

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

*На правах рукописи*

**ХОПИН Пётр Николаевич**

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

Специальность: 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант  
д.т.н. Курапов П.А.

Москва, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА I СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>15</b>
1.1 Область применения и преимущества твердых смазок.....	15
1.2 Основные сведения о твердых смазках.....	24
1.3 Влияние технологических факторов на триботехнические показатели твердосмазочных покрытий в парах трения.....	38
1.4 Влияние эксплуатационных условий на триботехнические показатели пар трения с твёрдосмазочными покрытиями.....	42
1.5 Цель и задачи исследований.....	51
<b>ГЛАВА 2 ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>55</b>
2.1 Структура и порядок исследований.....	55
2.1.1 Методика комплексной оценки триботехнических показателей.....	55
2.1.1.1 Микроанализ контактирующих поверхностей трения с ТСП.....	55
2.1.1.2 Методика комплексной оценки на основе математического эксперимента.....	57
2.1.1.3 Методика оценки триботехнических показателей на основе регрессионных зависимостей для нормальных атмосферных условий и вакуума.....	58
2.1.2 Методика оценки влияния технологических факторов.....	59
2.1.3 Методика оценки влияния эксплуатационных условий .....	64
2.1.3.1 Методика исследования влияния температурного фактора в нормальных атмосферных условиях .....	64
2.1.3.1.1 Методика исследования влияния нагрузочно – скоростных факторов при повышенной температуре.....	64
2.1.3.1.2 Методика разработки и опробования метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения	

смазочных материалов.....	70
2.1.2.1.3 Методика оценки антифрикционных характеристик.....	75
2.1.2.1.4 Методика сравнительной оценки триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов .....	75
2.1.2.2 Методика исследования влияния вакуума.....	77
2.1.2.2.1 Методика исследования влияния нагрузочно – скоростных факторов .....	77
2.1.2.2.2 Методика сравнительной оценки триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов.....	78
2.1.3 Методика исследования влияния атмосферы соляного тумана.....	78
2.2 Оборудование, аппаратура и материалы.....	79
2.3 Выводы к главе 2.....	107
<b>ГЛАВА 3 КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ .....</b>	<b>109</b>
3.1 Микроанализ контактирующих поверхностей трения с ТСП.....	109
3.1.1 Растровое сканирование контактирующих поверхностей.....	109
3.1.2 Оценка микротопографии поверхностей трения.....	112
3.1.3 Элементный микроанализ трущихся поверхностей .....	114
3.2 Разработка расчётного метода комплексной оценки на основе математического эксперимента.....	117
3.2.1 Анализ эксплуатационно-технологических факторов, разработка и реализация расчётного метода.....	117
3.2.2 Экспериментальная оценка достоверности полученной модели.....	143
3.3 Методика и оценка интенсивности изнашивания на основе регрессионных зависимостей в нормальных атмосферных условиях.....	144
3.4 Методика и оценка антифрикционных характеристик основе регрессионных зависимостей в нормальных атмосферных условиях .....	150
3.5 Методика и оценка интенсивности изнашивания на основе	

регрессионных зависимостей в вакууме.....	154
3.6 Методика и оценка антифрикционных свойств на основе регрессионных зависимостей в вакууме.....	155
3.7 Выводы к главе 3 .....	160
<b>ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТОРСКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ.....</b>	<b>162</b>
4.1 Влияние материала основы и его предварительной обработки .....	162
4.1.1 Сравнение интенсивности изнашивания, антифрикционных свойств	162
4.1.2 Триботехнические показатели твёрдосмазочных покрытий на титановой основе.....	163
4.2 Оценка комплексного влияния конструкторско - технологических факторов .....	164
4.3 Результаты исследования явления «стоп-эффекта».....	174
4.3.1 Исследование комплексного влияния технологических факторов.....	174
4.3.2 Новый способ контроля времени приработки пар трения скольжения .....	182
4.4 Выводы к главе 4 .....	185
<b>ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ.....</b>	<b>190</b>
5.1 Результаты исследования влияния температурного фактора в нормальных атмосферных условиях.....	191
5.1.1 Влияние нагрузочно – скоростных факторов при повышенной температуре.....	191
5.1.2 Разработка и опробование метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных материалов.....	199
5.1.3 Оценка антифрикционных характеристик.....	208
5.2 Сравнительная оценка триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов в нормальных атмосферных условиях.....	210



5.2.1	Исследование теплофрикционных показателей самосмазывающихся материалов для различных материалов контртела.....	210
5.2.2	Сравнение теплофрикционных показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов.....	214
5.3	Результаты исследования влияния вакуума.....	219
5.3.1	Влияние нагрузочно – скоростных факторов на триботехнические показатели и температурные характеристики .....	227
5.3.2	Сравнительная оценка триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов при трении .....	227
5.3.2.1	Исследование теплофрикционных характеристик самосмазывающихся материалов для различных материалов контртела...	227
5.3.2.2	Сравнение теплофрикционных характеристик твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов.....	231
5.4	Результаты исследования влияния атмосферы соляного тумана.....	234
5.5	Выводы к главе 5 .....	239
	<b>ГЛАВА 6 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>241</b>
6.1	Технологические рекомендации по повышению надежности качественного нанесения твёрдосмазочных покрытий.....	241
6.2	Конструкторско-технологические рекомендации по обеспечению триботехнических показателей пар трения с твёрдосмазочными покрытиями и самосмазывающимися материалами.....	242
6.3	Оценка эффективности внедрения результатов исследований, испытательного оборудования, технологической оснастки, методов испытаний и выбора пар трения.....	245
6.3.1	Внедрение результатов работы.....	245
6.3.2	Оценка ресурса работы реальных узлов трения с твёрдосмазочными покрытиями.....	247
6.4	Выводы к главе 6.....	257

<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>259</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>271</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – РАСШИРЕННАЯ МАТРИЦА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ТИПА 2<sup>6</sup> .....</b>	<b>289</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б – МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО РОТАТАБЕЛЬНОГО УНИФОРМ – ПЛАНА 2 ПОРЯДКА ДЛЯ 5 ФАКТОРОВ.....</b>	<b>295</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В - ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ПРОВЕДЁННОГО ПО МЕТОДУ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО РОТАТАБЕЛЬНОГО УНИФОРМ – ПЛАНИРОВАНИЯ 2 ПОРЯДКА</b>	<b>300</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г - АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....</b>	<b>304</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений совершенствования изделий аэрокосмической техники является повышение надёжности их функционирования. Их безотказная работа определяется надёжностью работы отдельных узлов и агрегатов и, в том числе, ответственных узлов трения различных механизмов и устройств, автономно функционирующих в условиях высокого вакуума при воздействии различного рода облучений, экстремальных нагрузок, повышенной температуры. К ним относятся механизмы раскрытия антенн, регулируемые опоры и подвески двигателей космических аппаратов, замки рабочих лопаток ГТД, шарнирно-болтовые, резьбовые, зубчатые соединения, силовые возвратно – пневматические приводы, подшипники, регулируемые опоры и другие трущиеся соединения космических кораблей, авиационных двигателей и других летательных аппаратов, и, в том числе, ответственных узлов трения различных механизмов и устройств, показанных на рис. 4.1-4.3.

В условиях высокого вакуума исключается образование поверхностных окисных плёнок, происходит интенсивное испарение смазочных материалов, что, с одной стороны, приводит к ухудшению их смазочных характеристик, а с другой стороны, вызывает загрязнение ответственных поверхностей оптических приборов и электронной техники. Поэтому жидкая смазка не применяется, консистентная смазка может использоваться при небольшом сроке службы. Большинство узлов изделий аэрокосмической техники должны функционировать заданный ресурс без дополнительной смазки, т.к. создание сложных централизованных смазочных систем вследствие экономии веса используется лишь в исключительных случаях.

Особое место при решении проблемы обеспечения смазки узлов трения, функционирующих в указанных экстремальных условиях, занимают твёрдосмазочные покрытия (ТСП) [22,55], среди которых наиболее широкое практическое применение нашли ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующими

веществами типа ВНИИ НП, ВАП и др. Эти покрытия хорошо зарекомендовали себя как при работе в нормальной атмосфере, так и особенно в условиях вакуума. Несмотря на большое число исследований, до настоящего времени не разработаны методики и математический аппарат для их реализации для оценки важнейших трибологических свойств для пар трения с ТСП, работающих как в нормальных, так и в экстремальных условиях космического пространства при произвольных сочетаниях давлений, скоростей 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, а также с учётом увеличения сроков эксплуатации космических агрегатов до 10 и более лет особую актуальность приобретает проблема разработки методов оценки триботехнических свойств пар трения с твёрдосмазочными покрытиями для различных условий эксплуатации.

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

Для достижения указанной цели требовалось решение следующих **задач**:

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявить наиболее существенный фактор, влияющий на триботехнические показатели пар трения с твёрдосмазочными 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 смазочных 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.

В результате проведения в рамках диссертационной работы исследований получены следующие **основные научные результаты**:

1. Установлены закономерности влияния нагрузочно – скоростных

режимов для широкого диапазона их изменений на эксплуатационную температуру при трении, а также термодинамические 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 характеристики 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 ротатбельного 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  $\text{MoS}_2$  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).

Получены зависимости для расчёта оптимальных, соответствующих образованию эффективной смазочной плёнки на поверхностях трения с ТСП ВНИИ НП 212, и предельных режимов трения рассматриваемых сопряжений.

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. Установлено, что приработанные образцы оказались практически неработоспособными после воздействия указанной атмосферы.

**Методы и достоверность исследований.** Теоретические и эмпирические 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.

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

- выявленное определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания и коэффициент трения рассматриваемых фрикционных сопряжений 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;

**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 инструмента» 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» в 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 печатная работа, 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 53 таблицы и 128 иллюстраций. Список использованных источников состоит из 175 наименований источников. В главе I на основе анализа отечественной и зарубежной литературы по вопросу исследования влияния различных эксплуатационно – технологических факторов на триботехнические показатели твёрдосмазочных покрытий сформулированы цель и задачи исследований. В главе 2 приводится методика проведения работы. Глава 3 посвящена комплексной оценке триботехнических показателей пар трения с ТСП. В главе 4 исследуется влияние конструкторско -

технологических факторов на триботехнические показатели рассматриваемых сопряжений. Глава 5 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 главе 6 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.

Экспериментальная часть работы выполнена в лаборатории кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в тесном сотрудничестве с предприятиями отрасли.

# ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Область применения и преимущества твёрдых смазок

Известно, что окружающая среда является одним из факторов, определяющих процессы физико-химического взаимодействия в зоне фрикционного контакта. В атмосферных условиях на поверхности трения отсутствуют окисные плёнки, уменьшающие трение и предотвращающие непосредственный контакт металлических поверхностей. изнашивающиеся в процессе наработки плёнки окислов вновь восстанавливаются под воздействием окружающей газовой среды. При вакуумировании давление и состав последней изменяются, нарушается динамическое равновесие адсорбированных на поверхности металлов плёнок, затрудняется их образование, что приводит к контакту очищенных поверхностей и быстрому их схватыванию [106]. В неметаллических парах трения при понижении давления происходят испарение материалов или отдельных их составляющих. Потери же в весе до 10% и более существенно ухудшают свойства полимерных материалов [25]. Некоторые полимеры (пластмассы и эластомеры) под воздействием облучения теряют эластичность или разрыхляются, после чего легко разрушаются [106]. Применение жидких и консистентных смазок для большинства узлов трения, работающих в вакууме, ограничено сравнительно высокой скоростью испарения. Жирные кислоты из-за отсутствия кислорода и водяных паров в высоком вакууме также перестают выполнять свои функции, так как для образования металлических мыл необходимы кислород и водяные пары [106]. Недостатками жидких смазок являются узкий диапазон рабочих температур (до 250°C), испаряемость в условиях вакуума и загрязнение из-за этого других объектов, необходимость уплотнения, а, следовательно, усложнение конструкции узлов трения и утяжеление механизмов, что является существенным фактором для автономных ЛА.

Высокой работоспособностью в указанных условиях обладают твёрдые смазки (ТС). Они находят применение в следующих случаях:

1. в условиях высокого и сверхвысокого вакуума, радиации, теплового излучения [7,12,28,29,62,63,70,106,127,138,142,149,153,170];

2. в узлах трения, работающих при экстремальных нагрузках, соизмеримых с пределами текучести металлов [28,29,170];

3. при малых скоростях скольжения, недостаточных для образования смазочного гидродинамического клина при трении с использованием в качестве смазки минеральных и синтетических масел [29,81,170];

4. в широком диапазоне рабочих температур, как отрицательных, так и положительных [3,9,12,28,29,62,64,22,153,154,170].

