

На правах рукописи

УДК 621.436

Смирнов Алексей Юрьевич

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЧНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ КАМЕРЫ  
СГОРАНИЯ НА ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) на кафедре «Поршневые двигатели» и в научно-образовательном центре «Поршневое двигателестроение и специальная техника»

Научный руководитель: **Онищенко Дмитрий Олегович**  
доктор технических наук, профессор кафедры поршневых двигателей ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Петриченко Михаил Романович**,  
доктор технических наук, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства, Инженерно-строительный институт ФГАОУ ВО «СпбПУ»

**Скрипник Алексей Александрович**  
кандидат технических наук, руководитель по развитию бизнеса AST – руководитель отдела расчётных исследований ООО «АВЛ»

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «НАМИ»

Защита диссертации состоится « 31 » марта 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана или на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью, просим направлять в адрес ученого секретаря совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент

Тумашев Р.З

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Современное двигателестроение идет по пути постоянного увеличения удельной мощности, снижения расхода топлива и улучшения надежности и срока службы силовых установок. Данные задачи обусловлены необходимостью достижения перспективными образцами колесной и гусеничной техники заданных параметров по энерговооруженности, надежности, эффективности и ресурсу. Необходимо отметить, что в настоящее время вопросы повышения удельной мощности маршевой силовой установки успешно реализуются, однако одной из самых актуальных проблем является вопрос обеспечения стабильного температурного состояния дизеля с учетом жестких требований, предъявляемых к военным гусеничным машинам и в условиях ограниченных габаритов моторно-трансмиссионного отделения. Необходимость форсирования двигателей и, как следствие, повышения среднего эффективного давления и быстроходности, с одной стороны и требования по высокой надежности и ресурсу, топливной экономичности с другой, являются основными критериями качества современного дизеля. Форсирование дизелей приводит к увеличению термических и механических нагрузок на основные детали (поршень, гильза, головка блока), и увеличению количества теплоты передаваемого в систему охлаждения дизеля, что, в свою очередь, ведет к необходимости увеличения габаритов теплообменных аппаратов. Следует отметить, что в современных гусеничных и колесных машинах специального назначения увеличение габаритов силовой установки в целом и системы охлаждения в частности является крайне нежелательным, так как приводит к ухудшению технических характеристик гусеничных или колесных машин. Очевидно, что задачу уменьшения теплоотвода в систему охлаждения и снижения тепловых нагрузок на основные детали можно решить путем рациональной организации рабочего процесса, позволяющего использовать различные способы снижения интенсивности турбулентного теплообмена в КС. Кроме того, возможно использовать способ термической защиты термически нагруженных деталей – это применение теплоизолирующих (жаровых) накладок (вставок) из различных материалов с низкой теплопроводностью, что наряду с известными преимуществами может привести к ухудшению эффективных и удельных показателей дизеля.

Решение одновременно двух проблем, какими являются улучшение эффективных и удельных показателей дизелей, а также снижение тепловых нагрузок на их основные детали с целью уменьшения отвода теплоты в систему охлаждения и увеличения ресурса и надежности дизеля в целом, имеет научное и практическое значение. Это особенно важно, если учесть, что в настоящее время уже существуют высокофорсированные дизели с максимальным давлением цикла  $p_z=250$  бар и выше, а также с давлением впрыскивания  $p_{впр}=3000$  бар.

**Цель работы.** Основной целью диссертационной работы является разработка методов снижения теплоотвода в систему охлаждения и улучшения удельных параметров транспортных дизелей.

**Основные задачи работы.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработка комплексного инструмента в виде математических моделей рабочего процесса, теплообмена и теплового состояния деталей, реализация которых предусматривает применение современных численных методов и компьютерных технологий, использование эффективных программных продуктов, в том числе и коммерческих с целью определения локальных нестационарных тепловых потоков в камере сгорания форсированного дизеля.

2. Разработка трехмерной математической модели рабочего процесса в двигателе с непосредственным впрыском топлива, которая дает возможность получения значений локальных, нестационарных температур газа в цилиндре в зависимости от таких факторов, как наличие теплоизоляции деталей КС, интенсивности закрутки заряда в цилиндре, давления впрыска топлива, количества сопловых отверстий форсунки и угла опережения впрыскивания топлива. Верификация разработанной математической модели.

3. Исследование на натурном двигателе в стендовых условиях теплоизолирующего воздействия слоя теплоизолятора на изменение параметров рабочего процесса и теплового баланса дизеля.

4. Оценка возможности использования различных методов утилизации повышенной энтальпии отработавших газов в условиях использования частичной тепловой изоляции деталей камеры сгорания двигателя.

Решение поставленных задач имеет важное промышленное и экономическое значение, поскольку их решение позволяет повысить научно-технический уровень проектирования, сократить сроки и затраты на создание новых перспективных и доводку существующих дизелей для гусеничных и колесных машин.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- в 3D-постановке исследованы внутрицилиндровые процессы в дизелях с частичной теплоизоляцией камеры сгорания, определены регулировочные и конструктивные параметры двигателя, оптимальное сочетание которых обеспечивает приемлемые индикаторные показатели дизеля;

- разработаны методы и осуществлен комплекс мероприятий для снижения тепловых нагрузок в быстроходном дизеле при одновременном улучшении его эффективных и ресурсных показателей;

- осуществлена оценка влияния искусственных теплоизоляторов на рабочий процесс и теплообмен в камере сгорания дизеля, а также влияние частичной теплоизоляции камеры сгорания на изменение теплового баланса дизеля;

- разработана математическая модель рабочего процесса дизеля в

трехмерной постановке с применением CFD-пакетов с учетом частичной теплоизоляции камеры сгорания;

- разработаны трехмерные модели для исследования теплонапряженного состояния базового поршня и поршня с теплоизолирующим покрытием, учитывающие технологические особенности его нанесения, обеспечивающие требуемую работоспособность поршня;

- экспериментально доказана возможность создания теплоизолирующих покрытий, имеющих значительную стойкость при эксплуатации;

- предложены методы утилизации отработавших газов (ОГ) с учетом повышения температуры ОГ дизеля с частичной теплоизоляцией камеры сгорания (КС).

**Достоверность и обоснованность научных результатов** определяются:

- использованием фундаментальных законов термодинамики, гидродинамики, тепломассообмена и химической кинетики, соответствующими этим законам уравнениями и граничными условиями, современных аналитических и численных методов реализации математических моделей, хорошо апробированных программных продуктов, в том числе и коммерческих;

- применением при обосновании разработанных математических моделей рабочего процесса дизеля с непосредственным впрыскиванием опытных данных, полученных автором на специальной экспериментальной установке на основных нагрузочных и скоростных режимах;

- использованием достоверных результатов исследований, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, ВНИИГАЗ, СПбГПУ, Мюнхенском техническом университете, ТАДИ, на фирмах Cummins, AVL и др.;

- экспериментальным подтверждением адекватности разработанных математических моделей рабочего процесса, сложного теплообмена и теплонапряженного состояния деталей дизеля путем использования экспериментальных данных по изменению теплового баланса дизеля, полученных в стендовых условиях.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что:

- разработанные методики и осуществленный на их базе комплекс мероприятий представляют собой инструмент, имеющий практическое значение для оценки возможностей и перспектив высокофорсированных дизелей с частичной теплоизоляцией камеры сгорания;

- решение ряда теоретических, методологических, и экспериментальных вопросов исследования рабочего процесса, теплонапряженного состояния деталей и экологических характеристик позволяют сократить сроки выполнения и материальные затраты на проектирование, испытание и доводку дизелей с уменьшенными тепловыми нагрузками;

- разработаны алгоритмы, позволяющие реализовать математические модели и с достаточной для практики точностью решать задачи

проектирования, доводки и модернизации как серийных, так и перспективных дизелей традиционных и нетрадиционных схем и конструкций;

- определен ряд основных регулируемых и конструктивных параметров, оптимальное сочетание которых одновременно с уменьшением отвода теплоты от рабочего тела обеспечивает оптимальное соотношение удельного расхода топлива и требуемого снижения теплоотвода в систему охлаждения двигателя.

