



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «УГАТУ»)

К. Маркса ул., д. 12, г.Уфа, 450008. Тел.: (347) 272-63-07(347); факс: 272-29-18, e-mail: office@ugatu.su; <http://www.ugatu.su>  
ОКПО 02069438, ОГРН 1030203899527, ИНН/КПП 0274023747/027401001

26.02.2020 № 230/104-13

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО “УГАТУ”,  
д.т.н., профессор

Р. Д. Еникеев



2020 г.

## О Т З Ы В

**ведущей организации на диссертационную работу Гаврилова Константина Владимировича «Повышение ресурса трибосопряжений поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания снижением гидромеханических потерь на трение», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.04.02 – Тепловые двигатели (технические науки), 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин (технические науки)**

### 1. Актуальность темы исследования

Решение проблемы повышения моторесурса ДВС непосредственно связано со снижением потерь энергии на преодоление трения в элементах систем, механизмов и сложнагруженных трибосопряжений. Среди энергетических потерь на трение особое место занимают гидромеханические потери на трение в трибосопряжениях ДВС.

Снижение потерь энергии на преодоление трения достигается уменьшением механических потерь за счет ограничения уровня нагруженности трущихся поверхностей, увеличением доли жидкостного режима трения для наиболее критичных по надежности ресурсопределяющих сложнагруженных трибосопряжений. Для сложнагруженных трибосопряжений свойственны переменные по

времени и величине действующие нагрузки, при которых положение подвижного элемента в сопряжении характеризуется высокими значениями эксцентриситетов. К таким сложнагруженным трибосопряжениям относят коренные и шатунные подшипники коленчатого вала, сопряжения «направляющая поршня–гильза цилиндра» и «поршневое кольцо–гильза цилиндра», опорные и упорные подшипники турбокомпрессора ДВС и т.п.

В работе решается проблема теоретического анализа гидродинамических сложнагруженных трибосопряжений (ГСТС) ДВС, включающая в себя: моделирование динамики кривошипно–шатунного механизма ДВС, определении характеристик нелинейных колебаний шипа на смазочном слое подшипников коренных и шатунных шеек коленчатого вала, возникающих под действием нестационарных нагрузок от газовых и инерционных сил; расчет поля гидродинамических давлений в смазочном слое, разделяющем поверхности трения, которая считается основополагающей и наиболее трудоемкой при моделировании динамики ГСТС ДВС.

Обоснована необходимость учета в расчетной модели микро– и макрогеометрии поверхностей трения. Показано, что игнорирование указанных факторов может быть причиной конструктивных, технологических и эксплуатационных отказов ресурсопределяющих ГСТС дизелей.

С целью повышения ресурса ДВС широкое применение находят конструктивно заданные макроотклонения поверхностей трения ГСТС от идеальной геометрии. Наряду с этим, современной тенденцией повышения несущей способности ГСТС ДВС является использование регулярной микрогеометрии, в том числе, текстурирования поверхностей трения поршней, подшипников коленчатого вала и ротора ТКР.

Кроме конструктивно заданных, макроотклонения могут быть вызваны погрешностями обработки поверхностей трения, силовыми и тепловыми деформациями, а также процессами трения и изнашивания при эксплуатации трибосопряжений в составе ДВС. Учет влияния этих факторов на ГМХ учтен в методике расчета ГСТС.



Одной из особенностей трибологического анализа ГСТС дизелей является определение температуры в смазочном слое с учетом конфигурации смазочной системы ДВС, источников смазки на поверхностях трения, деформаций, обусловленных протеканием рабочих процессов в камере сгорания двигателя, чему в работе уделено особое внимание.

Таким образом, развитие указанных моделей и методов учетом макро– и микропрофиля, создаваемого в результате технологической обработки поверхностей деталей сопряжения, нерегулярной микрогеометрии, описанием реологических свойств моторного масла, расчетно–экспериментальной оценкой интенсивности изнашивания и ресурса позволит существенно улучшить качество прогнозирования несущей способности и трибологических характеристик ГСТС ДВС, что свидетельствует об актуальности темы исследования.

## **2. Оценка структуры и содержания работы**

Диссертация Гаврилова К.В. состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 375 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна, сформулированы цель и задачи исследования.

В **первой главе** рассматриваются исходные уравнения для расчета гидромеханических характеристик ГСТС ДВС: уравнение для определения гидродинамических давлений в смазочном слое, уравнение движения подвижных элементов подшипника, уравнение теплового баланса для смазочного слоя. На основе анализа современной зарубежной литературы показана необходимость применения при расчете гидромеханических характеристик ГСТС ДВС алгоритмов сохранения массы жидкости в смазочном слое, что позволяет повысить достоверность прогноза возможного режима масляного голодания в дизеле. Рассмотрены вопросы учета неньютоновских свойств смазочных жидкостей, определяемых содержанием энергосберегающих присадок, которые могут значительно изменять реологические свойства смазки.



