

*На правах рукописи*



**ХОПИН Пётр Николаевич**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЙ  
С ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность: 05.02.04 – Трение и износ в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Москва 2018

Работа выполнена на кафедре «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

**Научный консультант**

**Курапов Павел Анатольевич** - доктор технических наук

**Официальные оппоненты:**

**Годлевский Владимир Александрович** - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Экспериментальная и техническая физика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет».

**Скотникова Маргарита Александровна** - доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Машиноведение и основы конструирования» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Шапвалов Владимир Владимирович** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортные машины и триботехника» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», заслуженный деятель науки РФ.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Защита диссертации состоится 29 ноября 2018г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д999.112.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» в ИМАШ РАН по адресу: Россия, 119334, Москва, ул. Бардина, д.2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» и на сайте <http://imash.ru/councils/disertacii01/>.

Автореферат разослан «...» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент:



В.А. Хандожко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Безотказная работа современных высокотехнологичных конструкций определяется надёжностью функционирования отдельных агрегатов и, в том числе, ответственных узлов трения различных механизмов, автономно функционирующих как в нормальной атмосфере, так и в высоком вакууме при воздействии различного рода облучений, экстремальных нагрузок, повышенной температуры и других факторов. Наиболее широко для смазки рассматриваемых узлов трения применяются твёрдосмазочные покрытия (ТСП) типа ВНИИ НП, ВАП и др. К ним относятся механизмы раскрытия антенн, регулируемые опоры и подвески двигателей космических аппаратов, замки рабочих лопаток газотурбинных двигателей, шарнирно-болтовые, резьбовые, зубчатые соединения, подшипники, регулируемые опоры и другие трущиеся соединения космических кораблей, авиационных двигателей и других летательных аппаратов. В связи с разработкой современной перспективной высокотехнологичной техники в настоящее время ставится задача увеличения сроков эксплуатации ряда ответственных узлов трения и, в частности, автономно функционирующих узлов трения космической техники до 15 и более лет.

**Степень разработанности проблемы.** Теоретическая и методологическая основа диссертации базируется на адгезионно-деформационной теории трения д.т.н, проф. Крагельского И.В, а также концепции механизма смазочного действия покрытий д.т.н. профессоров Хрущёва М.М., Матвеевского Р.М.

Существенный вклад в развитие рассматриваемого направления внесли отечественные учёные д.т.н. профессора Крагельский И.В., Матвеевский Р.М., Дроздов Ю.Н., Гриб В.В., Сентюрихина Л.Н., Сутягин О.В., Сачек Б.Я., Гамуля Г.Д., Вайнштейн В.Э., Курилов Г.В. и зарубежные специалисты: Брейуэйт Е.Р., Боуден Ф.П., Тейбор Д., Финкин Е., Карп С.Л., Miyoshi K., Voevodin A.A., Haidou Wang и др. Однако несмотря на большое число исследований, до сих пор не разработаны методики и соответствующий математический аппарат для оценки важнейших триботехнических показателей трущихся сопряжений с ТСП, работающих как в нормальных, так и в экстремальных условиях космического пространства при произвольном сочетании давления, скорости скольжения, температуры нагрева. Поэтому расчёт интенсивности изнашивания, антифрикционных характеристик и температурного состояния ответственных узлов трения с применением ТСП в ряде случаев оказывается невозможным. В этой связи особую актуальность приобретает проблема разработки методов комплексной оценки триботехнических показателей пар трения с ТСП для различных условий эксплуатации.

**Цель работы.** Разработка методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями с учетом модификации состава покрытий, а также влияния эксплуатационных факторов применительно к различным условиям функционирования.

**Задачи исследований.**

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявить наиболее существенный фактор, влияющий на триботехнические показатели пар трения с твердосмазочными покрытиями, функционирующими в условиях нормальной атмосферы и вакуума.
2. Разработать расчетный метод комплексной оценки триботехнических показателей пар трения, основанный на обобщении результатов математического эксперимента, в котором используются имеющиеся в литературе однофакторные зависимости. Получить в результате реализации метода многофакторную модель, описывающую влияние наиболее значимых технологических и эксплуатационных факторов на триботехнические показатели сопряжений с ТСП для условий нормальной атмосферы.
3. Создать методику для оценки триботехнических показателей сопряжений с ТСП и определить необходимые для их реализации зависимости применительно к ТСП различных составов и условий функционирования (условия нормальной атмосферы и вакуума) на базе найденного ранее наиболее существенного фактора.
4. Разработать методику для оценки предельных и оптимальных режимов трения смазочных материалов и получить искомые зависимости для исследуемых пар трения.
5. Исследовать комплексное влияние нагрузочно-скоростных факторов на интенсивность изнашивания, температуру и коэффициент трения пар трения с ТСП для различных условий функционирования. С этой целью разработать для условий повышенной температуры и вакуума экспериментальные установки, методики и провести исследования, в результате которых получить многофакторные модели, позволяющие с достаточной для практики точностью оценить влияние эксплуатационных факторов контактного давления и скорости скольжения на триботехнические показатели рассматриваемых фрикционных сопряжений.
6. Провести сравнительные исследования теплофрикционных характеристик ТСП и самосмазывающихся материалов для выбора оптимальных типов сма-

зочных материалов для узлов трения, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума.

7. Исследовать комплексное влияние технологических факторов на прирабатываемость пар трения с ТСП и явление «стоп-эффекта».
8. Исследовать влияние атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели сопряжений с ТСП.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследований являются трибосопряжения с твёрдосмазочными покрытиями, функционирующие при воздействии эксплуатационных факторов в различных условиях эксплуатации.

Предметом исследования является разработка новых методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твёрдосмазочными покрытиями.

**Методы и достоверность исследований.** Теоретические и экспериментальные исследования проводились на базе современных представлений теории трения и изнашивания, регрессионного и дисперсионного анализов, теории планируемого эксперимента. Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, применением современных технических средств при анализе, приемлемой сходимостью теоретических и эмпирических результатов, а также реализацией результатов исследований в промышленности.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Установлены закономерности влияния нагрузочно – скоростных режимов для широкого диапазона их изменений на эксплуатационную температуру при трении, а также регрессионные зависимости интенсивности изнашивания от температуры ТСП различных составов применительно к нормальным атмосферным условиям и условиям вакуума.

2. Предложен метод определения предельных и оптимальных нагрузочно – скоростных режимов трения ТСП, позволяющий получать на основании математической модели зависимости для оценки предельных и оптимальных режимов трения.

3. Установлены закономерности влияния эксплуатационной температуры на коэффициент трения для нормальных атмосферных условий и условий вакуума.

4. Предложен метод комплексной оценки триботехнических показателей пар трения на основании разработки математических моделей, описывающих влияние эксплуатационно-технологических факторов на триботехнические показатели сопряжений с ТСП.

**Практическая значимость.** Разработаны методики и получены математические модели, позволяющие на стадии конструкторской подготовки производства с достаточной для практики точностью рассчитать для нормальных атмосферных условий, вакуума и повышенной температуры триботехнические показатели сопряжений с ТСП различных составов.

Рекомендовано для нормальных атмосферных условий при низких контактных давлениях ( $P = 11-18$  МПа) и скоростях скольжения  $V < 0,4$  м/с использовать самосмазывающиеся материалы (СМ) типа углеграфитового АТГ, наполненных фторопластовых антифрикционных материалов ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-1, графитопласта АМС-5М, которые обладают меньшим коэффициентом и температурой трения, чем пара с ТСП ВНИИ НП 212, а при более напряжённых режимах трения - пар с ТСП ВНИИ НП 212, которые оказались также более предпочтительными для работы в условиях вакуума (за исключением СМ АТГ) для диапазона температур трения от 40 до 200°С.

Создан расчётный метод комплексной оценки триботехнических показателей пар трения, основанный на проведении математического планируемого эксперимента, в котором используются имеющиеся в литературе однофакторные зависимости. В результате реализации математических планируемых экспериментов типа ПФЭ  $2^6$  (64 опыта) и центрального ротатабельного композиционного плана 2 порядка для 5 факторов, состоящего из 52 опытов, для сопряжений с ТСП получена модель для расчёта интенсивности изнашивания в нормальных атмосферных условиях фрикционных сопряжений с ТСП на основе  $MoS_2$  с органическим связующим в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, толщины ТСП, шероховатости основы и твёрдости контртела.

Разработаны эффективный способ существенного снижения "стоп-эффекта" за счёт использования материала контртела с более выраженными пластическими свойствами и более точный по сравнению с имеющимися способ контроля времени приработки (а.с. 1059485).

Определены технологические рекомендации и выбран оптимальный тип покрытия ВНИИ НП 212М, сохранившего свои смазочные свойства даже после

пребывания в атмосфере соляного тумана в течение 7 суток.

***Положения, выносимые на защиту,*** включают:

- выявленное определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания и коэффициент трения рассматриваемых фрикционных соприжений как для условий нормальной атмосферы, так и для вакуума;

- математические модели для расчёта температуры трения пар с ТСП в зависимости от нагрузочно-скоростных факторов для условий нормальной атмосферы и вакуума;

- математические модели для расчёта интенсивности изнашивания пар с ТСП различных составов для условий нормальной атмосферы и вакуума;

- математические модели для расчёта коэффициента трения пар с ТСП различных составов для условий нормальной атмосферы и вакуума;

- математические модели для оценки оптимальных и предельных режимов трения пар с ТСП;

- оптимальные области применения ТСП в сравнении с самосмазывающимися материалами для условий нормальной атмосферы и вакуума.

***Личный вклад соискателя.*** Автор принимал личное непосредственное участие в проведении всех экспериментальных исследований по оценке триботехнических показателей соприжений с твёрдосмазочными покрытиями как в условиях нормальной атмосферы, так и вакуума. Им разработаны новые методы оценки интенсивности изнашивания и антифрикционных свойств пар трения с ТСП с учетом их термостойкости и метод комплексной оценки работоспособности покрытий на основе проведения математического планирования эксперимента. Им лично подготовлены и изданы, в том числе с соавторами, 24 научные статьи в ведущих изданиях, 2 монографии, 4 изобретения.

***Реализация результатов работы.*** В результате проведённой работы на ряде авиационно-космических и других предприятий осуществлено проектирование, изготовление и внедрение следующей технологической оснастки, испытательного оборудования, методов испытаний, оптимизация выбора пар трения и оценочный расчёт их триботехнических показателей:

1. Методики оценки работоспособности узлов трения с применением твёрдосмазочных покрытий для условий нормальной атмосферы и вакуума, внедрённой на предприятиях ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (КБ «Салют»), ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

в конструкторской практике для оценки долговечности и теплофрикционных характеристик узлов трения с твёрдосмазочными покрытиями, в том числе при разработке агрегатов РКН и КА (письмо ФГУП ГКНПЦ им. М.В.Хруничева №22/2947 от 13.06.12г., акт внедрения ФГУП ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского от 30.05. 2012г.).