**Реализация результатов работы** Результаты диссертационной работы используются при проектировании гусеничных машин в ОАО «ММЗ». Они также готовы к внедрению на других предприятиях.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на:

- пятой Российской национальной конференция по теплообмену (Москва, МЭИ 2010 г.);
- шестой Российской национальной конференция по теплообмену (Москва, МЭИ 2014 г.);
- международной конференции «школа-семинар молодых ученых Академика Леонтьева» в 2015 и 2017 гг.;
- федеральном форуме «Двигатель России» в 2018 г.
- круглом столе международного военно-технического форума «Армия-2018» в 2018 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 статьи (все – в научно-технических журналах, входящих в перечень ВАК) и два материала конференций. Общий объем работ автора – 1,65 п.л.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты определения теплового состояния деталей двигателя, и исследования рабочего процесса базового и опытных дизелей, полученные опытным путем на специальных установках;
- экспериментально обоснованные математические модели рабочего процесса, теплообмена в КС, теплового состояния деталей, позволяющие определить:
  - локальные нестационарные температуры рабочего тела в цилиндре;
  - температурные поля базовых и опытных (составных) конструкций поршня и гильзы;
  - оценка тепловыделения в процессе сгорания;
  - методы компьютерной реализации этих моделей и результаты, полученные на основе этих методов.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы, методы исследования и математические модели, выносимые на защиту, получены Смирновым Алексеем Юрьевичем самостоятельно в ходе проведения экспериментальных исследований и теоретических разработок.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Диссертация содержит 179 страниц

машинописного текста, 59 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 140 источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность снижения теплоотвода в систему охлаждения быстроходного дизеля, при одновременном улучшении его экономических характеристик, в условиях ограниченного объема моторно-трансмиссионного отделения военно-гусеничных машин. Дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе диссертации** проведен обзор и анализ работ, направленных на решение проблемы, рассматриваемой в диссертационном исследовании. В частности, рассмотрены работы, направленные на изучение теплонапряженного состояния основных деталей КС дизеля, тепловой баланс, проведен анализ работ, посвященный использованию различных теплоизоляционных материалов в поршневых ДВС, методам использования и утилизации энергии выхлопных газов, характеристике тепловыделения адиабатных дизелей, показателям рабочего процесса и особенностям теплообмена дизелей с уменьшенными тепловыми потерями. Этим проблемам посвящены работы Н.Д. Чайнова, Р.З Кавтарадзе, Н.А. Иващенко, Л.В. Грехова, М.М. Арпиджанова, А.С. Орлина, С.М. Кадырова, А.А. Скрипника, Х.Н. Дьяченко, А.К. Костина, Р.М. Петриченко, М.Р. Петриченко, Н.В. Шерепова, В.К.Ванина, С.А. Захарова, Н.Ф Разлейцева, Г. Вошни, К. Цайлингера и других российских и иностранных ученых.

Показано, что основными факторами, определяющими рабочий процесс в дизеле с теплоизолированными деталями КС, являются:

1. Протекание рабочего процесса, обуславливающего формирование тепловых нагрузок на тепловоспринимающих поверхностях деталей цилиндропоршневой группы;

2. Использование особых конструктивных элементов и технологических процессов изготовления деталей двигателя (наличие тепловой защиты, экранов, тепловых барьеров, средств регулирования интенсивности процесса передачи теплоты, теплофизических характеристик материалов деталей, наличие на поверхностях деталей слоев с особыми теплофизическими и физико-механическими свойствами и т.п.);

3. Особенности процессов теплообмена в камере сгорания и в полостях системы охлаждения (свойства и теплофизические характеристики, режим и характер течения, состояние теплоносителей, состояние теплоотдающих и тепловоспринимающих поверхностей, уровень их температур и вибраций, наличие турбулизаторов и других средств воздействия на интенсивность теплообмена);

4. Особенности временных процессов, протекающих в двигателе (изменение зазоров, формы и состояния тепловоспринимающих и охлаждаемых поверхностей, динамика образования отложений накипи, шлама, нагара, лаковых пленок, пленок окислов, срабатывание присадок к охлаждающим жидкостям, изнашивание деталей);

5. Особенности эксплуатации двигателя, в том числе его техническое состояние, соблюдение правил технического обслуживания и ремонта.

Теоретический анализ теплового состояния дизеля с теплоизолированной КС в сравнении с традиционной конструкцией и турбокомпаундным дизелем показан на Рис. 1. Из него можно сделать вывод о возможности значительного повышения эффективного использования теплоты и значительном росте энтальпии ОГ в дизеле с теплоизоляцией.

Анализ проведенных работ, посвященных исследованию характеристик тепловыделения в теплоизолированных двигателях внутреннего сгорания, показывает, что при одном и том же угле опережения впрыскивания топлива и тех же цикловых подачах топлива применение теплоизоляции КС обеспечивает меньшую величину пика скорости тепловыделения.



Рис. 1. Диаграммы баланса энергии дизельных двигателей

Вместе с тем, очевидно, что при использовании теплоизоляции КС дизеля начальная скорость тепловыделения снижается, процесс сгорания затягивается и как следствие смещается по углу п.к.в. пик тепловыделения. Основной причиной происходящего является изменение процесса сгорания вследствие повышения температуры поверхностей КС. В результате этого повышается температура газов в КС, ухудшается наполнение цилиндра свежим зарядом.

В зависимости от теплофизических свойств теплоизолятора, испарение попавшего на стенку КС топлива будет происходить с разной скоростью, но независимо от механизма прогрева - медленнее, чем в традиционном двигателе с металлическими стенками. Этот эффект вызывает резкое замедление испарения топлива со стенок КС и очевидно также влияет на снижение интенсивности тепловыделения. Изложенное поясняет экспериментально установленный факт, что в теплоизолированном дизеле большое значение приобретает диффузионное горение - как по доле тепловыделения, так и по продолжительности сгорания. Для компенсации снижения топливной экономичности теплоизолированного дизеля из-за роста продолжительности сгорания увеличивают угол опережения



впрыскивания топлива и усиливают турбулентность заряда в конце сжатия-начала расширения. Ухудшение топливной экономичности в адиабатных дизелях относительно их прототипов объясняется не только ухудшением наполнения цилиндров, но и ухудшением качества смесеобразования, переобогащением зон около форсунки и около поверхностей головки цилиндра и поршня, уменьшением значения объемного сгорания, затягиванием диффузионного сгорания. Для улучшения смесеобразования в теплоизолированном двигателе необходимо использовать топливную аппаратуру, обеспечивающую существенно большие давления впрыскивания, оптимизировать параметры и законы впрыскивания, управлять законом впрыскивания. Одним из основных аспектов исследования теплоизолированного двигателя, несомненно, является характер теплообмена.

Проведенный анализ состояния проблемы снижения термических нагрузок на основные детали камеры сгорания двигателя путем применения частичной теплоизоляции камеры сгорания и оптимизации параметров рабочего процесса, использования современных методов расчета рабочего процесса, оценки теплофизических и механических свойств керамических и других теплоизолирующих материалов, особенностей рабочего процесса и теплообмена при теплоизоляции стенок камеры сгорания с учетом ужесточенных экологических требований, позволяет наметить пути разработки научных основ для создания дизелей с уменьшенным отводом теплоты в систему охлаждения и пониженными тепловыми нагрузками на основные детали камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания.

**Во второй главе** представлено описание математического аппарата моделирования рабочего процесса, локального теплообмена и теплового состояния деталей для базового и теплоизолированного дизелей. Рассмотрены основные уравнения нестационарных процессов переноса количества движения, энергии, массы и концентрации и проведена верификация математической модели.

Дифференциальные уравнения, на основе которых описываются физические процессы переноса количества движения, энергии, массы и концентрации в камере сгорания двигателя можно записать в виде обобщенного закона сохранения, согласно которого сумма нестационарного и конвективного потоков равна сумме источникового и диффузионного потоков:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho \vec{W} \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + S_{\Phi}.$$

В этом уравнении:  $\rho$  - плотность,  $\vec{W}$  - вектор скорости,  $\Phi$  - произвольная зависимая переменная,  $\Gamma_{\Phi}$  - коэффициент обмена (диффузии),  $S_{\Phi}$  - источниковый член, который в общем случае можно представить как разность генерации  $S_{\Phi_g}$  и аннигиляции  $S_{\Phi_a}$  потоков, т.е.  $S_{\Phi} = S_{\Phi_g} - S_{\Phi_a}$ .

