На правах рукописи

НИКИТИН ПАВЕЛ ДМИТРИЕВИЧ

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ КОНТАКТНО-СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ И ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре техники и технологий транспорта инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель:	**Асоян Артур Рафикович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой техники и технологий транспорта инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»
Официальные оппоненты:	**Онищенко Дмитрий Олегович**, доктор технических наук, профессор кафедры Э-2 «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»
	Дунин Андрей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплотехника и автотракторные двигатели» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
	Хмелев Роман Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортно-технологические машины и процессы» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита диссертации состоится « 30 » ноября 2026 года в 16:00 на заседании диссертационного совета ПДС 2022.020 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: 115903, г. Москва, ул. Подольское шоссе дом 8, ауд. 3036.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6, и на сайте https://www.rudn.ru/science/dissovet/dissertacionnye-sovety/pds-2022020

Автореферат разослан «___» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н, доцент Агасиева С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергообеспечение многих отраслей народного хозяйства и оборонного комплекса РФ, особенно в труднодоступных и арктических регионах, невозможно без наличия надежных и эффективных автономных энергетических установок, основным агрегатом которых в большинстве случаев являются поршневые двигатели внутреннего сгорания. Именно они обеспечивают подавляющий объём энергии, потребляемой мобильной техникой во всех отраслях народного хозяйства как в нашей стране, так и за её пределами.

Однако именно на долю ДВС приходится основная часть (более половины) выходов из строя автономных энергетических установок, а на сервисные воздействия и ремонт приходится не менее 20% трудоемкости работ. При этом существенная часть этих показателей приходится на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ).

Кроме того, состояние деталей ЦПГ влияет на такие показатели, как расход масла на угар, эффективная мощность, расход топлива и пусковые качества двигателя.

Поршневые кольца составляют небольшую долю в составе ЦПГ, однако именно они в совокупности с топливной аппаратурой определяют работоспособность, экономичность и долговечность ДВС.

В данной работе решались вопросы повышения показателей свойств надежности цилиндропоршневой группы двигателей, таких как:

- безотказность - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки;
- долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Степень разработанности темы.

Анализ литературных источников показал, что большой вклад в решение проблемы повышения долговечности и эффективности эксплуатации двигателей внутреннего сгорания и в том числе в методы расчета формы поршневых колец в свободном состоянии внесли такие отечественные ученые, как А.В. Адамович, А.Я. Александров, Б.Я. Гинцбург, Ю. А. Голицын, В. Г. Гончаренко, А.Ю. Дунин, Ю. А. Коган, А. П. Мартынов, В. П. Молдованов, Д.О. Онищенко, А. Р. Пикман, Н. И. Савицкий, Р.Н. Хмелев. Из зарубежных ученых необходимо отметить, К. Энглиша, K. Reinhardt, J. Prescott, H. Arnold, A. Iskra, E. Tomanik, V. Dunaevsky.

В публикациях, посвященных теме исследования в основном методы содержат ряд заложенных методических погрешностей, что естественным образом отображается на результатах расчетов. На определенных этапах это было приемлемо, однако в настоящее время, когда к удельной мощности, экологичности и экономичности силовых установок требования существенно повысились, эти методические погрешности стали критичными и потребовалось их устранение.

Таким образом задача исключения из результатов расчетов принимаемых допущений, методических и вычислительных погрешностей является актуальной, требующей своего решения на современном этапе.

Результаты работы показали не только свою актуальность, но и востребованность реальным промышленным сектором. Это подтверждается как актом о внедрении, так и протоколом о намерении использования этих разработок.

В соответствии с вышеизложенным сформулированы цель и задачи исследований.

Цель работы: Повышение надежности уплотнения камеры сгорания ДВС путем обеспечения постоянства силового замыкания сопряжения кольцо – гильза цилиндра в диапазоне возможных отклонений формы и размеров гильзы цилиндра.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Определить теоретические зависимости, достоверно описывающие силовое взаимодействие поршневого кольца и гильзы цилиндра и разработать методику оптимизации контактно-силового взаимодействия поршневых колец и гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания.
2. Исследовать деформации гильзы, вызываемые затяжкой головок (крышек) блока цилиндров и износом в пределах нормативного срока эксплуатации.
3. На основании вычислительных экспериментов предложить конструкцию комплекта поршневых колец, обеспечивающих надежную герметизацию камеры сгорания в широком диапазоне возможных износов и деформаций гильзы.
4. Изготовить поршневые кольца предложенной конструкции и экспериментально определить эффективность уплотнения камеры сгорания при их использовании.
5. Определить экономическую эффективность работы.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует следующим разделам паспорта научной специальности 2.4.7. – Турбомашины и поршневые двигатели, а именно:

- **пункту 1** «Разработка научных основ и экспериментальные исследования термодинамических, механических, тепло- и массообменных, физико-химических, гидрогазодинамических процессов в турбомашинах и поршневых двигателях, исследования общих свойств и принципов функционирования отдельных систем, элементов, вспомогательного оборудования турбомашин и поршневых двигателей»;
- **пункту 2** «Разработка физико-математических моделей, пакетов прикладных программ, цифровых двойников, методов экспериментальных исследований, теоретические и экспериментальные исследования с целью повышения эффективности, надежности и экологичности рабочих процессов турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования в составе объектов применения»;

- **пункту 3** «Экспериментальные исследования и физико-математическое моделирование динамики, напряженно-деформированного состояния, прочности и разрушения материалов, узлов и механизмов, их надежности, режимов работы турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования».

Объект исследования – поршневые кольца.

Предмет исследования – закономерности, обосновывающие постоянство силового замыкания сопряжения кольцо – гильза цилиндра в диапазоне возможных отклонений формы и размеров гильзы цилиндра.

Научную новизну работы представляют:

- уточненный метод расчета формы нейтральной линии поршневого кольца;
- аналитически обоснованная и экспериментально подтвержденная методика определения параметров силового замыкания сопряжения кольцо – гильза цилиндра.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке методики определения формы нейтральной линии поршневых колец, которая позволила отказаться от использования устоявшихся допущений и исключить существенную долю методических и вычислительных погрешностей. Полученные зависимости уточняют существующие представления о контактно-силовом взаимодействии кольца и гильзы и создают основу для аналитического прогнозирования работоспособности сопряжения на этапе проектирования.

Практическая значимость исследования заключается в применении методики определения параметров контактно-силового взаимодействия поршневого кольца с гильзой цилиндра и ее использование при проектировании поршневых колец, что способствует повышению их эксплуатационной надёжности и межремонтного ресурса ЦПГ ДВС в целом.

Методология и методы исследования.

Исследования выполнялись в соответствии с требованиями действующих нормативных документов (стандартов, технических регламентов и требований).

