



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
E-mail: office@spbstu.ru

15.01.2018 № К-214
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор

по научной работе

В. В. Сергеев



ОТЗЫВ

ведущей организации

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертационную работу Плотникова Леонида Валерьевича «Повышение качества газообмена в поршневых ДВС путём совершенствования газодинамики и теплообмена потоков во впускных и выпускных клапанах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и 05.04.02 – Тепловые двигатели

1. Оценка содержания работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 264 наименования, и 8 приложений. Диссертация изложена на 377 страницах и содержит 201 рисунок и 6 таблиц.

Автореферат диссертации изложен на 48 страницах, содержит 25 рисунков и список опубликованных работ соискателя из 54 наименований.

Диссертационная работа Л.В. Плотникова посвящена физическому и численному моделированию нестационарной газодинамики и локального теплообмена во впускных и выпускных системах поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Основной целью работы является установление закономерностей изменения газодинамических и тепловых характеристик пульсирующих потоков во впускных и выпускных каналах поршневых ДВС, связанного с геометрическими и режимными факторами, для повышения качества газообмена в двигателях и разработка на этой основе технических решений, повышающих технико-экономические показатели ДВС.

Во введении автор обосновывает актуальность темы, выбирает направления исследований, ставит цель и формулирует задачи диссертации, показывает научную и практическую значимость исследуемых проблем, представляет ключевые положения, выносимые на защиту, а также даёт общую характеристику диссертационной работы.

В первой главе содержится обзор литературы, посвященной нестационарным газовым потокам в энергетических машинах и установках, а более узко – физическим процессам в газоздушных трактах поршневых ДВС (с турбонаддувом и без него). Рассмотрены традиционные и перспективные методики экспериментальных исследований, реализующие их стенды и средства измерений. Анализируются основные результаты предшествующих работ отечественных и зарубежных авторов по данному направлению. Здесь же обсуждается разработанность выбранной темы, как в части фундаментальных исследований характеристик пульсирующих течений в гидравлических системах сложной конфигурации, так и в части прикладных исследований газообмена в газоздушных трактах поршневых ДВС.

На этой основе сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе выполнен анализ газодинамической нестационарности впуска и выпуска газов в каналах, характерных по форме для газоздушных трактов поршневых ДВС, а также предложены критерии оценки этой нестационарности.

Показано, что только нестационарный подход к исследованию газообмена в поршневых ДВС: может дать адекватные результаты, тогда как стационарная модель пригодна лишь для предварительных «качественных» опытов.

Экспериментально определены времена восстановления и релаксации, позволяющие судить о нестационарности переноса в газовых потоках; дана оценка нестационарности процессов в газоздушных трактах поршневых ДВС.

Установлен механизм разрешения нестационарности при различных частотах вращения коленчатого вала; утверждается, что для выпускных ка-

налов ДВС существует два типа разрешения газодинамической нестационарности.

Предложена новая методика, позволяющая с помощью коэффициента тепловой мобильности учесть влияние нестационарности на теплообмен.

В третьей главе описаны методики, лабораторные установки и стенд с действующим двигателем, автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных, указаны особенности экспериментов, представлены результаты пилотного численного моделирования и данные экспериментальных исследований газодинамических и расходных характеристик в газовоздушных трактах поршневых ДВС, а также предложены пути совершенствования процессов во впускных и выпускных системах ДВС с турбонаддувом и без него.

Установлено влияние частоты вращения коленчатого вала и конфигурации впускного и выпускного трубопроводов на газодинамические и расходные характеристики пульсирующих потоков; определены частотно-амплитудные характеристики изменения мгновенных скорости и давления при нестационарном течении в газовоздушных трактах поршневых ДВС с турбонаддувом и без него.

Выявлены существенные отличия в газодинамических и расходных характеристиках пульсирующих потоков во впускных и выпускных трубопроводах для атмосферных ДВС и двигателей с турбонаддувом.

Показано, что экспериментальные данные о газодинамике и теплообмене, полученные на натурной одноцилиндровой модели ДВС, качественно согласуются с полученными на действующем автомобильном двигателе.