Конкретный вид выражений для  $\Gamma_\Phi$  и  $S_\Phi$ , а также  $S_{\Phi_g}$  и  $S_{\Phi_a}$ , зависит от смысла переменной  $\Phi$  (таблица). После подстановки соответствующих значений из (2.1) получаем уравнения количества движения (Навье-Стокса), энергии (Фурье-Кирхгофа), диффузии (Фика) и сохранения массы (неразрывности).

УРАВНЕНИЯ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ, КАК ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ОБОБЩЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ		
$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho \vec{W}\Phi) = \text{div}(\Gamma_\Phi \text{grad}\Phi) + S_\Phi \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho W_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi$		
$\Phi = W_i, \Gamma_\Phi = \mu,$ $S_\Phi = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + V_\mu.$  Уравнение сохранения количества движения (уравнение Навье - Стокса)	Исходная форма	$\rho \frac{DW_i}{D\tau} = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \right) \right]$
	Форма Рейнольдса	$\bar{\rho} \frac{D\bar{W}_i}{D\tau} = \bar{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right) - \bar{\rho} \overline{W'_i W'_j} \right]$
	Новые неизвестные	<p>ГД <math>\bar{\rho} \overline{W'_i W'_j}</math> - тензор рейнольдсовых турбулентных напряжений, определенный по пульсационным составляющим скорости;</p> <p><math>\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right)</math> - тензор вязких (турбулентных) напряжений, определенный по осредненным значениям компонент скорости.</p>
$\Phi = H, \Gamma_\Phi = \frac{\lambda}{c_p},$ $S_\Phi = \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} W_j) + G_j W_j + w_r Q_r + \frac{\partial q_{Rj}}{\partial x_j}$  Уравнение сохранения энергии	Исходная форма	$\rho \frac{DH}{D\tau} = G_j W_j + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} W_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + w_r Q_r + \frac{\partial q_{Rj}}{\partial x_j}$
	Новая неизвестная	$\bar{\rho} \frac{D\bar{H}}{D\tau} = \bar{G}_j \bar{W}_j + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} \bar{W}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_p \bar{\rho} \overline{T' W'_j} \right) + \bar{w}_r \bar{Q}_r + \frac{\partial \bar{q}_{Rj}}{\partial x_j}$ <p><math>c_p \bar{\rho} \overline{T' W'_j}</math> - турбулентный перенос энтальпии <math>\bar{\rho} c_p T'</math> посредством флуктуации скорости <math>W'_j</math>;</p>
$\Phi = 1, \Gamma_\Phi = 0, S_\Phi = 0.$ Уравнение сохранения массы (неразрывности)	Исходная форма	$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho W_j) = 0$
	Форма Рейнольдса	$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{W}_j) = 0$
$\Phi = \frac{C_l}{\rho}, \Gamma_\Phi = D_l \rho,$ $S_\Phi = \dot{m}_l.$  Уравнение диффузии (концентрации)	Исходная форма	$\frac{DC}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \dot{m}$
	Новая неизвестная	$\frac{D\bar{C}}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \bar{C}' \bar{W}'_j \right) + \bar{\dot{m}},$ <p><math>\bar{C}' \bar{W}'_j</math> - турбулентный диффузионный перенос массы компонента, концентрация которого <math>C</math>, посредством флуктуации скорости <math>W'_j</math>.</p>

В уравнениях таблицы приняты следующие обозначения:  $p$  - давление,  $G_i$  - проекция вектора плотности объемных сил ( $\text{Н/м}^3$ ) на ось  $Ox_i$  прямоугольной декартовой системы координат;  $C$  - концентрация,  $\text{кг/м}^3$ ;  $H$  - полная удельная энергия,  $\text{Дж/кг}$ ;  $V_\mu = \frac{1}{3} \mu \cdot \text{grad}(\text{div} \vec{W})$  - член, выражающий объемную деформацию;  $\mu$  - динамическая вязкость,  $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$ ;  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении,  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $w_r$  - скорость химической реакции на единицу объема,  $\text{кг/(с}\cdot\text{м}^3)$ ,  $Q_r$  - количество выделяемой теплоты на единицу массы,  $\text{Дж/кг}$ ,  $\lambda$  - теплопроводность,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;  $D$  - коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\dot{m}$  - интенсивность источника массы (скорость изменения массы химической компоненты в единице объема,  $\text{кг/(с}\cdot\text{м}^3)$ ).

В работе использовались следующие модели описания рабочего процесса:

1. Математическая модель для расчета трехмерного нестационарного течения в цилиндре дизеля основана на фундаментальных уравнениях количества движения (Навье-Стокса), энергии (Фурье-Кирхгофа), неразрывности и диффузии (Фика), осредненных по методу Фавра и записанных в форме Рейнольдса.

2. Для замыкания системы уравнения Рейнольдса использовалась стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. Это уравнения для  $k$  (кинетической энергии турбулентности) и  $\varepsilon$  (скорости диссипации этой энергии, а также уравнения для нормированного масштаба скорости).

3. Используемая в работе при расчете ТЭГ  $k$ - $\zeta$ - $f$  - модель турбулентности, предложенная К. Ханиаличем, дополняется уравнением эллиптической функции  $f$  П. Дурбина, учитывающей пристеночную анизотропию турбулентности. Для описания течения рабочего тела в пристеночной области были использованы пристеночные функции, в стандартном виде которых предусматривается установление универсальной безразмерной скорости  $u^+$  как функции от универсального, безразмерного расстояния от поверхности  $y^+$ . Также были применены гибридные пристеночные функции К. Ханиалича. В данном случае логарифмический и вязкий слои связаны между собой универсальным безразмерным соотношением.

4. Процесс турбулентного горения моделируется на основе известной модели Магнуссена-Хартагера (Magnussen-Hjertager).

5. Численная реализация модели осуществляется с применением коммерческого 3D-CFD-кода FIRE, который был разработан фирмой AVL List GmbH (версий 2012-2017 гг.). В основе ядра FIRE лежит численный метод контрольных объемов в совокупности с усовершенствованным алгоритмом SIMPLE.

**В третьей главе диссертации** приведены результаты проведенного экспериментального исследования на моторном стенде базового быстроходного дизеля типа Д-246.9, устанавливаемого на колесную и гусеничную спецтехнику, и его модификации с частичной теплоизоляцией камеры сгорания.

Базовым объектом исследования данной диссертационной работы являлся быстроходный дизель Д-246.9 (4ЧН 11,0/12,5) производства ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод». Двигатель имел следующие параметры: четырёхтактный со свободным газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха, номинальная мощность: 80 кВт при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ , степень сжатия: 17, удельный эффективный расход топлива на режиме номинальной мощности:  $210 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . Топливная система распределительного типа исследуемого дизеля включала рядный четырёхсекционный топливный насос высокого давления и закрытые многоструйные форсунки. Двигатель имел камеру сгорания в поршне типа ЦНИДИ.

Модифицированный вариант базового быстроходного дизеля Д-246.9 (4 ЧН 11,0/12,5) представлял собой двигатель с частичной теплоизоляции камеры сгорания с теплоизолирующим слоем из диоксида циркония ( $\lambda = 1,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) со стабилизирующей добавкой иттрия (7..8%). Теплоизолирующий слой был нанесен на огневые поверхности головки цилиндра, поршня и клапанов методом плазменного напыления. Диоксид циркония наносился на никелевый подслой толщиной 0,1 мм. После нанесения теплоизолирующего покрытия было проведено шлифование. Толщина слоя после шлифования составляла 0,15 мм (на поверхности камеры в поршне, которая не подвергалась шлифованию, она была равна 0,2 мм). Детали с напылением показаны на Рис. 2. Следует подчеркнуть, что с целью сохранения рабочего объёма и степени сжатия  $\varepsilon = 17 = \text{idem}$  перед нанесением покрытия с поршня был снят слой металла.



