

В диссертационный совет 24.2.437.09
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (НИУ)»
454080, г. Челябинск,
пр. им. В. И. Ленина, 76,

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Медведева Геннадия Валериевича на диссертационную работу Наумова Алексея Владимировича «Снижение тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Наумова А.В. сфокусирована на решении комплекса задач, направленных на увеличение ресурса поршневых двигателей, интегрированных в инверторные системы генерации электроэнергии. В диссертационном исследовании поднимается важная на сегодняшний день тема оптимизации термодинамических процессов и конструктивных параметров дизельных двигателей, адаптированных для работы с инверторными преобразователями и оснащенных системой турбонаддува. Цель оптимизации – достижение максимальных показателей ресурса и КПД в составе таких энергосистем. Ключевым параметром, определяющим эффективность всей установки, является удельный расход топлива, зависящий, в свою очередь, от оптимизации рабочих процессов и минимизации механических потерь в двигателе внутреннего сгорания (ДВС). Нагрузки (как тепловые, так и механические), испытываемые компонентами ДВС, напрямую связаны с характером протекания процессов в камере сгорания, а динамика этих процессов определяется режимом работы (нагрузкой и количеством подаваемого за цикл топлива). Основная проблема, решаемая при разработке дизель-генераторов инверторного типа, заключается в противоречии: влияние скорости вращения коленчатого вала на экономичность и нагруженность ДВС имеет противоположный характер.

Актуальность темы представленной работы несомненна, а решаемые в ней задачи связаны с дальнейшим развитием теоретических подходов и оригинальных технических решений при совместной работе поршневых двигателей и инверторных комбинированных систем генерации электроэнергии.

2. Общая характеристика, структура и объем работы

Представленная диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Весь материал изложен на 190 страницах, и библиографический список, содержащий 272 наименования.

В первой главе проводится обзор и анализ современного состояния разработки и производства поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) для малой и возобновляемой энергетики. Рассматриваются особенности функционирования дизелей в составе инверторных дизель-генераторных установок (ДГУ), а также методы обеспечения нормативных пусковых качеств ДВС. Автор подчеркивает актуальность разработки инверторных энергоустановок, которые позволяют снизить удельный расход топлива на 25–30 % за счет изменения частоты вращения

коленчатого вала в зависимости от нагрузки. Однако в России серийное производство таких установок отсутствует, что связано с рядом научно-технических проблем, включая рост температуры и давления в камере сгорания на режимах пониженной частоты вращения, что снижает надежность ДВС. В главе формулируется научная проблема, связанная с противоположным влиянием частоты вращения коленчатого вала на топливную экономичность и тепломеханическую нагруженность ДВС. Предлагается гипотеза, что снижение геометрической степени сжатия двигателя при одновременном повышении давления наддува может решить эту проблему.

Вторая глава посвящена разработке и совершенствованию методов математического моделирования процессов в дизеле, работающем в составе инверторной энергоустановки. Автор предлагает новые уравнения для определения термического КПД цикла Тринклера, которые учитывают степень сжатия поршневой части и компрессора, а также ограничение максимального давления цикла. Эти уравнения позволяют более точно прогнозировать эффективность работы двигателя при различных режимах нагрузки и частотах вращения коленчатого вала.

С использованием программы OpenFOAM проведено моделирование процессов в камере сгорания дизеля 4ЧН15/20,5. Установлено, что снижение степени сжатия с 14,5 до 13,5 не приводит к уменьшению индикаторного крутящего момента, а в некоторых случаях даже увеличивает его на 2,7 %. Это связано с улучшением газодинамических условий в КС, что приводит к смещению фазы горения топлива за верхнюю мертвую точку. Уменьшение степени сжатия приводит к снижению максимального давления газов в камере сгорания на 13 %, что положительно сказывается на надежности двигателя. Также снижается температура отработавших газов и уменьшаются выбросы вредных веществ: оксидов азота (на 2 %), сажевых частиц (в 2 раза) и углеводородов (почти до нуля).

Разработана математическая модель, которая позволяет оценивать влияние различных факторов на расход топлива, тепловую и механическую нагруженность двигателя. Модель включает новые уравнения для определения периода задержки воспламенения топлива, показателя характера тепловыделения и критерия теплонапряженности. Это позволяет более точно прогнозировать поведение двигателя при изменении конструктивных параметров и режимов работы.

