На правах рукописи

АНДРИЯНОВ Сергей Михайлович

УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ КАРТЕРА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ДОВОДКИ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

Специальность 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Набережные Челны – 2023

Работа выполнена на кафедре «Автомобили, автомобильные двигатели и дизайн» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Никишин Вячеслав Николаевич
профессор кафедры «Автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна» Набережночелнинского института (филиала) ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Официальные оппоненты: **Галышев Юрий Витальевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы энергетического машиностроения ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Савастенко Эдуард Андреевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»**

Защита состоится «20» декабря 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: https://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru.

Автореферат разослан «20» октября 2023 г.

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

Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для защиты окружающей среды от выбросов вредных веществ во всех странах действуют национальные и международные стандарты, ограничивающие их допустимое содержание в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания. В процессе сгорания рабочей смеси в двигателе, часть продуктов сгорания через зазоры между поршнем и цилиндром попадает в картерное пространство двигателя, где смешивается с масляным туманом, превращаясь в картерные газы. Для исключения значительного избыточного давления в картерном пространстве картерные газы отводят в атмосферу через систему вентиляции.

Контакт внутрицилиндровых высокотемпературных газов с маслом, в связи с их прорывом в картерную полость, вызывает образование токсичных веществ, которые попадают в атмосферу, в случае открытого исполнения системы вентиляции. Поэтому используемые открытые системы вентиляции картера отходят в прошлое, требуется применение только закрытых (замкнутых) систем.

Экологические показатели двигателей с воспламенением от сжатия регламентируются в Европе Правилами ООН №49 с соответствующими поправками и дополнениями. Технический регламент «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации вредных (загрязняющих) веществ» требует выполнение требований Правил Российскими производителями двигателей с воспламенением от сжатия.

Подобные требования влияют на облик самих двигателей, требуют введения новых конструктивных элементов, реализующих тот или иной способ снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Последнее касается и систем вентиляции картерных газов. В частности, п. 3.4.9 ГОСТ Р 51998-2002 «Дизели автомобильных транспортных средств. Общие технические условия», требует применение закрытой системы вентиляции картерного пространства современных двигателей с воспламенением от сжатия.

В соответствии с требованиями ISO 17536 «Дорожные транспортные средства. Испытание аэрозольных сепараторов для двигателей внутреннего сгорания» унесенное масло в составе картерных газов на выходе из системы вентиляции должно быть не более 0,3 г/ч при этом эффективность системы не ниже 95%.

Целью работы является улучшение эффективности закрытой системы вентиляции картерных газов, по принципу сепарации моторного масла с применением маслоотделителя по типу соплового аппарата, на этапе проектирования и доводки высокофорсированного автомобильного дизеля.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

1) Разработать расчётные модели, описывающие процессы прорыва отработавших газов из камеры сгорания в полость картерного пространства с учетом конструкции применяемых поршневых колец, свойств материалов из которых изготовлены поршни и гильзы цилиндров двигателя, а также режимов работы двигателя, позволяющих определить основной поток и объемный расход картерных газов в цилиндропоршневой группе через зазоры в горячем состоянии при работе двигателя.

2) Установить современные численные значения к обобщенным требованиям и критериям оценки работоспособности и эффективности закрытой системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля.

3) Разработать эффективную закрытую систему вентиляции картерного пространства, соответствующую установленным современным численным значениям обобщенных требований и критериев работоспособности и эффективности системы.

4) Разработать программу и методику опытной апробации результатов теоретических исследований, в виде стендовых безмоторных и моторных испытаний.

5) Выполнить анализ влияния конструктивных параметров основных компонентов закрытой системы вентиляции картера на соответствие установленным современным численным значениям обобщенных требований и критериев оценки работоспособности и эффективности системы, и показатели рабочего процесса высокофорсированного автомобильного дизеля.

6) Сформировать рекомендации к конструктивным параметрам компонентов закрытой системы вентиляции картера на этапе проектирования и доводки высокофорсированного автомобильного дизеля.

Объект исследования: система вентиляции высокофорсированного V-образного автомобильного двигателя с воспламенением от сжатия типа 8ЧН 12/13.

Методы исследования: расчетно-теоретические исследования проводились с использованием метода математической статистики, компьютерной графики, уравнений термодинамики, механики жидкости и газа, теории теплообмена и современных численных методов математического моделирования. Проверка достоверности расчетов проводилась путем сравнения данных моделирования и результатов экспериментальных исследований двигателя внутреннего сгорания и его компонентов.

Научная новизна заключается в следующих результатах:

- расчётные модели описывающие процессы прорыва отработавших газов из камеры сгорания в полость картерного пространства с учетом конструкции применяемых поршневых колец, свойств материалов из которых изготовлены поршни и гильзы цилиндров двигателя, а также режимов работы двигателя;
- методика расчётно-экспериментальных исследований процессов в закрытых системах вентиляции картера и определении значений расхода картерных газов в зависимости от различных факторов;
- безмоторных экспериментальных исследований различных опытных конструкций маслоотделителей и моторных исследований новой конструкции закрытой системы вентиляции картера.

Достоверность и обоснованность научных положений и полученных результатов обусловлены:

- использованием фундаментальных законов и уравнений термодинамики, механики жидкости и газа, теории теплообмена и современных численных методов математического моделирования;
- согласованием результатов расчетных и экспериментальных исследований при оценке адекватности расчётных моделей.

Реализация результатов работы. Разработанные термодинамические модели рабочего процесса двигателя V8 ЧН 12/13, методы расчетно-экспериментальных ис-

следований теплового и напряженно-деформированного состояния поршня и гильзы цилиндров, газодинамические модели прорыва картерных газов через цилиндропоршневую группу используются в работе конструкторского отдела двигателей и в конструкторско-исследовательском отделе механизмов и систем двигателя Научно-технического центра ПАО «КАМАЗ» на этапе проектирования и доводки систем вентиляции картерного пространства современных двигателей. Разработанные расчётные модели, конструкция закрытой системы вентиляции картера и ее компоновка в составе автомобильных дизелей могут найти применение в учебном процессе кафедры ААДиД НЧИ К(П)ФУ при чтении курса «Конструирование двигателей» и «Экологическая безопасность двигателей с воспламенением от сжатия», а также при выполнении курсового проекта и выпускных квалификационных работ по направлению 13.04.03 – Энергетическое машиностроение.

Апробация работы. По основным результатам диссертационной работы были сделаны доклады: 25 апреля 2013г., г. Набережные Челны, К(П)ФУ, V Камские чтения: сборник докладов всероссийской научно-практической конференции; 28 апреля 2014г., г. Набережные Челны, К(П)ФУ, VI Камские чтения: сборник докладов всероссийской научно-практической конференции; 17 мая 2014г., г. Набережные Челны, К(П)ФУ, Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского федерального университета 2014 года: сборник тезисов; 15-16 декабря 2014г., г. Омск, СибАДИ, Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки; 2-3 декабря 2015г., г. Казань, АО «КНИАТ», Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы; 22 апреля 2016г., Г набережные Челны, К(П)ФУ, VIII Камские чтения: сборник докладов всероссийской научно-практической конференции; 4-6 июля 2016г., г. Воронеж, ВГЛТУ, «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования»: сборник научных трудов по материалам ежегодных конференций; 7-9 декабря 2016г., г. Казань, АО «КНИАТ», Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016; 31 января - 2 февраля 2017г., г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференций: «Двигатель-2017»; 21 апреля 2017г., г. Набережные Челны, К(П)ФУ, IX Камские чтения: всероссийская научно-практическая конференция; 27-28 июня 2017г., г. Протвино, НПО «ТУРБОТЕХНИКА», X международная научно-практическая конференция «Двигатели и компоненты транспортных средств: разработка и производство, эксплуатация и сервисное обслуживание»; 6-8 декабря 2017г., г. Казань, АО «КНИАТ», Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2017; 24 апреля 2020г., г. Ижевск, ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова, IV Всероссийскую научно-техническую конференцию «Автомобиле- и тракторостроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства».