Методика проведения исследований основывалась на анализе базовых явлений, влияющих на долговечность деталей ЦПГ: лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания, вычислительные эксперименты, проводимые на современной материальной и теоретической базе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование методики расчета формы поршневых колец в свободном состоянии.
2. Теоретическое обоснование методики определения параметров силового замыкания сопряжения кольцо – гильза цилиндра.
3. Результаты аналитических экспериментов и стендовых и эксплуатационных испытаний.

Достоверность и обоснованность научных результатов диссертационного исследования обеспечивается:

1. Использованием фундаментальных законов теории упругости, механики твёрдого тела и соответствующих этим законам уравнений и граничных условий, а также современных аналитических и численных методов реализации математических моделей.

2. Применением для обоснования математических моделей достоверных данных, полученных автором в лабораторных и производственных условиях.

3. Экспериментальным подтверждением адекватности разработанных математических моделей контактно-силового взаимодействия поршневых колец и гильзы цилиндра.

4. Удовлетворительной сходимостью результатов теоретических расчётов и экспериментальных исследований (расхождение не превышает 1,5%).

5. Согласованностью основных положений работы с результатами исследований других авторов, опубликованными в открытой печати.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2011» награжден медалью и дипломом «Лауреат ВВЦ»;
- 30-м международном научно-техническом семинаре имени В.В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (Саратов, 2017);
- *International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control* (*DS ART* 2019), 1 ноября 2019 г., Чолпон-Ата, Кыргызстан;
- 78-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (Москва, 2020);
- 79-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (Москва, 2021);
- Конференции «*Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex*» (TIRVED 2021);
- 81-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (Москва, 2023);
- XXXVIII международной научно-технической конференции имени В.В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (Саратов, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 научная работа, из них 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в Перечень ВАК, 1 работа в изданиях, входящих в базу *RSCI*, 1 работа в изданиях, входящих в журналы индексируемые в международной базе научного цитирования *Scopus*, а также получены патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все основные идеи и разработки, положенные в основу метода расчета формы нейтральной линии поршневого кольца в

свободном состоянии, и методика определения параметров контактно-силового взаимодействия поршневого кольца и гильзы цилиндра принадлежат автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, списка литературы, приложения. Объем диссертации составляет 111 страниц основного текста, содержащего 8 таблиц и 55 рисунков, список литературы содержит 72 источника отечественных и зарубежных авторов, 95 страниц приложений.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы и используются как в процессе производства, так и при проектировании новых типоразмеров поршневых колец в ООО «ППК», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы, изложены научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации «Основные причины неудовлетворительной работы и выхода из строя ЦПГ» на основании литературных источников и авторских наработок рассмотрены состояние отечественного двигателестроения, условия работы, основные причины отказов ЦПГ, представлен подробный анализ работ различных авторов и научных коллективов, посвященных расчету, производству и проблемам эксплуатации поршневых колец. В частности, рассмотрены работы, посвященные проблемам эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в целом и поршневых колец в частности. Проанализированы имеющиеся в открытых публикациях методы расчета формы поршневых колец в свободном состоянии и способы оценки параметров их контактно-силового взаимодействия с гильзой цилиндра.

Выявлено, что наибольшее количество отказов ДВС приходится на ЦПГ (рисунок 1).

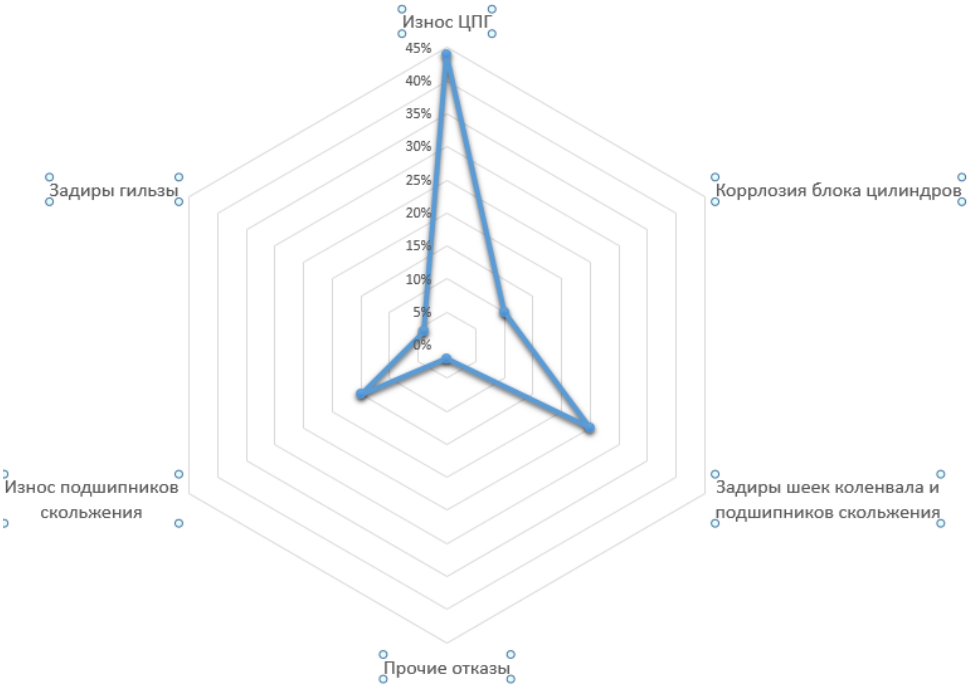


Рисунок 1 - Распределение отказов по системам двигателя.

На основании анализа данных из открытых источников сформулирована проблемная ситуация, заключающаяся в противоречии между потребностью отечественного машиностроения в качественных поршневых кольцах с одной стороны и отсутствием независимого от импортных поставок отечественного производителя – с другой.

Проведенный анализ имеющейся в открытой печати информации по теме исследования позволил сформулировать цель работы, направленную на разрешение проблемной ситуации и задачи для её достижения.

Во второй главе «Теоретическое обоснование методики расчета формы поршневых колец» представлены теоретические обоснования и разработанные методы как расчета формы поршневых колец в свободном состоянии, так и определения параметров контактно-силового взаимодействия кольца и гильзы цилиндра – что необходимо для надежного аналитического прогнозирования ресурса работы сопряжения.

