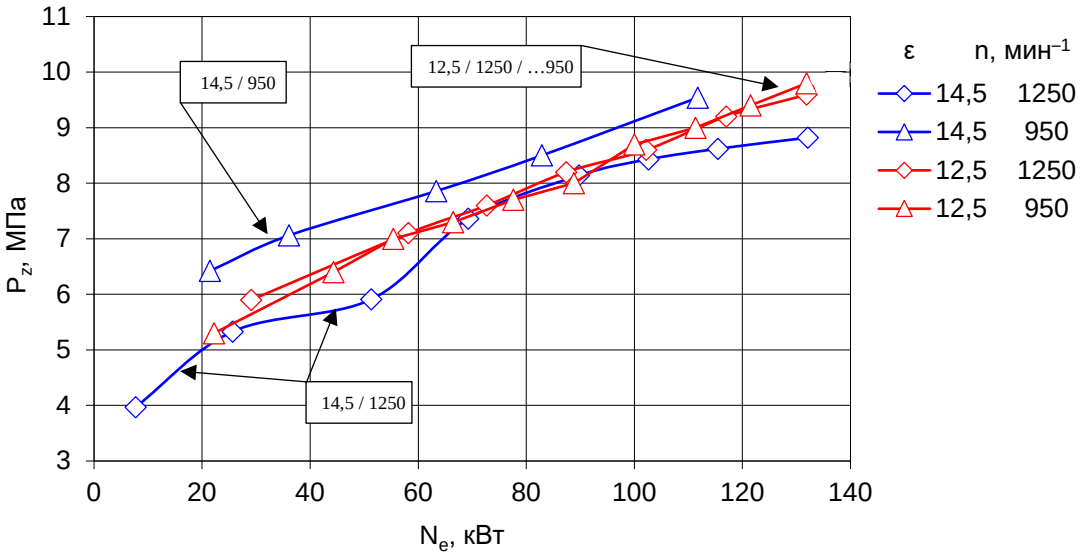


Рисунок 7 – Зависимость максимального давления сгорания дизеля 4ЧН15/20,5 от мощности, частоты вращения и степени сжатия

Согласно результатам расчета по методике А.А. Малозёмова и А.С. Шикина, при прочих равных условиях, уменьшение амплитуды теплосмен на 10 % (температура измеряется в Кельвинах) при частоте вращения КВ 950 мин$^{-1}$ влечет снижение скорости накопления повреждений поршня на 40…45 %. Уменьшение P_z на 12…18 % при тех же условиях влечет снижение скорости накопления повреждений поршня под действием газовых сил в 2…5 раз.

Суммарное прогнозируемое увеличение ресурса алюминиевых поршней при снижении степени сжатия с 14,5 до 12,5 и увеличении давления наддува со-

ставит 35…40 %. Для стальных деталей, образующих КС (гильза и головка цилиндра, клапаны) прогнозируемое увеличение ресурса составит 50…60 %.

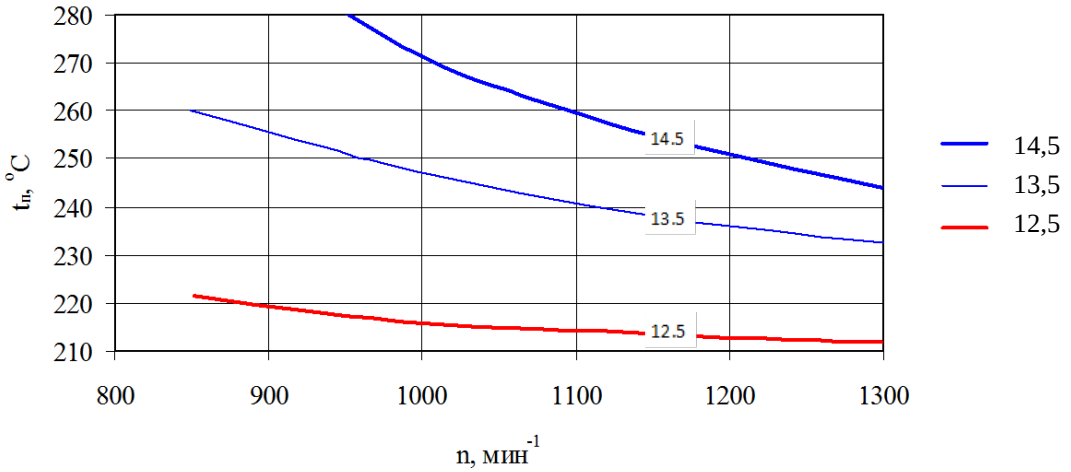


Рисунок 8 – Величины температур поршня над первым компрессионным кольцом двигателя 4ЧН15/20,5