Публикации. По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, в том числе 5 публикации в изданиях рекомендованных ВАК РФ и 4 патента на полезные модели.

Личный вклад автора заключается в участии и проведении основного объема

расчетных и экспериментальных исследованиях, анализе, обобщении, интерпретации полученных результатов и формулировке общих выводов.

На защиту выносятся:

- результаты расчётных моделей, позволяющих определить основной поток и объемный расход картерных газов в цилиндропоршневой группе через зазоры в горячем состоянии при работе двигателя;

- установленные современные численные значения обобщенных требований и критериев оценки работоспособности и эффективности закрытой системы вентиляции картера высокофорсированных автомобильных дизелей;

- результаты расчетных и экспериментальных процессов, протекающих в закрытой системе вентиляции картера;

- практические рекомендации по оптимальному сочетанию конструктивных параметров компонентов закрытой системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работ, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 144 страницы, включая 126 страниц основного текста, содержащего 93 рисунка и 28 таблиц. Список литературы включает 151 наименование на 17 страницах, из них 37 на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и показана степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна, практическая ценность, структура, объем работы и обоснован выбор предмета исследования.

Разработана общая схема проектирования закрытой системы вентиляции картерного пространства высокофорсированного автомобильного двигателя, учитывающая шесть основных задач, для каждой из которых были с сформированы свои цели и задачи, схема представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Схема проектирования закрытой системы вентиляции картера

В первой главе диссертации выполнен анализ отечественных и зарубежных научных работ по теме исследования. Рассмотрены расчетно-экспериментальные работы процессов протекающих в системе вентиляции картера и их конструкция, таких авторов как: В.Ф. Кутенёв, М.Ю. Волков, И.М. Браневская, Д.М. Воронин, А.А. Гаврилов, И.А. Гриднев, И.Ю. Данилов, В.Н. Никишин, Н.Д. Чайнов, В.Ф. Каменев, М.А. Зленко, С.М. Левит, M. Barris, H.W. Ebner, J. Fairbanks, W.C. Hinds, W. Krause, K. Leschonski, P. Podevin, P. Zenker и др. В результате анализа выявлено, что научные работы посвящены анализу протекающих процессов в открытой и закрытой системах вентиляции картерного пространства их совершенствованию и влиянию на рабочий процесс двигателя. Анализом выявлено, что нерешенными остаются следующие задачи: обобщение и установление численных значений современных требований и критериев к закрытой системе вентиляции картерного пространства высокофорсированных автомобильных дизелей; снижение общего расхода картерных газов в соответствии с современными требованиями; оптимизация заброса моторного масла в составе картерных газов на вход в систему вентиляции.

Для анализа текущего состояния изучаемого вопроса по разработке закрытой системы вентиляции картерного пространства высокофорсированного автомобильного двигателя был сформирован блок «Литературный и патентный анализ, бенчмаркинг», разработаны цель, задачи, требования, исходные и выходные данные, представленные на рисунке 2.

Рисунок 2 – Литературный и патентный анализ, бенчмаркинговые исследования

Обоснована актуальность и важность установления современных численных значений к обобщенным требованиям и критериям оценки работоспособности и эффективности закрытой системы вентиляции картерного пространства высокофорсированных автомобильных двигателей.

Сформулированы цель и основные задачи научной работы.

Вторая глава посвящена вопросам теоретического обоснования и расчётного моделирования процессов в двигателе и системе вентиляции картерного пространства.

Термодинамический расчет является первым этапом проектирования и доводки рабочего процесса двигателя, на основании которого определяются мощностные, экономические и частично экологические показатели, а также намечаются пути их дальнейшего улучшения.

На рисунке 3 представлена цель, задачи, исходные и выходные данные по результатам термодинамического анализа двигателя.

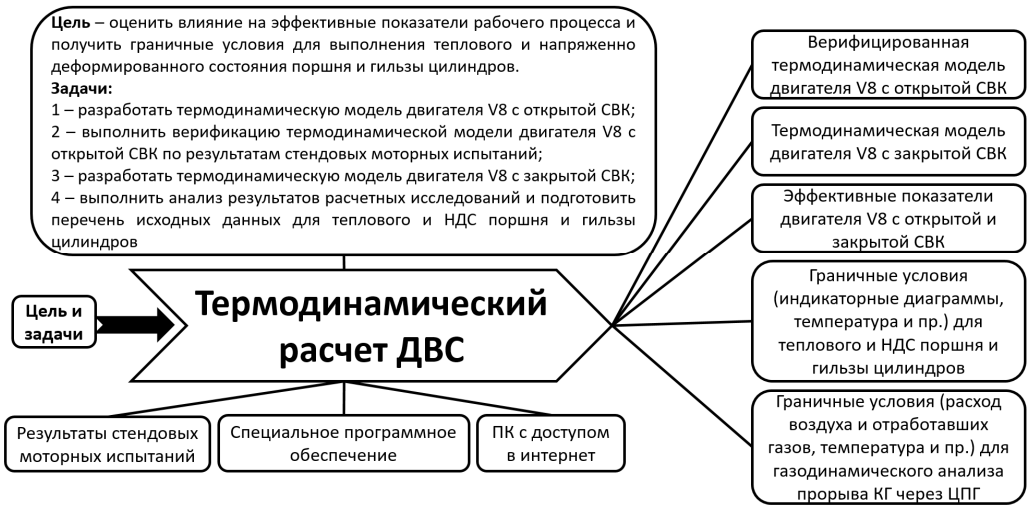


Рисунок 3 – Термодинамический расчет двигателя внутреннего сгорания

Разработка и верификация расчётной модели рабочего процесса (рисунок 4) была выполнена на базе стендовых моторных испытаний V-образного двигателя 8ЧН 12/13 мощностью 440 л.с. на площадке НТЦ ПАО «КАМАЗ», при помощи программного обеспечения AVL Boost. Модель достаточно точно описывает рабочий процесс двигателя, с долей погрешности не более 5% по всем рассмотренным показателям, по основным показателям погрешность не более 0,3%.

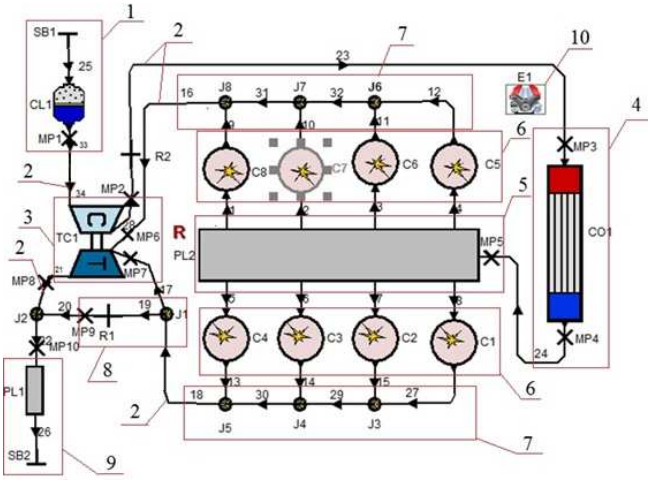


Рисунок 4 – Функциональная модель двигателя V8:
1 – воздушный фильтр, 2 – трубопровод, 3 – турбокомпрессор; 4 – охладитель наддувочного воздуха; 5 – впускной коллектор;6 – цилиндры двигателя; 7 – выпускные коллектора; 8 – перепускной клапан турбокомпрессора; 9 – глушитель; 10 – данные по двигателю (граничные условия)

Для реализации потока картерных газов обратно во впускную систему (закрытая система вентиляции), через турбокомпрессор была введена третья системная граница. С целью учета изменения количества газов, в результате изменения рабочего процесса, был введен элемент «интерпретатор формул» в котором

были просуммированы расходы газов, поступающие в картерное пространство V-образного двигателя 8ЧН 12/13 для каждого цилиндра на основании результатов испытаний.