Согласно информации из открытых источников расчет формы поршневых колец (рисунок 2) сводится к решению дифференциального уравнения, связывающего форму нейтральной линии кольца в свободном состоянии от основных параметров кольца – номинального радиуса нейтральной линии r_n, момента инерции сечения кольца J, осевой высоты кольца b и требуемого распределения радиальных давлений кольца на поверхность гильзы $p(\phi)$:

$$\frac{EJ}{br_n^4}\left[\frac{d^4u(\varphi)}{d\varphi^4} + 2\frac{d^2u(\varphi)}{d\varphi^2} + u(\varphi)\right] = p(\varphi) \qquad (1)$$

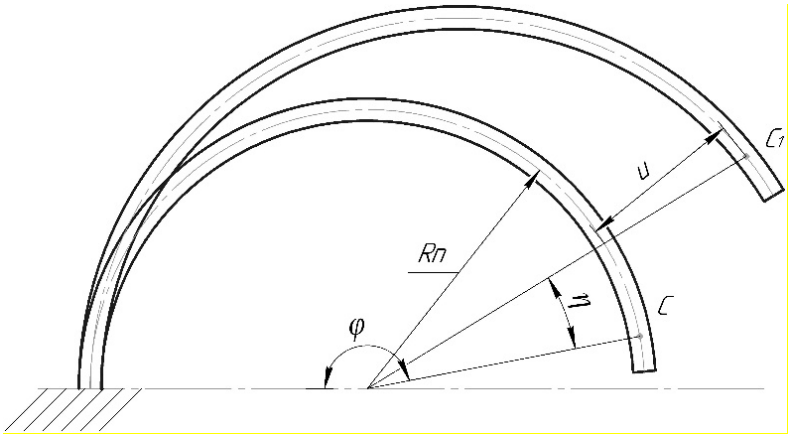


Рисунок 2 - Расчетная схема вычисления положения осевой линии кольца

Рисунок 2 иллюстрирует входящие в уравнение (1) величины при переходе кольца из свободного состояния в сжатое. Однако, учитывая, что уравнение (1) не имеет аналитического решения относительно перемещений u, в открытой печати представлены только эмпирические приблизительные решения, содержащие в своем составе достаточно большие погрешности.

Наиболее приемлемой и распространенной методикой расчета до последнего времени являлась методика расчета формы кольца в свободном состоянии, основанная на решении уравнения изгиба кривого бруса малой

кривизны:

$$\frac{1}{R}-\frac{1}{\rho}=\frac{M}{E\cdot J}, \text{ где:} \quad (2)$$

R – номинальный радиус нейтральной линии кольца в рабочем (сжатом до теплового зазора) состоянии; ρ – радиус кривизны нейтральной линии кольца в свободном состоянии; M – величина изгибающего момента в интересующей точке нейтральной линии; J – момент инерции сечения кольца; E – модуль упругости материала кольца.

Однако все известные из открытых публикаций методы решения также содержат численные методы, сопряженные с большими вычислительными погрешностями.

При этом, методики расчета формы поршневых колец в свободном состоянии, используемые ведущими зарубежными исполнителями, до последнего времени были недоступны. В последнее время появились публикации, в которых приводятся следующие формулы определения геометрических координат нейтральной линии кольца в свободном состоянии (согласно схеме расчета, представленной на рисунке 3):

$$\frac{x}{r_m}=cos\varphi+K(\varphi\cdot sin\varphi+\frac{sin^2\varphi}{2}+cos\varphi-1) \quad (3)$$

$$\frac{y}{r_m}=sin\varphi+K(\frac{\varphi}{2}+sin\varphi-\varphi\cdot cos\varphi-\frac{sin\varphi cos\varphi}{2}), \text{ где:} \quad (4)$$

K – характеристический параметр кольца, определяемый по одной из формул (5 … 9):

$$K=12\frac{p_0}{E}\left(\frac{r_m}{g_p}\right)^3 \quad (5)$$

$$K=\frac{F_t r_m^2}{E\cdot J} \quad (6)$$

$$K=\frac{3\cdot(d-g_p)\cdot F_t}{E\cdot h_p\cdot g_p^3} \quad (7)$$

$$K=\frac{3\cdot(d-g_p)\cdot F_t}{E\cdot h_p\cdot g_p^3} \quad (8)$$

$$K=\frac{m}{3\cdot\pi r_m} \quad (9)$$

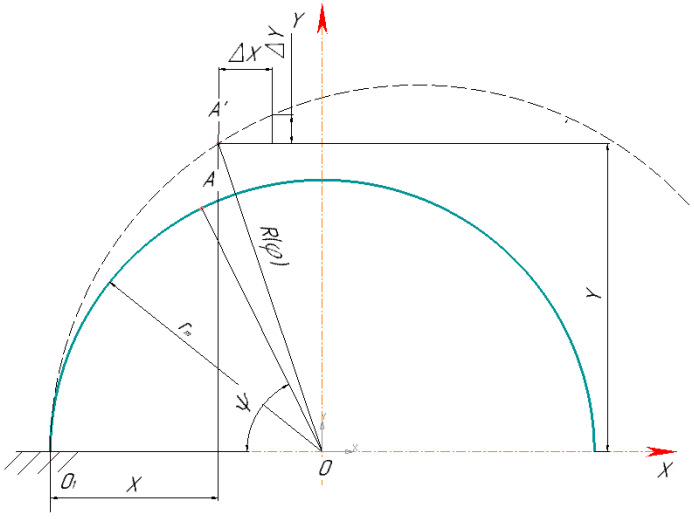


Рисунок 3 - Расчетная схема вычисления положения осевой линии кольца

То есть, за рубежом так же используют чисто эмпирические формулы.

В работе предлагается решение уравнения (1) методом конечных разностей в центральных производных с шагом H. При этом, уравнение (1) сводится к следующему виду:

$$\frac{EJ}{16br_0^4H^4}[u_{-4} + (8H^3 - 4)u_{-2} + (16H^4 - 16H^3 + 6)u_0 + (8H^3 - 4)u_2 + u_4] = p(\varphi) \quad (10)$$

Где i принимает значения от 0 до n (n – количество точек разбиения кольца на дуге 0 … 180°, соответствующей половине кольца в силу его симметрии). Для вычислений при i=0…3 будем использовать симметрию кольца, т.е. зависимость: $u_{-i} = u_i$. Для вычислений при i=N-4…N воспользуемся экстраполяцией с помощью полинома Лагранжа:

$$u_{n+1} = -u_{n-3} + 4u_{n-2} - 6u_{n-1} + 4u_n \quad (11)$$

$$u_{n+2} = -4u_{n-3} + 15u_{n-2} - 20u_{n-1} + 10u_n \quad (12)$$

$$u_{n+3} = -10u_{n-3} + 36u_{n-2} - 45u_{n-1} + 20u_n \quad (13)$$

$$u_{n+4} = -20u_{n-3} + 70u_{n-2} - 84u_{n-1} + 35u_n \quad (14)$$

Тогда левая часть уравнения (1) в матричной форме примет вид 15:

$$A = \frac{1}{16H^4} \cdot \begin{vmatrix}
-16H^3+6 & 0 & 16H^3-8 & 0 & 2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 16H^4-8H^3+2 & 0 & 8H^3-3 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
8H^3-4 & 0 & 16H^4-16H^3+7 & 0 & 8H^3-4 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
0 & 8H^3-3 & 0 & 16H^4-16H^3+6 & 0 & 8H^3-3 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
0 & 1 & 0 & 8H^3-4 & 0 & 16H^4-8H^3+2 & 0 & 8H^3-4 & 0 & 1 & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
0 & \dots & 1 & 0 & 8H^3-4 & 0 & 16H^4-16H^3+6 & 0 & 8H^3-4 & 0 & 4 \\
0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 8H^3-4 & -4 & 16H^4-16H^3+5 & -20 & 8H^3+6 \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & -10 & 32H^3+20 & 16H^4+64H^3-15 & 32H^3+4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -160H^3-4 & 128H^3+6 & -160H^3-3 & 16H^4+64H^3+1
\end{vmatrix} \quad (15)$$