Рис. 2. Поршни, клапаны и головка цилиндра дизеля Д-246.9 (4ЧН 11,0/12,5) с теплоизолирующими покрытиями

Экспериментальное исследование частично теплоизолированного дизеля Д-246.9 (4 ЧН 11,0/12,5) предусматривало решения следующих научных и практических задач:

1. Разработка и изготовление поршней, клапанов и головки цилиндра дизеля с теплоизолирующими покрытиями на тепловоспринимающих поверхностях со стороны высокотемпературного рабочего тела;

2. Стендовое испытание базового и теплоизолированного дизеля с целью проверки работоспособности и надежности опытных деталей с керамическими теплоизолирующими слоями;

3. Исследование и сравнительный анализ технико-экономических показателей базового и модифицированного дизелей;

4. Исследование потенциальных возможностей уменьшения отвода теплоты в охлаждающую жидкость без изменения компоновки системы охлаждения в ограниченном пространстве моторно-трансмиссионного отделения.

Экспериментальные исследования рабочих процессов базового дизеля и его теплоизолированной модификации проводились на специально оборудованном стенде, созданном в ОАО «Мытищинский машиностроительный завод» (Рис. 3). Оценка мощностных и топливно-экономических показателей двигателя заключалась в определении эффективной мощности двигателя и часового расхода топлива в различных нагрузочных режимах работы двигателя в диапазоне от режима холостого хода до режима с максимально возможной нагрузкой. В процессе экспериментального исследования фиксировались следующие параметры: температура окружающей среды, электрическая мощность блока генераторов, частота вращения коленчатого вала двигателя, крутящий момент на валу двигателя, температура охлаждающей жидкости, температура наддувочного воздуха, давление смазывающего масла, давление наддувочного воздуха, расход топлива, расход воздуха через двигатель, сопротивление воздухоочистителя.

Экспериментальное исследование двигателя показало, что применение частичной теплоизоляции камеры сгорания приводит к увеличению расхода топлива и повышению теплоотдачи в охлаждающую жидкость. Это можно объяснить более долгим испарением топлива за счёт того, что при попадании топлива на поршень слой диоксида циркония охлаждается из-за низкого коэффициента проникновения теплоты, что ухудшает условия испарения. В тоже время, теплоотдача в систему смазки снижается. Результаты исследования свидетельствуют о том, что использование частичной теплоизоляции камеры сгорания без изменения конструктивных и регулировочных параметров двигателя не приводит к желаемому результату.





Рис. 3. Общий вид испытательного стенда

Для достижения поставленной цели - снижения теплоотдачи в охлаждающую жидкость с целью улучшения топливно-экономических показателей двигателя внутреннего сгорания проведены дополнительные расчетные и экспериментальные исследования с изменением регулировочных и конструктивных параметров двигателя.

Для улучшения испарения топлива было необходимо изменить способ смесеобразования с плёночного на объёмный. Это можно осуществить путём внесения изменений в конструктивные параметры двигателя: распылитель форсунки и форму камеры сгорания. Согласно исследованиям, проведённым ранее в МГТУ им. Н.Э. Баумана на подобном двигателе, путём оптимизации конструктивных и регулировочных параметров можно достичь перераспределения тепловых потоков в двигателе (снижение теплоотдачи в охлаждающую жидкость) при сохранении неизменным удельного эффективного расхода топлива. Кроме того, можно существенно улучшить эффективные показатели двигателя за счет увеличения энергии отработавших газов при помощи частичной теплоизоляции камеры сгорания.

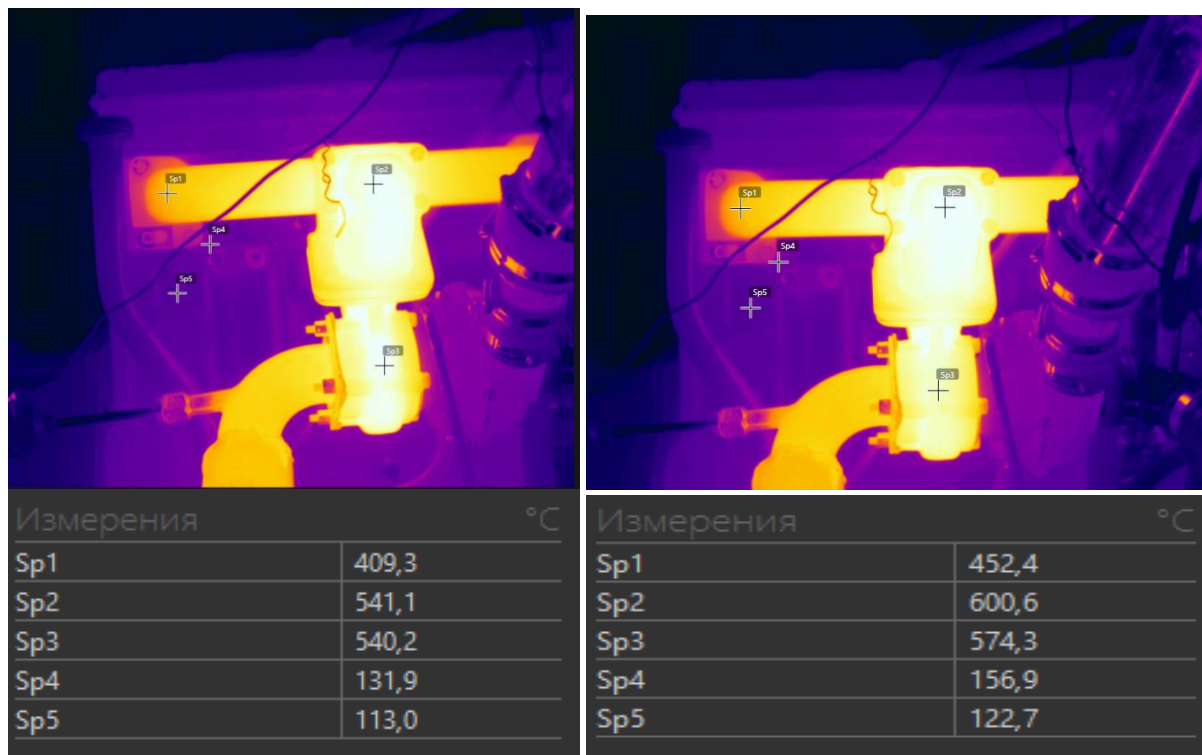


Рис. 4. Результат тепловизионной съемки базового двигателя (слева) и теплоизолированного (справа)

Проведенные экспериментальные исследования двигателя с частичной теплоизоляцией камеры сгорания (для теплоизоляции камеры сгорания был использован слой диоксида циркония толщиной 0,15 мм с никелевой подложкой, который наносился на огневые поверхности клапанов, поршня и головки цилиндров) показали, что нанесенный на детали, образующие камеру сгорания, слой теплоизоляции обладает достаточной адгезией с материалами деталей: трещин и отслаивания после испытания двигателя обнаружено не было. Нарботка исследуемого двигателя с частичной теплоизоляцией камеры сгорания составила 152 часа. Для этого двигателя показана возможность снижения отвода тепла в охлаждающую жидкость и смазочную систему двигателя при незначительном увеличении расхода топлива (на Рис. 4 заметно увеличение температуры выпускного коллектора частично теплоизолированного дизеля на 43,1 °C). для чего было необходимо изменить способ смесеобразования с плёночного на объёмный, а также оптимизировать конструктивные и регулировочные параметры исследуемого дизеля.

**В четвертой главе диссертации** проведен анализ возможности улучшения индикаторных и эффективных показателей быстроходного дизеля с частичной теплоизоляцией камеры сгорания по сравнению с базовым двигателем. Проведенные экспериментальные исследования двигателя, описанные в главе 3, показывают, что снижение тепловых нагрузок при одновременном улучшении эффективных и экологических показателей дизеля подразумевает проведение исследований по трем основным направлениям:

1. Организация рабочего процесса, обеспечивающего не только снижение интенсивности теплоотдачи от рабочего тела в стенки камеры сгорания, но и оптимальный расход топлива.

2. Создание «составных» конструкций основных деталей (поршня, клапанов, крышки), оснащенных частями из теплоизолирующих материалов, и исследование их теплового состояния в целях оценки теплоизолирующего эффекта.

3. Эффективное использование повышенной (по сравнению с базовым дизелем) в результате тепловой изоляции КС энергии выпускных газов.