Автор демонстрирует глубокое понимание термодинамических процессов и умение применять современные методы моделирования для решения сложных научных и инженерных задач.

Третья глава описывает методику экспериментального исследования первичного конвертированного дизеля 4ЧН15/20,5. Двигатель испытывался в двух вариантах комплектации: серийной (степень сжатия 14,5) и опытной (степень сжатия 12,5). В ходе испытаний использовались различные турбокомпрессоры, система подогрева воздуха на впуске и другие модификации. Испытания проводились на нагрузочном стенде Schenck W-700 и в климатической камере.

На первом этапе испытаний был определен алгоритм оптимального управления частотой вращения КВ, который позволяет минимизировать удельный расход топлива. Этот алгоритм учитывает КПД электротехнической части дизель-генератора и может быть описан системой уравнений, связывающих частоту вращения с электрической нагрузкой. На втором этапе проводились пусковые испытания двигателя в климатической камере при различных температурах окружающего воздуха. Установлено, что предварительный прогрев воздуха во впускном коллекторе электронагревателями мощностью 1,6–2,4 кВт обеспечивает надежный пуск двигателя со степенью сжатия 12,5 даже при низких температурах (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это подтверждает возможность использования двигателей с пониженной степенью сжатия в условиях низких температур.

Испытания показали, что снижение степени сжатия с 14,5 до 12,5 при одновременном повышении давления наддува позволяет уменьшить максимальное давление газов в КС на 1–1,5 МПа, температуру отработавших газов на 50–100 °С и температуру поршня на 35–45 °С. Это значительно снижает тепловую и механическую нагруженность двигателя, что положительно сказывается на его надежности и ресурсе.

Автор проявил высокий уровень профессионализма в проведении экспериментальных исследований. Методика испытаний и анализа экспериментальных данных обеспечивают высокую достоверность научных результатов исследования.

В четвертой главе приведены результаты натурных испытаний дизеля 4ЧН15/20,5 и их анализ. Валидация разработанной феноменологической модели показала высокую точность, что позволяет использовать модель для прогнозных инженерных расчетов.

Реализация оптимального алгоритма управления частотой вращения КВ позволяет снизить эксплуатационный расход топлива на 10–25 % в диапазоне мощностей 20–70 кВт. Это подтверждает эффективность предложенного подхода к управлению частотой вращения в зависимости от нагрузки.

Уменьшение степени сжатия с 14,5 до 12,5 при одновременном повышении давления наддува приводит к значительному снижению выбросов вредных веществ: сажевых частиц (в 2 раза), оксидов азота (на 2 %) и углеводородов (почти до нуля). Это делает двигатель более экологичным и соответствующим современным требованиям по выбросам.

Прогнозируемое увеличение ресурса алюминиевых поршней составляет 35–40 %, а стальных деталей КС (гильза, головка цилиндра, клапаны) – 50–60 %. Это связано с уменьшением тепловой и механической нагруженности, что позволяет продлить срок службы двигателя и снизить затраты на его обслуживание.

Пятая глава посвящена технико-экономическому обоснованию предлагаемого технического решения. Рассмотрены четыре варианта конструкции инверторной энергоустановки с дизелем 4ЧН15/20,5: с постоянной и переменной частотой вращения, а также с разными степенями сжатия.

Установлено, что предложенное техническое решение позволяет снизить затраты на топливо на 1–2,5 % и повысить ресурс двигателя до функционального отказа на 43 %. Годовой экономический эффект для установки мощностью 100 кВт составляет 408 тыс. руб. (3,67 % от затрат на топливо и расходование ресурса базовой установки). Это делает предложенное решение экономически выгодным для внедрения.

Автор отмечает, что совместная работа дизель-генератора с возобновляемыми источниками энергии позволяет дополнительно снизить удельный расход топлива и скорость расходования ресурса. Это особенно важно для автономных систем энергоснабжения, где нагрузка может варьироваться в широких пределах.

На основе проведенных расчетов и анализа автор делает вывод, что предложенное техническое решение является экономически эффективным и может быть рекомендовано к внедрению в промышленных масштабах. Это позволит не только снизить затраты на топливо, но и повысить надежность и долговечность энергоустановок.