А правая часть, соответственно, вид 16:

$$P = \begin{vmatrix} p(0) \\ p(\varphi_1) \\ \dots \\ p(\varphi_n) \end{vmatrix} \quad (16)$$

Соответственно, матрица искомых перемещений точек кольца:

$$U = \begin{vmatrix} u(0) \\ u(\varphi_1) \\ \dots \\ u(\varphi_n) \end{vmatrix} \quad (17)$$

А уравнение (1) в матричной форме в центральных конечных разностях примет вид:

$$A \cdot U = P \quad (18)$$

Решение этого уравнения выглядит следующим образом:

$$U = A^{-1} \cdot P \quad (19)$$

Решение уравнения (1), в конечном итоге, сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что не содержит в своём составе вычислительных сложностей.

Так же в работе предложен метод понижения порядка дифференциального уравнения до второго, что снижает трудоёмкость вычислений, а СЛАУ сводится к следующему виду:

$$\begin{vmatrix} 2+H^2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2-H^2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & & \dots & & \dots & & \dots \\ 0 & \dots & -1 & -2-H^2 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & & \dots & & \dots & & \dots \\ & & & & -1 & -2-H^2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -2 & -2H^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{H^2 \cdot M(\varphi_1) \cdot r_n^2}{EJ} \\ \frac{H^2 \cdot M(\varphi_2) \cdot r_n^2}{EJ} \\ \dots \\ \frac{H^2 \cdot M(\varphi_i) \cdot r_n^2}{EJ} \\ \dots \\ \frac{H^2 \cdot M(\varphi_{n-1}) \cdot r_n^2}{EJ} \\ \frac{H^2 \cdot M(\varphi_n) \cdot r_n^2}{EJ} \end{vmatrix} \quad (20)$$

Изменение угловых координат h = y – f при этом определяется по следующей зависимости:

$$\eta = \frac{1}{r_n} \int_0^{\varphi} u(\varphi) d\varphi \quad (21)$$

Таким образом решена задача определения формы кольца в свободном состоянии.

Для определения параметров контактно-силового взаимодействия кольца и гильзы цилиндра предлагается в уравнение (1) нагрузку $p(\varphi)$ рассматривать как реакцию основания с двумя коэффициентами постели. При использовании этой модели реакция основания в уравнении (1) определяется следующим образом:

$$q = ky - 2ty'', \quad (22)$$

где: y – прогиб кольца, равный деформации цилиндра под воздействием контактных давлений кольца; k и t – коэффициенты постели, определяемые по следующим формулам:

$$k = \frac{E_0 \delta}{\bar{H}(1-\upsilon_0^2)} \quad (23)$$

$$t = \frac{E_0 \delta \bar{H}}{12(1-\upsilon_0^2)} \quad (24)$$

где: E_0 – модуль упругости материала гильзы; υ_0 – коэффициент Пуассона материала гильзы; δ – толщина сжимаемого слоя гильзы; H – высота сжимаемого слоя гильзы.

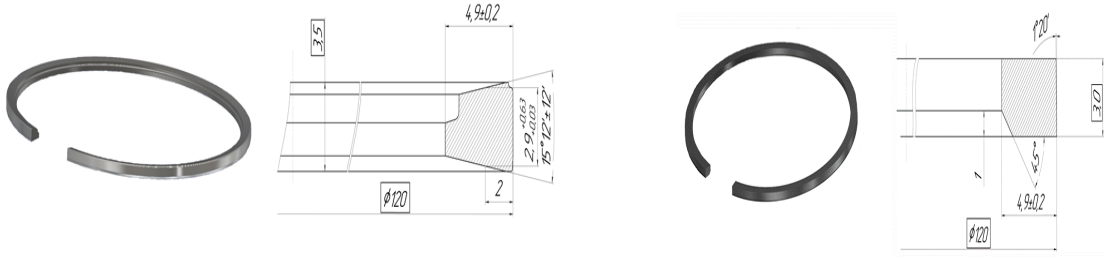
Соответственно, уравнение (1) примет следующий вид:

$$u(\varphi) + 2\frac{d^2u}{d\varphi^2} + \frac{d^4u}{d\varphi^4} = \frac{r^4}{EJ}\left[p(\varphi) - \frac{E_0\delta}{\bar{H}(1-\upsilon_0^2)}y - \frac{E_0\delta\bar{H}}{6(1-\upsilon_0^2)}y''\right] \quad (25)$$

Несмотря на определенные математические сложности, используя подробно описанный выше метод конечных разностей и сформулировав граничные условия, вытекающие из геометрии кольца (симметричности относительно оси «замок» - «спинка» и равенство 0 изгибающих моментов в крайних точках, удалось разработать и программно реализовать алгоритм решения СЛАУ линейных уравнений, представляющих собой разностные реализации уравнения (1) для различных угловых координат сечений кольца.

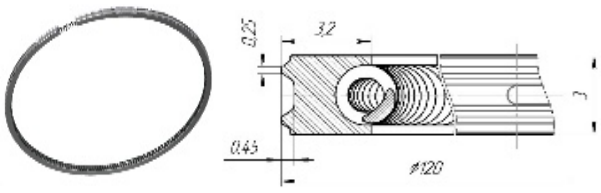
Предложенный математический аппарат позволил рассчитать форму средней линии кольца в свободном состоянии. Смоделировав контактно-силовое взаимодействие поршневых колец и гильзы цилиндра с учётом возможных отклонений от номинальной формы, возникающих при изготовлении и эксплуатации, удалось обеспечить полный контакт сопрягаемых деталей уже на этапе проектирования. Ранее отсутствие контакта выявлялось только в результате эксплуатационных испытаний, что влекло за собой временные и материальные затраты.

На основе конструктивных параметров поршня и гильзы выполнены расчеты формы, анализ приспособляемости и эскизное проектирование поршневых колец для ДГУ АД-200 на базе двигателя КАМАЗ 740.39. Результаты представлены на рисунке 4.



а) верхнее компрессионное

б) второе компрессионное



в) маслосъемное

Рисунок 4 - Результаты эскизного проектирования

В третьей главе диссертации «Программа и общая методика исследований» представлена предложенная программа проведения исследований (рисунок 5), а также частные методики.

