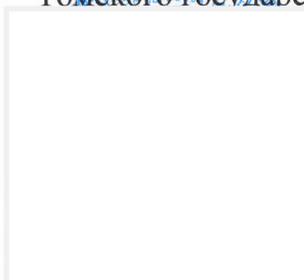


УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,



математических наук, профессор

Ворожцов Александр Борисович

1 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» – на диссертационную работу **Плотникова Леонида Валерьевича** «Газодинамика и теплообмен пульсирующих потоков в системах газообмена устройств периодического действия», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

1. Оценка содержания работы:

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы, содержащего 286 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 344 страницах и содержит 241 рисунок и 1 таблицу.

Автореферат диссертации изложен на 40 страницах, содержит 39 рисунков и список опубликованных работ соискателя из 28 наименований.

Диссертационная работа Плотникова Л. В. посвящена экспериментальному исследованию газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков газа в газодинамических системах сложной конфигурации при заполнении и опорожнении полости переменного объема с прикладной составляющей в области поршневого двигателестроения.

Основной целью рассматриваемой работы является выявить особенности процессов теплопереноса пульсирующих потоков газа в газодинамических системах сложной конфигурации, создаваемых при

заполнении и опорожнении полости переменного объема при разных начальных условиях, и на этой основе разработать технические решения по управлению газодинамикой и, как следствие, теплообменом в системах газообмена для повышения эффективности поршневых двигателей.

Во введении автором обоснована актуальность работы, произведен выбор направления научных исследований, поставлена общая цель и сформулированы задачи диссертационной работы, показаны научная и практическая значимость решаемых проблем, представлены ключевые положения, выносимые на защиту, а также дана краткая характеристика диссертационной работы.

В первой главе содержится обзор литературы, посвященной влиянию газодинамической нестационарности на интенсивность теплообмена в различных технических устройствах и аппаратах, изучению воздействия поперечного профилирования каналов на структуру потоков газа и интенсивность теплообмена в газодинамических системах, исследованию влияния начальной внешней турбулентности на газодинамику и теплообмен газовых потоков, анализу особенностей газодинамики и теплообмена потоков в турбокомпрессоре для наддува поршневых двигателей, а также характеристикам газодинамики и теплообмена пульсирующих потоков в системах газообмена поршневых двигателей.

На основе обзора литературы автором сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе описан комплекс лабораторных установок и стенды с действующими поршневыми двигателями с соответствующими измерительными приборами, представлена автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных, приводятся методики и особенности проведения исследований, а также выполнен расчет неопределенности опытов для основных физических величин, характерных для данной диссертационной работы.

В третьей главе представлены особенности газодинамики и теплообмена нестационарных потоков в газодинамических системах сложной конфигурации, а также выполнено сравнение газодинамических и теплообменных характеристик для стационарных и пульсирующих потоков. Отдельный раздел посвящен верификации лабораторных данных на стенде с действующим поршневым двигателем.

В результате исследований показаны особенности газодинамики пульсирующих потоков в газодинамических системах при заполнении

и опорожнении полости переменного объема. Проведена классификация пульсирующих потоков в системах газообмена поршневых двигателей. Определено, что они являются среднечастотными.

Также выявлено, что газодинамическая нестационарность, характерная для поршневых двигателей, снижает интенсивность теплоотдачи в 1,1–1,5 раза во впускной системе, тогда как в выпускной системе имеет место как интенсификация, так и подавление теплоотдачи.

Установлены существенные отличия в газодинамике и теплообмене стационарных и пульсирующих потоков газа в газодинамических системах сложной конфигурации:

- показано, что при стационарном течении газа в выпускной системе степень турбулентности на порядок выше, чем при течении газа во впускной системе; тогда как в случае пульсирующих потоков газа в рассматриваемых системах нет столь существенных различий в величине степени турбулентности (разница не превышает 25 %);

- повышенная турбулизация потока при стационарном течении газа в выпускной системе приводит к интенсификации теплообмена до 30 % по сравнению с системой впуска; в свою очередь, отличия интенсивности теплоотдачи в газодинамических системах при пульсирующем течении находятся в пределах 15 %.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования влияния поперечного профилирования каналов на газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков в газодинамических системах сложной конфигурации, геометрические размеры которых характерны для систем газообмена поршневых двигателей.

Установлено, что профилирование канала впускной системы двигателя приводит к росту степени турбулентности потока до 22 % и вызывает рост относительного коэффициента теплоотдачи на 3–15 % по сравнению с базовой системой впуска. Тогда как профилирование канала выпускной системы двигателя приводит к росту степени турбулентности потока до 33 % и приводит к подавлению интенсивности теплоотдачи на 25–41 % по сравнению с базовой системой выпуска

Получено, что поперечное профилирование каналов улучшает расходные характеристики систем газообмена поршневого двигателя – наблюдается увеличение расхода газа на 5–30 % по сравнению с базовыми модификациями.