Одним из основных рассматриваемых вопросов является необходимость исследования влияния макро- и микротекстурирования поверхности трения трибосопряжений дизеля на трибологические характеристики.

Кроме того, показано, что при расчете трибосопряжений ДВС широкое применение находят методы оптимального проектирования, учитывающие совместное влияние различных факторов и позволяющие в итоге получать конструкцию с «заданными качествами». Исходя из современного состояния изучаемого вопроса, сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке методики численного моделирования динамики и смазки подшипников коленчатого вала ДВС с учетом макрогеометрии смазочного слоя, шероховатости поверхностей трения и реологических свойств смазочного материала.

Сравнительные исследования показали, что при расчете поля гидродинамических давлений в смазочном слое подшипников коленчатого вала ДВС, применение алгоритма сохранения массы обеспечивает получение более достоверной информации. Кроме того, уравнения для определения поля гидродинамических давлений в подшипниках коленчатого вала ДВС дополнены учетом реологических свойств моторного масла, а также учетом макроотклонений подшипников в радиальном и осевом направлениях.

В результатах расчетов ГМХ ГСТС форсированных ДВС с учетом макроотклонений поверхностей трения от круглоцилиндрической имеют место минимальные значения толщины смазочного слоя за время рабочего цикла, сравнимые или меньшие, чем значения шероховатости поверхностей вала и вкладыша и описание этого процесса выделено в отдельную подзадачу учета контактного взаимодействия шероховатых поверхностей трения.

В **третьей главе** разработана методика моделирования динамики ГСТС ДВС с учетом масляного голодания и представлен алгоритм расчета смазочной системы ДВС на основе нелинейных макромоделей опор скольжения.

Показано, что основными элементами смазочной системы двигателя, определяющими его работоспособность и надёжность, являются ГСТС, поэтому в основе разработанного алгоритма лежит гидродинамический расчёт всех трибосопряже-



ний, смазываемых под давлением и особенностью предложенной методики расчета является использование модифицированного алгоритма сохранения массы, что позволяет физически обоснованно описать процессы в смазочном слое, существенно повысить точность прогнозирования масляного голодания подшипников коленчатого вала ДВС, избежать применения масляных насосов с избыточной производительностью, снизить потери мощности на их привод.

Отмечается, что одним из способов снижения масляного голодания может выступать текстурирование контактирующих поверхностей, что позволит увеличить несущую способность сложнонагруженного подшипника. Выполненные расчетные исследования шатунных и коренных подшипников дизеля на различных скоростных режимах показали эффект применения микротекстурирования поверхности вкладыша.

**Четвертая глава** посвящена разработке комплексной методики анализа динамики и смазки сопряжения «поршень–цилиндр» ДВС, включающую в себя аналитическое описание макрогеометрии юбки поршня в плоскости перпендикулярной оси поршневого пальца, а также профилированию юбки поршня в радиальном направлении. Наряду с макропрофилем автором разработана методика, позволяющая учесть регулярную микрогеометрию на поверхности направляющей поршня. Верификация разработанной методики показала хорошее качественное и количественное совпадение результатов автора с результатами зарубежных исследователей.

**Пятая глава** посвящена экспериментальной оценке линейной интегральной интенсивности изнашивания исследуемых ГСТС, которая проводилась автором на трибометре SRV в Австрийском центре компетентности в трибологии (AC2T research GmbH). Была получена аппроксимирующая локальная зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления, которая использована в методе расчетно–экспериментальной оценки ресурса ГСТС «поршень–цилиндр» дизеля ЧН 13/15.

Для исследования реологического поведения моторных всесезонных масел автором был использован сертифицированный аппарат TANNAS TBS 2100E, позволяющий измерять вязкость смазочных жидкостей при высоких скоростях сдвига



(до  $3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  по стандарту SAE J300) и определять неньютоновские параметры смазки при температуре 150 °С. Выполненные исследования подтверждают необходимость учёта реологического поведения масел при проектировании ГСТС ДВС.

В **шестой главе** выполнены параметрические исследования и оптимизационные расчеты конструктивных решений ГСТС дизелей. На первом этапе решалась задача оптимизации макрогеометрических параметров шатунных подшипников коленчатого вала ДВС ЧН 12/12, ЧН 21/21, а также ГСТС «поршень–цилиндр» дизеля ЧН 15/16. На втором этапе выполнялись параметрические исследования микрогеометрических параметров для ГСТС дизеля ЧН 13/15. Третий этап включал расчетно–экспериментальное определение ресурса ГСТС «поршень–цилиндр» дизеля ЧН 13/15.