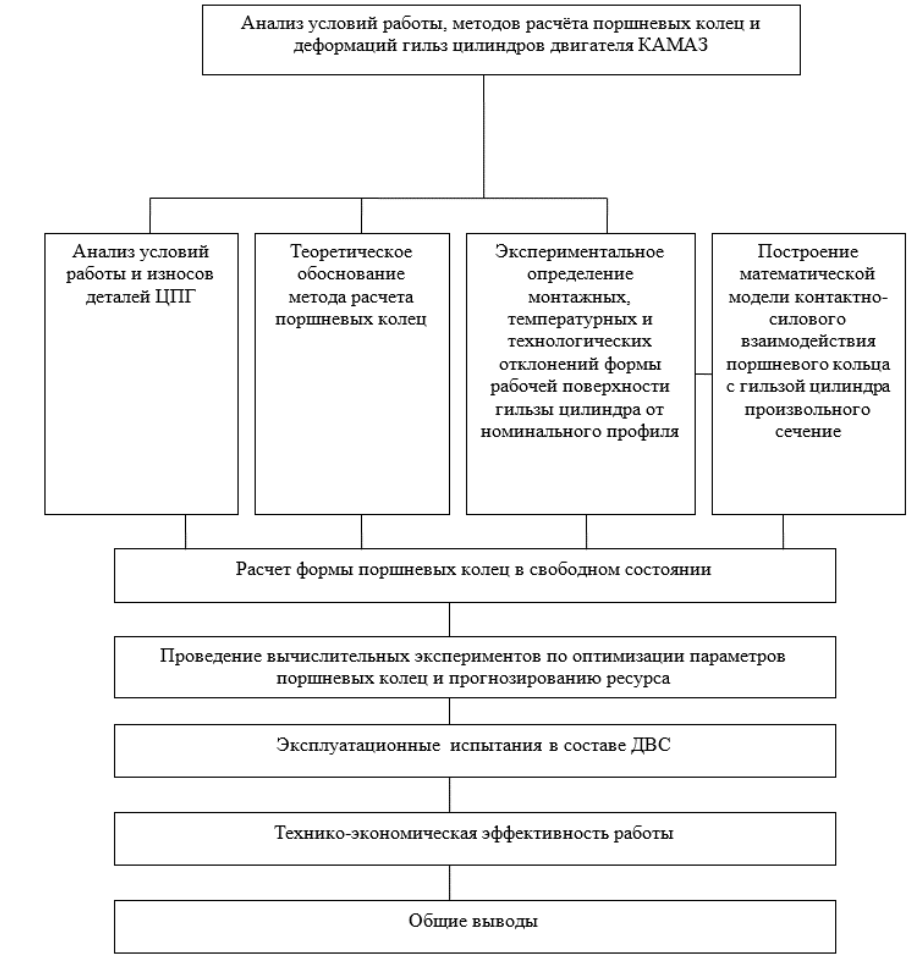


Рисунок 5 - Общая программа исследований

Разработаны экспериментальная и аналитическая методики определения деформации гильз цилиндра, методика проведения вычислительного эксперимента по адаптации поршневых колец к гильзе цилиндров, имеющей отклонение формы (стартовая страница работы программы расчета представлена на рисунке 6), методика определения эффективности работы ЦПГ и оценке ее ресурса в составе двигателя, а так же методика эксплуатационных испытаний и оценка технической эффективности работы.

В четвертой главе диссертации «Проектирование и изготовление экспериментального комплекта поршневых колец» осуществлен выбор исходных данных для расчета колец, в качестве которых использовались физико-механические и упругие свойства материалов (высокопрочный и серый специальный чугуны) и требуемые для обеспечения надежной работоспособности, приспособляемости и ресурса упругость, овальность. При выборе исходных данных для расчета колец опирались на эскизное проектирование, выполненное во 2 главе диссертационной работы.

Произведен расчет формы колец в свободном состоянии, оценены контрольные параметры произведенных колец и проведено аналитическое определение параметров контактно-силового взаимодействия изготовленных колец с гильзой, имеющей отклонения от номинальной формы, а также оценена работоспособность ЦПГ, укомплектованной экспериментальными кольцами.

Расчет формы колец в свободном состоянии осуществлялся с использованием авторского программного обеспечения *Piston Ring Design V*01.00.00 (рис. 6, 7).



Рисунок 6 - Стартовая страница работы программы расчета

Разрыв нейтральной линии в зоне замка замыкался степенным полиномом четвертой степени, что обусловлено плавностью и отсутствием ударных нагрузок в процессе резания и симметрией кольца относительно оси «замок» – «спинка». Соответственно четность степени полинома обусловлена симметрией, а степень – требованием равенства «0» 1-ой и 2-ой производных в точках сопряжения со средней линией кольца для обеспечения плавности резания.

Для аналитического определения контактно-силового взаимодействия компрессионных колец использовалась методика, изложенная в главе 3 диссертационной работы. При этом учитывалось, что реальная форма гильзы имеет отклонение от номинальной в виде овальности, а отдельные гильзы в процессе затяжки имеют огранку 4 порядка.

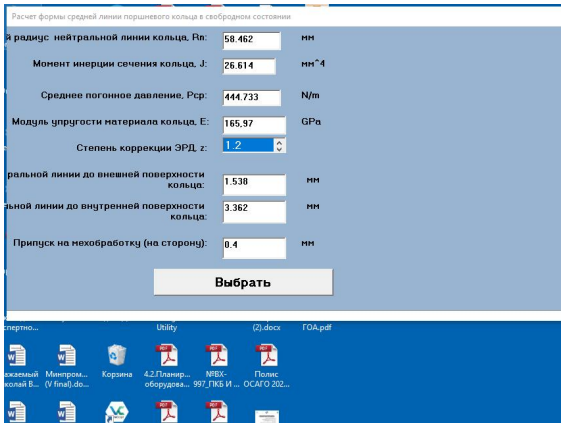


Рисунок 7 - Работа программы расчета (на этапе выбора исходных данных)

На первом этапе исследований оценивали сохранение непрерывности контактно-силового взаимодействия между верхним компрессионным кольцом и гильзой круглого поперечного сечения с увеличенным диаметром, что

возможно в соответствии с допуском на её изготовление, а также в процессе износа гильзы. Результаты представлены на рисунке 8.