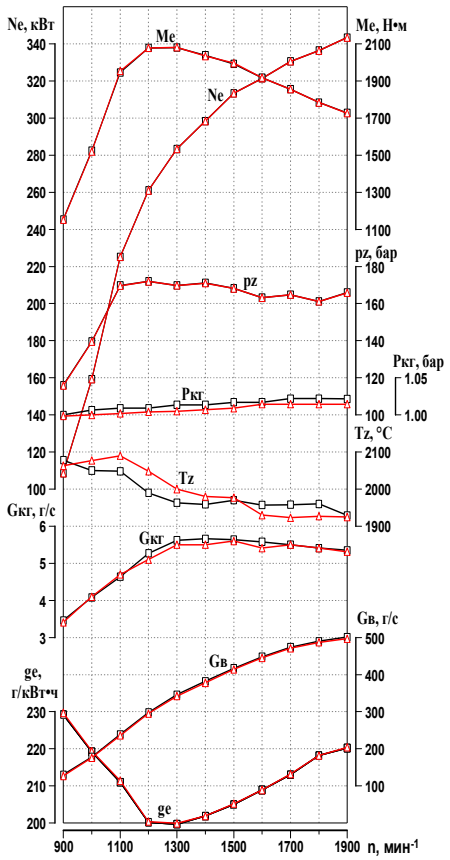


Рисунок 5 – ВСХ двигателя V8 с открытой и закрытой системой (расчетные данные):
—□— открытая
—△— закрытая

В соответствии с полученными результатами термодинамического моделирования (рисунок 5), было установлено незначительное влияние закрытого исполнения системы вентиляции на рабочий процесс высокофорсированного V-образного автомобильного дизеля 8ЧН 12/13 (повышение удельного расхода топлива до 0,2%; снижение максимального давления в цилиндре до 0,3%; повышение максимальной температуры цикла до 2,8% и др.). Данные результаты аргументируют незначительное влияние на рабочий процесс и необходимость применения закрытой системы вентиляции при проектировании новых и модернизации существующих высокофорсированных двигателей, с целью исключения негативного влияния на окружающую среду по средствам уноса картерных газов в атмосферу.

Полученные граничные условия (индикаторные диаграммы, расход отработавших газов, температуры и др.) были использованы в дальнейших расчетных задачах динамики, теплового, напряженно-деформированного состояния (НДС) поршня и гильзы цилиндров, а также газодинамического анализа прорыва картерных газов через цилиндропоршневую группу.

В аналогичных работах, к примеру, Волкова М.Ю. и Гаврилова А.А. представлены математические модели и программы расчетов газообмена четырехтактного двухцилиндрового дизельного двигателя с неравномерным порядком работы цилиндров и закрытой системы вентиляции, позволяющие определять рациональные параметры воздуха и картерных газов при их рециркуляции во впускную систему. В их работах были получены подтверждения незначительного влияния на основные эффективные показатели рабочего процесса и экологические показатели, в частности: снижение дымности отработавших газов до 4%; занижение концентрации оксидов азота до 6%; снижение оксида углерода до 5%; увеличение углеводородов до 5%.

Расчет теплового и НДС гильз цилиндров и поршней различных вариантов исполнения, с целью получения действительных геометрических размеров в рабочем (горячем) состоянии для последующего газодинамического расчета прорыва картерных газов через них.

На рисунке 6 представлена цель, задачи, исходные и выходные данные по анализу теплового и НДС поршня и гильзы цилиндров двигателя.

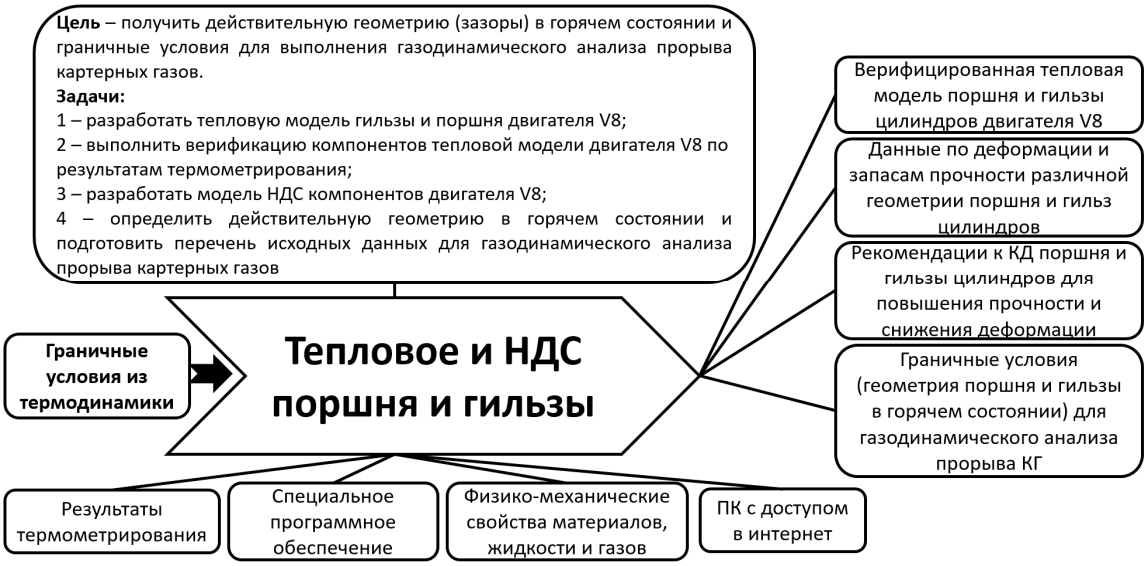


Рисунок 6 – Тепловое и НДС поршня и гильзы цилиндров

Выполнен анализ НДС трех вариантов гильз цилиндров, при помощи программного обеспечения ANSYS. Принята схема, при которой опорный бурт зажат между блоком и головкой. По верхнему и нижнему поясам из-за наличия монтажных зазоров, опоры отсутствуют. Боковая сила от поршня рассчитывается по величине газовых и инерционных сил возвратно-поступательно движущихся деталей и передается гильзе через среднюю часть юбки. Давление сгорания и температурное состояние было получено по результатам стендовых моторных испытаний и расчетов рабочего процесса. Размеры поршня и гильзы цилиндров в холодном состоянии по конструкторской документации представлены на рисунке 7.

Разработанная модель была верифицирована по результатам термометрирования базового V-образного двигателя «КАМАЗ» 8ЧН 12/13, мощностью 400 л.с., на площадке НТЦ ПАО «КАМАЗ», с долей погрешности не более 6%. Результаты теплового состояния изменения температуры гильзы 8-го цилиндра представлены на рисунке 8 и в таблице 1.

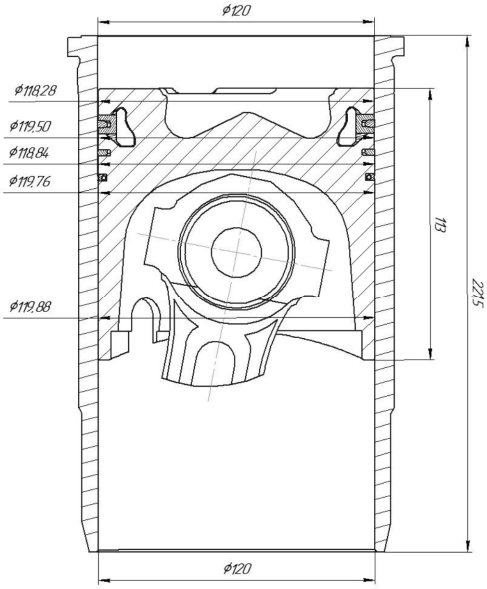


Рисунок 7 – Размеры поршня и гильзы цилиндров в холодном состоянии

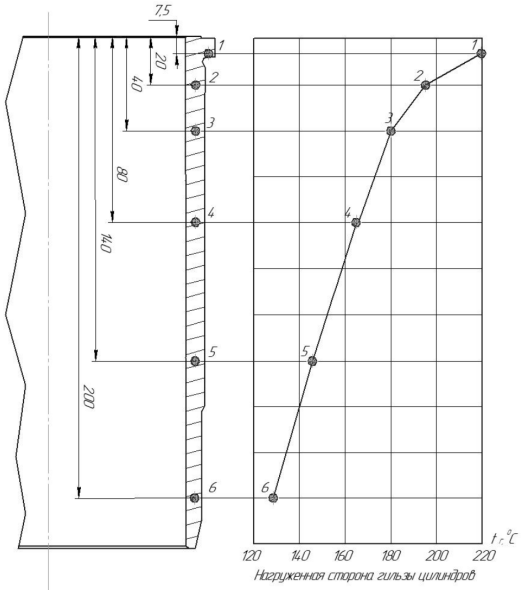


Рисунок 8 – Изменение температуры гильзы 8 цилиндра ($n_{ном}$=1900 1/мин; $t_{ОЖ}$=90 ^{0}C)