Для уменьшения тепловых потерь и тепловой защиты теплоизоляция поршня имеет большее значение, чем теплоизоляция гильзы. Это связано с тем, что, во-первых, поршень является термически наиболее нагруженной деталью, а во-вторых, известно, что при теплоизоляции только поршня потери теплоты теоретически могут быть уменьшены на ~ 26 %.

В соответствии со сформулированной в главе 1 целью диссертационной работы для поршня решались специфические задачи:

1. Уменьшение температуры поршня в зоне компрессионных колец, и особенно в зоне первого компрессионного кольца, что повышает надежность работы колец и кольцевых канавок в поршне.

2. Уменьшение потерь теплоты в масляную систему двигателя, что оказывает положительное действие на тепловой баланс двигателя

Предварительно была проведена нульмерная оценка параметров работы двигателя без теплоизоляции и с частичной теплоизоляцией камеры сгорания. Для более точной оценки показателей двигателя с частичной теплоизоляцией камеры сгорания использовано трехмерное моделирование. Расчет проводился в программном комплексе AVL FIRE методом контрольных объемов с использованием модели сгорания Магнуссена-Хартагера, алгоритма SIMPLE и модели турбулентности k-ε. Предварительно проведенные нульмерные расчеты позволили определить граничные условия на впуске и выпуске из цилиндров двигателя, оценить состояние рабочего тела в рассматриваемом объеме в начальный момент времени (внутренний объем цилиндра). По результатам трёхмерного моделирования рабочего процесса получены локальные тепловые нагрузки на тепловоспринимающей поверхности поршня в случае работы без теплоизоляции и с частичной теплоизоляцией КС. Результаты расчетов для дизеля без теплоизоляции представлены на рис. 5 и 6. Результаты расчетов для дизеля с частичной теплоизоляцией КС (при частоте вращения коленчатого вала  $n = 1817 \text{ мин}^{-1}$ ) даны на Рис. 7 и 8.

По представленным на Рис. 5-8 данным следует отметить, что при сохранении общей картины в распределении температурных полей в сечении камеры сгорания дизеля без теплоизоляции (Рис. 5 и 6) и с теплоизоляцией (Рис. 7 и 8), в последнем случае наблюдается некоторое повышение локальных максимальных значений температур рабочего тела (с 2806 до 2837 К).



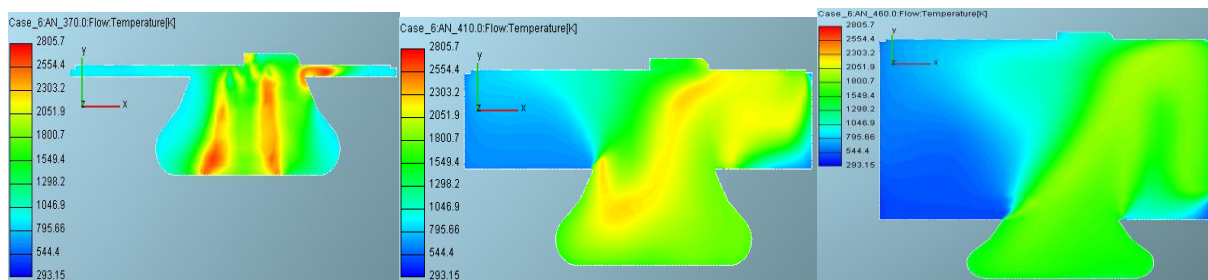


Рис. 5. Распределение температуры рабочего тела в сечении КС дизеля без теплоизоляции

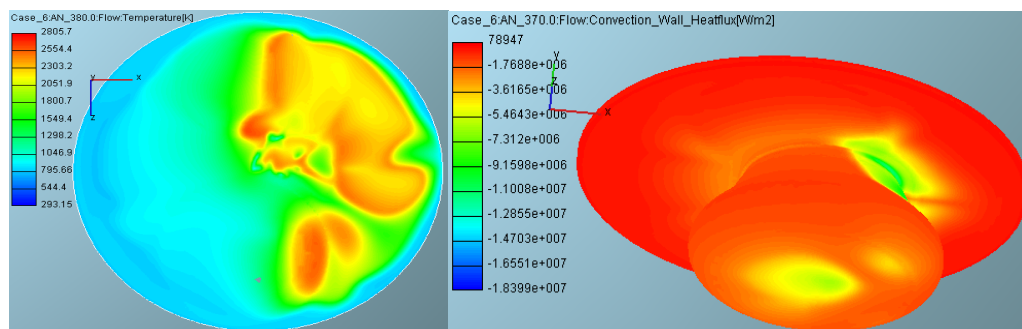


Рис. 6. Распределение температуры рабочего тела (К) в горизонтальном сечении КС дизеля без теплоизоляции и тепловой поток в огневое днище поршня ( $\text{Вт/м}^2$ ) дизеля без теплоизоляции

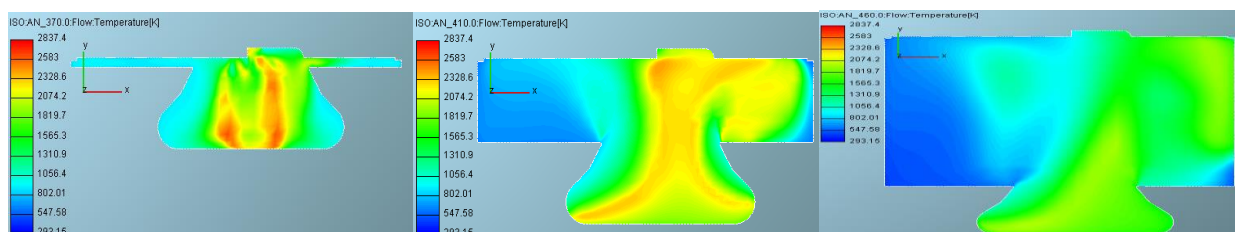


Рис. 7. Распределение температуры рабочего тела (К) в сечении КС дизеля с теплоизоляцией

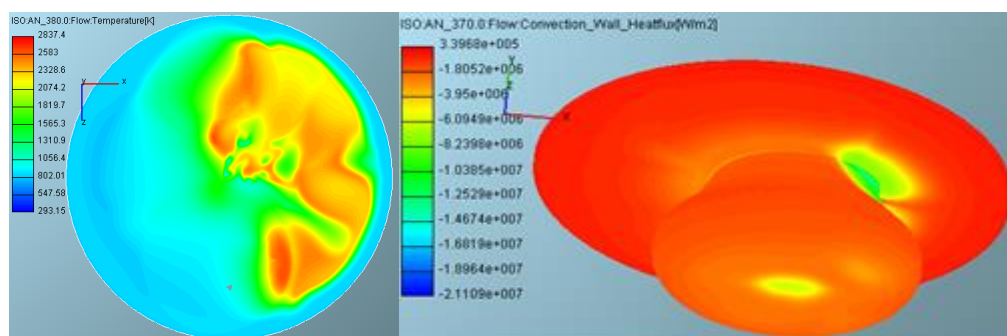


Рис. 8. Распределение температуры рабочего тела (К) в горизонтальном сечении КС дизеля с теплоизоляцией ( $\varphi = 380^\circ \text{ПКВ}$ ) и тепловой поток в огневое днище поршня ( $\text{Вт/м}^2$ ) дизеля с теплоизоляцией

Следует отметить, что при сохранении общей картины в распределении температурных полей в сечении камеры сгорания исследуемого дизеля без теплоизоляции (Рис. 5) и с теплоизоляцией (Рис. 7), в последнем случае наблюдается некоторое повышение локальных максимальных значений температур рабочего тела, но, в целом, указанные тенденции совпадают с ожидаемой картиной распределения температур в случае применения частичной теплоизоляции камеры сгорания исследуемого двигателя.

Несмотря на наличие слоя диоксида циркония, локальные тепловые потоки на теплоизолированных поверхностях не равны нулю, хотя и снижаются в сравнении с дизелем без теплоизоляции. Вместе с тем, общий уровень тепловых потоков на всех, а не только на теплоизолированных, поверхностях КС несколько растет (максимальные мгновенные величины тепловых потоков в стенку камеры сгорания повышаются на 12-15%, рис. 5 и 7). Эффект низкой теплопроводности покрытия проявляется в существенно ухудшающихся условиях теплопередачи от нагретого огневого днища к относительно холодным внутренним поверхностям поршня. Как следствие, наблюдается значительный рост температуры огневого днища поршня, а также крышки двигателя (в случае применения теплоизоляции температура достигает 538 К, без теплоизоляции – 473 К).