2. Методики и модернизированной установки для проведения испытаний на трение и износ в вакууме (авторское свидетельство № 926573 "Устройство для испытания материалов на трение и износ". "Бюллетень изобретений", 1982, № 17), внедрённых на предприятии п/я Р-6601, что позволило осуществить комплексные испытания имитаторов пар трения изделия с существенным годовым экономическим эффектом.

3. Механизированного приспособления для нанесения ТСП на предприятии п/я Р-6601; экспериментально отработанные режимы нанесения обеспечили качественное напыление указанных покрытий на поверхности узлов трения, в результате чего повышены качество и надёжность изделия.

4. Технологического обеспечения работоспособности пар трения применением покрытий для реальных узлов трения на предприятии ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», позволившего повысить долговечность ряда узлов изделия с существенным годовым экономическим эффектом.

5. Рекомендаций «Выбор оптимальных твёрдосмазочных покрытий для пар трения и расчёт их характеристик», используемой в технологической практике при разработке технологических процессов нанесения твёрдосмазочных покрытий в узлах трения на предприятии ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют».

6. Способа контроля времени приработки (а.с.1059485), внедрённого на БЕЛАЗе, г. Жодино, Беларусь.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались: на научно-технических конференциях МАТИ в 1973-1988г.г., на научно-технических конференциях предприятия п/я Р-6601 в 1978, 1979г.г., на Московской научно-технической конференции "Триботехника - машиностроению" в 1981г., на отраслевом совещании "Трибологические испытания твёрдосмазочных материалов, стандартизация средств и методов исследования твёрдых смазочных материалов" в ЦНИИ МВ в 1984г., на научном семинаре во ВНИИ НП в 1986г. Отдельные главы работы обсуждались и были одобрены на заседании кафедры "Триботехника" секции "Технологический процесс и средства производства" Высшей технической школы г. Карл-Маркс-Штадта (г. Хемниц), Германия в 1986г., на Всесоюзной НТК "Повышение стойкости деталей машин и инструмен-



та" в 1989г., на 4 Московской НТК "Триботехника - машиностроению" в 1989г., на Всероссийской НТК «Новые материалы и технологии» в 1997, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2012г.г., на заседании научного семинара по трению и износу в машинах им. проф. М.М.Хрущёва в ИМАШ в 1995г., на 7 Всероссийской с международным участием НТК «Быстрозакалённые материалы и покрытия» в 2008г., на семинаре кафедры «Прикладная физика» Тверского государственного технического университета в 2014г., на семинаре по механике фрикционного взаимодействия твёрдых тел им. И.В. Крагельского в ИПМех РАН в 2015г., на научном семинаре по трению и износу в машинах им. М.М. Хрущёва в ФБГУН ИМАШ РАН в 2015г. и в 2017г., на XI международной научно-технической конференции «Трибология - машиностроению» ИМАШ РАН в 2016г., на IX и X Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (ВИАМ) в 2017 и 2018 г.г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 63 печатные работы, из них 24 - в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 монографии, одна из которых издана зарубежным издательством, 4 авторских свидетельства, 2 из которых внедрены на предприятиях. Список работ, в которых отражено основное содержание диссертации, приведён в конце автореферата.

**Структура и объём диссертации.** Работа состоит из введения, 6 глав, списка использованных источников и приложений. Диссертация написана на 313 страницах машинописи, содержит 44 таблицы и 126 иллюстраций. Список использованных источников состоит из 151 наименования источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, изложена краткая характеристика, показана научная новизна, практическая ценность и достоверность научных результатов, основные задачи и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** по материалам отечественной и зарубежной литературы был проведён анализ современного состояния исследований триботехнических показателей ТСП в парах трения в зависимости от различных факторов.

До последнего времени в подавляющем большинстве проведённых исследований удавалось получать лишь однофакторные зависимости интенсивности изнашивания, ресурса или коэффициента трения фрикционных соединений с ТСП от одного из факторов без учёта влияния других важных факторов, а тем более их взаимодействий. Использование результатов таких исследований для оценки триботехнических показателей узлов трения изделий различного назначения с ТСП приводило к значительным погрешностям, а в ряде случаев оказывалось невоз-

возможным. При расчёте коэффициента трения на основе молекулярно-механической теории трения не учитывался температурный фактор и фактор скорости скольжения, тесно связанный с температурой трения. Не была разработана методика определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения рассматриваемых узлов с ТСП. Не проводилась оценка комплексного влияния технологических факторов на интенсивность изнашивания, прирабатываемость, «стоп-эффект» и другие параметры, определяющие триботехнические показатели ТСП. Не исследовалось поведение рассматриваемых покрытий в трущихся соединениях, подвергнутых действию атмосферы соляного тумана. Не была разработана методика определения теплофрикционных характеристик для композиционных ТСП, а также самосмазывающихся материалов (СМ) различных типов.

Поэтому проблема разработки методов комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями с учетом модификации состава покрытий, а также влияния эксплуатационных факторов применительно к различным условиям функционирования имеет важное научное и практическое значение.

*Во второй главе* описана методика проведения исследований.

Триботехнические показатели ТСП в парах трения оценивались на установках, работающих по роликовой, торцевой схемам. Сравнительная оценка триботехнических показателей самосмазывающихся материалов (СМ) и ТСП при трении в нормальных атмосферных условиях производилась для следующих типов СМ: высокотемпературного углеграфитового антифрикционного материала АТГ, наполненных фторопластовых антифрикционных материалов ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-І; графитопласта АМС-5М. Применялись шлифованные контртела из закалённой стали ХВГ с твёрдостью HRC>60, шарикоподшипниковой стали ШХ15 и нержавеющей стали І2ХІ8Н9Т.

При исследовании влияния температурного фактора эксперименты проводились с использованием центрального композиционного ортогонального планирования 2-го порядка при повышенной температуре на модернизированной установке для комплексных испытаний. Основной уровень и интервалы варьирования факторов были следующими:  $V=0,66\pm 0,4$  м/с;  $N=784\pm 392$ Н;  $T_{об.}=120\pm 80^{\circ}\text{C}$ ; звёздные точки ( $\pm 1,215$ ):  $V=1,146$  и  $0,174$  м/с;  $N=1260$  и  $308$  Н,  $T_{об.}=217$  и  $23^{\circ}\text{C}$ .

Для проведения исследования триботехнических показателей пар трения с ТСП, а также других смазочных материалов в условиях разряженной атмосферы

был разработан стенд для изучения трения и износа в вакууме, конструкция которого признана в качестве изобретения (а. с. № 926573).

Исследования основных триботехнических показателей узлов трения с ТСП в вакууме проводились с использованием центрального композиционного ротатбельного униформ-планирования 2-го порядка на стенде для изучения трения и износа в вакууме [а.с. 926573]. Основной уровень и интервалы варьирования факторов были следующими:  $V = 0,295 \pm 0,148$  м/с;  $N=1180 \pm 245$ Н; звёздные точки ( $\pm 1,41$ ):  $V = 0,504$  и  $0,087$  м/с;  $N=1280$  и  $590$  Н.

Экспериментальное исследование воздействия атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели имитаторов пар трения изделий аэрокосмической техники с ТСП проводилось на машине трения «роликовый прибор (РП)».

*Третья глава* посвящена комплексной оценке триботехнических показателей композиционных ТСП. В результате измерения динамики изменения величины износа рассматриваемого покрытия, установлено, что вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75-80%) приходится на период приработки и лишь 20-25% - на установившийся режим трения. Таким образом, именно смазочная плёнка толщиной в 2-3 микрометра обеспечивает в основном функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия. Анализ профилограмм, снятых на различных этапах наработки, показал, что сумма значений наибольшей высоты неровностей профиля материала основы и контртела после приработки составила ( $R_{\max \text{ осн.}} + R_{\max \text{ контртела}}$ ) для исходного состояния составила 6,18 мкм, а после приработки – 4,92 мкм. Следовательно, при трении исходная толщина ТСП ( $\cong 20$  мкм) уменьшается настолько (2-5 мкм), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную плёнку  $\text{MoS}_2$ .

Указанное выше предположение было подтверждено при рентгеновском микроанализе поверхностей. На установившемся режиме именно шероховатость поверхности основы выдерживает всю нагрузку на контакт. Низкое трение обеспечивается смазочной плёнкой  $\text{MoS}_2$ , удерживаемой на поверхности трения между микронеровностями основы за счёт связующих компонентов композиционного ТСП. Ресурс работы сопряжений с ТСП определяется ресурсом связующих составляющих.

Разработан расчётный метод комплексной оценки триботехнических показателей, основанный на обобщении результатов математического эксперимента, в котором использовались имеющиеся в литературе однофакторные зависимости. Вначале было проведено аналитическое описание имеющихся в литературе одно-

факторных зависимостей наиболее влияющих факторов. Выделенные на первом этапе математического эксперимента 5 наиболее существенных факторов ( $\delta$ –толщина ТСП;  $R_z$ –высота неровностей профиля основы по 10 наибольшим точкам;  $HRC_k$  –твёрдость контртела,  $N$ –нагрузка;  $V$ -скорость скольжения) исследовались затем на втором этапе с использованием метода центрального композиционного ротатабельного униформ - планирования 2 порядка. После проверки адекватности с учетом статистически значимых коэффициентов в натуральных значениях факторов математическая модель приняла вид (адекватность модели (1) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 33; 9} (0,867) < F^{табл.}_{0,05; 33; 9} (2,86)$ ):

$$\tau = -463,7 - 3142,4 \cdot V - 3,76 \cdot N + 111,1 \cdot HRC_k + 255,5 \cdot \delta + 635,5 \cdot R_z - 6,4 \cdot \delta^2 + 6,77 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 - 99,3 \cdot R_z^2 + 3,77 \cdot V \cdot N - 79,1 \cdot V \cdot HRC_k - 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot N \cdot HRC_k, \quad (1)$$

где  $\tau$  - ресурс пары трения до разрушения [мин.];  $V$ -скорость скольжения [м/с];  $N$ –нагрузка [Н];  $HRC_k$  –твёрдость контртела [ед.];  $\delta$ –толщина ТСП [мкм];  $R_z$ –высота неровностей профиля основы по 10 наибольшим точкам [мкм].

Пересчёт значений  $\tau$  в триботехнический показатель линейной интенсивности изнашивания  $I_h$  производится по формуле:

$$I_h = \frac{\delta_{прип.}}{V \cdot 60 \cdot \tau} \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

где  $\delta_{прип.} = 2$  мкм – толщина приработанной плёнки ТСП со связующими смолами;  $V$  – скорость скольжения [м/с];  $\tau$  – ресурс [мин.].

Проведённые проверки подтвердили корректность модели (1).