Таблица 1 – Распределение температуры (^{0}C) по основным точкам гильзы цилиндров на рисунке 8, при номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n_{ном}$=1900 1/мин; $t_{ОЖ}$=90 ^{0}C)

Наименование	Номер точки на рис. 8					
	1	2	3	4	5	6
Испытания	221	201	191	173	146	130
Расчеты	218	195	180	164	144	128
Отклонение,%	1,4	3,0	5,8	5,2	1,4	1,5

Была разработана модель теплового и НДС поршня в трех вариантах исполнения, вариант 2 был верифицирован по результатам термометрирования базового V-образного двигателя «КАМАЗ» 8ЧН 12/13, мощностью 400 л.с., на площадке НТЦ ПАО «КАМАЗ». Модель показала хорошую корреляцию с результатами испытаний, с долей погрешности до 6%. Результаты теплового состояния поршня вариант 2 по характерным рассмотренным точкам представлены на рисунке 9 и таблице 2.

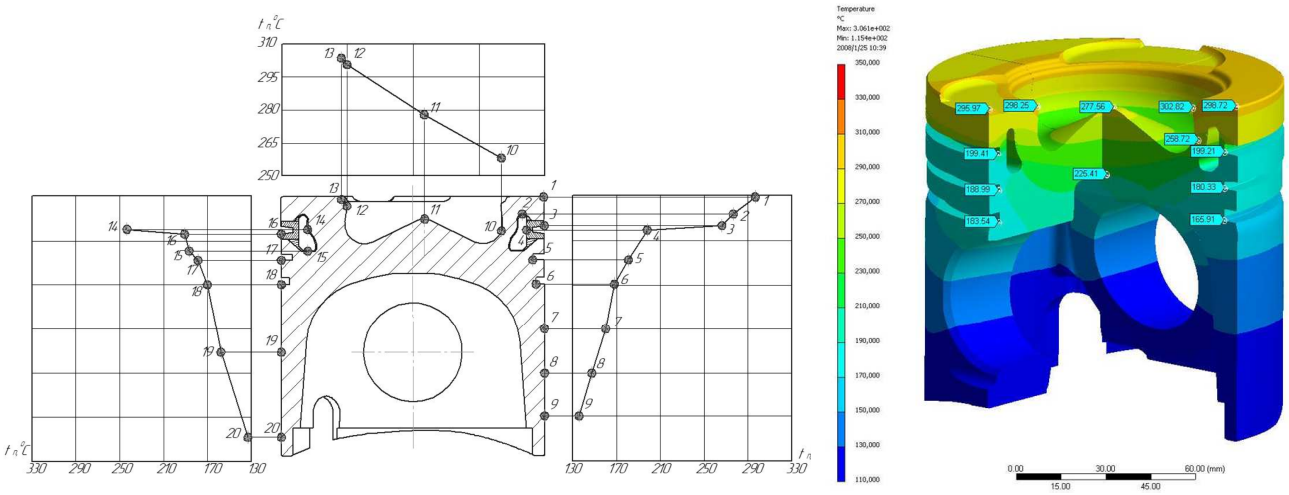


Рисунок 9 – Распределение температурных полей поршня

Таблица 2 – Распределение температуры (^{0}C) по основным точкам поршня на рисунке 9, при номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n_{ном}$=1900 1/мин; $t_{ОЖ}$=90 ^{0}C)

Наименование	Номер точки на рис. 9												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Испытания	303	286	266	207	190	172	160	141	129	263	282	307	310
Расчеты	299	281	262	201	180	166	152	133	128	260	278	303	305
Отклонение,%	1,3	1,7	1,5	3,0	5,3	3,5	5	5,7	0,8	1,1	1,4	1,3	1,6

Установлено, что, поршень вариант 2 имеет наименьшую деформацию, максимальные значения зафиксированы на внешнем диаметре днища (рисунок 10):

- вдоль оси поршневого пальца до 0,22 мм;
- перпендикулярно оси поршневого пальца до 0,32 мм.

Получены действительные геометрические параметры гильзы цилиндров и поршня в рабочем (горячем) состоянии для последующего газодинамического расчета прорыва картерных газов.

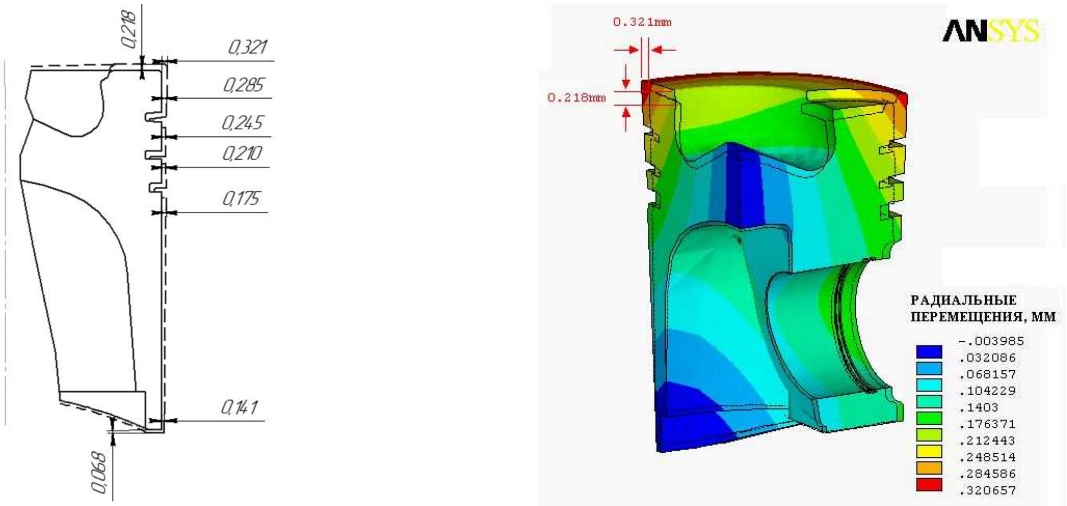


Рисунок 10 – Деформированное состояние поршня вариант 2 от действия температурных, газовых и инерционных сил

Газодинамическая модель прорыва картерных газов

На рисунке 11 представлена цель, задачи, исходные и выходные данные газодинамического анализа прорыва картерных газов через элементы цилиндропоршневой группы двигателя.

Рисунок 11 – Газодинамический анализ прорыва картерных газов через элементы цилиндропоршневой группы двигателя

Была разработана газодинамическая модель прорыва картерных газов через цилиндропоршневую группу при помощи программного обеспечения Federal-Mogul Prime 3D (рисунке 12), которая была верифицирована по результатам стендовых моторных испытаний V-образного двигателя «КАМАЗ» 8ЧН 12/13, мощностью 400 л.с., на площадке НТЦ ПАО «КАМАЗ», с долей погрешности до 12,6% (в расчете не учитывался расход картерных газов через элементы газораспределительного механизма, турбокомпрессора и масляная пленка на поверхностях элементов цилиндропоршневой группы), полученные результаты можно считать качественно соответствующими действительности.