ТС используются также в качестве основных компонентов самосмазывающихся антифрикционных материалов [55, 7]. К их достоинствам следует отнести малый вес [70], постоянную смазку в условиях хранения. В отличие от жидких масел при использовании ТС не требуется специальных уплотнений и систем циркуляции смазки [70,103], что значительно упрощает конструкции узлов трения ЛА. Применение ТС может исключить необходимость периодического введения смазочного материала, что особенно в процессе эксплуатации летательных аппаратов.

В настоящее время из всех известных ТС в промышленности наиболее широко применяются графит, дисульфид молибдена и фторопласт [104, 146,147,173]. Однако область применения последнего ограничена низкой несущей способностью, механической прочностью, большим коэффициентом линейного расширения, невысокой адгезией.

Начало применения  $\text{MoS}_2$  относится к 40-м годам, и в настоящее время он является наиболее широко распространенным антифрикционным материалом [70], в том числе и для летательных аппаратов (ЛА), функционирующих в экстремальных условиях. Применение твердых смазок в опорах скольжения и качения позволили значительно повысить надежность и долговечность узлов

сухого трения ЛА, функционирующих в условиях вакуума и различного вида облучений. Так, по данным американского научно-исследовательского центра Годдарта, в орбитальной солнечной обсерватории (спутник типа «Тирос») для смазки шарикоподшипников цепного привода в вакууме успешно использовалась паста из  $\text{MoS}_2$  [104]. Д. Мур приводит данные, что при температуре  $-157^\circ\text{C}$  твердая смазка, состоящая из фенольной смолы и дисульфида молибдена, обеспечила беспрепятственное выдвижение регулируемых опор космического корабля с астронавтами на борту, который совершил посадку на Луну в июле 1969 г. [70].

Область применения ТС по данным зарубежных авторов [56,148,156,161] распространяется и на объекты военной техники, где они используются в конструкциях направляющих пусковых установок, реактивных снарядов и ракет, трущихся частей артиллерийских орудий и стрелкового оружия. Так например, компания Everlube Products [148] выпускает ТСП различного назначения под брендами [Everlube®](#), [Lube-Lok®](#), [Lubri-Bond®](#), [Henderlube™](#), [Perma-Slik®](#), [Kal-Gard®](#), [Ecoalube®](#), [Ever-Slik®](#), [Electrobond®](#), [Esnalube™](#), [Electrolube®](#), [Formkote®](#) и [Henco-Mask™](#). В частности для применения в ракетно-космической технике, системах вооружения, промышленности предлагаются ТСП для сопряжений, изготовленных из углеродистой стали, коррозионно - стойких сталей, титановых сплавов и других металлов космического назначения. ТСП используются в следующих сопряжениях: винтовые соединения, карданные валы, приводные механизмы, рычаги, подшипники, кулачки, толкатели клапана, клапаны, поршни, болты, соединений тормозной системы и т.д. Рекомендованы ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , графита, ПТФЭ со связующими в виде силиката натрия, фосфатов, эпоксидной, акриловой смол и др. для диапазона температур от  $-218^\circ\text{C}$  до  $760^\circ\text{C}$ .

Компания «Sandstrom Products Company» [161] предлагает широкий набор ТСП для различных применений:

- в качестве сухих твёрдосмазочных покрытий марок [Roxylube® #835-Black](#), #103, 28A Aerosol, Piston Skirt Coating и др.;

- в качестве термо - и химически стойких покрытий: Aluminum Baking

Enamel #8558, 9AV-35 Mod 1, 26AV-10 Black, 26AV-10 Clear, Heat Resistant Coating - High Temp Gasket Coating и др.

- в качестве покрытий для оружия: POXYLUBE® #859, 28A, 9A, #099, LC-300;

- для ТСП, отверждаемых ультрафиолетовым облучением: Glazon® Matte Acrylate, Glazon® Gloss Acrylate, Glazon® Satin Acrylate;

- для автомобилестроения: Nitrile Plus – Blue, Neoprene Phenolic Adhesive, Nitrile Phenolic Coating, Black Barrier Coating и др.;

- для вооружённых сил: 28A Bulk (Gallon, Quart), 28A Aerosol (16 oz.), #099, #329, LC-300 и др.

Рекомендованы ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , ПТФЭ со связующими в виде фенольной, эпоксидной, акриловой смол и др.

Диапазоны контактных давлений и скоростей скольжения для сопряжений трения, функционирующих в условиях космоса, представлены в работе [154,138,170]. Отмечается, что рожденные космосом системы включают различные подвижные устройства: колеса реакции, гироскопы, солнечные батареи, двигатели антенны, механизмы обращения датчика, механизмы, насосы, приводы головок, замки, выпуски, и т.д. Вместе они покрывают широкий диапазон контактных давлений от  $10^7$  до  $10^{10}$  Па и скоростей скольжения от почти нуля в ограничении механизмов до вышеупомянутых 20 м/с в гироскопах контроля момента.

Спутники, разработанные для высокого космического вакуума, могут быть подвержены воздействию влажности во время сборки и наземных испытаний или при запуске, а также действию атомарного кислорода на низкой земной орбите. Они работают в широких диапазонах температур (от  $-100$  до  $+100^\circ\text{C}$ ). Летательные аппараты типа «Шаттл» функционируют как в условиях земной атмосферы, так и в космосе циклически, что приводит к резким изменениям окружающей среды и температур выше  $1000^\circ\text{C}$  во время

возвращения в земную атмосферу. Эти чрезвычайные условия работы зачастую сопровождаются требованиями продолжительного функционирования ЛА, которое может составлять до 30 лет для автономно работающих спутниковой систем. Оценки работы указанных сопряжений в течение 15–30 лет службы дают значения ресурса работы сопряжений порядка  $10^9 - 10^{10}$  циклов в подшипниках карданного подвеса управляющих устройств импульса или  $10^6 - 10^8$  колебаний в соединениях солнечной батареи.

Факторы космического пространства исследованы также в работе [170]. Отмечается, что многие системы, функционирующие в условиях космического пространства, могут оставаться в космосе в течение 10–30 лет. На них воздействуют такие факторы, как атомарный кислород, солнечное излучение, частицы с высокой энергией, температурные циклы от криогенной до  $400^\circ\text{C}$ . Кроме того, эти системы часто проверяются на земле и много лет хранятся под воздействием окружающей среды перед запуском. Кроме того, повторно используемые ракеты-носители предполагают, что они будут работать в космически-земной атмосфере циклами и с температурными всплесками сверх  $800^\circ\text{C}$  во время возвращения. Для этих целей было разработано покрытие "Хамелеон", поверхность которого способна приспосабливаться к окружающей среде.

Первые покрытия "Хамелеона" были изготовлены на базе WC,  $\text{WS}_2$  и алмазоподобного углерода (diamantlike carbon (DLC)). Они обеспечили работу в условиях смены атмосферы космоса и земной.

Второе поколение покрытий "Хамелеона" были сделаны из иттрия, стабилизированного двуокисью циркония в золотой матрице со скрытыми наноразмерными «хранилищами»  $\text{MoS}_2$  и DLC. Также исследовалась герметизация наночастиц  $\text{MoS}_2$  в матрицу из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и высокотемпературное смазывание с низкой точкой плавления стеклокерамической фазы.

Однако, как отмечается в работе [167], в условиях длительного функционирования в высоконагруженных сопряжениях, работающих при существенных скоростях скольжения, использование DLC приводит к его

графитизации и последующему увеличению коэффициента трения в высоком вакууме. Поэтому альтернативным подходом к решению указанной проблемы является объединение смазок на основе дихалькогенидов, таких как  $\text{MoS}_2$  или  $\text{WS}_2$ , с карбидами и переход к системам карбиды/DLC/дихалькогениды. Например, покрытия типа "Хамелеон", созданные из аморфной матрицы DLC с объединением нанокристаллитов TiC [168,169]; WC [164,165];  $\text{WS}_2$  [171, 166]; создали с помощью лазера микрохранилища для  $\text{MoS}_2$  [163].

В работе [141] анализируются условия работы трибосопряжений на международной космической станции. В частности отмечается воздействие на подвижные механизмы атомарного кислорода, ультравысокого вакуума, радиации (включая ультрафиолетовое излучение) и тепловые диапазоны от  $-40^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$ , рассмотренные также в работе [172].

Отмечается намного более широкая частота и более высокая спектральная интенсивность света, которые наблюдаются во внеземной окружающей среде, особенно в ультрафиолетовой части спектра [130,131]. Эта радиация может повреждать слишком многие материалы и в особенности, как известно, ухудшает полимерные материалы [145].

В работе [138] описывается конструкция и условия функционирования трибометра с восемью узлами трения, которые были доставлены на Международную космическую станцию 16 ноября 2009 на борту «Шаттла STS-129 «Атлантида».

Большое внимание вопросам функционирования сопряжений с ТСП уделяется в китайской народной республике. Так, в работе китайских исследователей [149] отмечаются следующие области применения ТСП: сначала эти покрытия использовались в военной промышленности, затем в некоторых высокотехнологичных областях, таких как, использование в конструкциях искусственных спутников, космических кораблей и электронной промышленности. Отмечается применение ТСП для смазки подшипников в турбонасосном агрегате ЖРД. Диапазон рабочих температур твердых смазок может составлять от  $-270^\circ\text{C}$  (ПТФЭ и свинец) до  $1000^\circ\text{C}$ . Рабочие



температуры высокомолекулярного полиимида и окиси свинца - 350 °С и 650 °С соответственно, смеси фтористого кальция и бария - 820 °С.

ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  толщиной 2,5 мкм может выдерживать контактное давление до 2800 МПа и работать на скорости до 40 м/с.

Рассмотрены различные методы нанесения ТСП. Так, например, плёнки  $\text{MoS}_2$ , полученные двухшаговым методом нанесения (многократное ионно-дуговое напыление молибдена и ионное сульфидирование при низких температурах) позволили достичь  $f_{\text{тр.}} = 0,07$  (рисунок 1.1.)

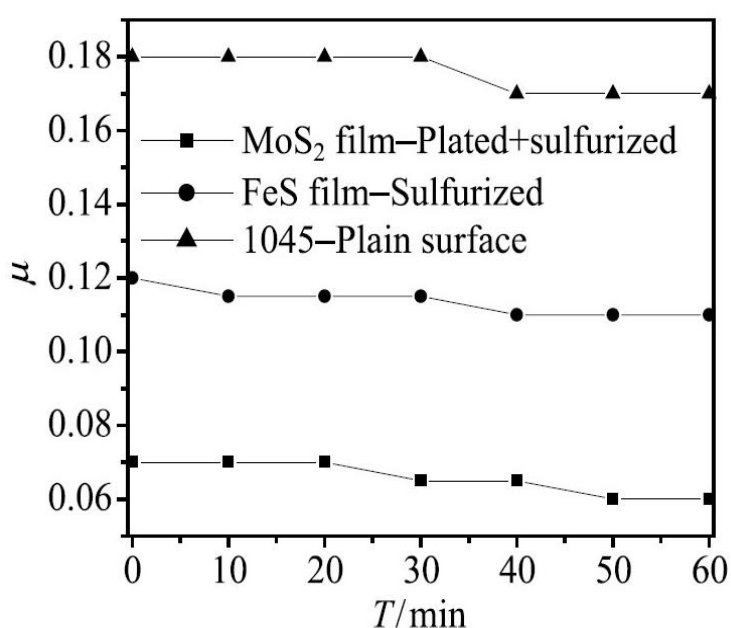


Рисунок 1.1 - Изменение коэффициента трения синтетического покрытия  $\text{MoS}_2$ , полученного ионно-плазменным напылением молибдена с последующим сульфидированием, сульфидированного железа и чистой металлической поверхности в зависимости от времени испытаний

Однако зависимости от скорости скольжения и контактной нагрузки для указанных поверхностей трения имели возрастающую динамику, не характерную для ТСП суспензионного напыления (рисунок 1.2).

При испытании покрытий, полученных магнетронным распылением молибдена с последующим сульфидированием, коэффициент трения составляет  $f_{\text{тр.}} = 0,06$  (рисунок 1.3).

В работе китайских исследователей отмечается широкое использование в различных областях техники ТСП со связующими. С 1970 г.г. в институте химической физики в Ланчжоу проводятся систематические исследования твёрдых смазок. В течение более чем 30 лет, были разработаны ТСП с

силикатным связующим, эпоксидной смолой, полифенилсульфидами, фосфатами и др.