Автор проявил себя как грамотный исследователь, способный не только разработать техническое решение, но и обосновать его экономическую эффективность. Результаты работы позволяют не только улучшить технические характеристики энергоустановок, но и снизить затраты на их эксплуатацию.

В **заключении** автор подводит итоги работы, формулирует основные научные результаты и их практическую значимость. Заключение структурировано и логично, что позволяет легко проследить за ходом мысли автора и оценить достигнутые результаты. Научные результаты работы являются ключевыми, так как они обеспечивает теоретическую основу для дальнейших исследований и разработок. Автор делает вывод, что предложенное техническое решение является обоснованным, экономически эффективным и может быть рекомендовано к внедрению.

Рекомендации автора обоснованы и подкреплены результатами проведенных исследований. Это свидетельствует о том, что автор не только решил поставленные задачи, но и наметил направления для будущих исследований. Автор демонстрирует высокий уровень профессионализма, глубокое понимание предмета исследования и умение применять современные методы для решения сложных научных инженерных задач.

3. Степень обоснованности полученных результатов, научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе

Высокая степень обоснованности подтверждается детальным анализом значительного количества отечественных и иностранных литературных источников, последовательным проведением экспериментов, научным обоснованием полученных результатов, их математической обработкой и закономерно сформулированными выводами.

Достоверность результатов обеспечивается корректной постановкой задач, обоснованностью используемых теоретических зависимостей и принятых допущений, применением современного оборудования с высокой точностью измерений, воспроизводимостью результатов экспериментов.

4. Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна заключается в разработке аналитических зависимостей, устанавливающих взаимосвязь термического КПД цикла Тринклера-Сабатэ с геометрическими параметрами поршневой группы и компрессора (степень сжатия), а также с максимальным давлением в цикле; Также была разработана математическая модель, позволяющая оценить относительное изменение ключевых параметров процесса сгорания: периода задержки самовоспламенения топливовоздушной смеси, формы кривой тепловыделения (описываемой уравнением Вибе), а также критерия, характеризующего теплонапряженность дизельного двигателя. Проведены стендовые испытания двигателя 4ЧН15/20,5 с различными вариантами степени сжатия (12,5; 13,5; 14,5) и разными моделями турбокомпрессоров. В результате получены эмпирические зависимости, отражающие влияние конструктивных особенностей и режимных параметров двигателя на его топливную экономичность и уровень тепломеханических нагрузок. Двигатель 4ЧН15/20,5 с двумя значениями степени сжатия (14,5 и 12,5) был испытан в климатической камере. Установлена зависимость пусковых характеристик двигателя от степени сжатия, мощности нагревательных элементов, установленных во впускном коллекторе, и температуры окружающего воздуха.

5. Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая ценность определяется следующим содержанием: создание обобщенной теоретической базы и проведении экспериментальных исследований, комплексно охватывающих процессы, протекающие в системах и механизмах дизельного двигателя, адаптированного для работы в составе инверторного дизель-генератора, в характерных эксплуатационных режимах. Полученные результаты

могут быть применены для решения обширного круга научных задач в области двигателестроения, направленных на улучшение топливной экономичности, повышение надежности и обеспечение надежного запуска ДВС, входящих в состав различных энергоустановок.

Практическая значимость работы определяется следующим содержанием: предложено и обосновано техническое решение, основанное на одновременном снижении степени сжатия и увеличении давления наддува. При этом учитывается необходимость сохранения требуемых пусковых характеристик ДВС, интегрированного в инверторную энергоустановку. Разработаны методики (расчетные и экспериментальные), позволяющие определить оптимальные значения степени сжатия и давления наддува для ДВС, работающего в составе инверторной энергоустановки. Сформулированы практические рекомендации по методам обеспечения надежного запуска ДВС, входящего в состав инверторной энергоустановки, в различных условиях эксплуатации. Создан программный комплекс ("Программный класс для определения влияния степени сжатия на показатели рабочих процессов в камере сгорания дизеля"), предназначенный для моделирования влияния степени сжатия на параметры рабочего процесса в камере сгорания дизельного двигателя и оценки его эффективности.

Отдельные результаты диссертационного исследования нашли применение в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»; ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК»; Омский филиал Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва; в ФГБОУ ВО ОмГТУ.