На основе стендовых испытаний установлено, что применение квадратного или треугольного канала во впускной системе приводит к росту мощности дизеля на 1–17 %.

Также в данной главе представлены эскизы и 3D-модели впускных и выпускных систем с квадратными и треугольными каналами для большого количества бензиновых и дизельных двигателей.

В пятой главе изложены результаты исследования влияния начальной внешней турбулентности (механического воздействия от турбокомпрессора) на газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков в газодинамических системах сложной конфигурации.

В результате исследований определены существенные отличия в тепломеханических характеристиках газовых потоков во впускных и выпускных системах поршневых двигателей с турбокомпрессором и без него.

Показано, что установка турбокомпрессора во впускную систему приводит к существенному росту степени турбулентности (до 2 раз) и увеличению интенсивности теплоотдачи (до 70 %) по сравнению с базовой системой. Следует отметить, что установка турбокомпрессора в выпускную систему двигателя приводит к росту гидравлического сопротивления системы до 3,85, снижению объемного расхода воздуха через систему в среднем на 11 %, увеличению степени турбулентности в 1,2–2,1 раза, уменьшению интенсивности теплоотдачи на 5–30 % по сравнению с базовой системой.

В шестой главе рассмотрены способы управления газодинамикой и теплообменом пульсирующих потоков газа, подверженных влиянию исходной внешней турбулентности, в газодинамических системах сложной конфигурации. В диссертационной работе рассматривалось несколько способов модернизации систем газообмена двигателей: установка выравнивающей решетки на впуске, нанесение канавок в трубопроводе впускной системы, сброс избыточного наддувочного воздуха, применение эффекта эжекции в выпускной системе.

Установлено, что наличие во впускной системе двигателя с турбокомпрессором выравнивающей решетки приводит к снижению степени турбулентности до 80 % и подавлению теплоотдачи в среднем на 15 % по сравнению с базовой впускной системой. В прикладном аспекте показано, что это вызовет улучшение показателей надежности поршневых двигателей.

Получено, что наличие канавок во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором приводит к росту степени турбулентности на 9–25 % и интенсификации теплоотдачи в среднем на 25 % по сравнению с базовой системой впуска. С практической точки зрения это вызовет незначительный рост мощности поршневого двигателя.

Показано, что сброс избыточного количества сжатого воздуха в турбокомпрессоре приводит к существенной стабилизации потока во впускной системе при соответствующем снижении степени турбулентности до 2 раз (при сохранении расхода воздуха через систему), а также подавлению теплоотдачи до 35 % по сравнению с базовой системой. На основе инженерных расчетов установлено, что при внедрении автоматизированной системы сброса воздуха КПД турбокомпрессора увеличится в среднем на 2,5 %, а КПД двигателя – на 0,25 %.

Установлено, что применение эффекта эжекции в выпускной системе приводит к увеличению степени турбулентности на 8–30 %, при этом наблюдается как подавление теплоотдачи в пределах 15 %, так и интенсификация теплоотдачи до 35 % по сравнению с базовой системой выпуска. Аналитические расчеты показали, что применение эффекта эжекции в выпускной системе приведет к повышению надежности деталей и узлов поршневого двигателя.

В заключении изложены основные результаты работы.

Следует отметить следующие квалификационные признаки диссертации:

Актуальность темы научной работы Плотникова Л. В. не вызывает сомнений, устройства периодического действия широко используются во всех отраслях техники. К ним можно отнести машины для сжатия и расширения рабочего тела (поршневые и шестеренчатые компрессоры), транспортные энергетические установки (поршневые, роторные, роторно-поршневые двигатели), холодильные машины и тепловые насосы. В подающих и отводящих системах подобных машин возникает нестационарное, пульсирующее движение газов с характерным изменением характеристик во времени. Ярким примером таких технологий является рабочий цикл в поршневых двигателях внутреннего сгорания, которые являются самыми распространенными устройствами среди тепловых двигателей. В данной работе именно этот тип устройств выбран в качестве объекта для практической реализации результатов исследований, поскольку эффективность работы поршневых двигателей зависит не только

от совершенства процесса сгорания топлива в цилиндре, но и от качества заполнения полости рабочим телом и степени опорожнения ее от отработавших газов, т.е. от процессов, происходящих во впускных и выпускных системах. В конечном счете, эти процессы во многом определяют количество и качество рабочего тела на момент начала сгорания (его теплофизические характеристики), что оказывает непосредственное влияние на эксплуатационные показатели энергетических установок.