Автор предложил способы улучшения газообмена на основе поперечного и продольного профилирования трубопроводов. На некоторых режимах работы ДВС это позволяет повысить коэффициент наполнения на 22 % и снизить коэффициент остаточных газов на 24 %. Расчетная оценка показала, что профилирование газовоздушных трактов может повысить мощности ДВС (до 14 %) при фактически неизменном удельном расходе топлива ($\pm 1,0$ %) и снизить (в среднем на 10 – 12 %) теплонапряжённость основных деталей и узлов в трактах. Технические решения диссертанта защищены патентами Российской Федерации на полезную модель.

Разработан способ уменьшения (до 2,5 раз) амплитуды пульсаций местных давления и скорости потока и способ снижения (в среднем на 20 %) локального коэффициента теплоотдачи во впускном трубопроводе поршневого ДВС с турбонаддувом. Это позволит снизить различия в рабо-

те цилиндров, уменьшить уровень шума, повысить КПД турбокомпрессора и надежность двигателя.

Предложен способ увеличения (в среднем на 20 %) расхода через выпускной трубопровод поршневого ДВС (с турбонаддувом и без него) на основе эффекта активной эжекции, что улучшит очистку цилиндра от отработавших газов и, следовательно, повысит мощность двигателя.

В четвертой главе исследован локальный теплообмен во впускных и выпускных трубопроводах поршневых ДВС с турбонаддувом и без него. Выявлено влияние нестационарности на интенсивность теплообмена. Предложены методы снижения теплонапряженности конструктивных элементов трактов путем ослабления пульсаций коэффициентов теплоотдачи.

Выявлены закономерности изменения мгновенного локального коэффициента теплоотдачи во впускном и выпускном трубопроводах разной конфигурации в поршневом ДВС с турбонаддувом и без него.

Установлены значительные отличия в изменении локальных коэффициентов теплоотдачи при стационарном и нестационарном течениях во впускных и выпускных трубопроводах поршневых ДВС без турбонаддува; при этом газодинамическая нестационарность снижает коэффициент локальной теплоотдачи в 1,1 – 2,5 раза (в зависимости от частоты вращения коленчатого вала).

Показано, что профилирование впускных и выпускных трубопроводов поршневых ДВС без наддува снижает коэффициенты локальной теплоотдачи, уменьшает подогрев газа при впуске в среднем на 30 % (что улучшает наполнение цилиндра), увеличивает перепад энтальпии на турбокомпрессоре (что увеличивает мощность двигателя), а также снижает температурные напряжения в элементах трактов (что повышает надежность двигателя).

Выявлены существенные отличия в теплообменных характеристиках потоков во впускном и выпускном трубопроводах поршневого ДВС с турбонаддувом и без него.

На основе обобщения экспериментальных данных получены эмпирические уравнения для расчета мгновенного локального коэффициента теплоотдачи во впускном и выпускном трубопроводах разной конфигурации для поршневых ДВС с турбонаддувом и без него.

В пятой главе рассмотрена реализации полученных результатов:

– выполнены эскизные проработки модернизированных впускных и выпускных трубопроводов с профилированными участками; поперечные сечения в виде квадрата и равностороннего треугольника можно внедрить

в производство без значительных конструктивных доработок газоздушных трактов ДВС и без серьезных технологических затруднений;

- проработана конструкция впускной системы дизельного двигателя 6ДМ-21 (ООО УДМЗ) с системой управляемого сброса части наддувочного воздуха для повышения качества газообмена; предложена схема управляемого сброса части сжатого воздуха с помощью электромагнитного клапана для двигателей с турбонаддувом, а также разработан алгоритм управления этим процессом;

- представлена конструкция модернизированной выпускной системы дизеля 6ДМ-21 с системой эжекции; выполнена эскизная проработка установки эжекционных трубок в выпускном трубопроводе;

- выполнено численное моделирование рабочих процессов полного цикла дизельного двигателя 8ДМ-21 – с учетом конфигурации газоздушных трактов и газодинамической нестационарности процессов впуска и выпуска – с помощью программного комплекса ACTUS (ABB TurboSystems). Показано, что эжекция в выпускной системе снижает коэффициент остаточных газов до 10 %, что уменьшает удельный расход топлива в среднем на 1 % при сохранении мощностных характеристик ДВС;

- методом численного моделирования показано, что оптимизация формы впускного трубопровода дизеля 8ДМ-21 может повысить коэффициент наполнения в среднем на 0,5 %, эффективную мощность двигателя до 0,7 % и снизить удельный эффективный расход топлива до 0,75 %.