Экспериментальными исследованиями, как при нормальной, так и повышенной температуре было показано определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания рассматриваемых пар трения с ТСП. Для её расчёта необходимо иметь зависимости, позволяющие производить оценку температуры трения  $T_{тр.}$  для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров реальных узлов трения с ТСП, т.е. зависимости типа  $T_{тр.} = f(P, V)$ . Зная эту зависимость, последовательность расчёта интенсивности изнашивания пар трения с ТСП может быть записан в виде, представленном на рисунке 1. Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить искомую зависимость для пары с ТСП ВНИИ НП 212 (адекватность модели (3) не отвергается при  $\alpha=0,01$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,01; 3; 4} (13,7) < F^{табл.}_{0,01; 3; 4} (16,69)$ ):

$$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 47,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2, \quad (3)$$

где  $T_{тр.}$ - температура поверхности контакта [ $^{\circ}C$ ];  $V$ -скорость скольжения [м/с];  $P$ - контактное давление [МПа].

Для возможности оценки  $I_h$  пары с ТСП по указанной выше методике применительно к различным схемам трения были проведёны эксперименты с использованием метода центрального композиционного ротатбельного планирования 2 порядка и получены математические модели зависимости  $T_{тр.} = f(P, V)$  для различных схем трения, диапазонов варьирования факторов и типов ТСП (таблица 1).

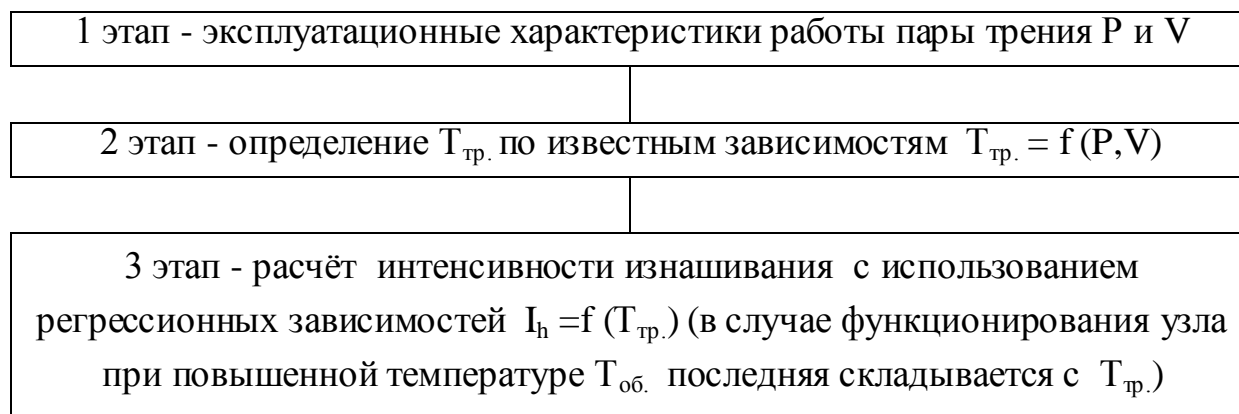


Рисунок 1 – Последовательность расчёта линейной интенсивности изнашивания пар трения с композиционными ТСП со связующими веществами

Таблица 1 - Зависимости  $T_{тр.} = f(P, V)$  для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов для нормальных атмосферных условий

Тип ТСП на основе MoS <sub>2</sub>	Схема трения	Диапазоны изменения		Зависимости $T_{тр.} = f(P, V)$ , [°C]
		N, Н P, [МПа]	V, [м/с]	
ВНИИ НП 212	Роликовая (модернизированная машина трения РП)	236-1337 (23,1-133,7)	0,096-1,224	$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 47,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2$ (адекватность модели – см. выше)
ВНИИ НП 212	Роликовая (машина трения СМТ)	210-1790 (12,2-103,5)	1,472-3,728	$T_{тр.} = 119,35 + 10,26 \cdot V + 0,065 \cdot P + 0,335 \cdot P \cdot V$ (адекватность модели не отвергается при $\alpha=0,05$ , т.к. $F^{расч.}_{0,05; 5; 4} (2,84) < F^{табл.}_{0,05; 5; 4} (6,26)$ )
Molykote 7409	Торцевая (стенд «шайба-диск»)	755-9045 (5.6-67.2)	0,11-0,25	$T_{тр.} = 67,27 - 98,96 \cdot V + 0,464 \cdot P + 6,42 \cdot P \cdot V - 0,011 \cdot P^2$ (адекват-

				ность модели не отвергается при $\alpha=0,01$ , т.к. $F^{расч.}_{0,01; 4; 4} (11,46) < F^{табл.}_{0,01; 4; 4} (15,98)$
--	--	--	--	--

Графическая интерпретация полученных зависимостей  $T_{тр.} = f(P, V)$ , представленная на рисунке 2, показывает, что вне зависимости от схемы трения и типа ТСП характер исследуемых зависимостей сохраняется, что позволяет использовать её для различных конструкций фрикционных сопряжений и видов ТСП.

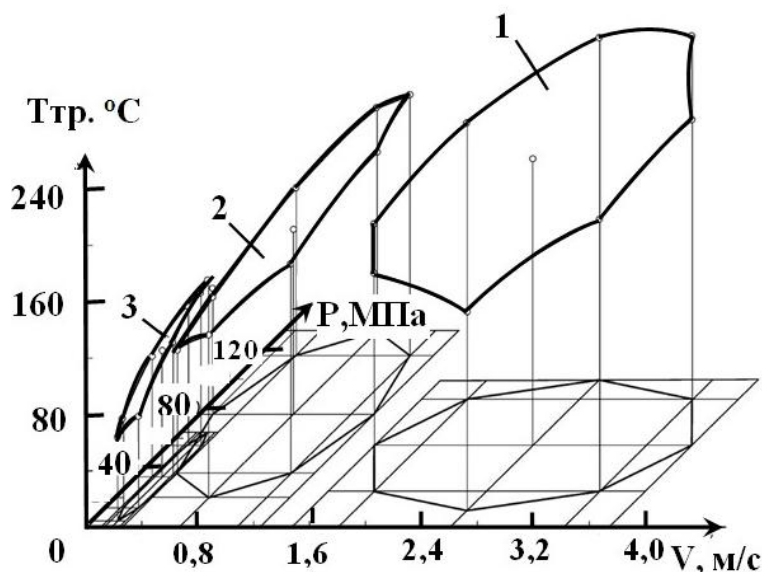


Рисунок 2 - Зависимости  $T_{тр.} = f(P, V)$ , полученные на: 1,2 - машинах трения СМТ-I и РП соответственно (ТСП ВНИИ НП 212); 3 - стенде "шайба-диск" (ТСП Molykote 7409)

На следующем этапе решалась задача определения регрессионных зависимостей типа  $I_h = f(T_{тр.})$  для ТСП различных составов для возможности широкого использования методики на практике. С использованием результатов экспериментальных исследований при повышенной температуре, представленных в главе 5, и литературных данных (см. примечание к таблице 2) для пары с ТСП ВНИИ НП 212 была построена зависимость интенсивности изнашивания от суммарной температуры трения, представленная на рисунке 3 (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,6765$ ):

$$I_h = 7,034 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,0035 \cdot T_{тр.}} + 7,049 \cdot 10^{-14} \cdot e^{0,0296 \cdot T_{тр.}} \quad (4)$$

где  $I_h$  – линейная интенсивность изнашивания;  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [°C].

Альтернативная зависимость ресурса  $\tau$  от температуры трения для пары с ТСП ВНИИ НП 212, описывается уравнением (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,7373$ ):

$$\tau = 9 \cdot 10^6 \cdot T_{тр.}^{-1,969} \quad (5)$$

где  $\tau$  - ресурс пары трения до разрушения [мин.];  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [°C].

Анализ литературы показал, что регрессионные зависимости  $I_h = f(T_{тр.})$

для ТСП наиболее применяемых на практике составов могут быть получены

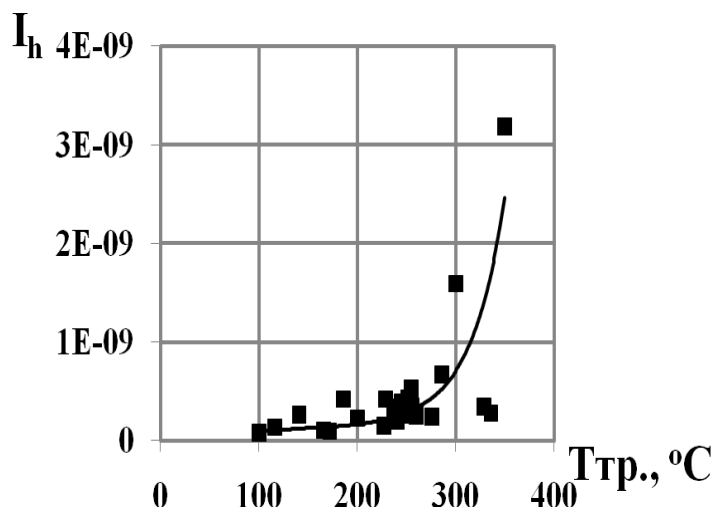


Рисунок 3. Регрессионная зависимость  $I_h=f(T_{тр.})$  для ТСП ВНИИ НП 212, построенная по данным автора и литературным данным

из экспериментальных данных, приведённых в монографии [см. примечание к таблице 2] путем математической обработки зависи-

симостей долговечности  $\tau$  от температуры трения для температур свыше  $100^{\circ}\text{C}$ , при которых образуется эффективная смазочная плёнка и коэффициент трения резко снижается до значений  $f_{тр.} \approx 0,02-0,05$ . В результате обработки указанных данных были получены зависимости  $I_h = f(T_{тр.})$  для наиболее часто используемых составов суспензионных ТСП, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Регрессионные зависимости интенсивности изнашивания пар трения с ТСП ( $I_h$ ) от температуры трения ( $T_{тр.}$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ] для нормальных атмосферных условий и альтернативные зависимости для оценки ресурса  $\tau = f(T_{тр.})$

Состав ТСП		Регрессионные зависимости $I_h=f(T_{тр.})$ и $\tau = f(T_{тр.})$
наполнитель	связующее	
MoS <sub>2</sub>	мочевина - формальдегидная смола	$I_h = 7,034 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,0035 \cdot T_{тр.}} + 7,049 \cdot 10^{-14} \cdot e^{0,0296 \cdot T_{тр.}}$ ( $R^2=0,6765$ ) $\tau = 9 \cdot 10^6 \cdot T_{тр.}^{-1,969}$ ( $R^2=0,7373$ ) (по данным автора и результатам испытаний *)
Графит*	кремнийорганическая смола К-55	$I_h = 6,082 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,0157 \cdot T_{тр.}}$ ( $R^2=0,9666$ ) $\tau = 4 \cdot 10^{-5} \cdot T_{тр.}^3 - 0,0276 \cdot T_{тр.}^2 + 4,88 \cdot T_{тр.} - 6,67$ [94] ( $R^2=0,9854$ )
MoS <sub>2</sub> *	эпоксидная смола ЭП-96	$I_h = 4 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,014 \cdot T_{тр.}}$ ( $R^2=0,9675$ ) $\tau = 4493,4 \cdot e^{-0,014 \cdot T_{тр.}}$ ( $R^2=0,9675$ )
MoS <sub>2</sub> *	кремнийорганическая смола К-55	$I_h = 5 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,0125 \cdot T_{тр.}}$ ( $R^2=0,9782$ ) $\tau = 3414 \cdot e^{-0,013 \cdot T_{тр.}}$ ( $R^2=0,9782$ )

Примечание: \* - Сентюрихина, Л.Н. Твёрдые дисульфид - молибденовые смазки / Л.Н.Сентюрихина, Е.М. Опарина. - М.: Химия, 1966. - 152с.