Испытания дизеля 4ЧН15/20,5 в климатической камере показали, что предварительный прогрев воздуха во впускном коллекторе размещенными в нем по всей длине ТЭН с суммарной тепловой мощностью 1,6…2,4 кВт обеспечивает его надежный пуск при степени сжатия 12,5 в условиях, соответствующих инверторной энергоустановке (рисунок 9).

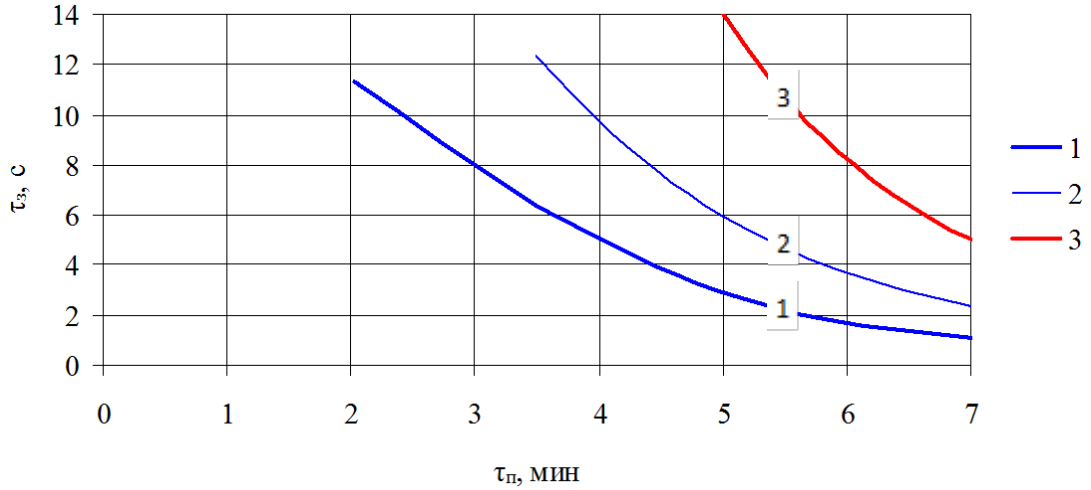


Рисунок 9 – Зависимость времени пуска дизеля 4ЧН15/20,5 со степенью сжатия 12,5 от времени предварительного прогрева тремя ТЭН суммарной мощностью 2,4 кВт при различных температурах окружающего воздуха: 1) t_o = –10 °С; 2) t_0 = –15 °С; 3) t_o = –20 °С

Анализ результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследования показал, что рациональная, с точки зрения топливной экономичности и надежности, величина степени сжатия дизеля 4ЧН15/20,5, конвертированного для работы в составе инверторной энергоустановки и оснащенного турбокомпрессором ТКР-8,5С, составляет 13,5 единиц.

В **пятой главе** выполнено технико-экономическое обоснование предлагаемого технического решения на примере инверторной энергоустановки с первичным ДВС – 4ЧН15/20,5 для вариантов конструкции:

1) с постоянной частотой вращения и степенью сжатия 14,5 (базовый);
2) с постоянной частотой вращения и степенью сжатия 13,5;
3) с переменной частотой вращения и степенью сжатия 14,5;
4) с переменной частотой вращения и степенью сжатия 13,5.

Для определения изменения скорости расходования ресурса ДВС, при внесении в его конструкцию и режимы эксплуатации изменений, была использована методика А.А. Малозёмова и А.С. Шикина, которая была упрощена, т.к. накоплением от воздействия переменной частоты вращения КВ и высокочастотными теплосменами как базовой, так и инверторной энергоустановок можно пренебречь, так как в автономных системах энергообеспечения изменение нагрузки происходит постепенно.