6. Анализ публикаций автора по теме исследования

Основные результаты исследований, приведенные в диссертации, докладывались 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.

Материалы диссертации опубликованы в 26 печатных публикациях (включая 5 работ на иностранных языках), в том числе: 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК; 2 статьи в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus. По теме диссертации получен патент на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. География

публикаций в российских изданиях охватывает широкий спектр городов: Москва, Челябинск, Уфа, Ижевск, Омск, Брянск, Комсомольск-на-Амуре.

На основании этих сведений, а также анализа публикаций можно утверждать, что научная новизна работы и все вносимые на защиту положения отражают личный вклад соискателя в проведенных научных исследованиях.

7. Соответствие автореферата диссертации

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации, охватывает все ее разделы и отвечает требованиям ВАК РФ.

8. Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация соответствует специальности 2.4.7 - Турбомашины и поршневые двигатели, в части:

п.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;

п.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.

9. Вопросы и замечания по диссертации:

1. В первой задаче исследования, требуется пояснения о каких «особенностях конструкции» ДВС идет речь - (стр. 12);

2. Страница 66, опечатка в последнем абзаце, «рисунка 2.2» вместо «рисунка 2.3»

3. В формулах 2.12 и 2.13 (стр. 68) требует пояснения при каких значениях показателя адиабаты, следует полученные значения констант А и В для уравнения 2.11 и чем это обоснованно?

4. На странице 70 приведены частоты вращения коленчатого вала ДВС выбираемые для полнофакторного эксперимента 1250, 950, 650 мин⁻¹, однако на стр. 8 автор приводит ссылку на ГОСТ 33105-2014 [1] и приведением частот вращения из стандартного ряда (750, 1000, 1500 мин⁻¹), что требует пояснения;

5. Рисунок 2.8 (стр. 73) , из графика зависимости среднего индикаторного момента в зависимости от степени сжатия, представлена кусочно-ломаная функция. Проводился ли анализ на возможный экстремум функции в приведенном диапазоне степени сжатия 12,5...14,5 единиц, в виде полиномиальной функцией.

6. В качестве «удобного» критерия оценки теплонапряженности дизеля выбран критерий фирмы «Доксфорд» (2.36), стр. 85. Чем обоснован, выбор именно данного критерия, а не критерия проф. А.К. Костина например?

7. Для полученного автором оптимального алгоритма управления ПДВС (4.1) стр. 117 диссертации, не указана величина достоверности аппроксимации.

8. В четвертой главе диссертации (стр. 117), автор указывает принятый КПД электротехнической части инверторной установки равным 0,95, но при этом в третьей главе (стр. 99) речь идет о 0,90, что требует пояснения.

9. В п.4 заключения по диссертации, при обосновании эффективности предложенного технического решения диссертантом не отмечается, возможность

использования, фильтрующих элементов штатной системы впуска первичного ДВС, при применении турбокомпрессоров большей производительности.

10. Заключение о соответствии диссертации требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней

Указанные замечания не снижают качества и научной ценности представленной диссертационной работы, которая решает актуальные задачи и соответствует критериям, установленным пунктами 9–14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 16.10.2024 г.) «О порядке присуждения ученых степеней» (вместе с «Положением о присуждении ученых степеней») (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2025 г.) для кандидатских диссертаций.

Таким образом, диссертационная работа Наумова Алексея Владимировича на тему «Снижение тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки» является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой. Цель работы, заключающаяся в снижении тепловой и механической нагруженности конвертированного дизеля в составе инверторной энергоустановки путем совершенствования его конструктивных параметров и режимов функционирования, успешно достигнута. Работа полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а ее автор, Наумов Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели.

Официальный оппонент – доктор технических наук по специальности 05.08.05 - «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)», профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и электротехнологии», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

Медведев Геннадий Валериевич



«17» марта 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

Официальный сайт: <https://spbgau.ru>.

Почтовый адрес: 196601, Санкт-Петербург, город Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, литер А.

Тел.: +79095031125.

E-mail: genatswaly@mail.ru.

Подпись Медведева Г.В. заверяю

Проректор по научной, инновационной и международной работе
ФГБОУ ВО СПбГАУ



Р.О. Колосников