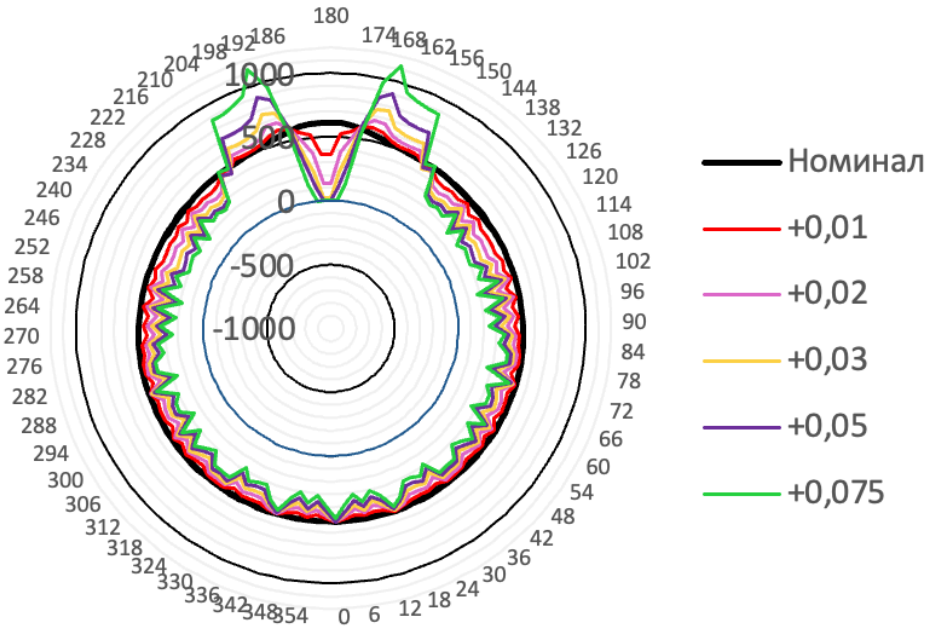


Рисунок 8 - Динамика изменения эпюры радиального давления при увеличении диаметра гильзы

Анализ расчетных данных показывает, что при увеличении номинального диаметра гильзы происходит снижение давления в зоне замка. При этом давление достигает нулевого значения при диаметре гильзы 120,75 мм, что не противоречит техническим требованиям двигателя.

Также следует обратить внимание на практически полное соответствие эпюры радиального давления (ЭРД) в гильзе номинального размера заданному распределению радиальных давлений, что характеризует сопоставимость полученных результатов и адекватность разработанной во 2 главе математической модели контактно-силового взаимодействия поршневого кольца и гильзы цилиндра.

Также оценивалось изменение ЭРД в гильзе, имеющей отклонение от заданной формы в виде овальности (в соответствии с данными, полученными в ходе экспериментов, представленных в главе 5). Результаты представлены на рисунке 9, из которого следует, что с увеличением овальности гильзы «грушевидный» характер ЭРД становится более ярко выраженным. При этом есть тенденция незначительного снижения давления в зоне 150 … 156^{o} от спинки кольца, что не приводит к снижению работоспособности кольца.

Проведенный анализ показывает, что параметры кольца были выбраны верно, а разработанный математический аппарат работает адекватно.

Кроме того, учитывая, что в силу стремления к снижению напряженности кольца в такой гильзе ориентируются по большой оси овала гильзы, их уплотняющая способность не снижается.

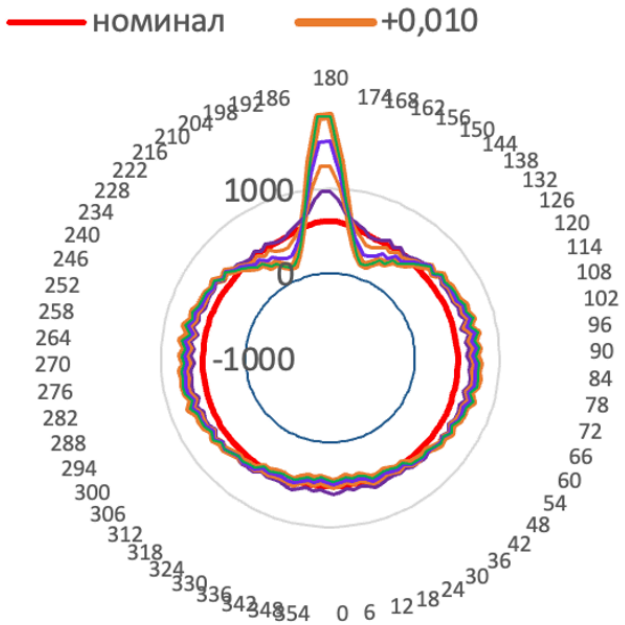


Рисунок 9 - Динамика изменения ЭРД при увеличении овальности гильзы

Оценка стабильности воспроизводства расчетной формы и требуемых параметров (таблица 1, 2, 3) проводилась путём контроля параметров по 40 колец каждого наименования и сопоставления запроектированных параметров реальным параметрам готовых поршневых колец.

Таблица 1 - Результаты контроля прилегаемости поршневых колец

№ п.п.	Параметр	Заданный параметр	У готового кольца		Заключение
			Диапазон	Среднее значение	
	2	3	4	5	6
	Прилегаемость	При введении кольца в калибр просвет не допускается	Отсутствует		Годные

Таблица 2 - Результаты контроля упругости и овальности верхних поршневых колец

№ п.п.	Параметр	Заданный параметр	У готового кольца		Заключение
			Диапазон	Среднее значение	
1	Упругость	25 … 35 Н	22 …35	32	Годные
2	Овальность	-0,02 … +0,02 мм	0 …0,018	0,006	Годные

Таблица 3 - Результаты контроля упругости и овальности вторых колец

№ п.п	Параметр	Заданный параметр	У готового кольца		Заключение
			Диапазон	Среднее значение	
1	Упругость	22 … 30 Н	22 …35	32	Годные
2	Овальность	0 … 0,060 мм	0 …0,058	0,048	Годные

Из таблиц 1, 2 и 3 следует, что все изготовленные кольца удовлетворяют заложенным в ходе расчета данным, следовательно, предложенная методика

расчета формы средней линии поршневого кольца в свободном состоянии обладает достоверностью и обеспечивает сходимость результатов.

В пятой главе диссертации «Результаты экспериментов и эксплуатационных испытаний» представлены результаты исследования монтажных деформаций гильз цилиндра двигателя дизель-генераторной установки (ДГУ). Усредненные по 8-и цилиндрам результаты представлены на рисунке 10, а направленность этих деформаций – на рисунке 11.