Эффективность технического решения определялась по критерию суммарных затрат на топливо и расходование ресурса энергоустановки. С использованием графика характерных суточных электрических нагрузок автономной системы энергоснабжения определялась частость возникновения режимов нагружения инверторной энергоустановки. В таблице 1 представлены основные итоговые результаты технико-экономического обоснования эффективности предложенного в диссертации технического решения. Цены, использованные при расчете, соответствуют средним величинам в Республике Саха (Якутия) в 2019–2020 г.

Таблица 1 – Результаты технико-экономического расчета
(без учета работы ВИЭ)

Экономический показатель, тыс. руб./год	Вариант			
	1 – базовый (ε = 14,5 n = const)	2 (ε = 13,5 n = const)	3 (ε = 14,5 n = var)	4 (ε = 13,5 n = var)
Затраты на топливо	10531	10536	10428	10263
Изменение (относительно базового варианта):				
абсолютное	–	+5	–103	–268
относительное, %	–	+0.05	–0,98	–2,54
Расходование ресурса	584	634	857	444
Изменение (относительно базового варианта):				
абсолютное	–	+50	+273	–140
относительное, %	–	+8,56	+46,75	–23,97
Итого	11115	11170	11285	10707
Изменение «Итого» (относительно базового варианта):				
абсолютное	–	+55	+170	–408
относительное, %	–	+0,49	+1,53	–3,67

Установлено, что предложенное техническое решение позволяет снизить затраты на топливо для ДВС в составе инверторной гибридной энергетической установки на 1…2,5 %. Только снижение степени сжатия или только работа первичного ДВС с оптимальной, с точки зрения топливной экономичности, частотой вращения влекут увеличение скорости накопления повреждений в 1,7…2,1 раза, поэтому не могут быть рекомендованы к внедрению без дополнительных мероприятий по снижению механических и тепловых нагрузок.

Выявлено, что техническое решение позволяет повысить ресурс первичного ДВС до функционального отказа вследствие накопления повреждений на 43 %, до параметрического отказа вследствие изнашивания на 32 %.

Совместная работа ДГУ с ВИЭ позволяют дополнительно снизить удельный расход топлива и скорость расходования ресурса вследствие изменения частости режимов нагружения, величина эффекта зависит от мощности ВИЭ.

Для рассматриваемой инверторной энергоустановки мощностью 100 кВт годовой экономический эффект составит 408 тыс. руб. или 3,67 % от затрат на топливо и расходование ресурса базовой энергоустановки, поэтому предложенное и научно обоснованное техническое решение может быть рекомендовано к внедрению, так как является экономически эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования **научно обосновано техническое решение** по снижению тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки заключающееся в снижении геометрической степени сжатия двигателя при одновременном повышении давления наддува. Получены следующие **научные результаты**:

1. **Разработаны математические модели** процессов в системах и механизмах двигателя, учитывающие особенности его конструкции и функционирования в составе инверторной энергоустановки и позволяющие оценивать показатели топливной экономичности и тепломеханической нагруженности:

– предложено новое уравнение для определения зависимости термического КПД цикла Тринклера от степени сжатия поршневой части и компрессора, с учетом ограничения максимального давления цикла;

– предложено новое уравнение для определения степени сжатия поршневой части и компрессора, при которых достигается максимальное значение термического КПД для различных величин относительного максимального давления цикла;

– разработана феноменологическая математическая модель процессов дизеля для оценки влияния различных факторов на расход топлива, тепловую и механическую нагруженность, которая, в отличие от известных, включает зависимости для определения относительного изменения периода задержки воспламенения топлива в камере сгорания, показателя характера тепловыделения в уравнении И.И. Вибе и критерия теплонапряженности от относительного изменения геометрической степени сжатия и давления наддува.