Этим продемонстрирована практическая ценность разработанного расчетного комплекса, позволяющего оптимизировать параметры ГСТС ДВС с учетом их конструктивных особенностей, характера действующих нагрузок, схем подачи смазки и других предъявляемых требований.

В **заключении** приводятся итоги выполненной работы. В приложении помещены исходные данные, необходимые для решения тестовых примеров; некоторые результаты экспериментальных исследований линейной интегральной интенсивности изнашивания; свидетельства о регистрации разработанных комплексов программ; патент на полезную модель; акты, подтверждающие использование и внедрение результатов работы.

Тема диссертационной работы, сформулированные в ней цель и задачи исследования соответствует паспорту специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели и паспорту специальности 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин. Перечисленные в заключении основные результаты соответствуют цели и задачам исследования.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме. Все положения работы, результаты и выводы нашли отражение в тексте диссертации, представленной к защите.

В тексте диссертации сделаны необходимые ссылки на авторов и источники, где опубликованы использованные в работе материалы и отдельные результаты; при использовании идей и результатов, полученных в соавторстве, в тексте диссертации имеются соответствующие указания, как и указания в отношении научных работ, выполненных соискателем единолично. На все источники библиографического списка имеются ссылки из текста диссертации.

Содержание автореферата полностью соответствует диссертации в части основных положений, этапов работы, результатов и выводов.

Публикации соискателя в полной мере отражают наиболее значимые положения работы, сделанные выводы и рекомендации. Результаты работы также в полной мере отражены в публикациях автора в рецензируемых научных изданиях, в т.ч. входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Диссертация написана литературным языком с использованием общепринятой терминологии и обозначений. Стил ь изложения ясный и четкий, соответствующий требованиям, предъявляемым к научно-исследовательским работам. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК к докторским диссертациям. Замечаний по оформлению диссертации и автореферата нет.

Диссертационная работа выполнена автором самостоятельно на достаточном научном уровне и представляет собой законченную работу.

### **3. Научная новизна работы**

Научную новизну диссертационной работы Гаврилова К.В. определяют следующие результаты:

– метод расчета динамики и смазки ГСТС поршневых и комбинированных ДВС, отличающийся учетом геометрии поверхностей трения на разных масштабных уровнях. Установление зависимости между гидромеханическими характеристиками (ГМХ) ГСТС и параметрами регулярной макро– и микрогеометрии поверхностей трения;



- математическая модель контактного взаимодействия шероховатых поверхностей трения ГСТС, позволяющая учитывать эволюцию распределений высот микрорельефа во времени и наличие смазочного слоя, разделяющего поверхности;
- уточненная методика моделирования смазочной системы ДВС применением алгоритма сохранения массы при расчете поля гидродинамических давлений в смазочном слое ГСТС с учетом конвективного переноса неньютоновской жидкости через область кавитации;
- методика расчетной оценки ресурса ГСТС тепловых двигателей на основе экспериментального определения линейной интегральной интенсивности изнашивания, а также применения метода оценки изменения микрорельефа поверхности трения при эксплуатации ДВС;
- уточненная модифицированная энергетическая модель трения и изнашивания применительно к ГСТС тепловых двигателей, базирующаяся на совместном учете молекулярно–механической и энергетической моделях изнашивания;
- созданная на базе разработанных методик методология комплексного трибологического анализа ГСТС ДВС и оценки их ресурса с учетом режимов трения.

#### **4. Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Разработанные модели и методы, позволяющие учесть макро– и микропрофиль, создаваемый в результате технологической обработки поверхностей деталей сопряжения, нерегулярную микрогеометрию, описание реологических свойств моторного масла, расчетно–экспериментальную оценку интенсивности изнашивания и ресурс позволят существенно улучшить качество прогнозирования несущей способности и трибологических характеристик ГСТС ДВС, обосновывать рекомендации по оптимизации параметров сложнонагруженных подшипников, что сократит затраты времени и средств на создание, экспериментальные исследования и доводку конструкций подшипников, что особенно важно для таких конструктивно сложных объектов, как двигатели внутреннего сгорания.

В Федеральной службе по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) зарегистрированы: пакеты прикладных программ «Элрод», «Устойчи-



вость»; программа оптимизации сопряжения «поршень–гильза цилиндра» «Поршень–оптимум»; комплексы программ «Орбита–поршень–2», «Микрогеометрия трибосистемы поршень–цилиндр», программа трибологического анализа «PISTON–CYLINDER TRIBOSYSTEM».