Для уточнения результатов был также проведен расчет дизеля без теплоизоляции с начальными параметрами, соответствующими двигателю с частичной теплоизоляцией. В этом случае наблюдается рост теплового потока для дизеля без теплоизоляции за счет более высокого давления наддува. Однако при этом двигатель демонстрирует больший уровень тепловой нагрузки, чем в случае применения частичной теплоизоляции КС: максимальные тепловые потоки в теплоизолированный поршень снижаются с  $1,881 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> до  $1,3817 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, т.е. на 27%.

Таким образом, применение частичной теплоизоляции позволяет добиться снижения тепловых потерь в детали, образующие камеру сгорания, и получить повышение эффективных показателей двигателя.

Для оценки влияния изменения параметров теплообмена в КС на тепловое состояние поршня проводится моделирование его температурного поля с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS.

Для расчёта использовались граничные условия первого и второго рода. В местах перехода материалов моделировался идеальный тепловой контакт (граничные условия четвертого рода).

Максимальная температура базового поршня составляет 197 °С, поршня с теплоизолирующим покрытием – 265 °С, что объясняется увеличением температуры рабочего тела и низкой теплопроводностью слоя диоксида циркония. На поверхности поршня возникает большой градиент температур, что свидетельствует о необходимости хорошей адгезии

материалов покрытия, подложки и тела поршня во избежание образования трещин. В исследованной конструкции поршня трещин после испытаний обнаружено не было.

Проведено моделирование рабочего процесса дизеля с частичной теплоизоляцией. Графики влияния различных регулировочных и конструктивных параметров на показатели рабочего процесса исследуемого дизеля представлены на Рис. 9.

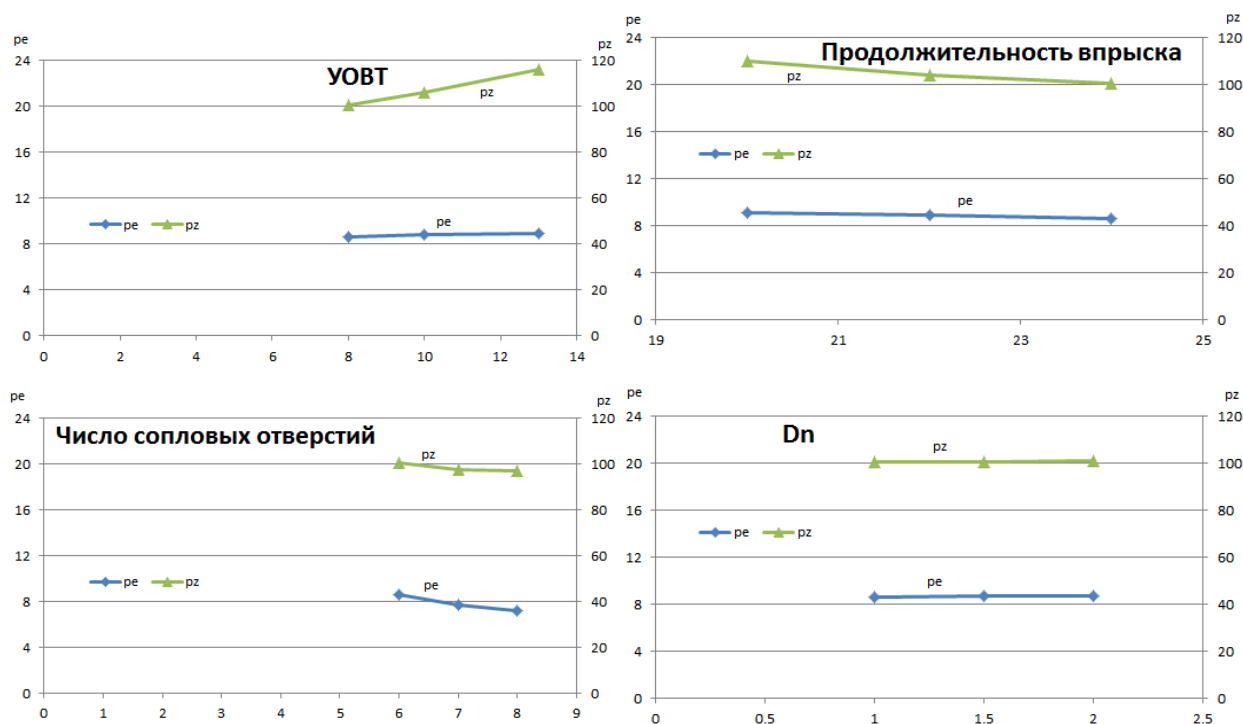


Рис. 9. Расчетные кривые влияния регулировочных и конструктивных параметров на показатели рабочего процесса

При этом возникает проблема обеспечения работоспособности турбины из-за увеличения температуры отработавших газов. Решение этой проблемы возможно следующими путями:

- применение турбинных колёс из жаропрочных сплавов или обеспечение охлаждения лопаток, что приводит к существенному удорожанию турбокомпрессора
- охлаждение впускного коллектора, что приводит к потере энтальпии отработавших газов.
- установка между двигателем и турбокомпрессором термоэлектрического генератора (ТЭГ).

Одним из вариантов утилизации повышенной энтальпии отработавших газов является установка в выпускной системе термоэлектрического генератора.

Термоэлектрический генератор представляет собой термопару (термоэлемент), в которой за счёт разницы температур спаев создаётся электрический ток, подаваемый в электрическую сеть транспортного

средства. Несколько соединённых между собой ТЭГ образуют термоэлектрогенераторную батарею.

Теплообменник ТЭГ представляет собой шестигранник, в проточной части которого выполнены рёбра, соединённые с внешним корпусом. К внешнему корпусу прижимаются 24 плоских термоэлектрических модуля (Рис. 10). Коэффициент полезного действия термоэлектрических модулей применяемого типа с учетом расчетных условий работы может достигать 0,05-0,07.