Экспериментальными исследованиями, приведёнными в главе 5, установлена тесная корреляционная связь между антифрикционными характеристиками пары трения с ТСП ( $f_{тр.}$ ) и температурой трения ( $T_{тр.}$ ) (рисунок 4) .

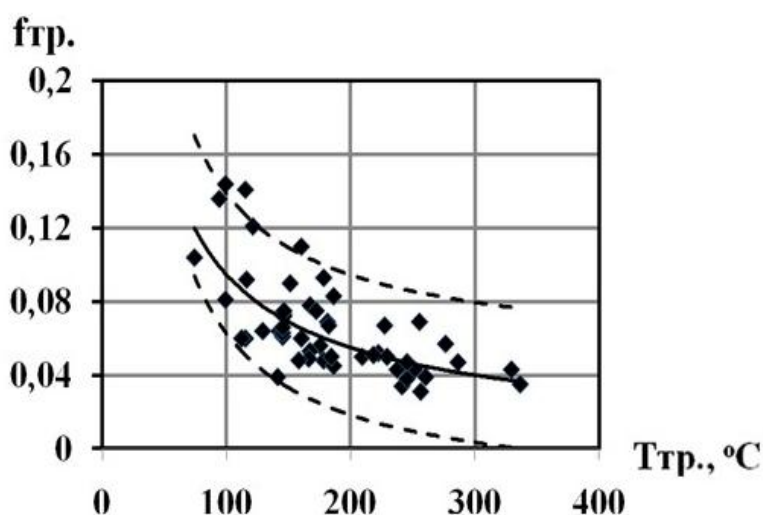


Рис.4. Теплофрикционное состояние пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 для режимов: установившегося трения (до нагрева пары трения); наработки при нагреве; установившегося трения (по данным эксперимента без нагрева при получении зависимости  $f_{тр.}=f(P,V)$  с границами доверительной 95% области)

С учётом определённых ранее зависимостей  $T_{тр.}=f(P,V)$  (табл.1), зная регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для различных ТСП, можно оценить соответствующие антифрикционные характеристики для рассматриваемых сопряжений с использованием методики, 1 и 2 этапы которой аналогичны представленной ранее на рис.1.

На 3 этапе осуществляется расчёт коэффициента трения  $f_{тр.}$  по формуле  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  (в случае функционирования узла при повышенной температуре  $T_{об.}$  последняя складывается с  $T_{тр.}$ ). Необходимые регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  были получены следующим образом. В результате обработки экспериментальных данных автора для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 (рис.4) была построена зависимость  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ , адекватно описываемая уравнением (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,5153$ ):

$$f_{тр.} = 0,01197 + 8,881 \cdot T_{тр.}^{-1} \quad (6)$$

где  $f_{тр.}$  - коэффициент трения;  $T_{тр.}$  - температура поверхности контакта [°C].

Регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для других типов ТСП были получены из экспериментальных данных, приведённых в работах (см. примечания к табл.3).



Экспериментальными исследованиями, проведёнными в условиях вакуума (см. главу 5), также было подтверждено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания  $I_h$  рассматриваемых пар трения с ТСП.

Таблица 3 – Регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для пар трения с ТСП различных составов для нормальных атмосферных условий

Тип ТСП	Состав	Регрессионные зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$
ВНИИ НП 212 (данные автора)	MoS <sub>2</sub> + мочевино - формальдегидная смола	$f_{тр.} = 0,01197 + 8,881 \cdot T_{тр.}^{-1}$ (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,5153$ )
ВНИИ НП 213 [*]	MoS <sub>2</sub> + кремнийорганическая смола	$f_{тр.} = 0,1223 - 0,00047 \cdot T_{тр.} + 6,29 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ ( $R^2=0,9764$ )
ЦВСП-3с [**]	Графит + CdO + кремнийорганическая смола	$f_{тр.} = 0,0896 - 1,47 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 3,464 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ ( $R^2=0,8863$ )
ВНИИ НП 229 [**]	MoS <sub>2</sub> + силикат натрия	$f_{тр.} = 0,0821 - 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 2,72 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ ( $R^2=0,9944$ )

Примечания: \* - Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. М.: Наука, 1971. 228с.

\*\* - Крioni Н.К. Высокотемпературные твёрдые смазочные покрытия в опорах скольжения. ж. Вестник УГАТУ. 2009, т. 12, №4(33), с. 102-105.

В результате обработки экспериментальных данных для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 для оценки  $I_h$  в вакууме была получена следующая регрессионная зависимость:

$$I_h = 10^{-12} \cdot T_{тр.}^{1,0202}, \quad (7)$$

где  $I_h$  – линейная интенсивность изнашивания;  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [°C].

Альтернативная зависимость ресурса  $\tau$  от температуры трения для пары с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума, описывается уравнением (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,8302$ ):

$$\tau = 4 \cdot 10^9 \cdot T_{тр.}^{-3,206}, \quad (8)$$

где  $\tau$  – ресурс, [мин.];  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [°C].

Методика оценки интенсивности изнашивания пар трения с ТСП для условий вакуума может быть записан в виде, представленном ранее на рис.1. Регрес-

сионная зависимость типа  $T_{тр.}=f(P,V)$  для пары с ТСП ВНИИ НП 212, полученная в результате экспериментальных исследований в условиях вакуума (см. главу 5) имеет вид (адекватность модели (9) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 5; 4} (1,56) < F^{табл.}_{0,05; 5; 4} (6,26)$ ):

$$T_{тр.} = 3,31 + 291,64 \cdot V + 0,643 \cdot P - 282,19 \cdot V^2, \quad (9)$$

где  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [ $^{\circ}C$ ];  $V$  – скорость скольжения [м/с];  $P$  – контактное давление [МПа].

В результате проведения экспериментальных исследований в вакууме (глава 5) установлена регрессионная зависимость антифрикционных характеристик рассматриваемых трибосопряжений от температуры трения  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ , (рисунок 5) для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212, адекватно описываемая уравнением (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,8362$ ):

$$f_{тр.} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot T_{тр.}^2 + 0,002 \cdot T_{тр.} + 0,190 \quad (10)$$

где  $f_{тр.}$  - коэффициент трения;  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [ $^{\circ}C$ ].

Учитывая полученную ранее регрессионную зависимость  $T_{тр.}=f(P,V)$  (9) методика расчёта коэффициента трения для рассматриваемых пар с ТСП может быть представлен в виде, представленном ранее на рис.1 (1 и 2 этапы). На 3 этапе осуществляется расчёт коэффициента трения  $f_{тр.}$  с помощью зависимости

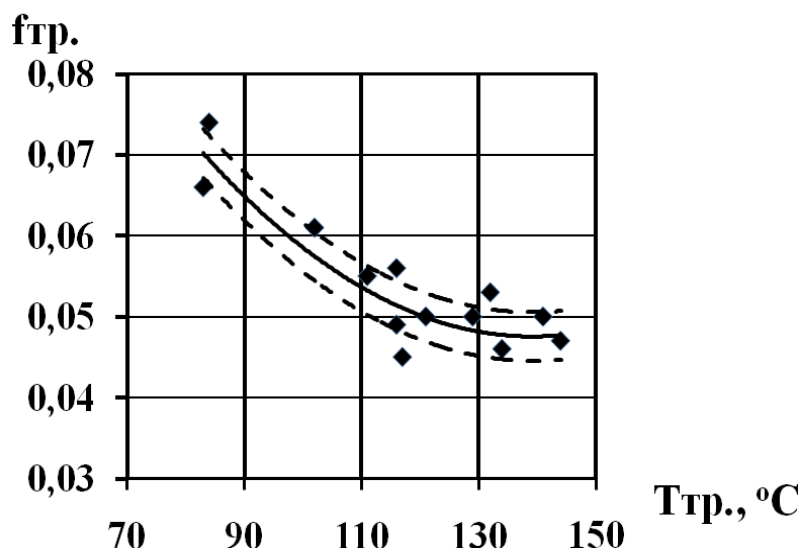


Рис.5. Регрессионная зависимость  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума с границами доверительной 95% области

$f_{тр.}=f(T_{тр.})$  (в случае функционирования узла при повышенной температуре  $T_{об.}$  последняя складывается с  $T_{тр.}$ ).

Искомые регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для пар трения с ТСП различных составов были рассчитаны с использованием экспериментальных данных, приведённых в работе (см. примечание к табл. 4).

**Четвёртая глава** посвящена оценке влияния конструкторско - технологических факторов на триботехнические показатели пар трения с ТСП. В случае использования в качестве контртела кольца, изготовленного из закален-

ной стали ХВГ, при возобновлении скольжения после остановов  $f_{тр.}$  таких

Таблица 4 - Регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума

Тип ТСП	Состав	Регрессионные зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$
ВНИИ НП 212 (данные автора)	MoS <sub>2</sub> + мочевино - формальдегидная смола	$f_{тр.} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot T_{тр.}^2 + 0,002 \cdot T_{тр.} + 0,190$ (величина достоверности аппроксимации – см. выше)
ВНИИ НП 213 [*]	MoS <sub>2</sub> + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр.} = 0,0905 - 3,46 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 5,86 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,8693$ )
Типа ЦВСП - 3с [*]	графит + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр.} = 0,152 - 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ (величина достоверности аппроксимации $R^2= 0,9568$ )
[*]	графит + силикат натрия	$f_{тр.} = 0,1167 - 3,99 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 4,23 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,9668$ )

Примечание: \*- Сентюрихина, Л.Н. Твёрдые дисульфид - молибденовые смазки / Л.Н.Сентюрихина, Е.М. Опарина. - М.: Химия, 1966. - 152с.

фрикционных сопряжений возрастает примерно в 2 раза в сравнении с его установившимся значением. Однако при трении по контртелу, изготовленному из нержавеющей стали I2X18H9T, явление "стоп-эффекта" не было зафиксировано. Дальнейшие исследования показали, что при "стоп-эффекте" повышение коэффициента трения ТСП на основе MoS<sub>2</sub> при возобновлении скольжения вызывается не только окислением смазочной поверхности MoS<sub>2</sub> до абразивной трехокси молибдена, но также и формоизменением контактной площадки на величину упругих деформаций материала контртела. В качестве одного из эффективных способов борьбы с явлением "стоп-зффекта" при работе с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> было рекомендовано использование материала контртела пары трения скольжения с более выраженными пластическими свойствами.