2. **Выявлены зависимости**, связывающие конструктивные параметры и режимы функционирования ДВС в составе инверторной энергоустановки, пока-

затели его топливной экономичности, тепломеханической нагруженности и пусковые качества:

–на основе анализа цикла Тринклера определена зависимость термического КПД от степени сжатия поршневой части и компрессора с учетом ограничения максимального давления цикла, выявлены зависимости предельных величин степеней повышения давления и последующего расширения, исходя из условия роста максимально возможной величины термического КПД при снижении степени сжатия поршневой части;

– с применением разработанной феноменологической математической модели выявлены зависимости периода задержки воспламенения, показателя характера тепловыделения в уравнении И.И. Вибе и критерия теплонапряженности основных деталей двигателя 4ЧН15/20,5 от геометрической степени сжатия и давления наддува;

– по результатам стендовых испытаний дизеля 4ЧН15/20,5 со степенью сжатия 12,5, 13,5, 14,5 и различными турбокомпрессорами определены зависимости показателей топливной экономичности и тепломеханической нагруженности от его конструктивных и режимных параметров;

– по результатам испытаний дизеля 4ЧН15/20,5 со степенью сжатия 14,5 и 12,5 в климатической камере выявлена зависимость его пусковых качеств от мощности электронагревателей во впускном коллекторе при различных степенях сжатия и температурах окружающей среды.

3. **Обоснованы рациональные конструктивные параметры двигателя** в составе инверторной энергоустановки, обеспечивающие повышение его топливной экономичности, при снижении тепломеханической нагруженности и обеспечении нормативных пусковых качеств:

– в ходе CFD-расчета установлена и экспериментально подтверждена рациональная величина степени сжатия дизеля 4ЧН15/20,5, конвертированного для работы в составе инверторной энергоустановки – 13,5 единиц;

– экспериментально подтверждено, что методом обеспечения надежного пуска двигателя 4ЧН15/20,5 со степенью сжатия 12,5 единиц и выше в составе инверторной энергоустановки является предварительный прогрев воздуха во впускном коллекторе электронагревателями мощностью 1,6…2,4 кВт.

4. **Обоснована эффективность технического решения**, заключающегося в снижении степени сжатия при одновременном повышении давления наддува, с учетом необходимости обеспечения требуемых пусковых качеств ДВС в составе инверторной энергоустановки, **установлено**, что:

– реализация оптимального алгоритма управления частотой вращения коленчатого вала дизеля 4ЧН15/20,5 в составе инверторной энергоустановки позволяет снизить текущий расход топлива на 10…25 % (в диапазоне мощностей 20…70 кВт), эксплуатационный – на 1…2,5 %;

– рекомендуемое снижение степени сжатия с при одновременном повышении давления наддува влечет уменьшение максимального давления газов в камере сгорания первичного дизеля 4ЧН15/20,5 на 1…1,5 МПа, максимальной температуры газов в камере сгорания – на 85…120 К, температуры поршня над первым поршневым кольцом – на 35…45 К, в зависимости от нагрузки;

– снижение степени сжатия до 13,5 единиц, при прочих равных условиях, позволяет для первичного дизеля 4ЧН15/20,5 уменьшить выбросы сажевых ча-

стиц – в 2 раза, оксидов азота – на 2 %, углеводородов – почти до нуля, рост выбросов оксидов углерода II не превышает допустимых норм;

– предлагаемое техническое решение позволяет повысить ресурс первичного двигателя 4ЧН15/20,5 до функционального отказа вследствие накопления повреждений на 43 % и до параметрического отказа вследствие изнашивания – на 32 %;

– для инверторной энергоустановки мощностью 100 кВт с дизелем 4ЧН15/20,5 годовой экономический эффект составит 408 тыс. руб. или 3,67 % от затрат на топливо и расходование ресурса базовой энергоустановки (относительно средних цен на период проведения расчетов).

Дальнейшая разработка темы исследования осуществляется в направлении совершенствования математических моделей изнашивания и накопления повреждений первичного двигателя инверторной энергоустановки с целью повышения достоверности и снижения трудоемкости.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК

1. Наумов, А.В. Снижение механической и тепловой напряженности первичного конвертированного тракторного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса / А.В. Наумов, А.А. Малоземов, В.С. Кукис, Р.Р. Гимазетдинов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 2 (80). – С. 25–33. – EDN XQWRSH (0,25/0,56 п.л.).

2. Малозёмов, А.А. Программное обеспечение для имитационного моделирования автономных теплоэнергетических установок / А.А. Малозёмов, **А.В. Наумов**, Г.А. Малозёмов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – № 10 (214). – С. 38–42. – EDN TJWDJE (0,19/0,31 п.л.).