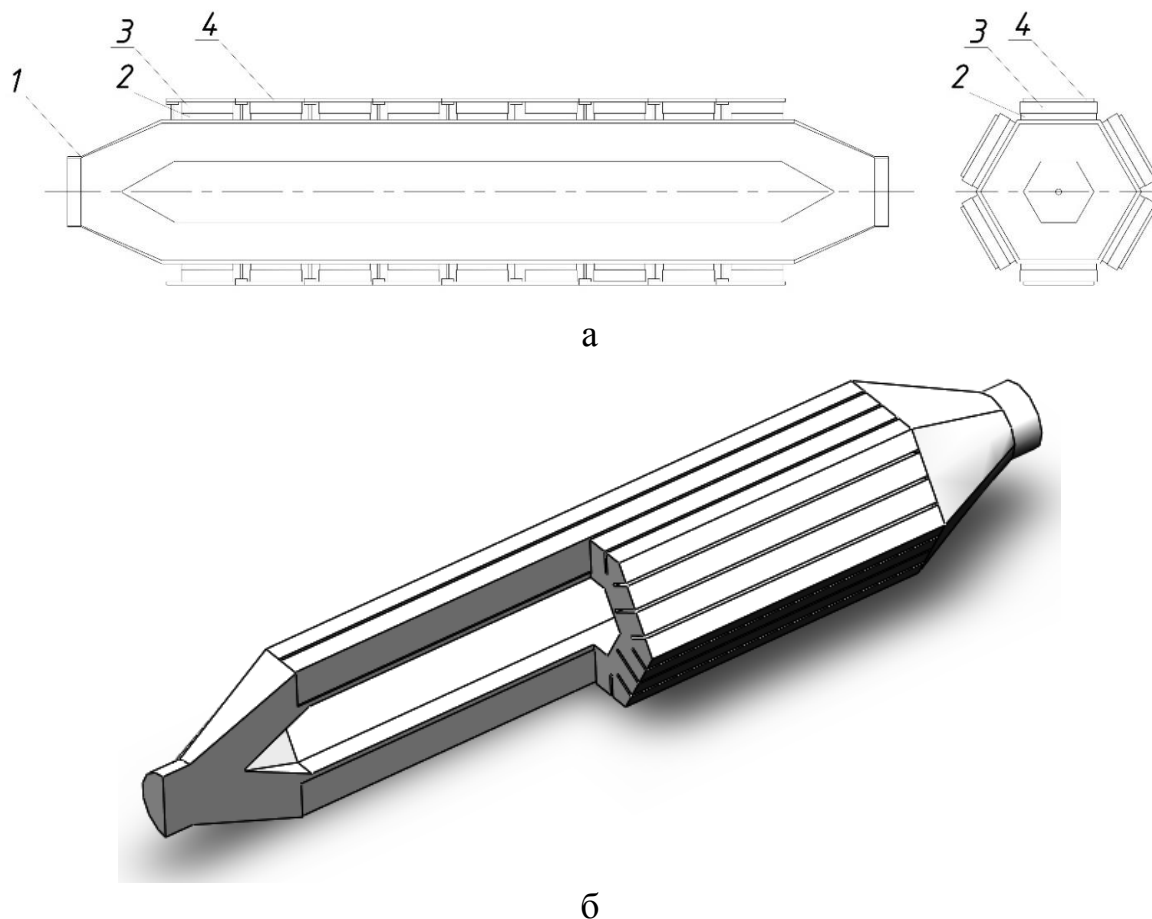


Рис. 10. Схема и модель ТЭГ: а – схема, б – твёрдотельная модель проточной части; 1 - горячий теплообменник с шестигранным сечением; 2 - термоэлектрический модуль; 3 - холодный теплообменник; 4 - прижимная пластина

При расчетах параметры газа на входе в ТЭГ взяты по результатам экспериментального исследования двигателя Д-246, производства ОАО «Минский моторный завод» с частичной теплоизоляцией камеры сгорания, испытания которого проводились в ОАО «Мытищинский машиностроительный завод»: температура газа 780K; расход газа 448 кг/ч.

Термоэлектрические модули заменены эквивалентным сопротивлением:  $R = \delta / \lambda = 0,0042735 \text{ м}^2\text{K/Вт}$ , где  $\lambda = 2,574 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$  – коэффициент теплопроводности материала термоэлемента;  $\delta = 11 \text{ мм}$  – высота термоэлемента. Температура на холодной

поверхности модулей: 359 К. На остальных поверхностях задан нулевой теплообмен.

Проведена генерация сетки контрольных объёмов в расчётной области термоэлектрического генератора. Максимальный размер элемента проточной части: 4 мм. Для получения достаточно точных результатов в местах, где генерируются завихрения, а также для учёта геометрии в районе рёбер заданы локальные измельчения сетки до 0,5 мм (Рис. 11). Число контрольных объёмов 5848486 (преимущественно кубических, также призматических, пирамидальных и тетраэдрических).

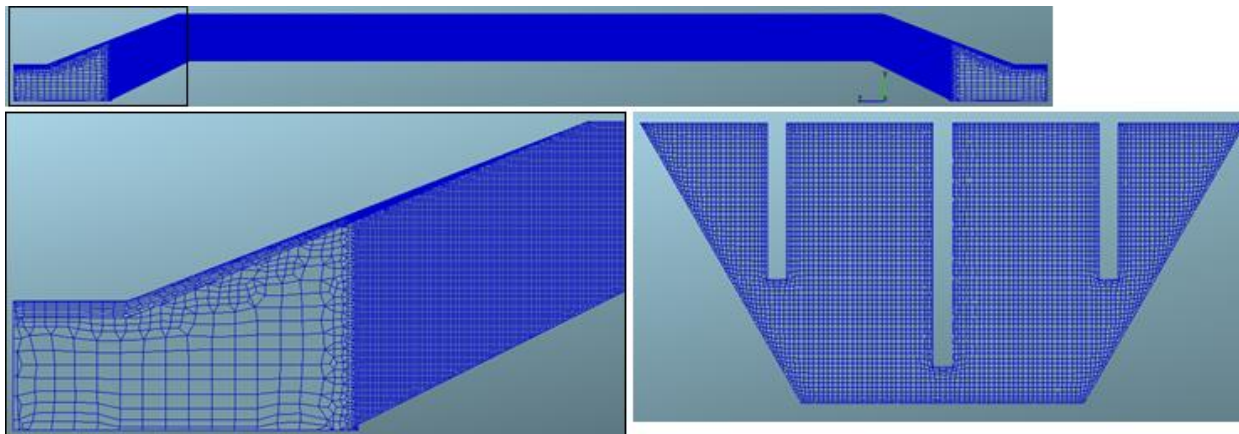


Рис. 11. Контрольнообъёмная сетка (проточная часть)

Максимальный размер элемента металлической части (твёрдого тела) - 3 мм. Для учёта геометрии в районе контакта с проточной частью задано локальное измельчение сетки (размер ячейки 0,375 мм). Число контрольных объёмов 6091327 (преимущественно кубических, также призматических, пирамидальных и тетраэдрических) (Рис. 12).

Моделирование теплофизических процессов, протекающих в цилиндре двигателя, с применением математической модели, основанной на системе фундаментальных уравнений Навье-Стокса с предварительным их осреднением по методу Фавра и замыканием относительно новой,  $k-\zeta-f$  - моделью турбулентности, а также моделью турбулентного сгорания Магнуссена-Хартагера, позволило получить распределение температур в проточной части ТЭГ и в твердом теле (Рис. 13). Для расчета параметры газа на входе в термоэлектрогенераторную батарею использованы данные, полученные в результате экспериментального исследования двигателя типа Д-246.9.



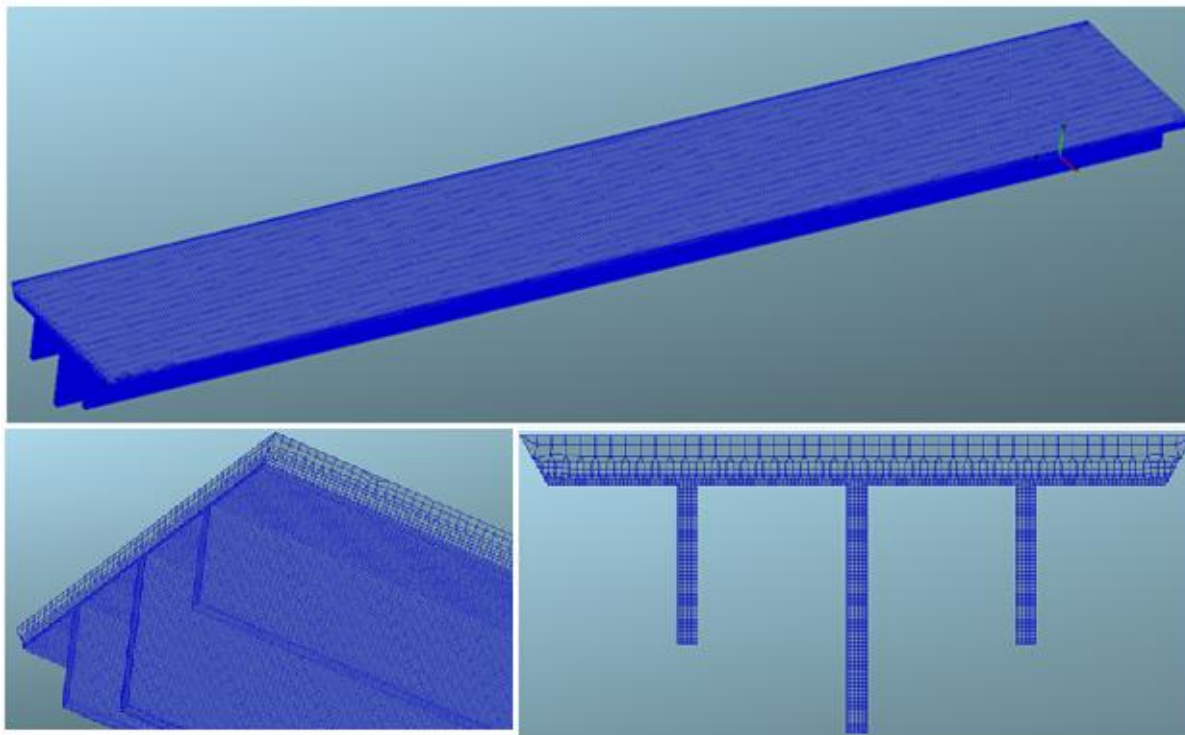


Рис. 12. Контрольнообъёмная сетка (твёрдое тело)