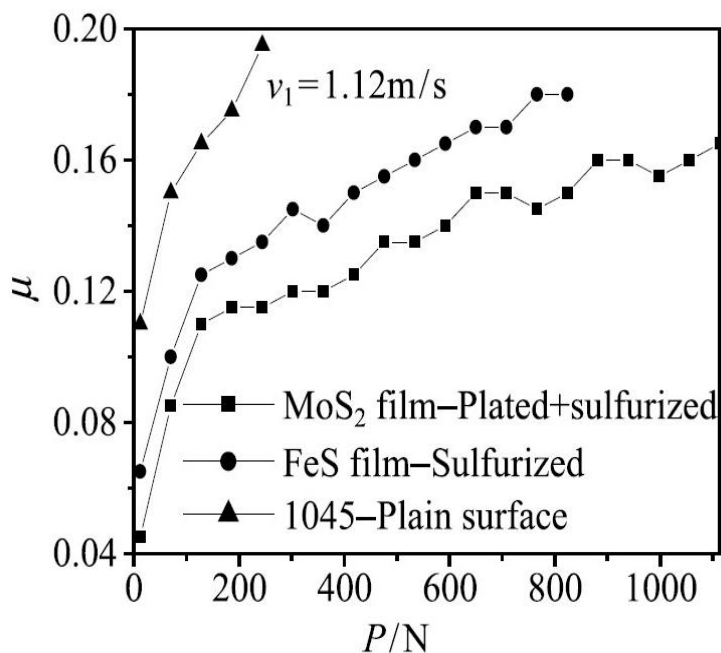


Рисунок 1.2 - Изменение коэффициента трения синтетического покрытия MoS<sub>2</sub>, полученного ионно-плазменным напылением молибдена с последующим сульфидированием, сульфидированного железа и чистой металлической поверхности в зависимости от скорости скольжения

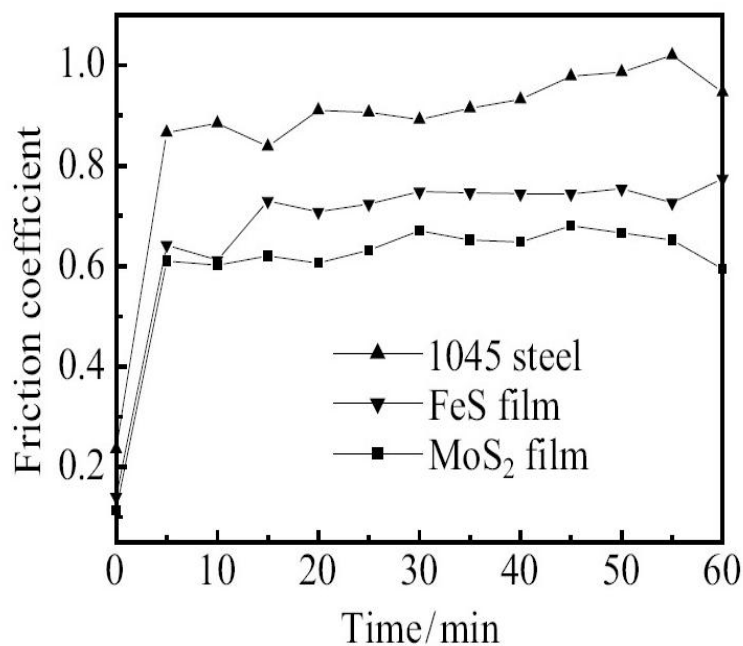


Рисунок 1.3 - Изменение коэффициента трения синтетического покрытия MoS<sub>2</sub>, полученного магнетронным напылением молибдена с последующим сульфидированием, сульфидированного железа и чистой металлической поверхности в зависимости от времени испытаний с силикатным связующим, эпоксидной смолой полифенилсульфидами, фосфатами и др.

Некоторые из них успешно применяются, например, для движущихся частей искусственных спутников, подшипников насоса подачи ракетного топлива, в торсионных пружинах, шарнирах, шестернях. Для аэрокосмических аппаратов использовались ТСП с органическими и неорганическими связующими типа SS-2 и IF-1. Отмечается большое значение температуры времени отверждения ТСП.

Изменение коэффициента трения в зависимости от контактной нагрузки по данным работы [174] приведено на рисунке 1.4.

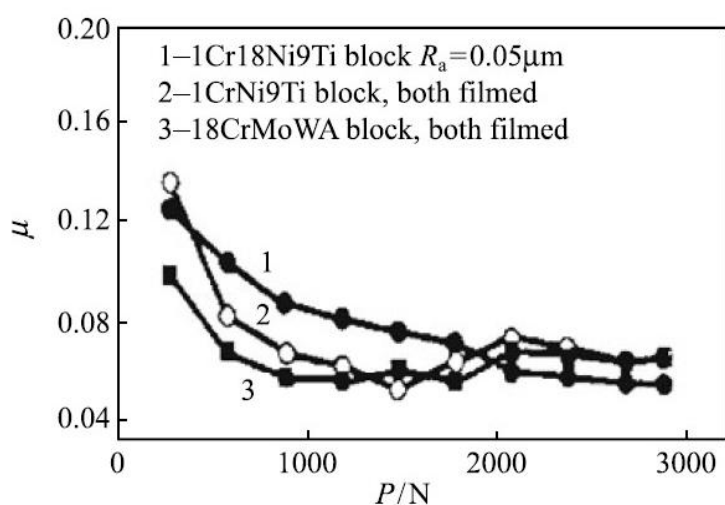


Рисунок 1.4 - Изменение  $\mu$  в зависимости от контактной нагрузки для сопряжения с ТСП: 1 – покрытие нанесено на кольцо; 2,3 – покрытие нанесено на обе поверхности сопряжения

На рисунке 1.5 приведена зависимость  $\mu$  от времени испытаний.

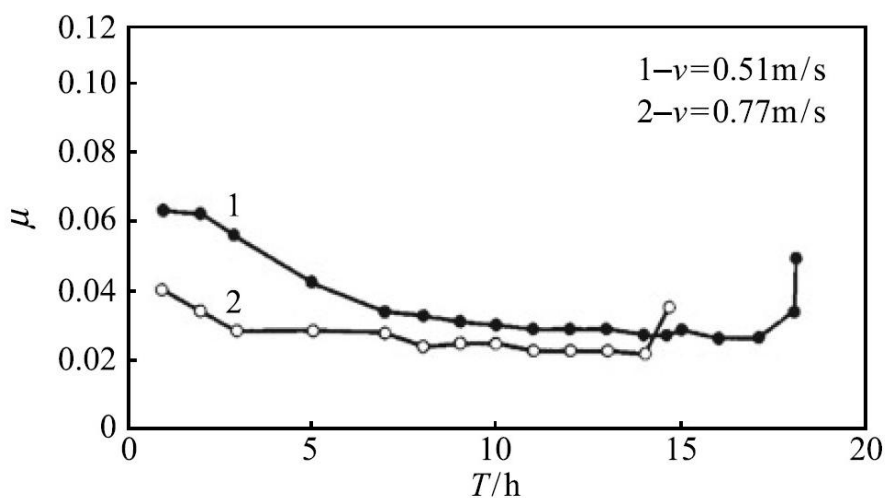


Рисунок 1.5 - Изменение коэффициента трения пары с ТСП в зависимости от времени испытаний

Для улучшения коррозионной стойкости предлагается обработка подложки фосфатированием и регулирование доли связующего и наполнителя [175].

В данной работе приведены сведения о ТСП комбинированного состава. Например, напылённая плёнка  $\text{MoS}_2$  с графитом обладает хорошими антикоррозионными свойствами во влажной среде. Плёнка  $\text{MoS}_2$  с соосаждением серебра не окисляется, а её износостойкость может существенно превышать аналогичные характеристики обычных ТСП суспензионного типа. Коэффициент трения плёнки  $\text{MoS}_2$  с соосаждением ПТФЭ может составлять 0,1 при увеличении срока службы до 10 раз. Соосаждение  $\text{MoS}_2$  с покрытием из золота может предотвращать деформацию сдвига, повышать трещиностойкость, увеличивать срок службы ТСП.

## 1.2 Основные сведения о твердых смазках

Известно большое количество материалов, которые могут быть использованы в качестве твердых смазок. Существует несколько классификаций ТС [134,148]. Наиболее обоснованной следует признать классификацию, предложенную Кемпбеллом [143, 97 ]:

1 – слоистые твердые смазки –  $\text{MoS}_2$ , нитрид бора, графит, слюда, тальк и др.; 2 – органические соединения – мыла, воски и жиры; 3 – химически активные покрытия – сульфидные, хлоридные, фосфидные и др.; 4 – мягкие металлы – индий, свинец, олово, цинк, медь, барий; 5 – полимерные пленки; 6 – различные пластичные материалы.

Наибольшее практическое применение нашли материалы первой группы – слоистые твердые смазочные материалы, большинство из которых обладают хорошими антифрикционными свойствами. Как отмечалось выше, наиболее распространенными сухими ТС являются графит и дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$ . По мнению Брейтуэйта [7] молибденит, как и графит, близок по своим свойствам к идеальному твердому смазочному материалу, хотя он имеет низкую антиокислительную способность. Преимущества  $\text{MoS}_2$  по сравнению с другими известными ТС подчеркивает в своей монографии и одна из

родоначальников и создателей твердосмазочных покрытий в нашей стране проф. Л.Н.Сентюрихина [94]. Графит при трении по твердой поверхности является хорошей смазкой лишь в условиях земной атмосферы, но неэффективен в вакууме [141] - коэффициент трения ( $f_{тр.}$ ) как природного, так и пиролитического графита более чем в 2 раза выше в вакууме, чем на воздухе. В отличие от дисульфидов молибдена и вольфрама, коэффициент трения которых снижается с увеличением контактной нагрузки, у графита с давления в контакте после первоначального снижения  $f_{тр.}$  до 0,028 при контактном давлении ( $P_{конт.}$ ) свыше 600 МПа начинается непрерывный рост  $f_{тр.}$  (рисунок 1.6). Однако и при этом «оптимальном» для графита давлении износостойкость пленки в 12 раз ниже, чем у  $MoS_2$  [12].

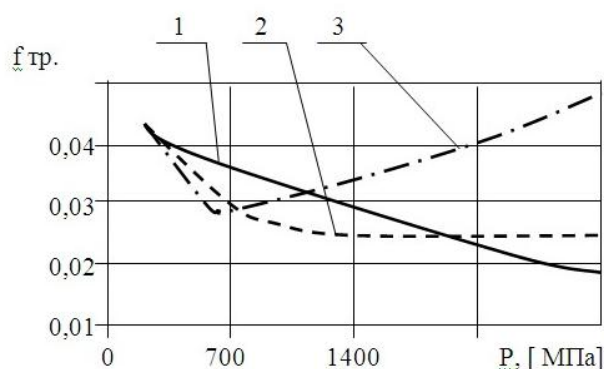


Рисунок 1.6 – Влияние контактной нагрузки на коэффициент трения ТС:  
1 –  $MoS_2$ ; 2 –  $WS_2$ ; 3 – графит

График изменения  $f_{тр.}$   $MoS_2$  и графита для вакуумных условий в зависимости от температуры приведен в работах [5,6] (рисунок 1.7).

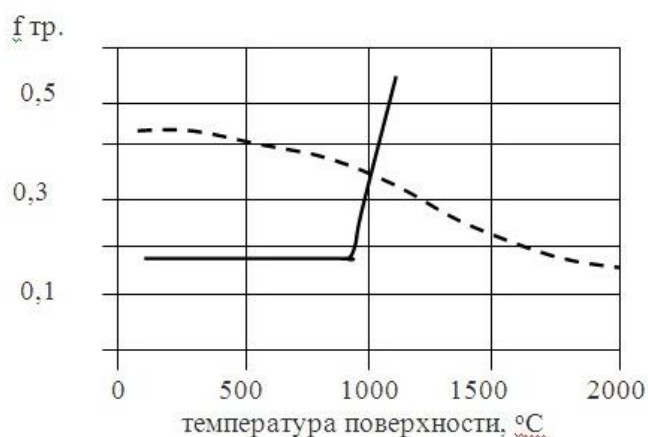


Рисунок 1.7 - Зависимость  $f_{тр.}$  от температуры в вакууме:  
— -  $MoS_2$   
- - - - графит

Автор отмечает, что при комнатной температуре трение дегазированного в вакууме  $MoS_2$  меньше, чем графита ( $f_{тр.} \approx 0,6$ ). Даже после нагревания в

вакууме до температур  $\approx 800^\circ\text{C}$  у  $\text{MoS}_2$  в противоположность графиту увеличения трения не наблюдается. Коэффициент трения практически не возрастает до температуры  $\sim 800^\circ\text{C}$ , при которой уже начинается разложение  $\text{MoS}_2$ .