3. Редько, И.Я. Прогнозирование ресурса многофункциональных энерготехнологических комплексов / И.Я. Редько, А.А. Малозёмов, **А.В. Наумов**, Д.В. Козьминых, Г.А. Малозёмов // Сантехника, отопление и кондиционирование. – 2020. – № 9(225). – С. 76–79. – EDN EOKNIA (0,13/0,25 п.л.).

В изданиях, индексируемых в БД Scopus

4. Malozemov, A.A. Hybrid Power System with Variable Speed Diesel Engine / A. Malozemov, V. Kukis, **A. Naumov** // Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018, Chelyabinsk, 04–06 октября 2018 года. – Chelyabinsk, 2018. – P. 63–68. – DOI 10.1109/ URALCON.2018.8544335. – EDN PMWEBB (0,19/0,38 п.л.).

5. Malozemov, A.A. Trinkler cycle analysis with maximum pressure limitation / A.A. Malozemov, **A.V. Naumov**, A.V. Shavlov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – P. 461–468. – DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_56. – EDN PDWEMU (0,31/0,50 п.л.).

Патенты на полезные модели, свидетельства на программы для ЭВМ

6. 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.

7. Программный класс для определения влияния степени сжатия на показатели процессов в камере сгорания дизеля / **А.В. Наумов**, Г.А. Малозёмов, В.С. Кукис. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020614099. Выдано 26.03.2020.

Другие публикации

8. Наумов, А.В. Некоторые вопросы тепловой напряженности первичного дизеля / А.В. Наумов // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 70-й научной конференции. Секции технических наук. – Электрон. текст. дан. (28,3 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – С. 678–682 (0,31/0,31 п.л.).

9. Наумов, А.В. Синтез алгоритма оптимального управления частотой вращения первичного дизеля инверторной гибридной энергоустановки с применением нейросетевой модели / А.В. Наумов, Д.А. Новикова // Технические науки: проблемы и решения. сб. ст. по материалам XV-XVI междунар. науч.-практ. конф. – № 9–10 (14). – М., изд. «Интернаука», 2018. – С. 100–109 (0,50/0,63 п. л.).

10. Наумов, А.В. Некоторые направления повышения энергообеспеченности образца вооружения и военной техники путем внедрения гибридных энергоустановок / А.В. Наумов, Г.Д. Чешко // Калашниковские чтения. V Всероссийская научно-практическая конференция (в рамках I Молодежного форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова» 8–11 ноября 2018 г.): материалы конференции. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018 – С. 218–225 (0,44/0,56 п.л.).

11. Редько, И.Я. Многофункциональный энерготехнологический комплекс с гибридной энергоустановкой / И.Я. Редько, А.А. Малозёмов, В.С. Кукис, **А.В. Наумов**, Д.А. Новикова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – № 1 (205). – С. 90–93 (0,06/0,25 п.л.).

12. Наумов, А.В. Многофункциональный энерготехнологический комплекс как основа развития малой энергетики / А.В. Наумов // Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения: сборник трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / [науч. ред. В.С. Кукис]. – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2019. – С.34–39 (0,38/0,38 п.л.).

13. Наумов, А.В. Обеспечение пуска дизеля с пониженной степенью сжатия в составе многофункционального энерготехнологического комплекса применением электронагревателей воздуха на впуске / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов, М.П. Грабец // Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения: сборник трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / [науч. ред. В.С. Кукис]. – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2019. – С. 23–33 (0,38/0,69 п.л.).

14. Наумов, А.В. Некоторые направления совершенствования пусковых качеств первичного дизеля в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов, Д.А. Матюхов // Новые материалы и технологии в машиностроении/ Под общей редакцией Е.А. Памфи-

лова. Сборник научных трудов. Выпуск 29. – Брянск: БГИТУ, 2019. – С. 122–125 (0,13/0,25 п.л.).

15. Naumov, A.V. Some questions of regional small energy development on the basis of hybrid energy installations / A.V. Naumov, A.A. Malozemov, V.Yu. Mironov / Экономика и эффективность организации производства/ Под общей редакцией Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов. Выпуск 29. –Брянск: БГИТУ, 2019 – С. 23–26 (0,13/0,25 п.л.).

16. Редько, И.Я. Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов / И.Я. Редько, А.А. Малозёмов, Г.А. Малозёмов, **А.В. Наумов**, Д.В. Козьминых // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – Т. 21. – № 4. – С. 244–253 (0,31/0,63 п.л.).