В диссертации Плотникова Л. В. получен ряд результатов, обладающих научной новизной. В том числе:

1. Установлены отличия в тепломеханических характеристиках стационарных и пульсирующих потоков газа в газодинамических системах сложной конфигурации, в частности, имеет место как подавление, так и интенсификация теплоотдачи в диапазоне $\pm 40\%$;

2. Показаны особенности газодинамики и теплообмена потоков в системах газообмена поршневых двигателей при разных условиях течения газов: избыточное давление (нагнетание, процесс выпуска) и разрежение в системе (всасывание, процесс впуска); в частности, отличия в величине степени турбулентности достигают 10 раз при разных режимах движения, а разница в относительном коэффициенте теплоотдачи не превышает 30 %;

3. Установлено влияние квадратного и треугольного участка трубопровода в газодинамических системах на газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков: изменение степени турбулентности на $\pm 25\%$, отличия в интенсивности теплоотдачи на $\pm 35\%$, рост расхода воздуха на 5–17 %;

4. Определены мощностные характеристики дизельного двигателя с впускной системой с участками разного поперечного сечения на основе стендовых испытаний: наличие квадратного или треугольного участка приводит к росту мощности дизеля в диапазоне 3–17 %;

5. Установлено влияние степени турбулентности пульсирующих потоков газа в выходном канале турбокомпрессора на локальные напряжения трения (с ростом степени турбулентности от 0,08 до 0,16 снижение локальных напряжений трения не превышало 20 %);

6. Определены особенности и выявлены отличия тепломеханических процессов для пульсирующих потоков в газодинамических системах при наличии механического воздействия (турбокомпрессора) на течение, а именно, имеет место рост значений степени турбулентности в 2,0–2,5 раза, а также как интенсификация, так и подавление теплоотдачи в 1,1–1,7 раза;

7. Предложены способы управления газодинамикой и теплообменом пульсирующих потоков в системах газообмена энергетических машин на базе поршневых двигателей путем изменения их конструкции (нанесения канавок в каналах, установка выравнивающей решетки), а также на основе газодинамических воздействий (управляемого сброса сжатого воздуха после компрессора, создания эффекта эжекции).

Достоверность результатов диссертации основывается на надежности экспериментальных данных, что обуславливается сочетанием независимых методик исследования; воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов измерений; применением комплекса современных методов исследования; выбором измерительной аппаратуры с соответствующим метрологическим обеспечением, ее систематической поверкой и тарировкой; а также хорошим согласованием опытных данных автора на уровне пилотных экспериментов с результатами других ученых.

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

1) показаны отличия в газодинамике и теплообмене пульсирующих и стационарных потоков в газодинамических системах сложной конфигурации;

2) определены закономерности изменения локальных мгновенных значений скорости, давления и напряжений трения во времени для пульсирующих потоков в газодинамических системах при разных начальных условиях, в том числе в трубопроводах с квадратными и треугольными участками;

3) установлены физические зависимости изменения мгновенных значений местных скорости и давления, а также локальных напряжений трения во времени для пульсирующих потоков в системах газообмена энергоустановок на базе поршневых двигателей с турбонаддувом и без него;

4) разработана оригинальная электронная схема термоанемометра постоянной температуры (патент РФ № 81338);

5) предложены новые технические решения (защищенные патентами РФ) для систем газообмена двигателей, улучшающие их технико-экономические характеристики и показатели надежности; предлагаемые технические решения основаны на изменении конструктива газодинамических систем (изменение формы поперечного сечения каналов, создание канавок на поверхности труб, установка выравнивающей решетки)

и на газодинамических воздействиях на поток (управляемый сброс избыточного воздуха из системы, создание эффекта эжекции);

6) выполнены эскизные проработки, включая твердотельные 3D-модели, конструкций впускных и выпускных систем на основе технических решений, разработанных автором, для более чем 10 бензиновых и дизельных двигателей с турбокомпрессором и без него;

7) эффективность предлагаемых решений подтверждена результатами стендовых испытаний дизельного двигателя 1Ч 7,5/6,0 с разными конструкциями впускных систем.

Полученные научно-технические результаты расширяют знания о теплофизических процессах при течении пульсирующих потоков газа в газодинамических системах, уточняют теоретические и прикладные представления о газодинамике и теплоотдаче течений при заполнении и опорожнении цилиндров поршневых двигателей, создают основу для совершенствования инженерных методов расчета систем газообмена для перспективных транспортных энергоустановок.

Ключевые результаты работы приняты к реализации в ООО «Уральский дизель-моторный завод» (при совершенствовании дизельных двигателей), ПАО «Уралмашзавод» (при доводке силовых установок для привода гидравлических экскаваторов), ООО «Элитгаз» (при совершенствовании систем и агрегатов газопоршневых машин).