Другие ТС, относящиеся к слоистым смазочным материалам не нашли столь широкого применения по ряду причин.  $\text{CdI}_2$  и  $\text{BN}$  имеют недостаточно низкий коэффициент трения, дисульфиды вольфрама и ниобия, диселениды  $\text{Mo}$ ,  $\text{W}$  и  $\text{Nb}$  являются весьма дефицитными материалами [12].

Несмотря на большое количество исследований  $\text{MoS}_2$  до настоящего времени нет единой теории, объясняющей его смазочные свойства. К числу наиболее известных концепций следует отнести структурную теорию Брега [135], дополненную впоследствии механико-дислокационной гипотезой механизма трения слоистых смазок, адсорбционную теорию Сейвиджа [160,136], основанную на различной адсорбционной активности слоистых материалов, а также гипотезу Брайанта [139]. Последний объясняет различное поведение рассматриваемых материалов при переходе от воздуха к вакууму, с одной стороны, влиянием диффузии водных паров, содержащихся в воздухе и ослабляющих ионные связи между атомами, а, с другой стороны, образованием электрических зарядов при расщеплении кристаллов по плоскостям спайности. Широко известна также концепция межкристаллитных связей Брейтуэйта [7], дополненная им впоследствии теорией контактной смазки, согласно которой механизм смазочного действия  $\text{MoS}_2$  объясняется влиянием поверхностно-химических свойств  $\text{MoS}_2$ , а именно – соединением при пластической деформации шероховатых поверхностей ТС с поверхностью металла. Однако по данным других исследователей [94,64] наилучшие смазочные характеристики  $\text{MoS}_2$  проявляются при трении образцов, изготовленных из стали повышенной твердости (типа ШХ 15), для которых пластическое деформирование материала практически исключается и, следовательно, описанное явление не может быть удовлетворительно объяснено с позиций

указанной выше гипотезы. Последнее обстоятельство подтверждает сложность процессов физико-химического и механического взаимодействия в зоне контакта рассматриваемых пар трения.

Общая гипотеза о едином механизме смазочного действия слоистых твёрдых смазок даётся А.П.Семёновым [93]. В работе отмечается, что антифрикционные свойства указанных выше смазочных материалов зависят от энергии связи между плоскостями скольжения, характера адсорбционного взаимодействия инородных атомов и молекул с этими поверхностями, определяющего изменение поверхностной энергии, а также способности адсорбированных атомов и молекул к лёгкой миграции по поверхностям, определяемой отсутствием высоких потенциальных барьеров.

Нанесение  $\text{MoS}_2$  на поверхности трения осуществляется различными способами [13, 50,108,78,34,80,29, 159,173]. Интенсивные исследования за рубежом в настоящее время ведутся с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесённых магнетронным методом [154]. Однако суспензионные покрытия обнаруживают большой ресурс. Результаты многолетних исследований представлены в работе китайских исследователей [149]. Обширный анализ современных ТСП зарубежного производства представлен в работе [103]. Одним из самых распространённых является суспензионный способ нанесения ТСП со связующими веществами [70, 6] (далее обозначается как ТСП).

ТСП представляют собой композиции антифрикционного наполнителя (например,  $\text{MoS}_2$ ) в лёгком растворителе в присутствии плёнкообразующих веществ (полимеров). Антифрикционный наполнитель обуславливает низкий коэффициент трения; плёнкообразователь (связующее в виде различных смол) обеспечивает высокую адгезию покрытия к поверхности и связывает частицы  $\text{MoS}_2$  в сплошную плёнку; растворитель предназначен для перевода плёнкообразователя в состояние, пригодное для нанесения на поверхность. До нанесения эти покрытия хранятся в виде суспензий, состоящих из перечисленных выше компонентов. После нанесения на предварительно обработанную и очищенную поверхность и последующего отверждения

получаются плёночные покрытия, по внешнему виду напоминающие лакокрасочные. Данные покрытия могут работать без специальной подпитки в течение всего срока службы. Технология их нанесения, описанная в инструкции [71], отличается простотой, не требует специалистов с высокой квалификацией, а также допускает возможность нанесения указанных выше антифрикционных покрытий непосредственно на месте сборки или эксплуатации прибора или механизма. При использовании этого способа практически нет ограничений ни на толщину наносимого покрытия, ни на вид материала основы, на которую наносится покрытие.

Качество ТСП, нанесенного на детали узлов трения, определяется в основном сроком службы сопряжения, антифрикционными свойствами (фтр.) и температурной стойкостью в зависимости от большого числа факторов, касающихся как вопросов технологической подготовки поверхности трения и нанесения ТСП, так и воздействия эксплуатационных факторов (нагрузка в контакте, скорость скольжения и др.) и влияния внешней среды.

В работах [142,3] приведено сравнение ресурса сопряжений с ТСП, нанесённых различными методами (рисунок 1.8).

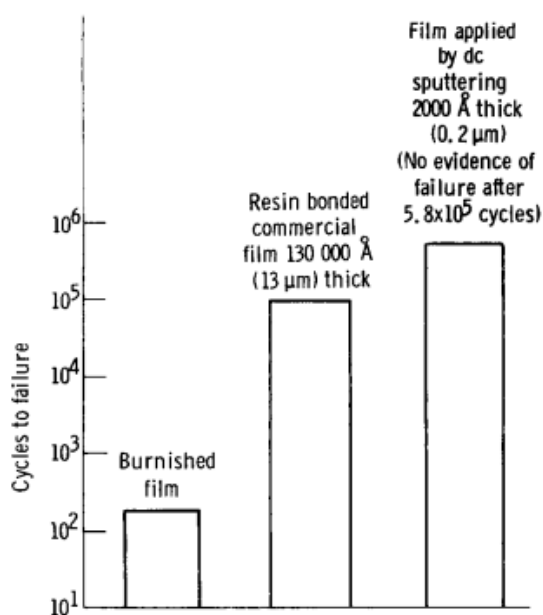


Рисунок 1.8 - Ресурс ТСП, нанесённых разными технологическими методами (по данным Buckley [142]: соответственно слева направо – натирание; ТСП со связующим толщиной 13 мкм; покрытие, нанесённое напылением толщиной 0,2 мкм.

Наибольший ресурс получен для сопряжений с плазменно-напылённым покрытием толщиной 0,2 мкм,



у которых даже после  $5,8 \times 10^5$  циклов испытаний признаков разрушения обнаружено не было.

Сравнительные испытания современных ТСП и износостойких алмазоподобных покрытий приведены в работе [154]. Были исследованы следующие покрытия:

- Дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) со связующим, наиболее широко используемое на практике ТСП.
- Магнетронно-напыленный MS (Magnetron-sputtered)  $\text{MoS}_2$ .
- Ионно-осаждённое серебро (Ag).
- Ионно-осаждённый свинец (Pb).
- Магнетронно-напыленный алмазоподобный углерод (Magnetron-sputtered diamantlike carbon) (MS DLC).
- CVD алмазоподобные покрытия с применением плазмы (Plasma-assisted, chemical-vapor-deposited diamantlike carbon (PA CVD DLC).

Характеристики исследуемых покрытий представлены в таблица 1.1.

Таблица 1.1 - Характеристики исследуемых твердых смазочных пленок (материал основы – нержавеющая сталь 440 С)

Номер пленки	Материал пленки	Толщина пленки, мкм	Шероховатость $R_a$ , нм	
			Значение	Стандартное отклонение
1	$\text{MoS}_2$ со связующими	$10 \pm 4$	$1,2 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^2$
2	MS $\text{MoS}_2$	$1 \pm 0,2$	32	4
3	Серебро	$0,5 \pm 0,2$	30	3,2
4	Свинец	0,55	98	15
5	С и WC	2–3	43	5,1
6	С и Si	3–5	29	3,2

Триботехнические показатели указанных выше покрытий исследовались в сверхвысоком вакууме, во влажном воздухе при относительной влажности 20% и в сухом азоте при относительной влажности <1%. Результаты испытаний, проведённых по схеме «палец-диск», приведены в таблице 1.2.

Таблица 1. 2 – Значения установившихся коэффициентов трения, срока службы и скорости износа твердосмазочных плёнок в скользящем контакте с шариками, изготовленными из нержавеющей стали 440С

Плёнка	Окружающая среда	Установившиеся коэффициенты трения	Срок службы плёнки*	Скорость износа плёнки,	Скорость износа шариков,
				$\frac{мм^3}{Н \cdot м}$	$\frac{мм^3}{Н \cdot м}$
MoS <sub>2</sub> со связующим	Вакуум	0,045	>1 млн.	$6 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$
	Воздух	0,14	113 570	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$
	Азот	0,04	>1 млн.	$4,4 \cdot 10^{-8}$	$6,9 \cdot 10^{-10}$
MS MoS <sub>2</sub>	Вакуум	0,07	274 130	$9 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
	Воздух	0,1	277 377	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
	Азот	0,015	>1 млн.	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-10}$
Ионно - осаждённое серебро	Вакуум	0,2	364 793	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$
	Воздух	0,43	8	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	Азот	0,23	1040	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Ионно - осаждённый свинец	Вакуум	0,15	30 294	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$
	Воздух	0,39	82	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
	Азот	0,48	1530	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
MS DLC	Вакуум	0,7	<10	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
	Воздух	0,12	>1 млн.	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$
	Азот	0,12	23965	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
PACVD DLC	Вакуум	0,54	<10	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	Воздух	0,07	>1 млн.	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
	Азот	0,06	>1 млн.	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$

\* - Срок службы плёнки был определен числом проходов (оборотов) до достижения коэффициента трения  $f_{тр.} = 0,30$

Диаграмма антифрикционных свойств исследуемых покрытий по установившемуся коэффициенту трения  $f_{тр.}$  приведена на рисунке 1.9.

Анализ представленных на рисунке 1.9 данных, показал, что:

- в условиях вакуума наилучшие антифрикционные свойства обнаружило ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  ( $f_{\text{тр.}} = 0,045$ ) со связующим компонентом и  $\text{MoS}_2$  магнетронного напыления ( $f_{\text{тр.}} = 0,07$ );

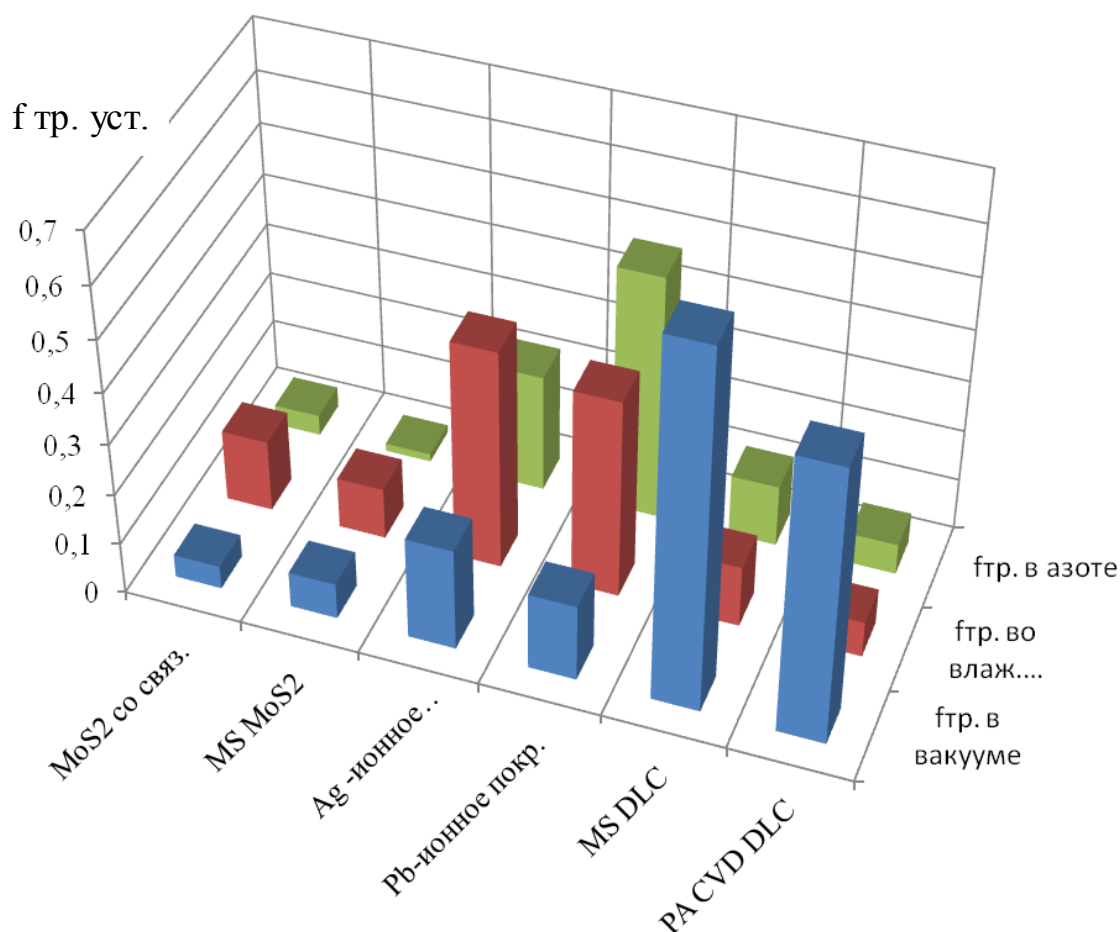


Рисунок 1.9 - Диаграмма коэффициентов трения установившегося режима для покрытий различных типов, функционирующих в условиях вакуума, влажного воздуха и азота

- в условиях влажного воздуха наилучшие антифрикционные свойства показало PACVD алмазоподобное покрытие ( $f_{\text{тр.}} = 0,07$ );

- в среде азота наилучшие антифрикционные свойства обнаружило  $\text{MoS}_2$  магнетронного напыления ( $f_{\text{тр.}} = 0,015$ ) и ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  ( $f_{\text{тр.}} = 0,04$ ) со связующим компонентом.