17. Наумов, А.В. К вопросу о регулировании параметров в процессе сжатия в двигателе внутреннего сгорания / А.В. Наумов // 100 лет Отечественному танкостроению. Состояние и развитие бронетанкового вооружения и техники [Текст]: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию Отечественного танкостроения (Омск, 11 сентября 2020 г.) / под общ. ред. П.Е. Кобзаря. – Омск: ОАБИИ, 2020. – С. 140–146 (0,38/0,38 п.л.).

18. Наумов, А.В. Некоторые направления исследований в области инверторных двигатель-генераторных установок / А.В. Наумов // Роль военной науки в развитии оборонно-промышленного комплекса и подготовке кадров: материалы международной молодежной научно-практической конференции, Омск, 02 марта 2020 года / Академия военных наук РФ; Под общ. ред. А. А. Соловьева. – Омск: Академия военных наук (Сибирское отделение), 2020. – С. 95–99 (0,31/0,31 п.л.).

19. Naumov, A.V. Some questions on reducing the toxicity of exhaust gases and switching to multi-fuel capacity through a controlled compression process in internal combustion engines / A.V. Naumov, A.M. Khusnutdinov, V.S. Vasin // Новые материалы и технологии в машиностроении / Под общей редакцией Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов. Выпуск 31. – Брянск: БГИТУ, 2020. – С. 62–65 (0,13/0,25 п.л.).

20. Наумов, А.В. Некоторые вопросы снижения токсичности отработавших газов и перехода на многотопливность за счет регулируемого процесса сжатия в двигателях внутреннего сгорания / А.В. Наумов // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 72-й научной конференции. Секции технических наук. – Электрон. текст. дан. (95,5 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – С. 645–648 (0,25/0,25 п.л.).

21. Наумов, А.В. Методика испытаний дизеля, используемого в качестве первичного в составе инверторной энергоустановки / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов // Транспортные средства специального назначения: разработка, производство и модернизация: материалы V Всероссийской научно-практической конференции (Омск, 19 марта 2021 г.) / Омский автобронетанковый инженерный институт; Омский институт водного транспорта. – Омск: ОАБИИ, 2021. – С. 236–241 (0,25/0,38 п.л.).

22. Наумов, А.В. Методы математического моделирования влияния степени сжатия на рабочие процессы в первичных двигателях внутреннего сгорания в составе энергоустановок / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов, Н.А. Наумов // Произ-

водственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на- Амуре, 16-26 февраля 2021 г. / редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 283–387 (0,19/0,31 п.л.).

23. Наумов, А.В. Применение CFD-моделирования для решения задач повышения эффективности автономных систем энергоснабжения / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов // Умные технологии в современном мире: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, 24–25 ноября 2021 г. / под ред. И.А. Соловьевой. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – Т. 1. – С. 316–322 (0,31/0,44 п.л.).

24. Naumov, A.V. Results of the diesel engine 4CHN15/20.5 working process indicators experimental determination as part of an inverter power plant / A.V. Naumov, A.A. Malozemov // Новые материалы и технологии в машиностроении / Под общей редакцией Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов. Выпуск 34. – Брянск: БГИТУ, 2021. – С. 3–6 (0,13/0,25 п.л.).

25. Наумов, А.В. Основные результаты диссертационной работы «Снижение тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки» / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 75-й научной конференции. Секции технических наук. – Электрон. текст. дан. (41,1 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. – С. 408–413 (0,25/0,38 п.л.).

26. Наумов, А.В. Технико-экономическое обоснование эффективности одновременного снижения степени сжатия и повышения давления наддува Конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки / А.В. Наумов, А.А. Малозёмов // Транспортные средства специального назначения: разработка, производство и модернизация: материалы VIII Межведомственной научно-практической конференции (Омск, 19 апреля 2024 г.) / Омский автобронетанковый инженерный институт; Сибирское отделение академии военных наук; Омский институт водного транспорта. – Омск: ОАБИИ, 2024. – С. 91–97 (0,31/0,44 п.л.).

Наумов Алексей Владимирович

Снижение тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки

Специальность 2.4.7 –Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 06.02.2025 г. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 18/46.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76