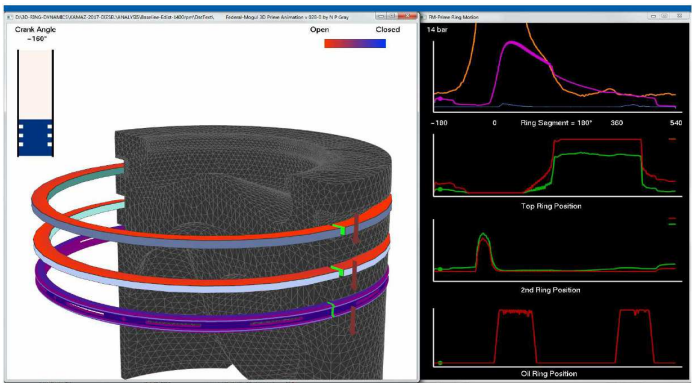


Рисунок 12 – Результаты моделирования при частоте вращения 1400 1/мин и углу поворота коленчатого вала 160^0 (14 бар)

Установлено процентное соотношение по распределению прорыва картерных газов через геометрию поршневых колец: замок поршневых колец – до 30%; периферия кольца – до 10%; боковые грани до 60% (деформация гильзы цилиндров).

В результате газодинамического анализа цилиндропоршневой группы удалось оптимизировать расход картерных газов до 27,2% (131 л/мин при 1500 1/мин и 100% нагрузки) и определить объем картерных газов, попадающий в картерное пространство при различных частотах вращения коленчатого вала (рисунок 13).

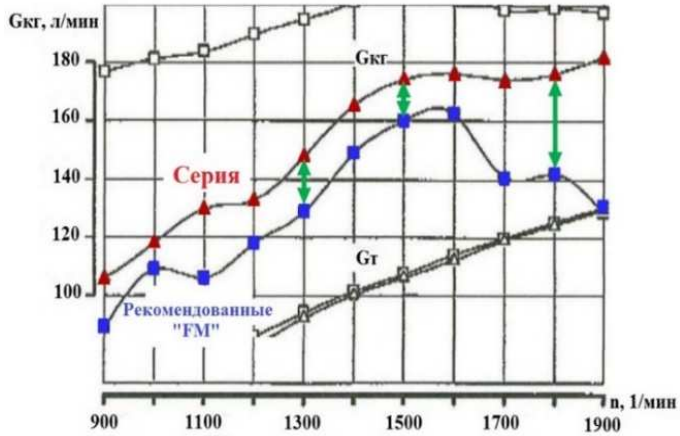


Рисунок 13 – Результаты стендовых моторных испытаний с разными комплектами поршневых колец

<u>В ходе выполнения расчетно-теоретических исследований было установлено следующее:</u>

1) Термодинамическая модель рабочего процесса, верифицированная по результатам стендовых моторных испытаний, позволяющая проанализировать и определить: подача картерных газов во впуск двигателя несущественно ухудшает топливную экономичность, особенно на низких режимах работы, разница может доходить до 0,4 г/кВт·ч (0,2%) при частоте 900 1/мин; подача картерных газов во впуск незначительно снижает максимальное давление сгорания до 0,3%, так как снижается масса свежего заряда; отношение расхода масла на угар по отношению к допустимому значению уноса масла из системы вентиляции (ISO 17536) составляет менее 1%; отношение расхода картерных газов к общему расходу воздуха (или расходу отработавших газов) двигателя составляет до 3 %.

2) Тепловая модель (верифицированная по результатам термометрирования) и анализ НДС поршня и гильзы цилиндров, позволяющие оценить возможность форсирования двигателя и действительные геометрические параметры компонентов в рабочем (горячем) состоянии для дальнейшего расчета прорыва картерных газов. Определены максимальные значения: температур поршня 305^0С и гильзы цилиндров 218^0С; деформации поршня 0,32 мм и гильзы цилиндров 0,41 мм.

3) Газодинамическая модель прорыва картерных газов через цилиндропоршневую группу верифицированная по результатам стендовых моторных испытаний, позволившая: определить объем картерных газов попадающий в картерное пространство при различных частотах вращения коленчатого вала, максимальное значение 180 л/мин при 1900 1/мин; подобрать оптимальный комплект поршневых колец и оптимизировать расход картерных газов через элементы цилиндропоршневой группы до 27,2% (131 л/мин при 1500 1/мин и 100% нагрузки).

На основании выполненных патентных, литературных изысканий и расчетных исследований были установлены современные численные значения к обобщенным требованиям и критериям оценки работоспособности и эффективности системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля, на базе семейства V-образных двигателей «КАМАЗ» 8ЧН 12/13:

- обеспечить расход картерных газов, попадающих в картерное пространство на уровне мировых аналогов в соответствии с рабочим объемом двигателя (например, 11 л. не более 110-130 л/мин);
- обеспечить унос масла на выходе из системы вентиляции картера не более 0,3 г/ч (на всех режимах), для выполнения требований ISO 17536;
- повысить эффективность системы вентиляции не ниже 95% (на всех режимах), для выполнения требований ISO 17536;
- обеспечить давление картерных газов в картере близкое к атмосферному, в диапазоне ±100 мм.вод.ст. в соответствии с рекомендациями производителей импортных маслоотделителей (Mahle, Parker, Alfdex, Mann & Hummel и др.), но не более 250 мм.вод.ст. (требования поставщиков комплектующих изделий ПАО «КАМАЗ»);
- соответствие ГОСТ Р 51998-2002 (исключить унос картерных газов в окружающую среду), применение закрытой системы вентиляции.

Третья глава диссертации посвящена разработке закрытой системы вентиляции картера.

На рисунке 14 представлены цель, задачи, исходные и выходные данные для разработки конструкции закрытой системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного двигателя.

С целью повышения эффективности существующих конструкции систем вентиляции картера высокофорсированных двигателей был проведен анализ возможности модернизаций всех основных компонентов системы.

Рисунок 14 – Общая схема разработки конструкции закрытой системы вентиляции

В качестве аналога было принято картерное пространство семейства V-образных двигателей «КАМАЗ» 8ЧН 12/13, на его основе было разработано новое картерное пространство, патент на полезную модель №108805, рисунок 15:

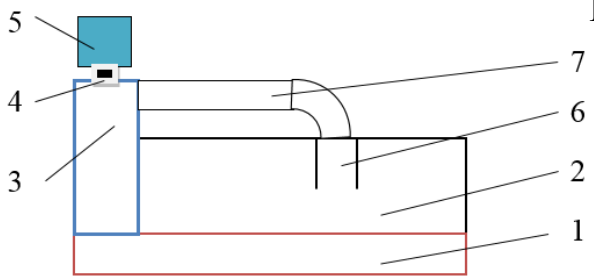


Рисунок 15 – Схема нового картерного пространства:
1 – пространство над масляным зеркалом; 2 – картерное пространство блока цилиндров; 3 – картерное пространство картера маховика; 4 – вход в систему вентиляции картера; 5 – система вентиляции (маслоотделитель); 6 – штанговая полость; 7 – канал газовой связи картерных пространств двигателя

Усовершенствование картерного пространства и системы вентиляции влечет за собой создание качественно новых элементов системы, которые бы подходили для данной системы и обладали при этом хорошей эффективностью и работоспособностью.

Были разработаны различные варианты опытных маслоотделителей закрытого исполнения по типу соплового аппарата, лабиринтового типа, тангенциального входа и спиральной направляющей, набором пластин различной формы и др. Часть опытных маслоотделителей были оформлены в виде патентов на полезные модели (№111582, 111583, 169135), один из них представлен на рисунке 16.