Диаграмма ресурса (до возрастания  $f_{тр.} = 0,3$ ) при трении для исследуемых покрытий различных типов, функционирующих в условиях вакуума, влажного воздуха и азота, представлена на рисунке 1.10.

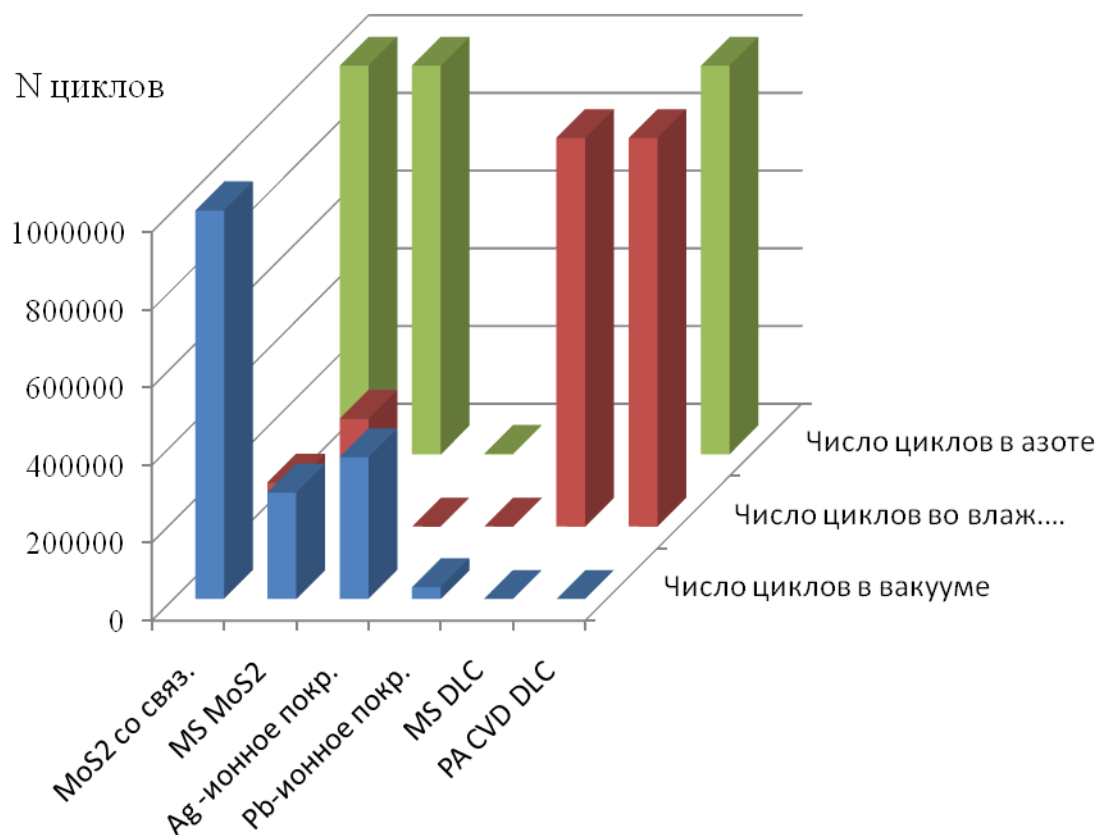


Рисунок 1.10 - Диаграмма ресурса покрытий до возрастания коэффициента трения до значения  $f_{тр.} = 0,3$  при трении для покрытий различных типов, функционирующих в условиях вакуума, влажного воздуха и азота

Анализ данных, представленных на рисунке 1.10, показывает, что:

1. в условиях вакуума наибольший ресурс обнаружило ТСП на основе MoS<sub>2</sub> со связующим компонентом ( $N = 10^6$ );
2. при трении в условиях влажного воздуха наилучшие характеристики обнаружили алмазоподобные покрытия ( $N = 10^6$ );
3. при трении в среде азота наибольший ресурс обнаружили ТСП на основе MoS<sub>2</sub> обоих типов нанесения (со связующим и магнетронного типа) и PACVD алмазоподобное покрытие ( $N = 10^6$ ).

Таким образом, представленные выше данные свидетельствуют о лучших триботехнических показателях сопряжений с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , причём в отличие от приведённых ранее показателей ресурса ТСП (рис.1.8) о большем ресурсе сопряжений с ТСП плазменного напыления, в более поздних исследованиях, представленных в таблице 1.2 и на рисунке 1.10, выявлено преимущество по сроку службы сопряжений с покрытиями на основе  $\text{MoS}_2$  со связующими компонентами.

Детальные результаты исследования ТСП со связующими веществами приведены в работах корпорация Downing Corning [146, 147, 173]. Для оценки работоспособности фрикционных сопряжений с ТСП типа Molykote использовались результаты испытаний, полученные на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714), реализующих трение скольжения по схеме «брусочек-кольцо» (рисунок 1.11).

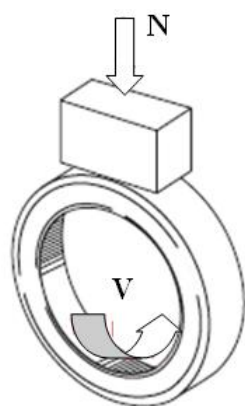


Рисунок 1.11 - Схема трения «брусочек-кольцо» для машины трения LFW-1 (ASTM D-2714).

Основные характеристики пары трения скольжения с ТСП для испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714) представлены в таблице 1.3.

Срок службы пар трения с ТСП типа Molykote различных состав на основе  $\text{MoS}_2$  и графита, полученный в результате испытаний на машине трения LFW-1 по ASTM D-2714 при вращении по схеме трения скольжения «брусочек-кольцо», представлен в таблице 1.4.

Таблица 1.3 - Основные характеристики пары трения скольжения с ТСП для испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714)

Параметры пары трения			Нагрузка N, Н	Частота вращения, об/мин.	Скорость скольжения V, м/с
Пара трения скольжения	Материал	Размеры, мм	2860	72	0,132
Брусочек	SAE 01, HRC 27-33	15,75x10,26x 6,35			
Кольцо	SAE 4620, HRC 58-63	Ø 34,9 x 8,15			

Таблица 1.4 - Ресурс пар трения скольжения (схема трения «брусочек-кольцо») с ТСП типа Molykote различных состав, полученные в результате испытаний на машине трения LFW-1 по ASTM D-2714 (N=2860 Н, V=0,132 м/с)

ТСП	Наполнитель	Связка	Ресурс ТСП для предварительной обработки основы, обороты			
			По данным работы [147] (2014г.)			[146] (2008г.)
			Без обработки	После фосфатирования	После пескоструйной обработки	Обработка основы указана ниже
1	2	3	4	5	6	7
D 321R	MoS <sub>2</sub> (19%) + графит(4,9%)	Полибутил - титанат	212000	146000	306000	песк. - 480000
D 3484	MoS <sub>2</sub> (20%) + графит (5,1%)	Фенольная	298000	126000	149000	фосф. - 300000

3400A (без Pb)	MoS <sub>2</sub> (12%)	Эпоксидна я смола	-	48000	-	фосф. - 100000
106	MoS <sub>2</sub> (18%) + графит 6%)	Эпоксидна я смола	-	187000	-	фосф. - 380000
D -7409	MoS <sub>2</sub> (15%) + графит (1,5%)	Полиамид - имидная	-	-	-	фосф. - 350000
7400	MoS <sub>2</sub> (13%) + графит (6,4%)	Акриловая	-	343000	-	фосф. - 280000
D10- GBL, D 10	Графит (15%)	Полиамид - имидная	-	-	-	фосф. - 6000
3402-C	MoS <sub>2</sub> (10%)	Специальн ая (органичес кая)	-	108800	74800	песк. - 150000
D-7620 (7620)	MoS <sub>2</sub> (17%) + графит (1,8%)	Полиамид - имидная	-	20000	-	фосф. - 400000

Анализ данных, представленных в таблицы 1.4, показывает:

- ресурс пар с ТСП типа Molykote по техническим описаниям 2014г. [147] существенно отличается от данных, представленных в работе 2008 г. [146]; например, для ТСП D-7620 (7620) ресурс снижается в 20 раз;
- имеют место отклонения ресурса для пар с ТСП D 321R и D 3484 от рекомендаций фирмы Molykote, приведённых в работе [147] (рисунок 1.12), где наивысшая долговечность ТСП обеспечивается на фосфатированных поверхностях, а наименьшая – без предварительной обработки основы.

3. для ТСП D 3484 наивысший ресурс получен для поверхности основы без предварительной обработки, что не соответствует данным рис. 1.7.

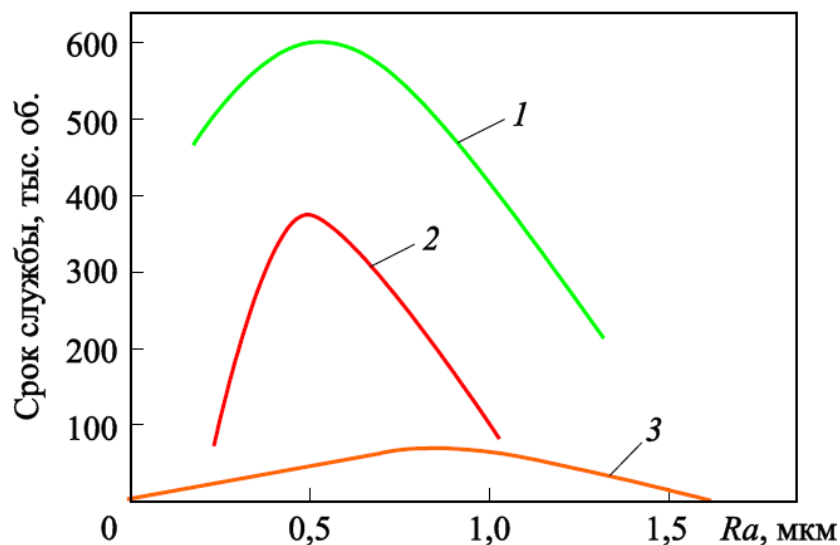


Рисунок 1.12 - Срок службы ТСП в зависимости от вида предварительной обработки и степени шероховатости основы: 1 – пескоструйная обработка и фосфатирование; 2 – пескоструйная обработка; 3 – полированная поверхность

С использованием результатов, представленных в графе 5 таблицы 1.4, для технических описаний 2014г. [147] с использованием недостающих значений для ТСП D -7409 и ТСП D10-GBL, D 10 из руководства 2008г. [146] была построена диаграмма, представленная на рисунке 1.13.

Анализ данных, представленных на рисунке 1.13, показывает, что наибольший ресурс обеспечивают сопряжения с:

1. ТСП Molykote D -7409 ( $\text{MoS}_2$  (15%) + графит (1,5%) с полиамид – имидным связующим);
2. ТСП Molykote 7400 ( $\text{MoS}_2$  (13%) + графит (6,4%) с акриловым связующим).

С использованием результатов, представленных в графе 7 таблицы 1.4, для данных из руководства 2008г. [146] была построена диаграмма, представленная на рисунке 1.14.



