

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Плотникова Леонида Валерьевича «Повышение качества газообмена в поршневых ДВС путем совершенствования газодинамики и теплообмена потоков во впускных и выпускных каналах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, 05.04.02 – Тепловые двигатели

Известно, что процессы во впускных и выпускных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания являются высокочастотными и нестационарными (газовые потоки ускоряются и замедляются с частотой до 100 Гц и более), а их периоды газообмена составляют сотые доли секунды. При этом до сих пор в отечественной и зарубежной литературе довольно мало информации о газодинамике и теплообмене при нестационарном течении газов, а часто эта информация является противоречивой. Таким образом, получение новых данных о газодинамике и теплообмене пульсирующих потоков в газоздушных трактах поршневых ДВС является актуальной фундаментальной задачей.

Известно, что более 80 % всей мировой энергии вырабатывается поршневыми двигателями. В зависимости от территории (страны) суммарная мощность поршневых ДВС превышает суммарную мощность тепловых электрических станций в 5,5-10 раз. Соответственно, совершенствование рабочих процессов и отработка элементов конструкций элементов и систем поршневых ДВС с целью повышения их технико-экономических показателей является одной из актуальных задач в мировой энергетике.

Тема рассматриваемой диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ (8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика). В работе разрабатываются критические технологии РФ (27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе).

Таким образом, тематику представленной диссертации следует признать актуальной.

Научная новизна работы состоит, прежде всего, в том, что:

1. Разработана методика для оценки степени нестационарности переходных процессов газовых потоков в трубопроводах на основе сопоставления характерных времен, предложенных автором;
2. Показаны особенности изменения локального коэффициента теплоотдачи при нестационарном течении газов во впускных и выпускных трубопроводах (разной конфигурации) поршневых ДВС (с наддувом и без него); установлено, что газодинамическая нестационарность приводит к снижению интенсивности локальной теплоотдачи во впускных и выпускных трубопроводах на 1,2–2,5 по сравнению со стационарным течением;
3. Предложен алгоритм учета газодинамической нестационарности течений в трубопроводах при расчетах коэффициента теплоотдачи;

4. Получены эмпирические уравнения для расчета локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  во впускном и выпускном трубопроводах разной конфигурации для поршневых ДВС;

5. На основе численного моделирования в специализированных программных комплексах проведен анализ влияния газодинамического совершенствования впускных и выпускных трубопроводов на технические показатели поршневых ДВС.

Обоснованность и достоверность полученных автором результатов основывается на использовании апробированного прикладного программного обеспечения для выполнения расчетных исследований и обработки экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов измерений, применением современных методов исследования, выбором измерительной аппаратуры с соответствующим метрологическим обеспечением, ее систематической поверкой и тарировкой, а также хорошим согласованием опытных данных на уровне пилотных экспериментов с результатами других авторов.

Практическая значимость работы состоит в том, что автором разработаны оригинальные технические решения для впускных и выпускных систем двигателей с наддувом и без, повышающие их технико-экономические показатели; разработана электронная схема термоанемометра постоянной температуры, которая защищена патентом РФ; предложен метод учета тепломеханической нестационарности при расчете локального коэффициента теплоотдачи в цилиндрических каналах; получены и обобщены данные по интенсивности мгновенной локальной теплоотдачи в газоздушных трактах поршневых ДВС, необходимые для разработки математических моделей процессов газообмена и уточнения методик расчетов впускных и выпускных систем поршневых ДВС. Важно, что результаты исследования внедрены на ряде крупных промышленных предприятий: ООО «Уральский дизель-моторный завод», ПАО «Уралмашзавод», ОАО «Машиностроительный завод имени М.И.Калинина» и промышленной группе «Генерация». Следует подчеркнуть, что разработанные конструкции впускных и выпускных систем поршневых двигателей с наддувом и без него защищены патентами Российской Федерации (автором получены 6 патентов).

Апробация работы включает в себя: публикации по теме диссертации 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 и в 4 учебно-методических пособиях, а также ежегодное участие Плотникова Л.В. в Российских и Международных конференциях разного уровня.

Структура диссертации состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 264 наименований, списка обозначений, восьми приложений. Всего 378 страниц (433 страницы с приложениями).

Во введении приведены цели и задачи работы, ориентированные на решение фундаментальных и прикладных проблем, а также отмечаются квалификационные признаки диссертации.

В первой главе представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по тематике исследования, создающий представление об исходном состоянии проблемы. На этой основе обосновываются задачи исследования.