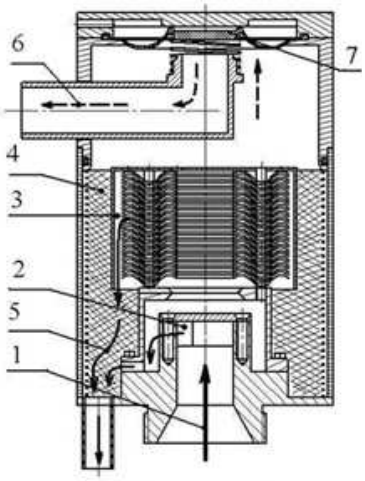


Рисунок 16 – Схема маслоотделителя по типу соплового аппарата:
1 – направление потока картерных газов из маслозаливной горловины; 2 – первая ступень маслоотделения; 3 – вторая ступень маслоотделения; 4 – маслоотделительная сетка, расположенная на внутренней стенке корпуса маслоотделителя; 5 – направление потока, отделенного от картерных газов масла; 6 – направление потока картерных газов, очищенных от масла (в систему впуска); 7 – следящий клапан, препятствующий образованию разрежения в картерном пространстве

Определен состав закрытой системы вентиляции картера для дальнейших стендовых безмоторных и моторных испытаний высокофорсированного V-образного автомобильного дизельного двигателя «КАМАЗ».

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям закрытой системы вентиляции картера.

С целью подтверждения выполнения поставленной цели и задач научной работы были проведены стендовые безмоторные и моторные испытания компонентов разработанной закрытой системы вентиляции картера. На рисунке 17 представлены цель, задачи, исходные и выходные данные для экспериментальных исследований и доводки конструкции закрытой системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля.

Рисунок 17 – Экспериментальные исследования и доводка конструкции

На рисунке 18 представлена схема установки для проведения испытаний компонентов системы вентиляции картера, в частности маслоотделителей и гидрозатворов.

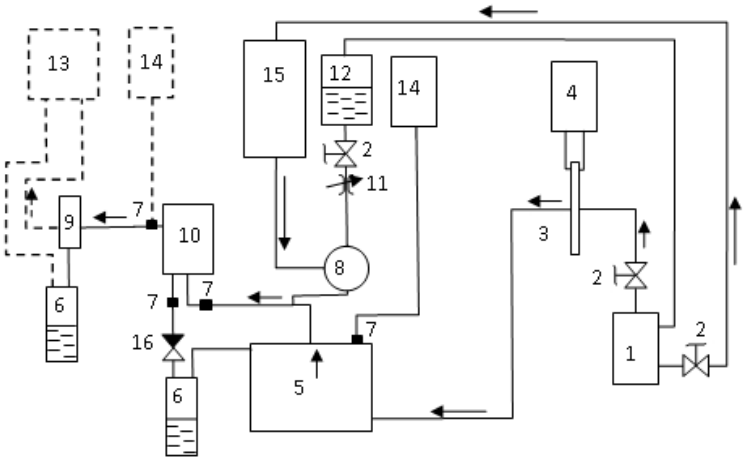


Рисунок 18 – Принципиальная схема установки испытаний системы вентиляции картера (пунктирными линиями обозначены дополнительные элементы стенда необходимые для испытания закрытой системы, стрелками указано направление движения потока сжатого воздуха и его смеси с маслом):

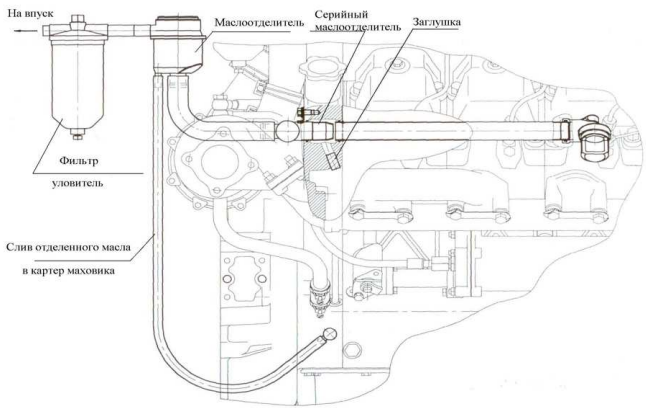
1 – источник сжатого воздуха с постоянным давлением; 2 – кран регулирования подачи сжатого воздуха; 3 – диафрагма с фланцевым способом отбора давления (для определения расхода сжатого воздуха, стандартным сужающим устройством по ГОСТ 8.586.2-2005); 4 – микроманометр типа МИН-240(5)-1.0; 5 – имитатор картерного пространства; 6 – ёмкость для сбора масла; 7 – места измерения давления в системе (четыре точки – обозначены черным квадратом); 8 – эжектор (устройство смешения воздуха и масла); 9 – фильтр улавливания уноса масла; 10 – маслоотделитель; 11 – зажим регулирующий подачу масла в систему; 12 – емкость подачи масла;13 – устройство для создания разряжения; 14 – водяной пьезометр; 15 – ротаметр с местными показаниями типа РМ ГОСТ 13045-81; 16 – обратный клапан (лепесткового типа)

Стендовые моторные испытания системы вентиляции картера в составе V-образного двигателя 8ЧН 12/13 проводились на испытательной станции двигателей НТЦ ПАО «КАМАЗ».

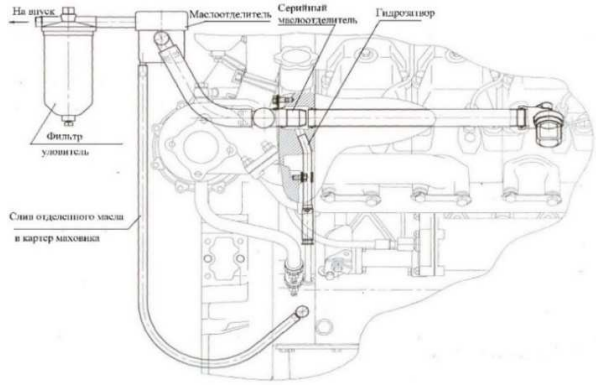
Двигатель перед испытаниями укомплектован в соответствии с приложением 2 ГОСТ 14846-81.

Испытания проводились на исследовательском стенде №4 фирмы «AVL» (Австрия) для двигателей мощностью 700 л.с. и газоаналитической установкой. Испытательный стенд оборудован измерительными приборами согласно разделу 2 ГОСТ 14846-81.

На рисунке 19 и 20 представлены схемы установки опытных маслоотделителей на двигателе.



Одноступенчатое исполнение системы



Двухступенчатое исполнение системы

Рисунок 19 – Схема одно и двухступенчатого исполнения системы вентиляции

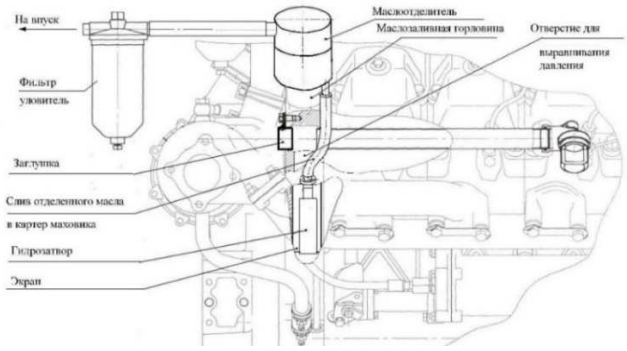


Рисунок 20 – Схема испытаний системы вентиляции с установкой маслоотделителей на маслозаливной горловине

Выполнена оценка точности испытательного оборудования и экспериментальных исследований.

Выполнены стендовые безмоторные и моторные испытания различных вариантов опытных маслоотделителей для закрытой системы вентиляции картерного пространства. Результаты стендовых моторных испытаний V-образного двигателя «КАМАЗ» 8ЧН 12/13 мощностью 440 л.с., в части эффективности системы вентиляции сведены в общую табл. 3. Подтверждено отсутствие значительного влияния закрытой системы вентиляции на эффективные показатели дизельного двигателя, не более 1% (Ne, Me, ge, pz, Gв и др.). В табл. 4 представлены данные по выбросам

вредных веществ двигателя с базовой и разработанной закрытой системы вентиляции картера по циклам ESC и ETC.