В результате проведенных экспериментов была установлена длительность останова пары трения скольжения для ТСП ВНИИ НП 212 и 213  $\Delta\tau = 1$  мин., когда с возобновлением скольжения увеличение  $f_{тр.}$  наблюдалось лишь на режиме

приработки, что позволило точно определить время ее окончания. Автором был разработан новый способ контроля времени приработки пар трения скольжения (а.с. 1059485), внедрённый на БЕЛАЗе, г. Жодино, Беларусь.

**Пятая глава** посвящена оценке влияния эксплуатационных условий на триботехнические показатели пар трения с ТСП, а также сравнительной оценке указанных показателей трибосопряжений с твёрдосмазочными покрытиями и самосмазывающихся материалов (СМ). В результате обработки экспериментальных данных были получены математические модели, позволяющие оценить влияние нагрузочно-скоростных факторов на ресурс  $\tau$  и коэффициент трения  $f_{тр.}$  пар с ТСП ВНИИ НП 212 при повышенной температуре (адекватность модели (12) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 6; 5}(1,13) < F^{табл.}_{0,05; 6; 5}(4,95)$ ):

$$\tau = 1794 - 1449 \cdot V - 7,55 \cdot P - 8,37 \cdot T_{об.} + 3 \cdot P \cdot V + 3,33 \cdot V \cdot T_{об.} + 2,55 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot T_{об.} + 334,92 \cdot V^2 + 0,01034 \cdot T_{об.}^2, \quad (12)$$

где  $\tau$  - ресурс [мин.];  $V$ -скорость скольжения [м/с];  $P$ - контактное давление [МПа];  $T_{об.}$ - объёмная температура нагрева пары трения [ $^{\circ}$ С].

Зависимость  $f_{тр.} = f(P, V, T_{об.})$  представлена моделью (13), адекватность которой не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 5; 5}(3,33) < F^{табл.}_{0,05; 5; 5}(5,05)$ ):

$$f_{тр.} = 0,177 - 6,94 \cdot 10^{-2} \cdot V - 1,776 \cdot 10^{-3} \cdot P - 4,19 \cdot 10^{-4} \cdot T_{об.} + 2,32 \cdot 10^{-6} \cdot T_{об.} \cdot P + 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot T_{об.} \cdot V + 1,814 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V + 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot V^2 + 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 7,75 \cdot 10^{-7} \cdot T_{об.}^2, \quad (13)$$

где  $f_{тр.}$  – коэффициент трения;  $V$ -скорость скольжения [м/с];  $P$ - контактное давление [МПа];  $T_{об.}$ - объёмная температура нагрева пары трения [ $^{\circ}$ С].

Проведённые проверки для схем трения «ролик-лента» (машина трения ИТК) и 4-шариковой схемы (машина трения КТ-2) подтвердили корректность моделей (12,13).

Следующим этапом работы явилась разработка метода определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов на примере исследования ТСП. Способ реализуется следующим образом. При помощи математических методов планирования эксперимента строится матрица, в которой варьируемыми факторами являются значения контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ , а параметром оптимизации - температура трения  $T_{тр.}$ . После приработки пары трения с испытуемым смазочным материалом в процессе одного испытания факторы  $P$  и  $V$  изменяют по заданному закону и непрерывно регистрируют соответствующую им  $T_{тр.}$  на стационарном уровне. В

результате математической обработки полученных данных рассчитывается уравнение поверхности отклика типа  $T_{тр.}=f(P, V)$ , вводя в которое оптимальную по интенсивности изнашивания, коэффициенту трения или другому фактору, определяющему процесс трения, температуру смазочного материала, получают соответствующую зависимость вида  $P_{опт.}=f(V_{опт.})$ . Экспериментально способ был опробован при испытании ТСП ВНИИ НП 212. В результате статистической обработки экспериментальных данных было получено следующее уравнение для расчёта контактной температуры трения  $T_{тр.}$  (адекватность модели (14) не отвергается при  $\alpha=0,01$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,01; 3; 4}(13,7) < F^{табл.}_{0,01; 3; 4}(16,69)$ ):

$$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 4,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2, \quad (14)$$

где  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [ $^{\circ}C$ ];  $V$ -скорость скольжения [м/с];  $P$ - контактное давление [МПа].

После преобразования уравнение оптимальных режимов трения (соответствующих температуре размягчения связующего  $T_{опт.}=100^{\circ}C$  и образования эффективной смазочной плёнки) пар с ТСП ВНИИ НП 212 приняло вид:

$$P_{опт.} = 6,636 \cdot V_{опт.}^{-1,759} \quad (15)$$

где  $P_{опт.}$ ,  $V_{опт.}$  – соответственно контактное давление и скорость скольжения, соответствующие оптимальному температурному режиму трения ТСП ВНИИ НП 212 ( $T_{опт.}=100^{\circ}C$ ).

Графически данная зависимость соответствовала эллипсу, представленному на рис.6, поз. 3. Для нахождения предельных режимов трения была разработана методика, представленная на рисунке 7. В результате её реализации получено искомое уравнение  $P_{пред.} = f(V_{пред.})$ :

$$P_{пред.} = 1397,8 \cdot V_{пред.}^{-2,132} \quad (16)$$

где  $P_{пред.}$ ,  $V_{пред.}$  – соответственно контактное давление и скорость скольжения, соответствующие температуре разрушения ТСП ВНИИ НП 212 ( $T_{разр.}=275^{\circ}C$ ).

Затем проводилась сравнительная оценка триботехнических показателей ТСП и самосмазывающихся материалов (СМ) при трении в нормальных атмосферных условиях. Полученные теплофрикционные характеристики различных СМ и ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях приведены на рисунке 8.

Показано, что в нормальных атмосферных условиях при низких контактных давлениях ( $P = 11-18$  МПа) и скоростях скольжения  $V < 0,4$  м/с рассматриваемые СМ обладают меньшим  $f_{тр.}$ , чем пара с ТСП ВНИИ НП 212.

**P, МПа**

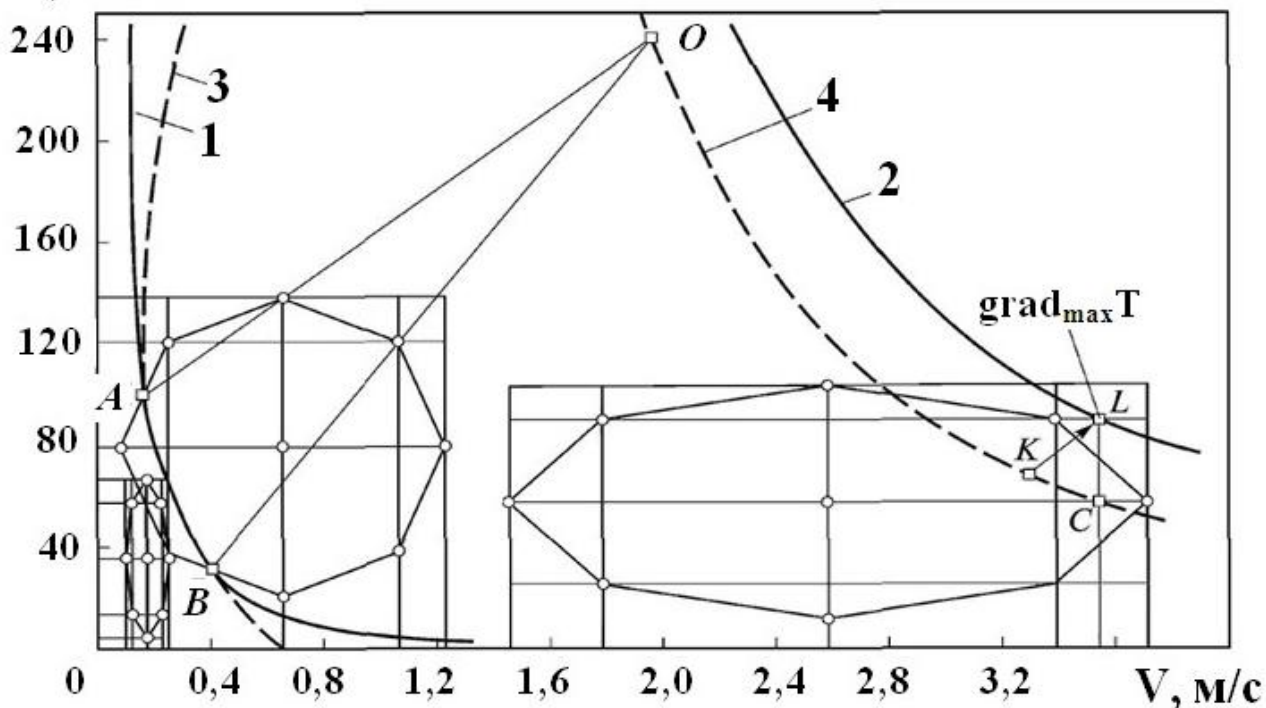


Рисунок 6 - Зависимости типа  $P = f(V)$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП

212: 1 - на оптимальном режиме трения  $P_{\text{опт.}} = 6,636 \cdot V_{\text{опт.}}^{-1,759}$ ;

2 - на предельных режимах трения  $P_{\text{пред.}} = 1397,8 \cdot V_{\text{пред.}}^{-2,132}$ ;

3,4 - исходные кривые, полученные экспериментально

Проведение экспериментов для определения  $T_{\text{разр.}}$  на предельных режимах трения при различных  $P_{1 \text{ пред.}}, V_{1 \text{ пред.}}; P_{2 \text{ пред.}}, V_{2 \text{ пред.}}; P_{3 \text{ пред.}}, V_{3 \text{ пред.}}$  и т.д.