Разработана и запатентована оригинальная конструкция поршня двигателя внутреннего сгорания, обладающая улучшенными трибологическими свойствами, позволяющая снизить потери на трение в цилиндропоршневой группе ДВС.

### **5. Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность полученных научных результатов обуславливается:

- корректной постановкой задач,
- строгостью используемого математического аппарата,
- обоснованностью принятых допущений,
- применением хорошо известных численных методов;
- подтверждается качественным и количественным совпадением полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными результатами.

Сформулированные в диссертационной работе выводы и рекомендации имеют достаточно высокую степень достоверности, поскольку согласуются с известными и широко апробированными теоретическими и экспериментальными исследованиями, закономерностями отечественных и зарубежных исследователей и ученых.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях и опубликованы более чем в 70 печатных работах, включая 2 монографии, 12 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, 16 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, патент, свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ, что позволяет говорить о знакомстве достаточно большой



аудитории отечественных и зарубежных специалистов и ученых в исследуемой области с результатами исследований Гаврилова К.В. и об их достоверности.

## **6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Полученные в диссертационной работе Гаврилова К.В. теоретические положения и результаты экспериментальных исследований новых научно обоснованных технических и технологических перспективных решений позволяют:

– обеспечить решение комплекса задач по снижению гидромеханических потерь на трение для повышения ресурса сопряжений ДВС, работающих в условиях жидкостного, смешанного и граничного режимов,

– моделировать смазочную систему дизеля, с применением алгоритма сохранения массы, что позволяет исследовать и заранее прогнозировать режимы возможного масляного голодания подшипников,

– создавать и модифицировать конструкции сложнагруженных трибосопряжений двигателей различной размерности, в том числе, на основе многокритериального оптимизационного подхода, используя приведенные в диссертационной работе рекомендации.

## **7. Замечания по диссертационной работе**

1. Не ясно чем продиктована необходимость разработки первой модификации алгоритма сохранения массы, применение которой при расчетах приводит к осцилляциям гидродинамических давлений.

2. Избранный метод оптимизации, по нашему мнению, является перспективным, но требует высочайшей квалификации эксперта. В диссертации следовало больше внимания уделить описанию технологии работы экспертов.

3. Существующие коммерческие программные продукты, в частности, фирмы AVL, позволяют рассчитывать характеристики подшипников коленчатого вала ДВС, сопряжения «поршень-цилиндр». В работе не дан анализ этих методик и их отличие от предлагаемой автором методики.



4. При решении задачи оптимизации параметров сложнагруженных подшипников параметры микротекстурирования поверхностей вкладышей и направляющей юбки поршня не включены в перечень оптимизируемых параметров, хотя из приведенных результатов и сути разработанной методики оптимизации ясно, что это было бы явно целесообразно.

5. Как известно, в узле поршень-гильза имеются поршневые кольца. В зависимости от типа двигателя они могут располагаться в верхней и нижней части поршня. Эти кольца играют большую роль в процессах трения и оказывают значительное влияние на режимы смазки системы поршень-гильза. Как эти важные аспекты условий работы системы «поршень-гильза» учитывались в формировании модели работы узла?

6. Из диссертации не ясно, почему упор сделан именно на дизели, хотя все положения, рассматриваемые в работе, можно было бы распространить и на бензиновые двигатели?

### **Заключение**

Несмотря на отмеченные недостатки, рассмотренная диссертация Гаврилова Константина Владимировича «Повышение ресурса трибосопряжений поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания снижением гидромеханических потерь на трение» является законченной научно-квалификационной работой, решает довольно сложную научную задачу и вносит существенный вклад в теорию сложнагруженных подшипников ДВС, часть решенных задач выполнены впервые, полученные результаты помогут решить многие технические задачи в будущем. Область исследований и основные научные результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели и паспорту специальности 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин. Диссертационная работа соответствует критериям, установленным пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Гаврилов Константин Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.04.02 – Тепловые двигатели

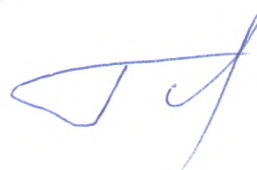


(технические науки), 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин (технические науки).

Отзыв обсужден на заседании кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (протокол № 8 от «17» февраля 2020 г.).

**Отзыв составлен:**

доктор техн. наук,  
профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»



Гарипов М.Д.  
25.02.2020г.

Докторская диссертация Гарипова Марата Даниловича защищена по специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели.

Адрес организации: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.  
Рабочий телефон: +7(347)2728405  
Адрес эл. почты: garry76@mail.ru