Таблица 3 – Результаты стендовых моторных испытаний закрытой системы вентиляции

№ п/п	Расход картерных газов, л/мин*	Расход подаваемого масла, гр./ч	Расход унесенного масла, гр./ч	Эффектив-ность, %	Разрежение на впуске, мм вод. ст.	Давление в картере, мм.вод.ст.
1	64	0,6	**0,05**	91,67	300	5
2	90	3	**0,25**	91,67		16
3	130	6	**0,3**	**95,00**		21
4	180	21	**0,3**	**98,57**		32
5	230	145	1,6	**98,90**		41
6	280	155	2,6	**98,32**		55
7	320	58	3,8	93,45		75
8	360	98	4,8	**95,10**		140

* расход картерных газов новых серийных V-образных двигателей «КАМАЗ» может достигать 180 л/мин. Повышенные значения расхода картерных газов (до 360 л/мин) были рассмотрены с целью анализа работоспособности системы вентиляции картера по результатам значительного времени эксплуатации двигателя (износа цилиндропоршневой группы, направляющих клапанов и пр.).

Для оптимальной работы уплотнений в V-образных двигателях «КАМАЗ» 8ЧН 12/13 значение давления в картерном пространстве не должно превышать 250 мм.вод.ст. (требования поставщиков комплектующих изделий). Полученные максимальные значения по давлению в картерном пространстве с применением опытных маслоотделителей не превышают 140 мм.вод.ст. при 360 л/мин.

Таблица 4 – Результаты моторных испытаний двигателя по определению выбросов вредных веществ с различной системой вентиляции картера

Исполнение системы вентиляции картера	NOx	CH	CO	PT
	г/кВт·ч			
ESC				
Базовая	10,126	0,234	0,242	0,0117
Разработанная	9,840	0,230	0,252	0,0121
Разница, %	-2,82	-1,71	4,13	3,42
ETC				
Базовая	8,75	0,30	0,81	0,017
Разработанная	**8,26**	**0,292**	0,84	0,0177
Разница, %	-5,60	-2,67	3,70	4,12

Анализом результатов по значениям выбросов вредных веществ установлено, что закрытое исполнение системы вентиляции картера на высокофорсированном V-образном автомобильном дизеле «КАМАЗ» 8ЧН 12/13 оказывает не значительное влияние на экологические показатели двигателя. Оксиды азота (NOx) и углеводороды (CH) содержащиеся в отработавших газах снижаются в зависимости от циклов

испытания двигателя от 1,71 до 5,6 %. В свою очередь, оксиды углерода (CO) и взвешенные (твердые) частицы (PT) незначительно растут от 3,42 до 4,13, в зависимости от циклов испытания двигателя. Снижение содержания NOx и CH, а также повышение CO и PT можно объяснить снижением максимальной температуры цикла рабочего процесса и как следствием снижением давления сгорания. Зафиксированный незначительный унос масла (табл. 3) из системы вентиляции на вход в систему впуска также оказывает свое негативное влияние на повышение PT и CO.

Для дальнейшего повышения эффективности маслоосаждения в системе необходимо применение специального волокнистого материала. Данный материал используется во всех импортных маслоотделителях, в разработанных опытных маслоотделителях используется металлическая сеточка, без ограниченного срока службы (при засорении имеется возможность продуть или промыть), в отличии от специального волокнистого материала, с ограниченным сроком службы не более 7500 ч. или ориентировочно 450 т.км. пробега (далее замена). С целью отслеживания необходимости очистки металлической сеточки в маслоотделители и избегания дальнейшего повышения давления в картерной полости, рассматривается установка индикационного клапана, который срабатывает при достижении определенного давления в маслоотделителе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Разработаны расчётные модели, описывающие процессы прорыва отработавших газов из камеры сгорания в полость картерного пространства с учетом конструкции применяемых поршневых колец, свойств материалов из которых изготовлены поршни и гильзы цилиндров двигателя, а также режимов работы двигателя. Расчётные модели позволяют определить основной поток и объемный расход картерных газов в цилиндропоршневой группе через зазоры в горячем состоянии при работе двигателя, в частности установлено:

- влияние перепуска картерных газов на эффективные показатели высокофорсированного V-образного автомобильного дизеля 8ЧН 12/13: подача картерных газов во впуск двигателя несущественно ухудшает топливную экономичность, особенно на низких режимах работы до 0,4 г/кВт·ч при частоте 900 1/мин; подача картерных газов во впуск незначительно снижает максимальное давление сгорания до 0,3%, так как снижается масса свежего заряда; отношение расхода масла на угар по отношению к допустимому значению уноса масла из системы вентиляции (ISO 17536) составляет менее 1%; отношение расхода картерных газов к общему расходу воздуха (или расходу отработавших газов) двигателя составляет до 3 %.

- действительные геометрические параметры компонентов в рабочем (горячем) состоянии для дальнейшего расчета газодинамического анализа прорыва картерных газов через цилиндропоршневую группу. Определены максимальные значения: температур поршня 305^0C и гильзы цилиндров 218^0C; деформации поршня 0,32 мм и гильзы цилиндров 0,41 мм. Определены требования к геометрии и материалу компонентов цилиндропоршневой группы для снижения деформации и повышения прочности компонентов.

- объем картерных газов, попадающий в картерную полость при различных частотах вращения коленчатого вала, максимальное значение 180 л/мин при частоте вращения коленчатого вала 1900 1/мин. Расчетным путем подобран оптимальный

комплект поршневых колец и оптимизирован расход картерных газов через элементы цилиндропоршневой группы до 27,2% (131 л/мин при 1500 1/мин и 100% нагрузки).

2) Установлены современные численные значения к обобщенным требованиям и критериям оценки работоспособности и эффективности системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля, на базе семейства двигателей «КАМАЗ» V8: соответствие ГОСТ Р 51998-2002 (исключить унос картерных газов в окружающую среду), применение закрытой системы вентиляции позволяет: обеспечить расход картерных газов попадающих в картерное пространство на уровне мировых аналогов в соответствии с рабочим объемом (например, 11 л в районе 110-130 л/мин); обеспечить унос масла на выходе из системы вентиляции не более 0,3 г/ч (на всех режимах); повысить эффективность системы вентиляции не ниже 95% (на всех режимах); обеспечить давление картерных газов в картерном пространстве близкое к атмосферному, в диапазоне ±100 мм.вод.ст. в соответствии с рекомендациями производителей импортных маслоотделителей (Mahle, Parker, Alfdex, Mann & Hummel и др.), но не более ±250 мм.вод.ст. (требования поставщиков комплектующих изделий ПАО «КАМАЗ»).

3) Разработана конструкция эффективной закрытой системы вентиляции картерного пространства, соответствующая установленным современным численным значениям обобщенных требований и критериев оценки работоспособности и эффективности системы. Разработаны и запатентованы полезные модели на варианты маслоотделителя для двигателей (3 патента) и новую схему картерного пространства (1 патент).

4) Разработаны программа и методика стендовых безмоторных и моторных испытаний компонентов открытой и закрытой системы вентиляции картерного пространства.

5) Проведено экспериментальное исследование влияния конструктивных параметров на унос масла и противодавление в системе вентиляции. Выполнена апробация результатов теоретических исследований. Разработанная закрытая система вентиляции картера соответствует установленным современным численным значениям обобщенных требований и критериев оценки работоспособности и эффективности при расходе картерных газов до 200 л/мин. Подтверждено отсутствие существенного влияния закрытой системы вентиляции картера на эффективные показатели двигателя, в пределах погрешности стендового оборудования. Установлено незначительное влияние на выбросы вредных веществ при применении закрытой системы вентиляции картера (в зависимости от цикла испытаний двигателя): снижение NOx до 5,6% и CH до 2,7%; рост CO до 4,1% и PT до 4,1%.