Оценка и расчёт рабочих диапазонов проведения планируемых экспериментов и определение зависимости  $T_{\text{тр.}} = f(P, V)$

Построение "изотермы"  $P_{\text{max}} = f(V_{\text{max}})$  для наибольшей в эксперименте температуры  $T_{\text{max}}$

Определение направления максимального градиента изменения  $T_{\text{тр.}}$  на поверхности  $T_{\text{тр.}} = f(P, V)$  и расчёт зависимости  $P_{\text{пред.}} = f(V_{\text{пред.}})$  с учётом смещения по градиенту от  $T_{\text{max}}$  к  $T_{\text{разр.}}$

Рисунок 7 - Последовательность этапов при нахождении предельных режимов трения сопряжений с ТСП

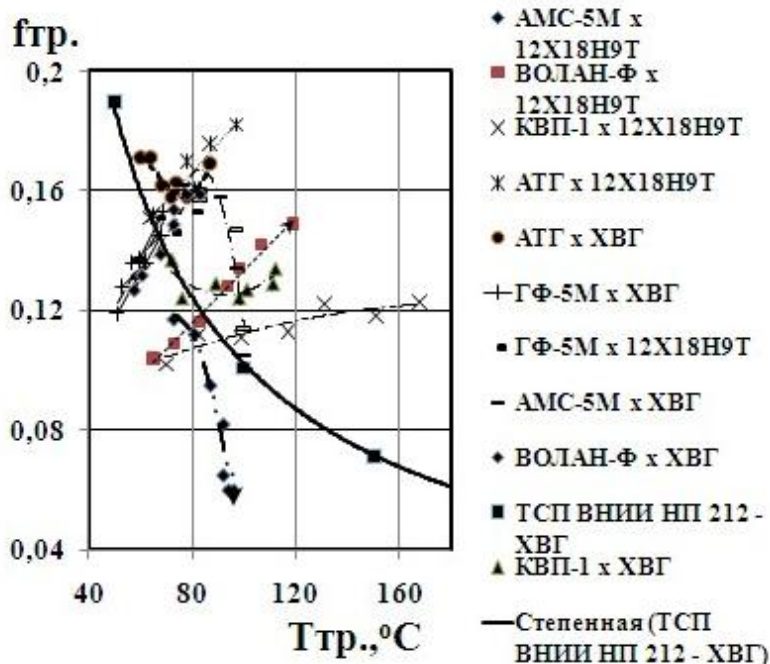


Рисунок 8. Теплофрикционные характеристики различных СМ и ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях

При более напряжённых режимах трения антифрикционные и прочностные характеристики пар с ТСП оказывались более предпочтительными.

К числу важнейших экстремальных условий, в которых эксплуатируются летательные аппараты с использованием ТСП и СМ, относятся условия вакуума.

Оценивалось влияние нагрузочно - скоростных факторов на ресурс  $\tau$ , антифрикционные свойства пар трения с ТСП в условиях вакуума. После проведения соответствующих преобразований искомые математические модели, выраженные в натуральных значениях факторов, приняли вид: (адекватность модели (18) не отвергается при  $\alpha=0,01$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,01; 5; 4}(12,7) < F^{табл.}_{0,01; 5; 4}(15,52)$ ):

$$\tau = 10804,7 - 34849 \cdot V - 66,75 \cdot P + 22791,34 \cdot V^2 + 166,03 \cdot V \cdot P, \quad (18)$$

где  $\tau$  - ресурс пары трения до разрушения [мин.];  $V$  - скорость скольжения [м/с];  $P$  - контактное давление [МПа];

(адекватность модели (19) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 3; 4}(3,68) < F^{табл.}_{0,05; 3; 4}(6,59)$ ):

$$f_{тр.} = 0,1564 - 0,153 \cdot V - 1,443 \cdot 10^{-3} \cdot P + 0,164 \cdot V^2 + 6,1 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 1,824 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V, \quad (19)$$

Графическая интерпретация зависимости коэффициента трения от нагрузочно - скоростных факторов для условий нормальной атмосферы и вакуума представлена на рисунке 9.

Проведённые проверки для схемы трения «вал-втулка» подтвердила корректность моделей (18,19). В результате исследования влияния нагрузочно-скоростных факторов на контактную температуру трения пар с ТСП в вакууме получена следующая математическая модель, выраженная в натуральных

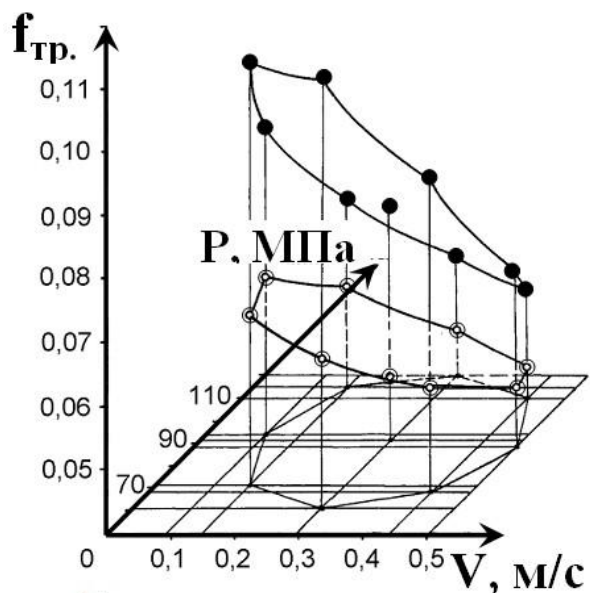


Рисунок 9. Графическая интерпретация влияния нагрузочно -скоростных факторов на коэффициент трения пары с ТСП ВНИИ НП 212:

—○— - в условиях вакуума ( $p \cong 4$  мПа);  
 —●— - в нормальных атмосферных условиях

значениях факторов (адекватность модели (20) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 5; 4}(1,58) < F^{табл.}_{0,05; 5; 4}(6,26)$ ):

$$T_{тр.} = 3,31 + 291,64 \cdot V + 0,643 \cdot P - 282,19 \cdot V^2, \quad (20)$$

где  $T_{тр.}$  – температура поверхности контакта [ $^{\circ}C$ ];  $V$ -скорость скольжения [м/с];  $P$ - контактное давление [МПа].

Графическая интерпретация зависимости температуры трения от нагрузочно - скоростных факторов для условий нормальной атмосферы и вакуума представлена на рисунке 10.

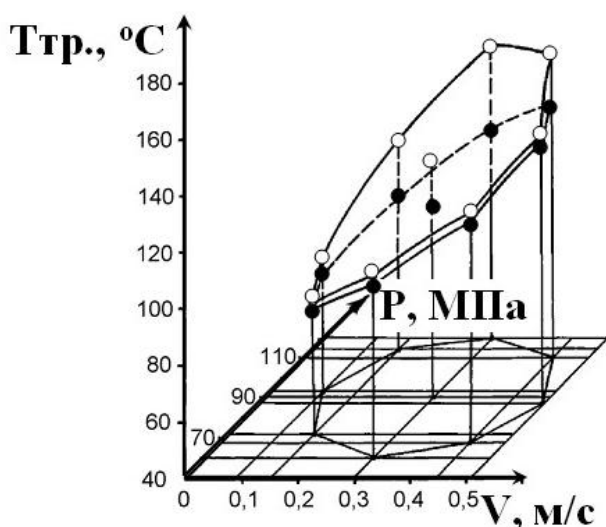


Рисунок 10. Графическая интерпретация влияния нагрузочно-скоростных факторов на температуру трения пары с ТСП ВНИИ НП 212:

—○— - в условиях вакуума ( $p \cong 4$  мПа);  
 —●— - в нормальных атмосферных условиях

Результаты сравнительной оценки теплофрикционных характеристик ТСП

ВНИИ НП 212 и СМ при трении в вакууме представлены на рисунке 11. Было установлено, что СМ АТГ в условиях вакуума оказался неработоспособным. лиз полученных зависимостей  $f_{тр.} = f(T_{тр.})$  выявляет значительно менее напряжённые теплофрикционные характеристики в парах трения с ТСП по сравнению с СМ в вакууме.

Исследование воздействия атмосферы соляного тумана на теплофрикционные показатели рассматриваемых фрикционных сопряжений показало, что



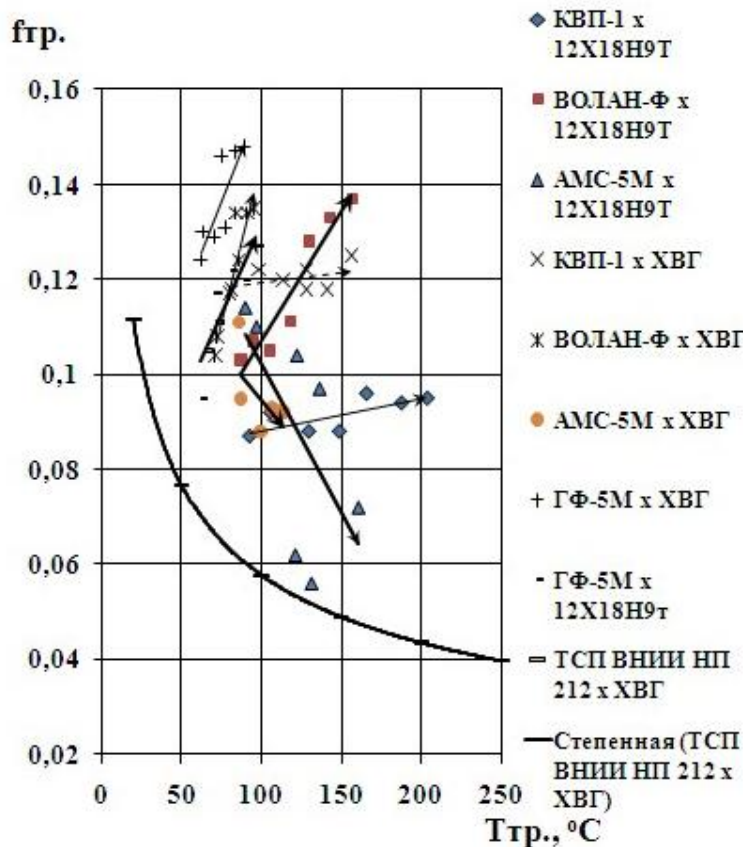


Рисунок 11. Теплофрикционные характеристики различных СМ и ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума

неприработанные образцы с ТСП типа ВНИИ НП имеют значительно большую коррозионную стойкость по сравнению с приработанными, на поверхности которых интенсивное осаждение соли наблюдалось уже после 1,2 суток выдержки. В результате экспериментов показано, что лучшие триботехнические показатели в целом об-

наружило ТСП ВНИИ НП 212М, сохранившее свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере с.т. в течение 7 суток.

**В шестой главе** представлены научно обоснованные конструкторско - технологические рекомендации для практического применения результатов выполненных исследований в целях снижения интенсивности изнашивания фрикционных сопряжений с ТСП как на этапе конструкторской подготовки (расчёт ресурса, коэффициента и контактной температуры трения, оценка влияния «стоп-эффекта», подбор оптимальных технологических параметров и типов смазочных материалов и др.), так и в производстве (механизированное нанесение ТСП, оценка времени приработки и др.). Проведена оценка триботехнических показателей пар с ТСП для реальных узлов, функционирующих в вакууме и в условиях нормальной атмосферы.

## ВЫВОДЫ

В работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения важной задачи комплексной оценки триботехнических показателей сопряжений ответственных узлов авиационно-космической техники с твердо-смазочными покрытиями, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение её обороноспособности.

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания и коэффициент трения рассматриваемых сопряжений как для условий нормальной атмосферы, так и для вакуума, что позволяет разработать методики оценки триботехнических показателей сопряжений с ТСП для различных условий эксплуатации.