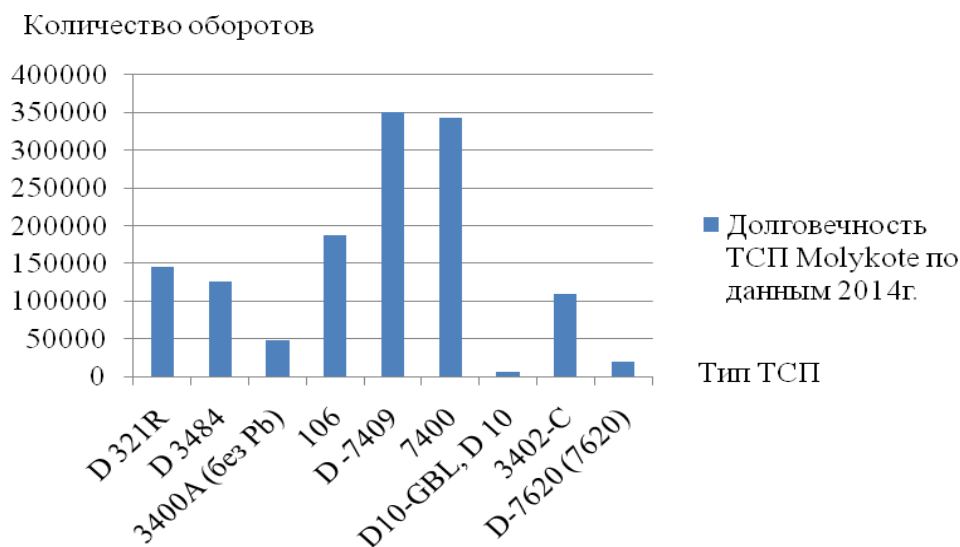


Рисунок 1.13 - Ресурс сопряжений с ТСП Molykote при трении скольжения по схеме трения «брусочек-кольцо» на машине трения LFW-1 по ASTM D-2714 (N=2860 Н, V=0,132 м/с) по данным 2014г.

Анализ данных, представленных на рисунке 1.14, показывает, что наибольший ресурс обеспечивают:

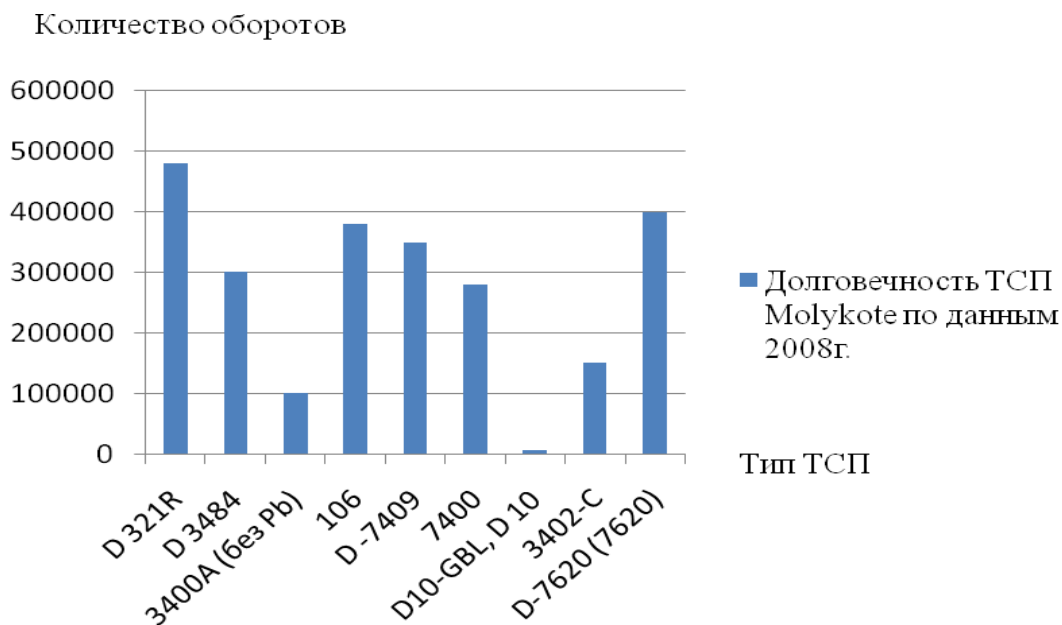


Рисунок 1.14 - Ресурс ТСП Molykote при трении скольжения по схеме трения «брусочек-кольцо» на машине трения LFW-1 по ASTM D-2714 (N=2860 Н, V=0,132 м/с) по данным 2008г.

1. ТСП Molykote D -321 R ( $\text{MoS}_2$ (19%) + графит(4,9%) с полибутил - титанатным связующим);
2. ТСП Molykote D-7620 (7620) ( $\text{MoS}_2$  (17%) + графит (1,8%) с полиамид – имидным связующим);
3. ТСП Molykote 106 ( $\text{MoS}_2$  (18%) + графит 6%) с эпоксидная связующим);

ТСП Molykote D -7409 ( $\text{MoS}_2$  (15%) + графит (1,5%) с полиамид – имидным связующим).

Диапазон рабочих температур для ТСП типа Molykote корпорации Downing Corning , представленных выше составляет от – 200 до + 450°С.

### 1.3 Влияние технологических факторов на триботехнические показатели твердосмазочных покрытий в парах трения

К технологическим факторам, влияющим на триботехнические характеристики пар трения с ТСП, необходимо отнести состав наносимого покрытия, качество контактных поверхностей трения (вид и режимы предварительной термохимической и механической обработки материала основы и контртела), режимы нанесения ТСП (перемешивание суспензии перед напылением и сам процесс нанесения покрытий), а также качество поверхности получаемого покрытия (толщина ТСП, волнистость, погрешность формы и др.).

#### 1.3.1 Состав покрытия.

Выбор ТСП из ассортимента покрытий типа ВНИИ НП производится на основе анализа условий эксплуатации, соответствующих области применения покрытия, которая в свою очередь в значительной мере определяется составом ТСП, а, следовательно, и типом пленкообразующего вещества, так как наполнителем для покрытий типа ВНИИ НП и ВАП в основном служит  $\text{MoS}_2$ .

Согласно данным различных исследователей [94,53,95] наиболее долговечными как на воздухе, так и в вакууме оказались покрытия с органическими пленкообразователями – мочевиноформальдегидной (ВНИИ НП 212) и эпоксидной смолой (ВНИИ НП 230), менее долговечными –

покрытия с кремнийорганическими полимерами (ВНИИ НП 209, 213). Наиболее существенное влияние на работоспособность связующих веществ оказывали повышенные температуры, которые после превышения определенного уровня приводили к деструкции и полимеризаций пленкообразователей. Так, например, предельная температура для органических пленкообразующих не превышает 200 – 250°C, а для элементоорганических (например, кремнийорганических) – 500 – 600°C [65].

### 1.3.2 Качество контактных поверхностей трения.

Методы и режимы предварительной обработки подложки для пар трения с использованием ТСП регламентируются инструкцией [71]. Согласно данным различных исследователей [28,94] наибольший ресурс указанных фрикционных сопряжений обеспечивает пескоструйная обработка материала основы до шероховатости металлической поверхности  $Rz = 1,6 - 3,2$  мкм. Отмечается также (см. таблицу 1.5 [94,98]), что твердость материала основы незначительно влияет на износостойкость рассматриваемых пар трения. Вместе с тем следует отметить, что приведенные в таблице 1.5 экспериментальные результаты обнаруживают некоторое возрастание долговечности пары трения при твердости подложки HRC = 29-31 ед. и HRC = 60-62 ед.

Таблица 1.5 – Влияние твердости образцов на триботехнические свойства пары трения с ТСП ВНИИ НП-212

Твердость, [ед.HRC]		Ресурс, τ, час.	Твердость, [ед.HRC]		τ, [час.]
подвижный образец	неподвижный образец		подвижный образец	неподвижный образец	
9-11	60-62	19	48-51	60-62	19
20-22	60-62	20	60-62	60-62	24
29-31	60-62	24	60-62	9-11	7

32-36	60-62	21	60-62	30-33	15
40-42	60-62	20			

По данным других исследователей [24,105] повышенная твердость материала основы (достигнутая, например, путем термодиффузионного хромирования с последующей нитридизацией для нержавеющей сталей [65]), приводит к улучшению антифрикционных характеристик пар трения с ТСП.

Согласно работе [96] для стальных поверхностей эффективной предварительной обработкой перед нанесением покрытий на основе  $\text{MoS}_2$ , работоспособных до  $250^\circ\text{C}$ , является оксидное фосфатирование или последнее вместе с кадмированием. Для высокотемпературных покрытий на основе графита рекомендовано никелирование. Работоспособность ТСП на титановой основе обеспечивается обезжириванием, химическим никелированием или металлизацией молибденом с последующим пескоструением [71].

При работе узлов трения в контакте находятся две сопряженные поверхности. Эффективность ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенного на одну из них, естественно будет определяться и комплексом физико-механических свойств ответной поверхности, на которой при скольжении также образуется смазочная пленка  $\text{MoS}_2$ .

Исследование влияния шероховатости контртела на работоспособность пар трения с применением  $\text{MoS}_2$  [12] показало, что наилучшие антифрикционные характеристики обнаруживаются при трении по шлифованной поверхности. Этот результат был подтвержден также и другими исследователями [57,94,10].

Зависимость износостойкости фрикционного сопряжения с ТСП от твердости контртела исследовалась в работе [98]. Полученные данные (см. таблицу 1.5) обнаруживают увеличение ресурса пары трения с ТСП с увеличением твердости сопрягаемой детали (неподвижный ролик) при неизменной твердости материала основы.

По данным работы [155] при одной и той же толщине ТСП  $\text{MoS}_2$  ресурс ТСП на твёрдом подслое значительно превышает ТСП без подслоя (рисунок 1.15).

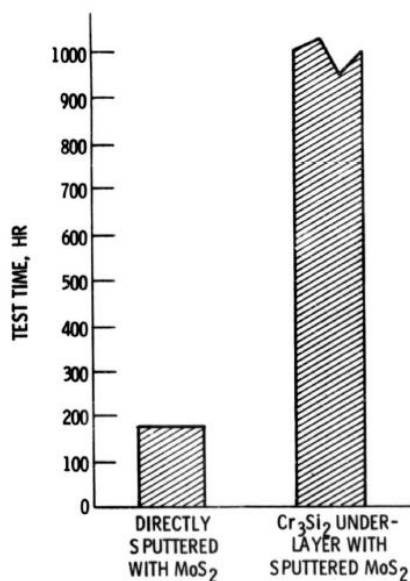


Рисунок 1.15 - Ресурс шарикоподшипников из нержавеющей стали 440С с покрытием из  $\text{MoS}_2$ , нанесённым непосредственно на сталь (слева), по сравнению с ТСП, нанесённым на подлой  $\text{Cr}_3\text{Si}_2$  (справа).

### 1.3.3 Режимы нанесения

В условиях производства наибольшие затруднения возникают на одном из самых ответственных этапов – при нанесении суспензии, образующей ТСП. До настоящего времени в подавляющем большинстве случаев в промышленности нанесение суспензий, образующих ТСП, производится вручную. В известной литературе не дается рекомендаций по вопросам, связанным с технологией механизированного нанесения ТСП.

В то же время в работе [103] отмечается необходимость тщательного контролирования техники нанесения ТСП со связующими для обеспечения равномерной толщины и хорошей адгезии покрытия к поверхности. Качество поверхности ТСП.

### 1.3.4 Качество поверхности ТСП

Согласно данным различных исследователей [94, 95, 7] оптимальная толщина ТСП, обеспечивающая наибольшую долговечность фрикционного сопряжения, составляет 20-30 мкм для покрытий с органическим, кремнийорганическим и фторорганическими пленкообразователями и 8-10 мкм – для неорганических связующих. Отмечается также, что для ТСП, нанесенных без связующих веществ, толщина смазочной пленки в начале установившегося режима трения составляет 2-4 мкм, а в период задира – 0,4-0,6 мкм [44, 47].

Аналогичные результаты были получены для ТСП, образованных путем натираания пористым контртелом, пропитанным  $\text{MoS}_2$  [159].

Несомненный интерес представляет также сопоставление ресурса пар трения с ТСП, нанесенным на обе поверхности трения, с фрикционным сопряжением, в котором покрытие нанесено лишь на одну поверхность. По данным проф. Р. М. Матвеевского [65] покрытие поверхностей трения вала и подшипника при возвратно – вращательном движении подшипника увеличивает ресурс пары трения с ТСП в 2-3 раза по сравнению с ресурсом той же пары, но при нанесении покрытия только на одну из рабочих поверхностей. В другой работе [95] отмечается, что при нанесении ТСП ВНИИ НП 209 на оба ролика долговечность фрикционного сопряжения увеличилась примерно вдвое. К сожалению, на практике нанесение покрытий на обе контактные поверхности часто бывает затруднено вследствие сложности напыления ТСП на внутренние поверхности деталей (как, например, для пары трения «вал-втулка»).