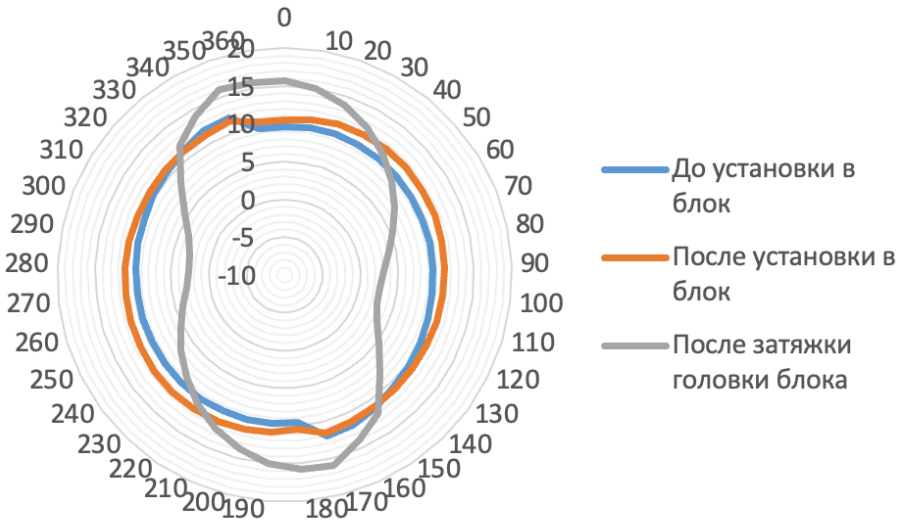


Рисунок 10 - Усредненные значения деформаций гильз

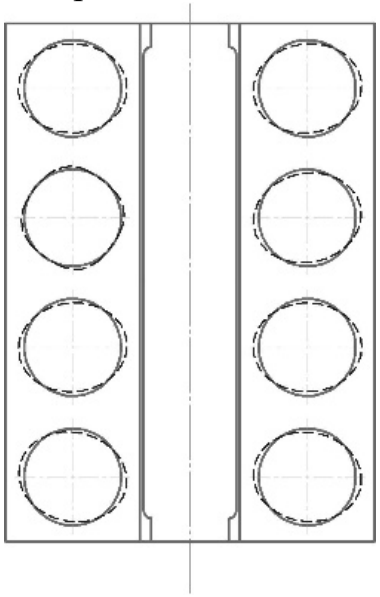


Рисунок 11 - Геометрическая направленность деформаций гильз в блоке

Анализ результатов замеров показал следующее:

- внутренний диаметр всех отобранных гильз удовлетворяет требованиям технической документации (Ø $120^{+0,03}$);
- после установки гильз в блок цилиндров их внутренний диаметр незначительно изменяется;
- после затяжки болтов крышек цилиндров внутренняя поверхность гильз приобретает эллипсоидальную форму, при этом большая ось эллипса лежит

в плоскости перекладки поршня. Максимальная величина эллипсности составляет 36 мкм;

- вдоль оси гильзы деформация увеличивается от верхнего пояса к нижнему;
- после монтажа большинство гильз имеют овальность внутреннего диаметра, однако часть гильз (например, гильза № 6 в средней части) имеет ярко выраженную огранку 4-й степени. Очевидно, что этот факт необходимо учитывать при анализе работоспособности колец;
- результаты эксперимента согласуются с литературными данными.

Также в данной главе представлены результаты подконтрольной эксплуатации дизеля КАМАЗ в составе ДГУ. В качестве контролируемого параметра технического состояния цилиндропоршневой группы принималось давление в камерах сгорания двигателя (компрессия), так как именно этот параметр однозначно характеризует уплотняющую способность ЦПГ в целом и поршневых колец – в частности. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Значение параметров технического состояния цилиндров, укомплектованных экспериментальными и серийными кольцами

№ п/п	**Время проведения замеров**	**Давление в цилиндрах, МПа**	
		Экспериментальные кольца	**Серийные кольца *(Federal Mogul*)**
1	После сборки двигателя	3	3
2	После прохождения периода приработки	2,98	2,82
3	После наработки *tк*	2,84	2,78

На основании этих данных была проведена оценка остаточного ресурса двигателя, укомплектованного экспериментальными кольцами, которая, основываясь на известных из открытых источников сведениях о линейном изменении диагностируемого параметра от наработки дизеля, составит не менее 10500 моточасов работы при рекомендуемом заводом изготовителем значении 10000 моточасов. Прогнозируемый ресурс находится на уровне, превышающем ресурс нового двигателя, укомплектованного серийными кольцами. Результаты подконтрольной эксплуатации подтверждены соответствующим актом.

В шестой главе диссертации «Технико-экономическая эффективность работы» приведена оценка экономического эффекта от внедрения предложенных мероприятий. Эффект складывается из экономии от повышения долговечности ЦПГ и ресурса дизеля, а также из экономии от снижения себестоимости поршневых колец.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных исследований решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности уплотнения камеры сгорания ДВС путем обеспечения постоянства силового замыкания сопряжения кольцо – гильза цилиндра в диапазоне возможных отклонений формы и размеров гильзы цилиндра.

1. Определены теоретические зависимости, достоверно описывающие силовое взаимодействие поршневого кольца и гильзы цилиндра.

Предложена методика оптимизации параметров контактно-силового взаимодействия кольца и гильзы произвольной формы, что позволило уже на этапе проектирования поршневых колец учитывать возможные деформации гильзы (технологические, монтажные, температурные), а при изготовлении, приспособляемость колец позволяет обеспечивать надежную герметизацию камеры сгорания от картерной полости при самых неблагоприятных условиях. Разработан алгоритм определения формы нейтрально линии поршневого кольца в свободном состоянии, позволяющий снизить погрешность расчета до 1,5%.

2. Исследованы деформации гильз цилиндров, вызываемые затяжкой головок (крышек) блока цилиндров, выявлено, что в результате установки в блок вследствие воздействия монтажных напряжений все гильзы подверглись деформациям. Подавляющее большинство приняло овальную форму, хотя имели место и другие отклонения, такие, как огранка 4–го порядка. Максимальная величина овализации составила 36 мкм. Кроме того, выявлено, что все гильзы в продольном направлении имеют отклонение формы в виде конусности с явно выраженным характером: деформация увеличивается от верхнего пояса к нижнему.

3. Применение разработанной на основе теоретических исследований программы позволило спроектировать и предложить конструкцию пакета поршневых колец с повышенной приспособляемостью, с использованием разработанного метода расчета рассчитана их форма в свободном состоянии.

4. Изготовлены поршневые кольца предложенной конструкции и экспериментально подтверждено повышение эффективности уплотнения камеры сгорания при их использовании на 20%.

5. Опыт эксплуатации мобильной техники с силовыми установками, укомплектованными экспериментальными поршневыми кольцами подтвердил повышение ресурса дизелей на 12-15% по сравнению с дизелями, укомплектованными серийными кольцами. Годовой экономический эффект от внедрения разработанных методик при годовой производственной программе 1 200 двигателей составил 8,2 млн. руб.

Рекомендации производству. Положительный опыт практического применения разработанных методик и алгоритмов в условиях ООО «ППК» позволяет рекомендовать их к широкому применению на предприятиях, производящих поршневые кольца.