2. Получена модель для расчёта интенсивности изнашивания в нормальных атмосферных условиях фрикционных сопряжений с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с органическим связующим в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, толщины ТСП, шероховатости основы и твёрдости контртела в результате реализации предложенного расчётного метода комплексной оценки триботехнических показателей пар трения, основанного на проведении математического планируемого эксперимента, в котором используются имеющиеся в литературе однофакторные зависимости. Полученная модель может быть использована для оценки триботехнических параметров рассматриваемых ТСП при различных сочетаниях конструкторско-технологических факторов для условий нормальной атмосферы. Использование данного метода позволяет существенно сократить объём экспериментальной работы и затраты времени.

3. Разработана методика оценки интенсивности изнашивания для пар трения с ТСП с использованием универсальных регрессионных зависимостей температуры трения от нагрузочно - скоростных параметров работы узла и регрессионных зависимостей интенсивности изнашивания от температуры трения для нормальной атмосферы и вакуума. Полученные модели применительно к парам трения с ТСП различных составов позволяют прогнозировать триботехнические показатели и ресурс узлов трения с ТСП, функционирующих в различных условиях при произвольном сочетании рассмотренных параметров.

4. Предложена методика оценки антифрикционных свойств пар трения с ТСП на основе использования регрессионных зависимостей температуры трения от контактного давления и скорости скольжения узла и регрессионных зависимостей коэффициента трения от температуры трения для нормальной атмосферы и вакуума. Определены соответствующие модели применительно к ТСП различных составов для оценки коэффициента трения трибосопряжений, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума.

5. Впервые предложен и экспериментально опробован для пар трения с ТСП оригинальный метод определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов, позволяющий получать в ре-

зультате проведения одного планируемого эксперимента зависимость для оценки оптимальных режимов трения и путём крутого восхождения по поверхности отклика зависимость для предельных режимов трения. Для трибосопряжений с ТСП ВНИИ НП 212 получены зависимости, позволяющие определять сочетания оптимальных и предельных режимов трения по скорости скольжения и контактному давлению.

6. Получены нелинейные математические модели, адекватно описывающие влияние нагрузочно-скоростных факторов на коэффициент трения и контактную температуру пар с ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях, на коэффициент трения при повышенной температуре, а также на коэффициент трения и контактную температуру рассматриваемых фрикционных сопряжений в вакууме. Корректность всех зависимостей проверена сравнением с экспериментальными данными других исследователей, что позволяет использовать их для практических расчётов.

7. Для выбора оптимальных типов смазочных материалов для узлов трения, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума проведена сравнительная оценка теплофрикционных характеристик пар трения с ТСП и самосмазывающихся материалов (СМ) для контртел различной твёрдости, функционирующих в указанных выше условиях. Показано, что в условиях нормальной атмосферы рассмотренные характеристики для СМ выше при  $T_{тр.} < 80-100^{\circ}\text{C}$ , а в вакууме лучшими показателями обладает ТСП. Неработоспособным в условиях вакуума оказался СМ высокотемпературный углеграфитовый антифрикционный материал марки АТГ.

8. Исследование комплексного влияния технологических факторов на прирабатываемость пар трения с ТСП и явление "стоп-эффекта" позволило определить оптимальные технологические параметры, обеспечивающие при минимальной интенсивности изнашивания наименьшее время приработки, разработать более точный по сравнению с имеющимися способ контроля времени приработки, а также эффективный способ существенного снижения "стоп-эффекта" за счёт использования материала контртела с более выраженными пластическими свойствами, т.е. меньшей твёрдости.

9. В результате исследования влияния атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели пар трения с ТСП установлено, что приработанные образцы оказались практически неработоспособными после воздействия указанной атмосферы. Неприработанные образцы сохраняли удовлетворительные триботехнические свойства в течение определенного срока в зависимости от времени вы-

держки в камере. Лучшие триботехнические показатели в целом обнаружил ТСП ВНИИ НП 212М, сохранившее свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере соляного тумана в течение 7 суток.

10. В результате проведённой работы на ряде авиационно-космических и других предприятий осуществлено проектирование, изготовление и внедрение установок и методик для оценки триботехнических показателей узлов трения с применением твёрдосмазочных покрытий для условий нормальной атмосферы и вакуума (ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (КБ «Салют»), ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», ФГУП ММП «Салют»; п/я Р-6601; БЕЛАЗ, Беларусь, г. Жодино.). Внедрение полученных решений позволило получить экономический эффект за счёт повышения производительности и снижения трудозатрат при проведении испытаний агрегатов изделия свыше 25 тыс. рублей в ценах 1982г.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и в международных рецензируемых изданиях*

1. Хопин, П. Н. Экспериментальная оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочным покрытием в зависимости от температурного фактора / П. Н. Хопин, О. В. Попов, В. А. Комаров // Трение и износ. -1985 - Т. 6.- № 6. - С. 1109—1116.
2. Хопин, П. Н. Сравнительная оценка работоспособности самосмазывающихся материалов при трении на воздухе/П. Н. Хопин, А. В. Петренко, Н. В. Фролова Т. Ф. Губанова, И. В. Александров // Пластические массы. – 1991.- № 10.- С. 25-27.
3. Хопин, П. Н. Исследование теплофрикционных характеристик самосмазывающихся материалов в вакууме по сравнению с твёрдосмазочными покрытиями / П. Н. Хопин, В. А. Комаров, Т. Ф. Губанова // Авиационная промышленность. – 1992.- № 3. - С. 38-40.
4. Хопин, П. Н. Теплофрикционное состояние контакта при трении самосмазывающихся материалов и твёрдосмазочных покрытий в нормальных атмосферных условиях / П. Н. Хопин // Пластические массы. -1992. - № 3.- С. 39-40.
5. Хопин, П. Н. Разработка расчётного метода комплексной оценки работоспособности пар трения с твёрдосмазочным покрытием / П. Н. Хопин // Трение и износ. - 1992.- Т. 13. -№ 6.- С. 1045—1051.
6. Хопин, П. Н. Оценка долговечности твёрдосмазочных покрытий на основе анализа топографии поверхностей трения / П. Н. Хопин // Трение и износ. - 1995.- Т. 16. - № 4.- С. 787-793.

7. Хопин, П. Н. Оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования / П. Н. Хопин // Авиационная промышленность. -2010.- № 2.- С. 49—52.
8. Хопин, П. Н. Исследование прирабатываемости пар трения с твёрдосмазочными покрытиями / П. Н. Хопин // Технология машиностроения.- 2011.- № 7 (109).- С. 44—49.
9. Хопин, П. Н. Разработка и опробование метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных покрытий / П. Н. Хопин // Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение.- 2011.- № 3 (84).- С. 48—55.
10. Хопин, П. Н. Работоспособность твёрдосмазочных покрытий на специально обработанных поверхностях / П. Н. Хопин // Технология машиностроения.- 2012. № 2 (116). - С. 47—49.
11. Хопин, П. Н. Оценка комплексного влияния технологических факторов на долговечность пар трения с твёрдосмазочными покрытиями / П. Н. Хопин // Справочник. Инженерный журнал. - 2012.- № 2 (179).- С. 47—52.
12. Хопин, П. Н. Исследование работоспособности твёрдосмазочных покрытий на поверхностях трения, подвергнутых механической и химико-термической обработке / П. Н. Хопин // Авиационная промышленность.-2012. № 1.- С. 14—18.
13. Khopin P.N. Method and Results of Assessment of the Performance of Friction Pairs with Solid Lubricating Coatings under Various Operating Conditions. Journal of Friction and Wear. 2012. Volume 33, Number 1, 14-21, DOI: 10.3103/S1068366612010060.
14. Хопин, П. Н. Влияние атмосферы соляного тумана на работоспособность твёрдосмазочных покрытий / П. Н. Хопин // Справочник. Инженерный журнал. -2012.- № 6 (183).- С. 52—54.
15. Хопин, П.Н. К вопросу о расчёте эксплуатационной долговечности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями / П. Н. Хопин // Технология лёгких сплавов. -2012.- № 2.- С. 117-120.
16. Хопин, П.Н. Методика и результаты оценки корреляции теплофрикционных характеристик твёрдосмазочных материалов для различных условий эксплуатации / П. Н. Хопин // Справочник. Инженерный журнал.-2012.-№ 11 (183). - С. 20—26.
17. Хопин, П. Н. Об оценке антифрикционных характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями различных составов / П. Н. Хопин // Авиационная промышленность.-2013.- №1.- С. 42-52.
18. Khopin P.N. Assessment of Antifriction Characteristics of Friction Pairs with Solid Lubricating Coatings under Various Operating Conditions. Journal of Friction and Wear. 2015. Volume 36, Number 5, pp. 491-498. DOI: 10.3103/S1068366615050074
19. Хопин, П. Н. Оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в условиях вакуума / П. Н. Хопин // Вестник НПО им. С.А.Лавочкина.-2016.- № 2.- С. 85-90.

20. Хопин, П.Н. Термокорреляционная оценка работоспособности пар трения твердосмазочными покрытиями для нормальных атмосферных условий. / П. Н. Хопин // Сборка в машиностроении, приборостроении.-2017.- №5.- С. 225-229.
21. Хопин, П.Н. Исследование периода приработки пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях нормальной атмосферы / П. Н. Хопин // Сборка в машиностроении, приборостроении. -2017.- №6. - С.269-273.
22. Хопин, П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе регрессионных зависимостей / П. Н. Хопин // Сборка в машиностроении, приборостроении.-2017.- №7.- С.317-320.
23. Хопин, П.Н. Оценка долговечности пар трения с твердосмазочными покрытиями различных составов отечественного и зарубежного производства / П.Н. Хопин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.- 2018.- №1(694).- С.84-93.
24. Khopin P.N. Test Analysis of Friction Couples With Solid Lubricant Coatings under Ground–Space Conditions and Prediction of Tribological Characteristics. Journal of Friction and Wear. 2018. Volume 39, Number 2, pp. 137-144. DOI: 10.3103/S1068366618020071.