#### 1.4 Влияние эксплуатационных условий на триботехнические показатели пар трения с твёрдосмазочными покрытиями

Помимо факторов технологического порядка триботехнические показатели пар трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующими веществами в значительной степени определяются условиями функционирования реальных сопряжений и, в первую очередь, контактной нагрузкой, скоростью скольжения, температурой и воздействием окружающей среды.

##### 1.4.1 Влияние контактной нагрузки.

По данным большинства исследователей [45,162,131,152,94] для пар трения с применением ТСП с увеличением контактной нагрузки наблюдается снижение коэффициента трения ( $f_{тр.}$ ) (рисунок 1.16). Причем согласно результатам исследований [94], приведенных в таблице 1.6, несмотря на увеличение  $f_{тр.}$  с понижением нагрузки в 5,7 раза ресурс данного фрикционного сопряжения возрастает почти в 10 раз. Некоторые исследователи

[52,21] приводят данные, свидетельствующие о наличии оптимального значения контактной нагрузки, соответствующего максимальной долговечности рассматриваемых пар трения.

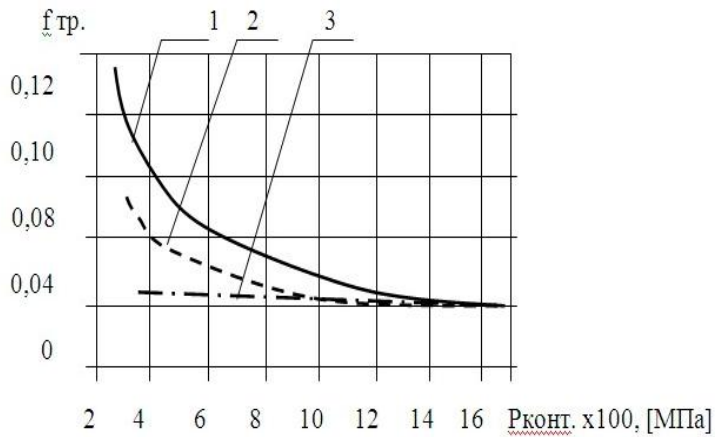


Рисунок 1.16 – Изменение  $f_{гр.}$   $MoS_2$  в зависимости от контактного давления  $P$ : 1 – при однократном ходе ползуна; 2 – при многократных проходах ползуна; 3 – по данным Бойда и Робертсона [134]

Таблица 1.6 – Влияние нагрузки на триботехнические показатели пары трения с ТСП ВНИИ НП 230 ( $V = 0,42$  м/с, пара ЭИ-474 – ЭИ-474)

N, Н	$\tau$ , мин.	L, м	$f_{гр.}$
1600	310	7780	0,028
700	1730	43420	0,031
280	2810	70530	0,107

Данный эффект, вероятно, связан со степенью приработанности фрикционных сопряжений с использованием ТСП. Так, в первом случае приработка пар трения, вероятно, не проводилась (в приведенной выше работе [52] упоминание о приработанное фрикционного сопряжения отсутствует), что при малых контактных нагрузках могло привести к абразивному износу неприработанного слоя ТСП, так как значение контактной температуры трения вследствие незначительной нагрузки было недостаточным для создания на поверхности трения смазочной пленки. Аналогичными причинами можно объяснить сложный характер подобной зависимости, приведенной в работе [21], так как приработка в этом случае осуществлялась при незначительной скорости скольжения ( $V = 0,04$  м/с). Согласно работы [170] значение

контактного давления для узлов космической техники изменяется от 10 до  $10^4$  МПа.

#### 1.4.2 Влияние скорости скольжения

Другим важным параметром, определяющим триботехнические показатели пар трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , является скорость скольжения. Согласно результатам исследований [12], представленных на рисунке 1.17, для рассматриваемых пар трения при  $P_{\text{конт.}} = 0,4$  МПа вначале с увеличением скорости скольжения до  $v = 1,5$  м/с наблюдалось снижение  $f_{\text{тр.}}$ , а при скорости, превышающей указанное выше значение, происходило ухудшение антифрикционных характеристик. Проведение параллельного измерения  $f_{\text{тр.}}$  и температуры контактной поверхности позволило обнаружить тесную корреляцию антифрикционных характеристик ТСП и теплового режима трения. Аналогичные результаты были получены и другими исследователями [94,53].

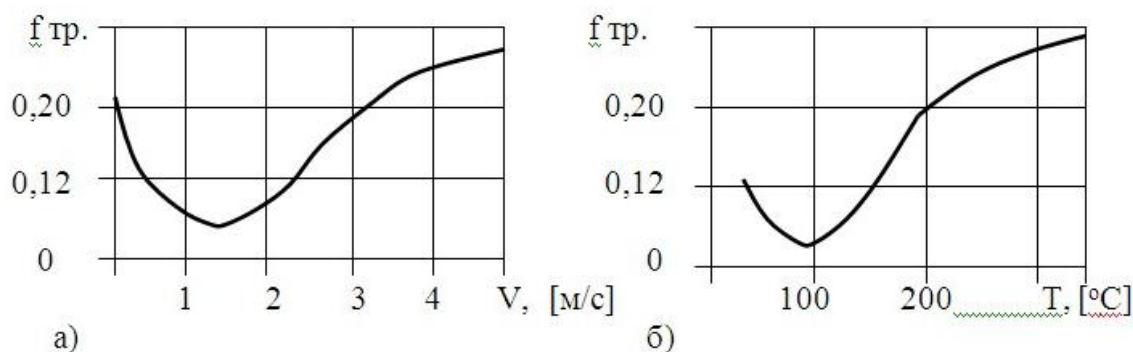


Рисунок 1.17 - Изменение  $f_{\text{тр.}}$   $\text{MoS}_2$  в зависимости от скорости скольжения (а) и температуры поверхности трения (б)

Согласно экспериментальным данным, полученным авторами работы [94] и представленным в таблице 1.7, с увеличением скорости скольжения долговечность пары трения с применением ТСП ВНИИ НИ 212 снижается.

Согласно работы [170] значение скорости скольжения для узлов космической техники изменяется от 0 до 20 м/с.



Таблица 1.7 – Влияние скорости скольжения на триботехнические свойства пары трения с ТСП (машина трения МИ, N=1600 Н, пара ЭИ-347 – ЭИ-347)

Скорость скольжения, м/с	$\tau$ , мин.	L, м	$f_{тр.}$
0,42	860	21600	0,031
0,59	560	19700	0,034
0,66	440	17700	0,028
0,76	290	13800	0,028
0,92	280	15500	0,025

#### 1.4.3 Влияние температуры

Исследования, проведенные под руководством проф. Р. М. Матвеевского [65] (см. рисунок 1.18) показали, что нагрев до 100-150°C приводит, как

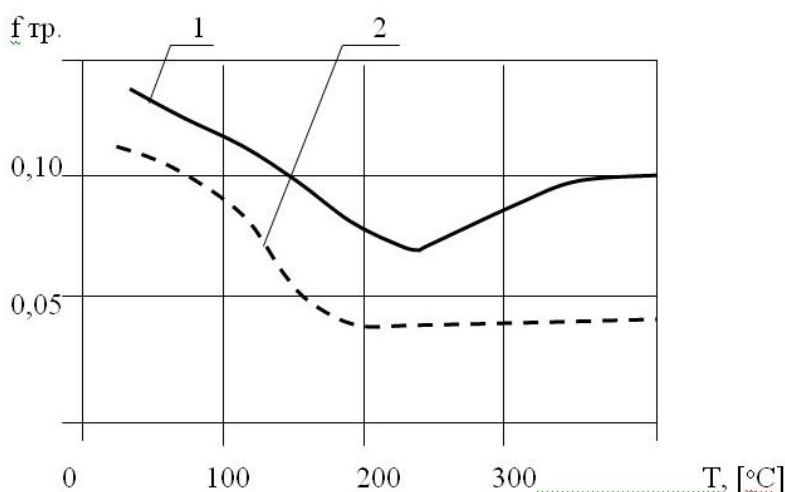


Рисунок 1.18 -  
Зависимость  $f_{тр.} = f(T)$   
для ТСП:  
1 - ВНИИ НП 212;  
2 - ВНИИ ШНП 213.

правило, к снижению значения  $f_{тр.}$  пар трения с ТСП. При дальнейшем возрастании температуры испытаний коэффициент трения данных фрикционных сопряжений начинает возрастать [94,65]. Согласно приведенной на рисунке 1.19 в зависимости наибольший ресурс рассматриваемых пар трения наблюдалась при температурах 100-150°C, что согласуется с ранее приведенными данными (рисунок 1.17).

Разрушение ТСП при высоких температурах объясняется деструкцией пленкообразующих веществ [65,94]. Большинство ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующими веществами сохраняют триботехнические показатели и при пониженных температурах. В работе [53] указывается, что ТСП ВНИИ НП 212 оказалось работоспособным при криогенной температуре  $T = -196^\circ\text{C}$  (испытания осуществлялись в условиях вакуума при  $p = 1,33 \cdot 10^{-5} - 1,33 \cdot 10^{-6}$  Па). Причем значение  $f_{\text{тр}}$ . Во время эксперимента было практически постоянным.

Наличие области оптимальных температур большинство исследователей объясняет размягчением при этой температуре связующих веществ ТСП и улучшением условий для ориентирования частиц  $\text{MoS}_2$  в направлении трения.

Согласно работ [62,170] температура для узлов космической техники изменяется от  $-150$  до  $+150^\circ\text{C}$ .

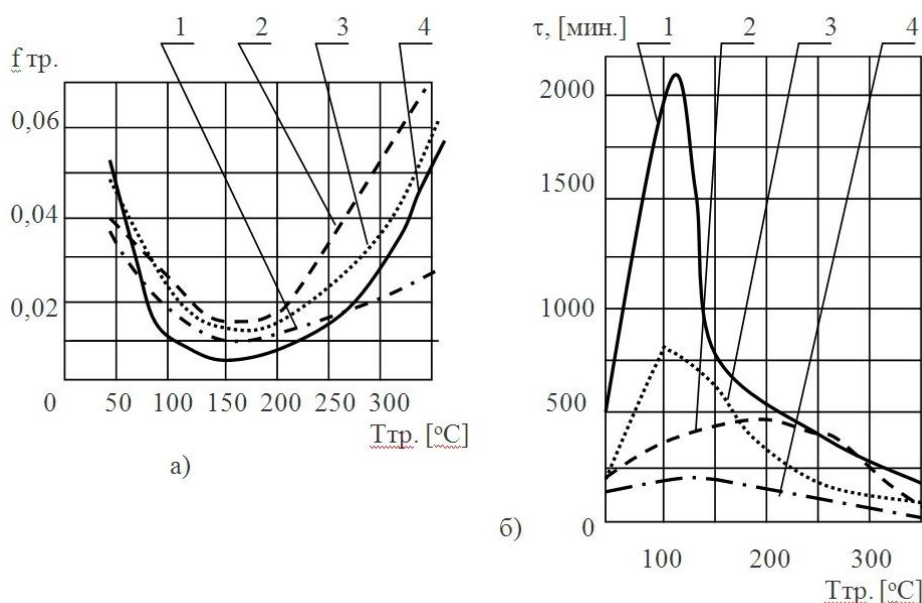


Рисунок 1.19 - Зависимости коэффициента трения (а) и ресурса (б) ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с различными пленкообразователями от температуры: 1 – органический; 2 – неорганический; 3 – кремнийорганический; 4 – фторорганический

По другим данным [42] антифрикционные свойства  $\text{MoS}_2$  в условиях вакуума ( $p = 1,33 \cdot 10^{-5}$  Па) при температуре  $T = -193^\circ\text{C}$  несколько ухудшаются

( $f_{тр.} = 0,039$  по сравнению с  $f_{тр.} = 0,025$ , полученным при нормальной температуре).

#### 1.4.4 Воздействие окружающей среды

По данным большинства исследователей окисление  $MoS_2$  кислородом воздуха происходит при  $300 - 350^\circ C$ , однако в условиях трения, по мнению Е.Р. Брейтуэйта [7], частичное окисление  $MoS_2$  до  $MoO_3$  начинается уже при  $150-170^\circ C$ . Эти данные подтверждены также и другими исследователями [12]. При исследовании влияния длительности неподвижного контакта ( $\Delta\tau$ ) на  $f_{тр.}$  Пары о ТСП на основе  $MoS_2$  в работе [14] впервые было отмечено возрастание  $f_{тр.}$  При возобновлении скольжения (рисунок 1.20). Это явление было названо «стоп-эффектом». На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что возрастание  $f_{тр.}$  В 2 раза после возобновления скольжения не зависит от продолжительности остановки узла трения (для  $\Delta\tau = 0,5$  часа и более).