Во второй главе проведен анализ степени газодинамической нестационарности процессов впуска и выпуска в поршневых ДВС, вводятся сопоставительные критерии оценки степени газодинамической нестационарности (характерные времена – время релаксации и время восстановления), для совершенствования инженерных расчетов предлагается алгоритм учета тепломеханической нестационарности на интенсивность теплоотдачи в газоздушных трактах ДВС.

В третьей главе приводятся методики проведения экспериментов, описание лабораторных установок и стенда с действующим двигателем внутреннего сгорания, схема автоматизированной системы сбора и обработки опытных данных, а также основные характеристики измерительных приборов и их погрешность. В данной главе делается акцент на анализе газодинамики процессов впуска и выпуска в поршневых ДВС. Предлагаются способы газодинамического совершенствования впускных и выпускных систем ДВС с наддувом и без. Ввиду сложности объекта исследования автором вполне справедливо выбран экспериментальный подход анализа явлений.

Четвертая глава посвящена исследованию локальной теплоотдачи во впускных и выпускных системах поршневых ДВС разной конфигурации, проводится анализ влияния турбокомпрессора на интенсивность локальной теплоотдачи в газоздушных трактах ДВС. Осуществляется сравнение интенсивности локальной теплоотдачи во впускном и выпускном трубопроводах ДВС при стационарном и пульсирующем течении газов. На основе, полученных автором, экспериментальных данных предлагаются конструктивные методы снижения тепловой напряженности в газоздушных трактах поршневых двигателей.

В пятой главе рассмотрены вопросы практической реализации основных научных результатов работы, связанные с инженерной проработкой впускных и выпускных систем поршневых ДВС:

- предложены новые конструкции впускных и выпускных трубопроводов с профилированными участками (с поперечными сечениями в форме квадрата и треугольника);
- проработана конструкция впускной системы дизеля 8ЧН 21/21 (ООО «Уральский дизель-моторный завод») с системой управляемого сброса части наддувочного воздуха;
- предложена конструкция выпускного тракта с системой эжекции отработавших газов для дизелей семейства ДМ-21 (ООО УДМЗ).

Важно, что часть работы была выполнена совместно со специалистами фирмы АВВ Turbo Systems (Швейцария), в частности, проведено физико-математическое моделирование рабочего цикла дизельного двигателя

8ЧН 21/21 с учетом конфигурации газоздушных трактов и газодинамической нестационарности процессов газообмена с помощью программного комплекса ACTUS с целью улучшения технико-экономических и экологических показателей.

Заключение на двух страницах суммирует выводы по работе.

В целом, диссертация производит положительное впечатление. Изложение материала хорошо структурировано и систематизировано, автор использует общепринятые специальные термины и предлагает свои. Совокупность приведенных данных и результатов с уверенностью позволяет судить о квалификационной состоятельности диссертационной работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по п. 3 «Исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии» и п. 5 «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей», а также паспорту специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели по п. 1 «Теоретические и экспериментальные исследования тепловых, газодинамических, гидродинамических, механических и физико-химических процессов в двигателях и их системах».

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По представленной диссертационной работе имеется ряд вопросов и замечаний.

1. Основная часть диссертации изложена на 377 страницах, а с приложениями на 433 страницах. Учитывая, что по тексту диссертации много «монотонно» описываемых первичных результатов в виде графиков по изменению скорости и коэффициентов теплоотдачи от угла поворота коленвала, то это затрудняет восприятие конечных, главных результатов работы. Кроме этого, при описании первичных результатов локальных измерений слишком мало описания «физики» процесса. Было бы целесообразнее в докторской диссертации выдвинуть на первый план прорывные результаты, описать «физику» процесса, ее изменение за счет новшеств, показать сразу изменения среднеинтегральных характеристик двигателя, при этом полученные конечные результаты подтверждать отдельными графиками первичных локальных измерений.

2. Предложенный в работе коэффициент мобильности теплоотдачи, представляющий отношение коэффициента теплоотдачи при нестационарном режиме к коэффициенту теплоотдачи при стационарном режиме приводится только в графическом режиме. К сожалению, нет рекомендаций для инженерных расчетов в виде критериальных зависимостей. Описание коэффициента приведено до экспериментальной части диссертации, а после нее практически нет его упоминаний. Встает вопрос – на основе каких результатов он получен.

3. К сожалению, в работе не показаны все аспекты влияния предложенных технических решений на показатели двигателя. Например, на экологические показатели, которые зависят от локальных температур в камере сгорания, а они зависят от системы подачи воздуха и горючего, формирования потоков в камере, а они уже от системы подачи воздуха и отведения газов, формирования завихренности и нестационарности потоков, которые и рассматриваются в работе.