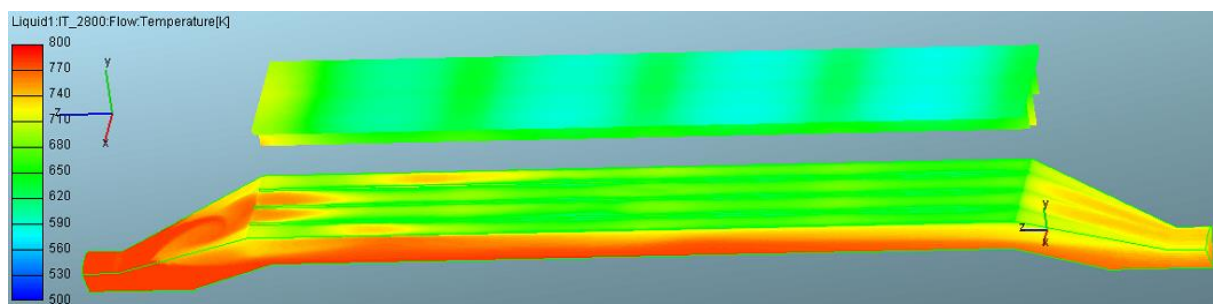


Рис. 13. Распределение температур в проточной части термоэлектрическом генераторе и твёрдом теле

Итерационным путем получена приемлемая длина теплообменной части: 834 мм, сечение: 107 мм; 48 плоских термоэлектрических модулей.

Полученные в рамках расчета значения - температура на выходе 728 К; падение температуры – 52 Л; теплоотдача – 11 кВт; вырабатываемая электрическая мощность – 11 кВт. Эти данные свидетельствуют об удовлетворительных результатах использования термоэлектрического генератора в моторно-трансмиссионном отделении военно-гусеничных машин.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

В представленной диссертационной работе получены новые, оригинальные результаты, которые дополняют имеющиеся данные по влиянию тепловой изоляции камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания, а также использованию систем утилизации теплоты отработавших газов, на теплонапряженное состояние основных деталей, рабочий процесс, экономические и экологические показатели быстроходного дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива. Показано, что исследование только комплексного влияния большого числа конструктивных, режимных и регулируемых параметров на эти показатели позволяют выявить те преимущества, которые двигатели с уменьшенным отводом теплоты и с применением альтернативного топлива могут показать в условиях эксплуатации.

Представленная диссертационная работа дает возможность комплексного обобщения вопросов, связанных с разработкой, созданием и испытаниями быстроходного дизеля с уменьшенным отводом теплоты с учетом современных экологических требований к двигателям внутреннего сгорания.

Основной результат диссертационной работы заключается в том, что проведено исследование возможности увеличения эффективности и снижения тепловых нагрузок деталей транспортного дизеля путем применения частичной тепловой изоляции камеры сгорания двигателя и использования систем утилизации отводимой теплоты.

В заключение каждой из глав диссертационной работы, посвященной решению поставленных задач, приведены подробные выводы. В связи с этим здесь отметим лишь основные из них:

1. Предложена трехмерная модель рабочего процесса в двигателе с непосредственным впрыском топлива, которая дает возможность получения значений локальных, нестационарных температур газа в цилиндре в зависимости от таких факторов, как наличие теплоизоляции деталей КС, интенсивности закрутки заряда в цилиндре, давления впрыска топлива, количества сопловых отверстий форсунки и угла опережения впрыскивания топлива.

2. Анализ температурного поля поршня базового двигателя показывают, что в режиме максимальной нагрузки, локальные температуры могут превышать пределы, допустимые для материала поршня. Этот факт говорит о целесообразности тепловой защиты поршня для улучшения его ТНДС и как следствие увеличения надежности работы двигателя. Применение теплоизоляции из диоксида циркония, приводит к увеличению максимальной температуры поверхности в центральной части КС, одновременно наблюдается снижение температуры в районе верхнего компрессионного кольца. Это увеличивает надежность работы поршня и двигателя в целом.

3. Применение частичной теплоизоляции деталей КС приводит, к нескольким положительным факторам:

- температурное поле основного тела поршня становится более равномерным, вследствие чего уменьшаются термические напряжения, которые являются основной причиной поломки деталей и, как следствие, выхода двигателей из строя;

- уменьшается отвод тепла от рабочего тела в систему охлаждения дизеля;

- повышение температуры отработавших газов примерно на 40-60 °С, вызванное теплоизоляцией деталей, образующих камеру сгорания свидетельствует о повышении энтальпии отработавших газов, поступающих на турбину, и создает благоприятные условия для использования этой энергии.

4. Улучшение как эффективных, так и экологических показателей и характеристик теплоизолированного дизеля, можно достичь путем подбора оптимальных конструктивных, режимных и регулируемых параметров двигателя.

5. Показано, что максимальные тепловые потоки в поршень с покрытием диоксидом циркония в сравнении с двигателем без теплоизоляции снижаются на 27%. Таким образом, применение частичной теплоизоляции позволяет добиться снижения тепловых потерь в детали, образующие камеру сгорания, и получить повышение эффективных показателей двигателя.

6. Экспериментально показана возможность создания теплоизолирующих покрытий, имеющих значительную стойкость при эксплуатации;

7. Нестационарный характер тепловых нагрузок со стороны рабочего тела и сам процесс нестационарного теплообмена, а также различные теплофизические свойства традиционных и керамических материалов, приводят возникновению импульсов градиента температуры в области контакта. Эти импульсы имеют достаточно большие амплитуды и способствуют концентрации температурных напряжений в области контакта, в результате чего возникает опасность разрушения составных деталей в местах контакта.

8. Предложен способ использования повышенной энергии выпускных газов поршневого двигателя, предусматривающий установку на двигателе прямого преобразователя теплоты продуктов сгорания в электричество.

В данной диссертационной работе получены оригинальные результаты, которые позволяют заключить, что возможности дальнейшего развития одной из самых «возрастных» энергетических машин, – поршневого двигателя внутреннего сгорания в части дальнейшего роста их эффективности и более полного использования энергии топлива, с учетом реалий современной цивилизации далеко не исчерпаны.



## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Онищенко Д.О. Смирнов А.Ю. Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований возможностей снижения тепловых нагрузок дизеля // Инновационные технологии и передовые инженерные решения: Сб. научных трудов Междунар. конф. Орехово-Зуево, 2012. С. 33-38 (0,50 п.л./0,25 п.л.).
2. Онищенко Д.О., Панкратов С.А., Смирнов А.Ю. Экспериментальная проверка возможности снижения теплоотдачи в систему охлаждения дизеля путём частичной теплоизоляции камеры сгорания // Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: тез. докл. науч.-тех. конф. «7-ые Луканинские чтения». М.: МАДИ (ГТУ), 2015. С. 60-62 (0,15 п.л./0,10 п.л.).
3. Онищенко Д.О., Панкратов С.А., Смирнов А.Ю. Влияние частичной теплоизоляции камеры сгорания дизеля на теплоотдачу в систему охлаждения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 3. С. 81-89 (0,60 п.л./0,30 п.л.).
4. Применение термоэлектрического генератора для обеспечения работоспособности турбины дизеля с частичной теплоизоляцией камеры сгорания / А.Ю. Смирнов [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2016. Том 8. № 5. С. 227-232 (0,4 п.л./0,20 п.л.).
5. Онищенко Д.О., Смирнов А.Ю. Экспериментальное исследование быстроходного дизеля с частичной теплоизоляцией камеры сгорания // Автогазозаправочный комплекс+альтернативное топливо. 2019. Том 18. № 10. С. 472-483 (0,8 п.л./0,4 п.л.).
6. Онищенко Д.О., Смирнов А.Ю. Индикаторные и эффективные показатели быстроходного дизеля с частичной теплоизоляцией камеры сгорания // Автогазозаправочный комплекс+альтернативное топливо. 2019. Том 18. № 11. С. 528-538 (0,8 п.л./0,4 п.л.).