В заключении изложены основные результаты работы.

Следует отметить следующие квалификационные признаки диссертации:

Актуальность темы работы Плотникова Л.В. не вызывает сомнений, поскольку на сегодняшний день поршневые ДВС являются наиболее распространенными тепловыми двигателями в мире, а их эффективность существенно влияет на совокупные экономические показатели большинства отраслей. Поэтому оптимизация рабочих процессов и конструкций ДВС – одна из первостепенных задач не только российской, но и мировой энергетики.

Литературные данные об оценке и учете влияния газодинамической нестационарности на тепломеханические характеристики газовых потоков весьма ограничены и противоречивы, а устоявшиеся методологические подходы и существующая приборно-измерительная база не вполне пригодна для исследований быстропротекающих процессов в газовых трактах. Решение указанных проблем является актуальной задачей развития науки и техники.

Достоверность результатов диссертации основывается на использовании апробированного прикладного программного обеспечения для выполнения численного моделирования и обработки экспериментальных данных, а также сочетанием независимых методик исследования, воспроизводимостью результатов измерений, применением комплекса современных методов исследования, выбором измерительной аппаратуры соответствующего метрологического уровня, ее систематической поверкой и градуировкой, а также удовлетворительным согласованием данных автора с результатами других исследователей.

Научная новизна основных положений работы.

А. В области фундаментальных исследований:

1) предложена методологическая концепция исследования тепломеханических характеристик потоков в газоздушных трактах поршневых ДВС в условиях газодинамической нестационарности, разработана сравнительная методика для оценки нестационарности переходных процессов в трубопроводах на основе времён восстановления и релаксации;

2) выявлены закономерности изменения локального коэффициента теплоотдачи при нестационарном течении газа во впускных и выпускных трубопроводах поршневых ДВС; установлено снижение в 1,2 – 2,5 раза коэффициента локальной теплоотдачи в пульсирующем газовом потоке по сравнению со стационарным течением; предложен новый способ учета влияния газодинамической нестационарности на локальный теплообмен;

3) установлена связь мгновенных значений местных скорости и давления, а также локального коэффициента теплоотдачи в газоздушных трактах при различных режимах работы ДВС и турбокомпрессора; показано, что газообмен в ДВС с наддувом имеет существенно другую тепломеханическую природу, и для его интенсификации необходимо совершенствовать процессы впуска и выпуска;

4) получены эмпирические уравнения для расчета мгновенного локального коэффициента теплоотдачи во впускном и выпускном трубопроводах различной конфигурации для поршневых ДВС с турбонаддувом и без него.

Б. В прикладной области:

5) предложены технические решения, позволяющие увеличить коэффициент наполнения до 22% и снизить коэффициент остаточных газов на 24 %) путем поперечного и продольного профилирования впускного и выпускного трубопроводов поршневых ДВС без наддува (что приводит к повышению мощности двигателя до 14 % при практически неизменном удельном расходе топлива); предлагаемые способы и конструкции для их

реализации защищены патентами Российской Федерации на полезную модель;

б) разработан способ уменьшения амплитуды пульсаций давления и скорости газового потока (максимально до 2,5 раз) во впускном трубопроводе, а также способ снижения локального коэффициента теплоотдачи (в среднем на 20 %) для поршневого ДВС с турбонаддувом, что позволит улучшить равномерность работы цилиндров, снизить уровень шума и повысить надежность двигателя; конструкция модернизированной впускной системы ДВС с наддувом защищена патентом Российской Федерации на полезную модель;

7) выполнено численное моделирование рабочих процессов полноразмерных ДВС с учетом конфигурации газоздушных трактов и газодинамической нестационарности впуска и выпуска с помощью программных комплексов Дизель-ПК (МГТУ имени Н.Э. Баумана) и ACTUS (ABB TurboSystems); проведен системный анализ влияния предложенных мер газодинамического совершенствования впускных и выпускных трубопроводов на технико-экономические показатели поршневых ДВС.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы Плотникова Л. В. состоит в следующем:

1) в области двигателестроения разработаны оригинальные технические решения для впускных и выпускных систем ДВС, повышающие их технико-экономические показатели;

2) в области приборной техники для теплофизического эксперимента разработана и реализована электронная схема термоанемометра постоянной температуры, которая защищена патентом Российской Федерации на полезную модель;

3) в области инженерной теплофизики разработан метод учета тепломеханической нестационарности при расчете локального коэффициента теплоотдачи в цилиндрических каналах;

4) в области проектных расчетов получены и обобщены данные по интенсивности мгновенного локального теплообмена в газоздушных трактах поршневых ДВС, необходимые для расчета подогрева и охлаждения газов, а также для определения поля температурных напряжений в деталях и узлах трактов.

Комплекс созданных экспериментальных методик и результатов численного моделирования, совокупность опытных и расчётных данных, формул и гистограмм расширяет базу знаний о теплофизических процессах при нестационарном течении газов и создает основу для совершенствования методов расчета впускных и выпускных систем ДВС, а также дополня-

ет и уточняет теоретические и прикладные представления о газодинамике и теплообмене в процессах впуска и выпуска газов, что необходимо для модернизации существующих и разработки новых поршневых ДВС.

Основные результаты работы приняты к реализации в ООО «Уральский дизель-моторный завод» (при совершенствовании дизелей размерности 21/21), ПАО «Уралмашзавод» (при доводке дизельных силовых установок для привода гидравлических экскаваторов), ПАО «Машиностроительный завод имени М.И.Калинина» (при совершенствовании систем и агрегатов гражданских машин), промышленной группе «Генерация» (при разработке дизельных приводов для буровых насосов и лебедок, а также дизельных электростанций).

2. Соответствие научным специальностям

Диссертация Плотникова Л. В. подпадает под следующие пункты ответственности.

По паспорту научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1) По существу *формулы специальности*: «обоснование методов расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, обоснование и проверку методов интенсификации теплообмена».

2) По содержанию *пункта 3 области исследования*: «Исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии»;

3) По содержанию *пункта 5 области исследования*: «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»;

По паспорту научной специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели:

1) По существу *формулы специальности*: «научная специальность, объединяющая теоретические и экспериментальные исследования тепловых, газодинамических, гидродинамических, механических, физико-химических и информационных процессов, протекающих в цилиндрах и системах поршневых двигателей внутреннего сгорания и двигателей с внешним подводом тепла. Исследования выполняются с целью совершенствования действующих энергоустановок с тепловыми двигателями, создания тепловых двигателей с улучшенными показателями качества»;

2) По содержанию *пункта 1 области исследования*: «Теоретические и экспериментальные исследования тепловых, газодинамических, гидродинамических, механических и физико-химических процессов в двигателях и их системах»;

3) По содержанию *пункта 2 области исследования*: «Теоретические и экспериментальные исследования по обеспечению экономичности и экологической чистоты рабочих процессов в тепловых двигателях, созданию надежных конструкций двигателей и их агрегатов».

Таким образом, диссертационная работа Плотникова Леонида Валерьевича «Повышение качества газообмена в поршневых ДВС путем совершенствования газодинамики и теплообмена потоков во впускных и выпускных каналах» соответствует паспортам специальностей 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и 05.04.02 – Тепловые двигатели. Тематика исследования, представленного в диссертационной работе, находится на стыке рассматриваемых научных специальностей, поскольку автор исследовал особенности газодинамики и теплообмена потоков во впускных и выпускных системах сложной конфигурации с целью совершенствования процессов газообмена в поршневых ДВС (с наддувом и без него) и, следовательно, улучшения их технико-экономических показателей.

3. Вопросы и замечания к работе

1. Используемый в работе новый способ определения коэффициента теплоотдачи описан недостаточно подробно, а его применимость к исследованию теплообмена в гидравлических системах сложной конфигурации (газовоздушных трактах ДВС) слабо обоснована.

2. Предлагаемый автором метод расчета безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) для пульсирующих потоков с помощью коэффициента мобильности теплоотдачи трудоёмок. Автор ничем не подтверждает его преимущества перед существующими аналогами.