Автореферат в полной мере соответствует основному содержанию диссертации. В нем последовательно раскрыты цель, задачи и методы исследования, представлены основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Научные результаты диссертационного исследования прошли достаточную апробацию, они опубликованы в 63 научных публикациях (из них 34 относятся к рецензируемым научным изданиям, рекомендуемым ВАК для опубликования результатов при защите докторских диссертаций), в том числе в 2 монографиях, 21 статье в журналах, индексируемых базами данных Scopus и WoS, 6 патентах РФ на полезную модель. Они прошли апробацию на представительных научных конференциях и семинарах.

2. Соответствие научной специальности

Плотниковым Л. В. исследованы особенности и способы управления газодинамикой и теплообменом пульсирующих потоков в газодинамических системах сложной конфигурации с прикладным акцентом в области

совершенствования систем газообмена энергетических машин на базе поршневых двигателей с целью улучшения их технико-экономических показателей. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника (технические науки):

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».

3. Вопросы и замечания к работе

1. В разделе 2.4.1 приводится методика определения мгновенных значений скорости потока газа в трубопроводах, которая основывается на применении термоанемометра собственного изготовления, для которого приводятся тарировочная зависимость и зависимость постоянной времени от средней скорости потока. Данная конструкция термоанемометра предполагает измерение только одной компоненты скорости. При этом турбулентный характер течения в исследуемых каналах трехмерен. В тексте работы не дается пояснений, как влияет расположение и ориентация нити термоанемометра в канале на результаты измерений.

2. В диссертации приведены результаты исследования газодинамики и теплообмена «холодного» двигателя и предварительно прогретого. Как влияют градиент температуры и тепловыделение в результате химических реакций горения на результаты измерений и характеристики двигателя?

3. Необходимо обосновать достоверность результатов, полученных при холодном наддуве турбокомпрессором.

4. На рисунках 6.10–6.13 необходимо пояснить смысл вертикальных сплошных и пунктирных линий.

5. На рисунках 6.10–6.13 приведены графики спектров скорости потока воздуха и давления для каналов с выравнивающей решеткой и каналов с

канавками в сравнении с базовой впускной системой. Графики для случая с выравнивающей решеткой и для случая с канавками приведены для отличных значений скоростей вращения валов двигателя и турбокомпрессора, что исключает возможность сравнения.

6. Как влияет интенсивность турбулентности, задаваемая параметром Tu , на теплоотдачу потока (число Нуссельта Nu)?

7. В тексте диссертации имеются опечатки и шероховатости стилистического плана, не влияющие в целом на понимание и восприятие работы.

Вышеприведенные замечания не влияют на положительную оценку рассматриваемой работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

4. Общее заключение о работе

Диссертация в целом представляет собой законченную самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой содержатся результаты экспериментального исследования нестационарной газодинамики и локальной теплоотдачи в газодинамических системах, конфигурации которых характерны для впускных и выпускных систем поршневых двигателей, и на основе полученных данных предложены способы модернизации конструкций систем газообмена, повышающие эксплуатационные показатели энергетических установок. Автореферат соответствует диссертации.

Результаты диссертационной работы Плотникова Л. В. имеют существенную научную и практическую значимость. Для практического использования полученных в работе результатов целесообразно ознакомить с материалами диссертации следующие организации: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Институт теплофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва), ПАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод), ПАО «АВТОВАЗ» (г. Тольятти), ПАО «Пермский моторный завод», ПАО «ПензаДизельМаш».

Диссертационная работа Плотникова Леонида Валерьевича «Газодинамика и теплообмен пульсирующих потоков в системах газообмена устройств периодического действия», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика

и теоретическая теплотехника содержит результаты фундаментальных исследований газодинамики и теплообмена пульсирующих потоков газа в газодинамических системах и научно-технические решения по модернизации конструкций систем газообмена применительно к энергетическим машинам на базе поршневых двигателей, и соответствует требованиям п. 9–11, 13, 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней к докторским диссертациям.

Автор диссертации Плотников Л. В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Плотникова Л. В. «Газодинамика и теплообмен пульсирующих потоков в системах газообмена устройств периодического действия», автореферат и отзыв ведущей организации рассмотрены на заседании кафедры физической и вычислительной механики НИ ТГУ, протокол № 6 от 01 марта 2021 г.

Заведующий кафедрой физической
и вычислительной механики НИ ТГУ,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
доцент

Лобода Егор Леонидович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
Телефон: +7 (382-2) 52-98-52
E-mail: rector@tsu.ru. Сайт: www.tsu.ru

Принят в совет 24.03.2021 г.

Уч. секретарь ДС

Ву (Воронин С.В.)

С отзывом ознакомлен 06.04.2021 г.

Минин

Плотников Л.В.