Перспективы дальнейшей разработки темы, заключаются в распространении полученных зависимостей и математического аппарата на другие упругие системы. В частности, предложенный метод расчёта может быть

адаптирован для поршневых и уплотнительных колец компрессоров, турбокомпрессоров, а также гидравлических и пневматических уплотнений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные труды, опубликованные ранее 5 лет:

1. Никитин, Д. А., Никитин П. Д., Ерюшев М. В. Метод контроля воспроизводства заданной эпюры радиальных давлений поршневых и уплотнительных колец по их форме в гибкой ленте / Д. А. Никитин, П. Д. Никитин, М. В. Ерюшев // Научное обозрение. – 2011. – № 3. – С. 8-12.
2. Никитин, Д. А. Учет влияния рабочей температуры на упругие свойства чугунов при расчете уплотнительных колец / Д. А. Никитин, П. Д. Никитин, М. В. Ерюшев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 10. – С. 59-60.
3. Никитин, Д. А. Влияние упругих свойств чугунных поршневых колец на ресурс цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания / Д. А. Никитин, М. В. Ерюшев, П. Д. Никитин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 9. – С. 34-36.
4. Анализ формообразования уплотнительных колец турбокомпрессоров / П. Д. Никитин, Л. Ю. Евсюкова, С. М. Сякин, Д. А. Никитин // Научная мысль. – 2015. – № 3. – С. 182-184.
5. Патент № 2538414 C2 Российская Федерация, МПК G01N 3/20. Устройство для определения модуля упругости конструкционных материалов: № 2013121248/28: заявл. 07.05.2013: опубл. 10.01.2015 / Л. В. Никитина, П. Д. Никитин, Г. Д. Межецкий [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А." (СГТУ имени Гагарина Ю.А.).
6. Никитин, Д. А. Моделирование износа поршневых колец двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации / Д. А. Никитин, С. М. Сякин, П. Д. Никитин // Научная мысль. – 2017. – № 3. – С. 99-101.
7. Причины отказов турбокомпрессоров и рекомендации по ремонту узлов уплотнения / Д. А. Никитин, Г. Д. Межецкий, П. Д. Никитин [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 10. – С. 50-54.
8. Никитин, Д. А. Моделирование износа поршневых колец двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации / Д. А. Никитин, С. М. Сякин, П. Д. Никитин // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: Материалы 30-го международного семинара им. В.В. Михайлова, Саратов, 17–18 мая 2017 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2017. – С. 104-106.
9. Influence of temperature and geometric parameters of elements in a turbocompressor seal assembly on its operability / D. A. Nikitin, P. D. Nikitin, C. A. Turoverov, A. R. Asoyan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive

Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. Vol. 832. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012084. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012084.

10. Влияние теплонапряженности турбокомпрессора на работоспособность узла уплотнения / А. Р. Асоян, Д. А. Никитин, П. Д. Никитин, М. Ю. Бургер // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов кафедры ЭАТиС, посвященный 90-летию МАДИ, по материалам 78 научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 28–29 января 2020 года / Под общей редакцией А.А. Солнцева. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2020. – С. 68-74.

11. Влияние температурной деформации деталей цилиндропоршневой группы ДВС на силовое взаимодействие сопряжения кольцо - гильза цилиндра / Д. А. Никитин, А. Р. Асоян, С. В. Снарский [и др.] // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 283-290.

12. Результаты экспериментального определения зависимости модуля упругости от изгибающих напряжений: Материалы Международной научно-практической конференции «Вавиловские чтения», Саратов, 2009.

13. Результаты эксплуатационных испытаний тракторов, укомплектованных экспериментальными кольцами: в сб. «Проблемы экономичности и эксплуатации ДВС» Материалы Межгосударственного научно-технического семинара, Выпуск 22, Саратов, 2010.

Научные труды, опубликованные за последние 5 лет:

Материалы конференций:

1. Обеспечение надежности пневматической тормозной системы автомобиля с компрессором нагнетания воздуха при ремонте / П. Д. Никитин, А. Р. Асоян, Д. А. Никитин, В. В. Чекмарев // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов по материалам 81-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 31 января – 2023 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2023. – С. 180-186.

Научные статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень ВАК:

1. Повышение эффективности уплотнения в сопряжении поршневое кольцо - гильза цилиндра путем снижения погрешностей при расчете формы кольца в свободном состоянии / П. Д. Никитин, А. Р. Асоян, Д. А. Никитин [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – № 1(47) (**К3)**

2. Оценка точности расчета формы поршневых колец в свободном состоянии / П. Д. Никитин, А. Р. Асоян, Д. А. Никитин, В. В. Чекмарев // Двигателестроение. – 2026. – № 1(303). – С. 18-26. (**К2)**

Научные статьи, опубликованные в журналах, входящих в базу RSCI:

1. Повышение точности воспроизводства заданной формы поршневых колец путем учета кинематических особенностей копировального узла станка HCFX-2 / Д. А. Никитин, П. Д. Никитин, В. В. Чекмарев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 12. – С. 164-174. – DOI 10.28983/asj.y2024i12pp164-174. **(К1)**

Научные статьи, опубликованные в журналах, входящих в базу международного цитирования Scopus:

1. Influence of the Piston Ring Shape in a Free State on the Efficiency of Sealing the Combustion Chamber / D. A. Nikitin, P. D. Nikitin, A. R. Asoyan [et al.] // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings, Moscow, 11–12 ноября 2021 года. – Moscow, 2021. – DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639210.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025691034 Российская Федерация. Программа вычисления координат нейтральной оси поршневого кольца в свободном состоянии с учетом влияния химических упрочняющих покрытий на упругие характеристики: заявл. 31.10.2025: опубл. 12.11.2025 / П. Д. Никитин, А. Р. Асоян, Д. А. Никитин, Л. В. Никитина; заявитель ФГАОУ ВО РУДН имени Патриса Лумумбы».

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Никитин Павел Дмитриевич

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ КОНТАКТНО-СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ И ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Обоснована актуальность повышения надёжности уплотнения камеры сгорания ДВС: более половины отказов поршневых двигателей приходится на цилиндропоршневую группу. Разработана методика расчёта формы средней линии поршневого кольца в свободном состоянии на основе решения дифференциального уравнения изгиба методом конечных разностей. Предложена модель контактно-силового взаимодействия кольца и гильзы как реакции основания с двумя коэффициентами постели. Установлено, что после затяжки крышек цилиндров гильзы приобретают эллипсоидальную форму с овализацией до 36 мкм. Разработана программа Piston Ring Design V01.00.00. Подтверждено повышение эффективности уплотнения на 20 % и ресурса дизелей на 12–15 %. Годовой экономический эффект — 8,2 млн руб.

Nikitin Pavel Dmitrievich

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE CONTACT-FORCE INTERACTION BETWEEN PISTON RINGS AND THE CYLINDER LINER OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The relevance of improving the reliability of internal combustion engine combustion chamber sealing is substantiated: more than half of piston engine failures occur in the cylinder-piston group. A methodology for calculating the free-state mean line shape of a piston ring has been developed based on solving the bending differential equation by the finite difference method. A model of the contact-force interaction between the ring and the liner as a foundation reaction with two bed coefficients is proposed. After cylinder cover tightening, the liners acquire an elliptical shape with ovality up to 36 μm. The Piston Ring Design V01.00.00 software has been developed. An increase in sealing efficiency by 20 % and in diesel service life by 12–15 % was confirmed. The annual economic effect is 8.2 million rubles.