#### *Публикации в других научных журналах и трудах*

1. Маркво, В. Е. Анализ перспективных конструкций вакуумных установок и разработка узла нагружения установки для проведения термовакуумных испытаний на трение и износ / В. Е. Маркво, А. Ф. Волков, П. Н. Хопин.- М.,-1978.-Деп. в ГОСИНТИ, реф. в сб.: Местный производственный опыт в промышленности. - №7.
2. Комаров, В. А. Исследование истираемости и антифрикционных свойств твёрдосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена/ В. А. Комаров, А. Ф. Волков, П. Н. Хопин. - М., -1979. - Деп. в ГОСИНТИ 19.06.79. - № 3679.
3. Машков, В.Н. Анализ перспективных конструкций и разработка установки для проведения термовакуумных испытаний на износостойкость / В. Н. Машков, А. Ф. Волков, А. А. Кушель, П. Н. Хопин // Технология производства приборов летательных аппаратов : Межвузовский сборник / Л., ЛИАП. - 1979.- Вып.1(133). - С. 135—140.
4. Хопин, П. Н. Методика экспериментального исследования теплового процесса трения на роликовой машине/ П. Н. Хопин. - М., 1981.- Деп. в ЦНТИ «Волна» 17.08.81, № 4609.
5. Хопин, П. Н. Исследование теплового режима трения пары с твёрдосмазочным покрытием / П. Н. Хопин. - М., 1981.- Деп. в ЦНТИ «Волна» 17.08.81, № 4609.
6. Попов, О.В. О природе «стоп-эффекта» при трении твёрдосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена/ О. В. Попов, П. Н. Хопин, А. Ф. Волков, В. А. Комаров // Машиноведение. - 1982.- № 4.- С.116-121.
7. Хопин, П. Н. Практические рекомендации по обеспечению качественного нанесения твёрдосмазочных покрытий методом напыления / П. Н. Хопин. - М., 1982. - Деп. в ЦНТИ «Волна» 25.05.82, № 4923.
8. Хопин, П. Н. Конструкции образцов и методические вопросы их применения при проведении многоцелевых фрикционных испытаний на роликовой машине трения / П. Н. Хопин. - М., - 1985. - Деп. в ЦНТИ «Волна», № 6479.
9. Хопин, П. Н. Устройство для исследования процессов трения и износа на роликовых образцах / П. Н. Хопин, А. Ф. Волков, Е. Н. Чернышев. - М.,-1986.- Деп. в ВИМИ 15.04.86, № 6799.
10. Хопин, П. Н. Разработка на основе математического эксперимента расчётного

- метода комплексной оценки работоспособности пар трения с твёрдосмазочным покрытием / П. Н. Хопин // Триботехника - машиностроению: тез. четвертой моск. науч. - техн. конф. - М.,: АН СССР. -1989.- С. 24—25.
11. Хопин, П. Н. Оценка долговечности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями на основе исследования контактных поверхностей пар трения / П. Н. Хопин, А. Г. Бойцов // Новые материалы и технологии : сб. тр. Рос. науч. - техн. конф. - М., МАТИ - РГТУ. – М.: ИЦ МАТИ - РГТУ - 1995.- С. 52—56.
  12. Хопин, П. Н. Способ определения предельных и оптимальных режимов трения твёрдосмазочных покрытий / П. Н. Хопин // Ресурсосберегающие технологии машиностроения: сб. науч. тр. межвузовской науч. - техн. конф.: - М.- МГААТМ, -1995. - С. 300—303.
  13. Хопин, П. Н. Экспериментальное исследование работоспособности пар трения с твёрдосмазочным покрытием в нормальных атмосферных условиях и в вакууме / П. Н. Хопин // Новые материалы и технологии : тез. докл. на Всерос. науч.-техн. конф., М. МАТИ-РГТУ-16-18 окт.1997- М.,ИЦ МАТИ,-1997.-С. 22.
  14. Хопин, П. Н. Обеспечение и восстановление работоспособности контактных поверхностей трения деталей авиационных двигателей / П. Н. Хопин // Новые материалы и технологии НТМ-2000 : тез. докл. на Всерос. науч. - техн. конф., М., МАТИ - РГТУ- 24—25 окт.2000— М.: ИЦ МАТИ – РГТУ, 200 - С. –130-131.
  15. Хопин, П. Н. Расчётно-экспериментальное обеспечение работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями на основе  $MoS_2$  / П. Н. Хопин // Науч. тр. МАТИ - РГТУ- М., МАТИ – РГТУ, 2002.- ИЦ МАТИ - РГТУ, 2002 - Вып. 5 (77). - С. 249—254.
  16. Хопин, П. Н. К вопросу о расчёте долговечности пар трения с твёрдосмазочными твёрдосмазочными покрытиями различных составов / П. Н. Хопин // Науч. тр. МАТИ — РГТУ - М., МАТИ – РГТУ, 2004: М.: ИЦ МАТИ - РГТУ - 2004.- Вып. 7 (79). - С. 187—191.
  17. Хопин, П. Н. Исследование влияния технологических факторов на работоспособность пар трения с твёрдосмазочными покрытиями / П. Н. Хопин // Новые материалы и технологии: тез. докл. Всерос. науч. - техн. конф.- М., МАТИ - РГТУ - 17—19 нояб. 2004 – М.: ИЦ МАТИ - РГТУ. 2004 - Т. 2.- С. 35—36.
  18. Хопин, П. Н. Работоспособность пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях эксплуатации / П. Н. Хопин // Ракетно-космические комплексы / КБТМ — МАТИ - РГТУ им. К. Э. Циолковского. 2005.- № 1. - С. 50—54.
  19. Хопин, П. Н. К вопросу об оценке ресурса работы узлов трения ЛА с применением твёрдосмазочных покрытий / П. Н. Хопин // Новые материалы и технологии НМТ-2006 : материалы Всерос. науч. - техн. конф., М., МАТИ – РГТУ - 21—23 нояб. 2006 - М.: ИЦ МАТИ - РГТУ. – 2006. - Т. 2. - С. 43-44.
  20. Хопин, П. Н. Перспективные конструкции установок для проведения испытаний на трение и износ в вакууме / П. Н. Хопин: науч. тр. МАТИ – РГТУ - М., МАТИ – РГТУ, 2006. - М.: ИЦ МАТИ - РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2006 - вып. 11(83) - С. 132—136.
  21. Хопин, П. Н. Исследование влияния технологических факторов на работоспособность пар трения с твёрдосмазочными покрытиями / П. Н. Хопин: науч. тр. МАТИ – РГТУ. – М., МАТИ – РГТУ, 2007 - М.: ИЦ МАТИ - РГТУ -2007.- Вып. 12 (84).- С. 149—154.
  22. Хопин, П. Н. Работоспособность твёрдосмазочных покрытий в вакууме / П. Н. Хопин // Быстрозакалённые материалы и покрытия: сб. тр. 7-я Всерос. с междунар. участием науч. - техн. конф. – М. МАТИ - РГТУ - 2-3 дек. 2008; М.: ИЦ МАТИ - РГТУ. 2008 - С. -110 - 114.
  23. Хопин, П. Н. Работоспособность твёрдосмазочных покрытий в условиях солевого тумана / П. Н. Хопин // Новые материалы и технологии: НМТ-2008: материалы Всерос. науч. - техн. конф. – М., МАТИ - РГТУ – 11-12 нояб. 2008 –М., ИЦ МАТИ - РГТУ. 2008 - Т. 2.- С. 54-55.
  24. Хопин, П. Н. Триботехника: учебное пособие / П. Н. Хопин. - М.: ИЦ МАТИ - РГТУ.- 2009.- 238 с.
  25. Хопин, П. Н. Экспериментальное многофакторное исследование температурного состояния контактных поверхностей трения твёрдосмазочных покрытий / П. Н. Хопин: науч. тр. МА-

- ТИ - РГТУ. – М.: МАТИ - РГТУ, 2009 – М.: ИЦ МАТИ-РГТУ - 2009 - Вып. 15 (87). - С. 143—148.
26. Хопин, П. Н. Теплофрикционные характеристики самосмазывающихся материалов и твёрдосмазочных покрытий в различных условиях / П. Н. Хопин // Полёт. - 2010. - № 4. - С. 56-60.
  27. Хопин, П. Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования / П. Н. Хопин. - М.: МАТИ-РГТУ, - 2012. - 255 с.
  28. Хопин, П. Н. Работоспособность твёрдосмазочных покрытий в различных условиях / Петр Хопин. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, - 2012. - 179 с.
  29. Хопин, П. Н. Оценка антифрикционных характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями различных составов/ П. Н. Хопин: научные труды МАТИ-РГТУ. – М., ИЦ МАТИ-РГТУ, 2012 - Вып.19(91).- С. 186-191.
  30. Хопин, П. Н. Методы оценки эксплуатационных характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями. / П. Н. Хопин // Евразийский союз учёных - М., - 2014. - №4 (ч. 5).- С.75-78.
  31. Хопин, П.Н. Оценка долговечности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями на основе термодилатационных зависимостей. / Хопин П.Н. // Результаты научных исследований и разработок: сб. статей Международной научно-техн. конфер., 2015 - Стерлитамак: РИЦ АМИ - 2015.- С.80-83.
  32. Хопин, П.Н. Термодилатационный подход к оценке работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями для условий нормальной атмосферы. / П. Н. Хопин // Трибология – машиностроению: тезисы докладов XI Международной НТК - М.: 01 – 03 ноября 2016г. – М., ИМАШ, - 2016, - С. 254-255.
  33. Хопин, П.Н. Термодилатационный подход к оценке работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями для условий вакуума / П. Н. Хопин // Трибология – машиностроению: тезисы докладов XI Международной НТК - М.: 01 – 03 ноября 2016г. – М., ИМАШ, - 2016, - С. 255-257.
  34. Хопин, П.Н. К вопросу об оценке работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями / П.Н.Хопин // ТестМат: сб. материалов IX Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов.- М., ВИАМ, 20 апреля 2017г. – М., ФГУП ВИАМ ГНЦ РФ. - 2017.- с.12.
  35. Хопин, П.Н. Сравнительная оценка работоспособности сопряжений с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: материалы X Всероссийской конференции (г.Москва, 09 фев. 2018 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М.: ВИАМ, 2018. – С. 381-396. - ISBN 978-5-905217-22-7.

#### **Авторские свидетельства**

1. Устройство для испытания материалов на трение и износ: а.с. 926573 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 N 3/56. / П. Н. Хопин, В. А. Комаров, А. Ф. Волков (СССР); заявитель: - ; № 2979446/25-28; заявл. 01.09.80; опубл. 07.05.82, Бюл. № 17.- 4 с.
2. Способ определения времени приработки: а. с. 1059485 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 N 3/56. / О. В. Попов, П. Н. Хопин, В. А. Комаров, А. Ф. Волков, В. А. Казьмин (СССР). заявитель: - ; № 3275207/25-28; заявл. 16.04.1981; опубл. 07.12.1983, Бюл. № 45. – 2 с.
3. Устройство для испытания материалов на трение и износ: а.с. 1515094 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 N 3/56. / П. Н. Хопин, О. В. Попов, В. А. Комаров (СССР); заявитель: - ; № 3689615/25-28; заявл. 06.01.84; опубл. 15.10.89, Бюл. № 38.-8с.
4. Установка для испытаний материалов на трение и износ в вакууме: а.с. 1539586 СССР, МКИ<sup>5</sup> G 01 N 3/56, G 01 N 19/02/ П. Н. Хопин; заявитель: Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э Циолковского; № 4424977/25-28; заявл. 06.04.88; опубл. 30.01.90, Бюл. № 4.- 6с.