3. Часть результатов получена с помощью программного комплекса АСТУС, однако в работе отсутствует описание математической модели, на основании которой построен этот комплекс.

4. Эксперименты выполнены при температуре потока не выше 40 °С, тогда как температура отработавших газов в ДВС достигает 1500 °С. Перенос полученных в опытах данных на реальный объект в работе не обоснован.

5. Несколько раз упоминается действие «устойчивых вихревых структур в углах квадратных и треугольных каналов», однако никак не подтверждается их существование для исследуемых каналов в условиях газодинамической нестационарности.

6. Данные по нестационарной газодинамике и локальному теплообмену получены только для прямолинейных участков впускного и выпускного трубопроводов. Однако газозвуковые системы поршневых ДВС чаще всего имеют сложные изгибы и повороты, которые могут существенно влиять на течение и теплообмен.

7. Не показано, как будут выглядеть поля скорости и давления в цилиндре (дутьевой камере) в результате предлагаемых в диссертации мер.

8. Автор не использовал введенный в 2012 г. в Российской Федерации ГОСТ Р 54500.3-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, рекомендуемый проводить оценку неопределенности взамен расчета погрешности, и ГОСТ Р 54500.1-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009, описывающий соответствующие процедуры.

9. Не проведены оценка и сравнение гидравлических потерь в каналах различного поперечного сечения.

10. В диссертации рассматривается два типа разрешения газодинамической нестационарности – кризисным образом и без кризиса. Такое разделение выглядит весьма условным, а наблюдаемые в эксперименте различия находятся, возможно, в пределах расширенной неопределённости измерений.

12. Стиль, присущий диссертации и автореферату, крайне тяжёл, а местами невразумителен. Текст изобилует синтаксическими ошибками. Рисунки в автореферате выполнены слишком мелкими.

Поскольку высказанные замечания не ставят под сомнение основные выводы диссертации, даём положительное заключение по работе.

4. Общее заключение о работе

Диссертация в целом представляет собой законченную самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой содержатся результаты физического и численного моделирования нестационарной газодинамики и локального теплообмена во впускной и выпускной системах поршневых ДВС и предложены способы модернизации конструкций газозвуковых трактов ДВС, повышающие качество газообмена и улучшающие технико-экономические показатели. Автореферат соответствует диссертации.

Результаты диссертационной работы Плотникова Л. В. имеют существенную научную и практическую значимость. Для использования полученных в работе результатов с материалами диссертации целесообразно ознакомить следующие организации: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт теплофизики УрО РАН, Московский энергетический ин-

ститут, ПАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод), ПАО «АВТОВАЗ», ПАО «Пермский моторный завод», ПАО «ПензаДизельМаш».

Основные результаты диссертации опубликованы в 78 научных и учебных изданиях (из них 27 относятся к рецензируемым научным изданиям, рекомендуемым ВАК для опубликования результатов при защите докторских диссертаций), в том числе в 1 монографии, 7 статьях в журналах, индексируемых базами данных Scopus и WoS, 6 патентах РФ на полезную модель и в 4 учебных пособиях. Они прошли апробацию на представительных научных конференциях и семинарах.

Диссертация содержит решения проблемы совершенствования процессов в газоздушных трактах поршневых ДВС, важной для теплофизики и теории тепловых двигателей, и соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней.

Автор диссертации Плотников Леонид Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальностям 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и 05.04.02 – Тепловые двигатели.

Диссертационная работа Л.В. Плотникова «Повышение качества газообмена в поршневых ДВС путем совершенствования газодинамики и теплообмена потоков во впускных и выпускных каналах», автореферат и отзыв ведущей организации рассмотрены на расширенном заседании кафедры «Теплофизика энергетических установок» СПбПУ, протокол № 3 от 15 декабря 2017 г.

Заведующий кафедрой
«Теплофизика энергетических
установок» ФГАОУ ВО СПбПУ,
д.т.н, профессор

Сапожников Сергей Захарович

Профессор кафедры
«Теплофизика энергетических
установок» ФГАОУ ВО СПбПУ,
д.т.н, доцент

Митяков Владимир Юрьевич