6) Сформированы рекомендации к конструктивным параметрам компонентов закрытой системы вентиляции картера на этапе проектирования и доводки высокофорсированных автомобильных дизелей. Для дальнейшего повышения эффективности разработанной закрытой системы вентиляции картера, рекомендовано применение специального волокнистого материала для фильтрующего элемента и индикационного клапана, срабатывающего при повышении определенного давления в системе и сообщающего о засоренности фильтрующего элемента. Разработанная в рамках научной работы закрытая система вентиляции картера может быть приме-

нима для других двигателей внутреннего сгорания, в зависимости от значений расхода картерных газов и компоновочных ограничений.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ

1. **Андриянов С.М.**, Башегуров С.В. Формирование требований к системам вентиляции картера современных дизелей // Журнал «Вестник СибАДИ». №6 (40) 2015. ФГБОУ ВПО «СибАДИ». С. 7-15.

2. **Андриянов С.М.**, Никишин В.Н., Зарипов Р.Э., Куликов А.С. Формирование высокого качества системы вентиляции картера на этапе проектирования и доводки высокофорсированного автомобильного дизеля // Журнал «Автомобильных Инженеров». №4 (105) 2017. Ассоциация автомобильных инженеров. Исследования, конструкции, технологии. – С. 16-19.

3. **Андриянов С.М.**, Никишин В.Н., Куликов А.С. Анализ и разработка маслоотделителя системы вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля // Журнал «Тракторы и сельхозмашины». №10, 2017. Московский Политех. – С. 20-27.

4. **Андриянов С.М.**, Матвеев А.А., Никишин В.Н., Фардеев Л.И. Анализ влияния закрытой системы вентиляции картера на топливную экономичность двигателя с воспламенением от сжатия // Журнал «Тракторы и сельхозмашины». №3, 2020. Московский Политех. – С. 3-9.

5. Матвеев А.А., Исрафилов И.Х., Никишин В.Н., **Андриянов С.М.** Термодинамический анализ эффективных показателей рабочего процесса дизельного двигателя с открытой и закрытой системой вентиляции картера // Журнал «Труды НАМИ». №4, 2021. Москва, НАМИ. – С. 22-30.

Патенты на полезные модели

6. Патент на полезную модель № 108805. Устройство для вентиляции картерного пространства двигателя внутреннего сгорания // Башегуров С.В., **Андриянов С.М.**, Ямаев А.С. – 2011. – 5 С.

7. Патент на полезную модель № 111582. Маслоотделитель системы вентиляции картера двигателя внутреннего сгорания // Башегуров С.В., **Андриянов С.М.**, Ямаев А.С. – 2011. – 7 С.

8. Патент на полезную модель № 111583. Маслоотделитель системы вентиляции картера двигателя внутреннего сгорания (варианты) // Башегуров С.В., **Андриянов С.М.**, Хусаинов И.Н., Ямаев А.С. – 2011. – 7 С.

9. Патент на полезную модель № 169135. Маслоотделитель системы вентиляции картера двигателя внутреннего сгорания // Ямаев А.С., **Андриянов С.М.**, Минеханов И.И., Хусаинов И.Н., Григорьев М.В. – 2016. – 7 С.

Другие публикации

10. **Андриянов С.М.**, Румянцев В.В. Опытный стенд для исследования систем вентиляции картера дизелей // V Камские чтения: сб. докл. всерос. научно-практической конференции. В 3-х ч. Часть 1. / Под ред. Л.А. Симоновой. СПб.: Из-

дательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2013. – С.90-92.

11. **Андриянов С.М.**, Румянцев В.В. Анализ системы вентиляции картера современных дизелей и их будущее // VI Камские чтения: сб. докл. всерос. научно-практической конференции. В 3-х ч. Часть 1. / Под ред. Л.А. Симоновой. СПб.: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2014. – С.141-144.

12. **Андриянов С.М.**, Румянцев В.В. Формирование требований к системам вентиляции картера современных дизелей // VI Камские чтения: сб. докл. всерос. научно-практической конференции. В 3-х ч. Часть 1. / Под ред. Л.А. Симоновой. СПб.: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2014. – С. 144-147.

13. **Андриянов С.М.**, Башегуров С.В. Анализ и формирование требований к системам вентиляции картера дизелей // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки. Сб. докл. в 3-х ч. Книга 3. / Под ред. В.Ю. Кирничный. СПб.: Издательско-полиграфический центр СибАДИ, 2014. - С.240-246.

14. **Андриянов С.М.**, Румянцев В.В. Формирование требований к системам вентиляции картера современных дизелей // Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского федерального университета 2014 года: сборник тезисов. В 2 т. Том 2. / Печатается по рекомендации редакционно-издательского совета Казанского (Приволжского) федерального университета – Издательство Казанского университета, 2014. – С.260-261.

15. **Андриянов С.М.** Разработка методики проведения испытаний системы вентиляции картера дизелей для формирования требований к ней // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2015. В 2-х ч. Часть 1. / Модератор: Н.Ф. Кашапов – Казань: Фолиант, 2015. – С.247-251.

16. **Андриянов С.М.**, Хабибуллин Р.Г. Анализ систем вентиляции картера и их перспективы // VIII Камские чтения: сб. докл. всероссийской научно-практической конференции. Под ред. Л.А. Симоновой. Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2016. –С.185-188.

17. **Андриянов С.М.**, Хабибуллин Р.Г. Система вентиляции картера дизеля, перспективы развития // «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования»: сборник научных трудов по материалам ежегодных конференций. Том 3, выпуск 2 (5). Под ред. А.И. Новикова. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 2016. – С.206-209.

18. **Андриянов С.М.**, Хабибуллин Р.Г., Куликов А.С. Разработка маслоотделителя системы вентиляции картера дизельных двигателей // «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016» В 2-х ч. Часть 1. / Модератор: Н.Ф. Кашапов – Казань: Фолиант, 2016. – С.251-255.

19. **Андриянов С.М.**, Хафизов Р.Х., Фардеев Л.И. Разработка маслоотделителя системы вентиляции картера дизельного двигателя // Сборник тезисов докладов

международной научно-технической конференций: "Двигатель-2017" / сост. Зенкин В.А., Мягков Л.Л.-М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. с. 72-73.

20. **Андриянов С.М.**, Ямаев А.С., Башегуров С.В., Никишин В.Н. Анализ гидрозатвора системы вентиляции картера дизельного двигателя // IX Камские чтения: всероссийская научно-практическая конференция. Под ред. Л.А. Симоновой. Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2017. – С.227-231.

21. **Андриянов С.М.**, Ямаев А.С., Куликов А.С. Формирование высокого качества системы вентиляции картера на этапе проектирования и доводки высокофорсированного автомобильного дизеля // Материалы Международной научно-технической конференции. Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2017. (МНТК ИМТОМ 2017). В 2-х ч. Часть 1. Казань: Фолиант, 2017. - С. 74-77.

22. **Андриянов С.М.**, Хасанов А.А., Никишин В.Н. Анализ требований к системе вентиляции картера высокофорсированного автомобильного дизеля // X международная научно-практическая конференция «Двигатели и компоненты транспортных средств: разработка и производство, эксплуатация и сервисное обслуживание», НПО «ТУРБОТЕХНИКА» г. Протвино, 27-28 июня 2017. – С.60-65.

23. **Андриянов С.М.**, Никишин В.Н., Куликов А.С. Экспериментальные исследования маслоотделителей закрытой системы вентиляции картерного пространства дизельного двигателя // IV Всероссийскую научно-техническую конференцию «Автомобиле- и тракторостроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства», ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» г. Ижевск, 24 апреля 2020. – С. 5-10.

АНДРИЯНОВ Сергей Михайлович
УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ КАРТЕРА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ДОВОДКИ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ
Автореферат дис. на соискание учёной степени канд. тех. наук
Подписано в печать 16.10.2023 г. Заказ № 53
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
ООО «Барс-НЧ» ИНН 1650192358