4. Считаю, что не полно показаны технические новшества по формированию потока на входе и выходе из камеры сгорания по сравнению с существующими исследованиями. Кроме этого, было бы целесообразно показать каких параметров потока мы хотим добиться, а потом описать как мы их достигаем, а не наоборот.

5. Формулы для локальных коэффициентов теплоотдачи (4.3), (4.4), (4.7), (4.8) представлены в размерном виде, откуда не вытекает размерность коэффициента теплоотдачи и размерные параметры находятся в дробных степенях. Хотя в работе есть опыт получения критериальных уравнений в безразмерном виде – уравнения (4.5), (4.6), (4.9), (4.10).

6. В основном использован термин погрешность, хотя согласно ГОСТ Р 54500.3-2011 и ГОСТ 34100.1-2017 используется термин и расчет неопределенности.

7. К сожалению, в работе проведены «холодные» испытания двигателя (привод от электромотора). Особенности, которые могут возникнуть при реальной работе двигателя, не учтены. Расчет по программам «Двигатель-РК» и АВВ не верифицированы хотя бы по отдельным режимам и точкам. Здесь же хочется отметить, что все результаты приводятся для двигателя 2Ч 8,2/7,1. Насколько применимы полученные результаты и технические решения для двигателей других типов и марок?

8. В основном при оценке газодинамики используется только локальное мгновенное значение скорости на оси потока. Как же меняется мгновенный расход, ведь профиль скорости, как бы, не известен, течение крайне нестационарное, подвержено высокочастотным колебаниям. Кроме этого, не используется степень турбулентности, не оценивается завихренность, масштаб турбулентности, правда имеется некоторый анализ спектра частот колебаний потока. Начальная турбулентность и завихренность в подводящем патрубке окажут значительное влияние на внутрикамерные процессы.

9. И последнее замечание, измерение коэффициента теплоотдачи производится с помощью «датчика термоанемометра», который работает как терморезисторный датчик температуры. Преимущества его – только малая тепловая инерционность, но это не датчик температуры в данной работе. В ходе тарировки измеряется падение напряжения на нити датчика в зависимости от скорости течения на оси канала. Далее значению падения напряжения присваивается значение коэффициента теплоотдачи, рассчитанному по известной зависимости для локальных коэффициентов теплоотдачи при турбулентном режиме течения. В ходе уже испытаний двигателя, по измеренным падениям напряжения на нитях датчиков судят о коэффициентах теплоотдачи. Но, где гарантия, что уравнение для

турбулентного течения, используемое при «тарировке» датчика приемлемо для течения в условиях явно повышенной турбулентности, завихренности (возможно, «закрученности») и в коротком канале, при наличии высоких температурных напоров (учет температурного фактора). Кроме этого, графики мгновенных значений скоростей показывают изменение скоростей в диапазоне 2-120 м/с. При минимальных скоростях возможно ламинарное течение в патрубках, а показано использование только турбулентной зависимости при градуировке датчика. Далее, датчик расположен на фторопластовой подложке, в канавке. Что он измеряет – температуру стенки, но она будет отличной от данной. Это просто датчик, дающий опорный сигнал для выбора коэффициента теплоотдачи. Существует метод определения коэффициентов теплоотдачи с применением многониточного датчика термоанемометра в пристенной области за счет определения градиента температур в погранслое. Требуется верификация предложенного и используемого в работе метода, оценка неопределенности определения данным методом коэффициента теплоотдачи, которая должна быть указана около предлагаемых для расчета зависимостей.

Вышеприведенные замечания и вопросы не меняют общей оценки рассматриваемой работы, которая является законченным научным исследованием по газодинамике и теплообмену нестационарных потоков в газоздушных трактах поршневых ДВС и отвечает квалификационным требованиям. Диссертация Л.В. Плотникова «Повышение качества газообмена в поршневых ДВС путем совершенствования газодинамики и теплообмена потоков во впускных и выпускных каналах», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук полностью соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а 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.

Профессор кафедры «Теплотехника  
и энергетическое машиностроение»  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»  
д.т.н., проф.

Попов Игорь  
Александрович

Подпись Попова И.А.  
заверяю. Начальник управления  
делами КИИТУ-КАИ

«20» \_\_\_\_\_ 2018 г.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Адрес организации: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

тел/факс: (843) 238-55-50 / 231-01-02

e-mail: popov-igor-alex@yandex.ru