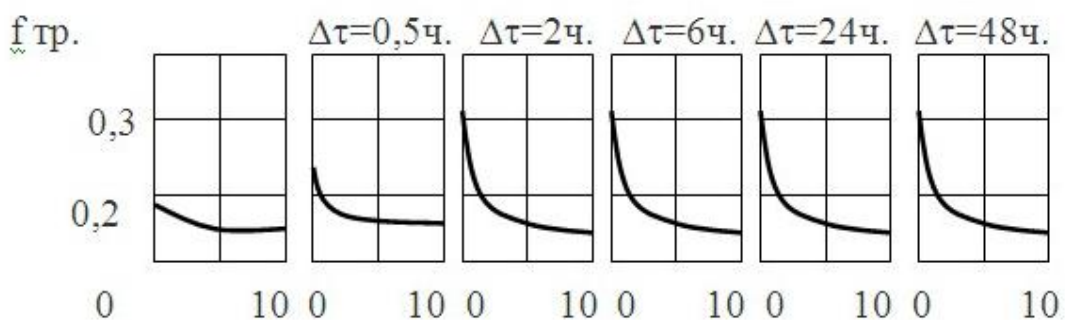


Рисунок 1.20 - Влияние продолжительности неподвижного контакта на коэффициент трения  $MoS_2$  на воздухе ( $P_{конт.} = 0,4$  МПа,  $V = 0,7$  м/с)

Авторы объясняют этот эффект тем, что в процессе трения  $MoS_2$  на воздухе возможно образование трехокси молибдена  $MoO_3$ , которая при остановках узла трения вследствие гидрофильности может поглощать влагу из воздуха. В результате этого и происходит возрастание  $f_{тр.}$  До  $0,28 - 0,3$  при возобновлении скольжения. В дальнейшем в процессе наработки вследствие фрикционного нагрева влага с поверхности трения удаляется и  $f_{тр.}$  Снижается

до своего установившегося значения. Если в период остановки нагревать зону контакта до 60-80°C, то возрастания  $\mu$ тр. При возобновлении скольжения не происходит. Однако этот эффект наблюдался также и при испытаниях в вакууме [12], где вследствие разряженности атмосферы окисление  $\text{MoS}_2$  затруднено, чем и была вызвана необходимость более подробного изучения описанного явления. К тому же до настоящего времени недостаточное внимание уделялось методам борьбы с ним. Кроме описанного выше нагревания зоны контакта в рассмотренной литературе был обнаружен еще лишь один способ воздействия на окислительную смазочную структуру  $\text{MoS}_2$  с целью предотвращения «стоп-эффекта». Бэллоу и Россом [130] предложили проводить обработку гидрофильного слоя  $\text{MoO}_3$  при помощи гидроокиси аммония и газообразного  $\text{H}_2\text{S}$  при 125°C.

При проведении испытаний пар трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  в условиях глубокого вакуума многими исследователями отмечалось снижение коэффициента трения в 2 раза и более [53,151,14,12,94].

В реальных условиях космического пространства при испытаниях твердых смазок на основе  $\text{MoS}_2$  на американском спутнике «Рейнджер-1» наблюдалось снижение коэффициента трения по сравнению с его величиной, полученной в лабораторном вакууме [156].

Согласно данным работы [61] наибольший ресурс в условиях вакуума обнаруживают покрытия рассматриваемого типа с использованием в качестве пленкообразователя мочевиноформальдегидного (ТСП ВНИИ НП 212) и эпоксидного полимеров (ВНИИ НП 230), меньшую износостойкость проявляют покрытия с кремнийорганическим связующим (ТСП ВНИИ НП 209, 213).

Следует также отметить, что, несмотря на большое количество исследований, комплексному изучению влияния различных факторов на триботехнические показатели рассматриваемых фрикционных сопряжений до последнего времени уделялось недостаточное внимание. В рассмотренной литературе найдены лишь 2 работы, посвященные этому вопросу. В статье [16]

приводится двухфакторная модель зависимости срока службы пары с ТСП ВНИИ НП 212 от нагрузки и скорости скольжения для условий вакуума ( $p = 13,3$  мкПа). Однако практическое использование данного уравнения затруднено по ряду причин. Нагрузочный фактор входит в формулу в абсолютном выражении, в то время как при расчетах реальных пар трения используется универсальный параметр контактного давления. К тому же в качестве параметра оптимизации выбран ресурс ТСП, выраженный в количестве циклов взаимодействий, что также затрудняет использование данной модели в конструкторской практике.

В другой работе [91] на основе спланированного эксперимента получены модели зависимости коэффициента трения  $f_{тр}$  от контактного давления  $P$ , скорости скольжения  $V$  и шероховатости контртела  $R_a$  для ТСП ВНИИ НП 212 и 230. Однако данные модели, полученные позднее опубликованных автором настоящей диссертации зависимостей [см. Хопин П.Н. Исследование влияния эксплуатационно-технологических факторов на работоспособность узлов трения летательных аппаратов с применением твёрдосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена. Автореферат диссерт. на соиск. уч. ст. к.т.н. М., МАТИ, 1982, 20с.], охватывают узкие диапазоны варьирования факторов  $P=0,8-2,2$  МПа,  $V = 0,065 - 0,38$  м/с, что затрудняет их практическое применение. В работе [92] разрабатывается возможность оценки ресурса работы ТСП ВНИИ НИ 212 и 230 для условий вакуума ( $P = 1,33 \cdot 10^{-4}$  Па) с использованием параметра интенсивности изнашивания  $I=N^{\alpha}\Phi^{\beta}\Gamma^{\gamma}$  (где учитываются нагрузочный фактор ( $N$ ), фрикционные условия трения ( $\Phi$ ) и геометрические параметры ( $\Gamma$ )). Не учитываются оптимальные условия адгезии ТСП к основе, обеспечиваемые соответствующей обработкой материала основы и самим составом ТСП, как композиционного материала, куда обязательно входит плёнкообразующая полимерная смола. С конструкторской точки зрения расчёт ресурсов с помощью интенсивности износа не учитывает также конкретной скорости скольжения, оказывающей наиболее существенное влияние на ресурс. К тому же расчёт по этой методике даёт разброс до 4,3 раз и существенно

зависит от точности измерения толщины ТСП. В работе [35] предлагается расчёт ресурса пар трения с ТСП с использованием фактора износа  $\Phi=I/P$ , исходя из равномерного износа исходной толщины ТСП  $\delta =10-22$  мкм, хотя в период приработки изнашивается 80% толщины ТСП. Расчёт выполнен только для ТСП ВНИИ НП 212.

Существенным фактором для летательных аппаратов, функционирующих в условиях вакуума при интенсивном облучении, является воздействие радиации. Согласно результатам исследований, представленным в работе [89], при проведении испытаний на трение пар с ТСП на основе  $MoS_2$  с различными плёнкообразователями, подвергнутых воздействию радиации, их триботехнические параметры практически не изменялись.

Известный интерес представляет также открытие в 1969 году эффекта сверхнизкого трения на полиэтилене и полипропилене после бомбардировки их ускоренными атомами гелия [32], объясняемого интенсивным очищением поверхностей трения от загрязнений. Авторы открытия продолжили исследования в этом направлении, но уже с  $MoS_2$ , синтезированным на молибденовой подложке в виде слоя толщиной 50 мкм, полученного по технологии ВНИИОФИ [33]. В результате проведенных экспериментов было установлено, что в указанных условиях значение  $f_{тр}$  для этого материала может быть снижено до величины  $f_{тр} \approx 10^{-3}$ . Однако в обоих случаях эффект исчезал после выключения источника облучения или при напуске в камеру атмосферы. Описанное явление не наблюдалось при испытаниях композиционного материала типа «Аман» ( $MoS_2$  с органическим связующим) и графита АГ-600. Практическое использование данного эффекта затруднено по ряду причин как конструкционного (необходимость вакуумирования и применения специальных источников облучения для пар, функционирующих в нормальных атмосферных условиях и подверженных вследствие этого интенсивному окислению), так и технологического порядка (описанный эффект наблюдался лишь для определенной модификации смазочного материала из

MoS<sub>2</sub>, в то время как в реальных парах трения по технологическим, прочностным и ряду других характеристик использование данного материала не всегда возможно).

Учитывая обилие факторов, влияющих на триботехнические показатели узлов трения с ТСП, и необходимость комплексной оценки их влияния, что приводило к необходимости проведения значительного числа экспериментальных исследований, в настоящей работе был выбран метод математического эксперимента, описывающего влияние наиболее значимых факторов, по которым в литературе имелись соответствующие однофакторные зависимости.

Такая методика позволила существенно снизить не только объем экспериментальной работы, но и затраты времени. Однако в связи с тем, что, с одной стороны, условия функционирования реальных узлов трения летательных аппаратов не всегда соответствовали принятым литературным данным, а, с другой стороны, зависимости, описывающие влияние температуры и вакуума, имели противоречивый характер (см. рисунки 1.18 и 1.19 а) или выражались в форме, когда практическое их использование затруднено (например, зависимость, описывающая влияние вакуума), были проведены также комплексные исследования работоспособности имитаторов узлов трения ЛА с ТСП при повышенной температуре и в условиях вакуума.

Учитывая перспективность применения в указанных экстремальных условиях самосмазывающихся материалов (СМ) [22], были осуществлены сравнительные исследования, позволившие выявить оптимальный вид ТСП или СМ для конкретных условий функционирования как в нормальных атмосферных условиях, так и в вакууме.

### 1.5 Цель и задачи исследований

Анализ литературных данных показал, что несмотря на большое количество исследований ТСП, в частности на основе MoS<sub>2</sub> (структурная теория Брегга, адсорбционные концепции Сейвиджа и Семёнова А.П., гипотеза

Брайанта и др.) до настоящего времени нет единой теории, объясняющей всё многообразие их смазочных свойств. Расчёт ресурса пары трения с ТСП с использованием интенсивности износа приводит к погрешностям до 4.3 раза. При расчёте коэффициента трения на основе молекулярно-механической теории трения не учитывался фактор скорости скольжения, тесно связанный с температурой трения. Недостаточное внимание уделялось комплексному изучению влияния различных эксплуатационно-технологических факторов на триботехнические показатели рассматриваемых фрикционных сопряжений. Не существовало методики, позволяющей получить зависимости для определения предельных и оптимальных нагрузочно – скоростных режимов трения для узлов с ТСП. Не проводилась оценка комплексного влияния технологических факторов на прирабатываемость и явление «стоп-эффекта». Наряду с ТСП высокими антифрикционными характеристиками при автономном режиме смазывания обладают самосмазывающиеся материалы. В литературе отсутствует сравнительная оценка работоспособности обеих групп смазочных материалов для нормальной атмосферы и вакуума. Не исследованы их теплофрикционные характеристики в указанных условиях с использованием контртел различной твёрдости.

В связи со сказанным основная цель работы состояла в разработке методов комплексной оценки триботехнических свойств сопряжений с твердосмазочными покрытиями с учетом модификации состава покрытий, а также влияния эксплуатационных факторов применительно к различным условиям функционирования.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи исследований:

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявить наиболее существенный фактор, влияющий на триботехнические показатели пар трения с твёрдосмазочными 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. 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.

4. 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.

5. Разработать методику для оценки предельных и оптимальных режимов трения смазочных материалов и получить искомые зависимости для исследуемых пар трения.

6. Провести сравнительные исследования ТСП и самосмазывающихся материалов для выбора оптимальных типов смазочных 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.

## ГЛАВА 2 ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Структура и порядок исследований

#### 2.1.1 Методика комплексной оценки триботехнических показателей

##### 2.1.1.1 Микроанализ контактирующих поверхностей трения с ТСП

В связи с решением задачи выявления физически обоснованного критерия для оценки ресурса пар трения с ТСП был проведён микроанализ контактных поверхностей трения.

На первом этапе осуществлено сканирование поверхности образца с ТСП ВНИИ НП 212 в исходном и приработанном состоянии при помощи растрового микроскопа «Super Probe –733» японской фирмы « JEOL « во вторичной электронной эмиссии при ускоряющем напряжении  $E=25$  кВ и токе  $I = 3 \cdot 10^{-8}$  А. Пары трения, изготовленные из закалённой стали ШХ15, испытывались на роликовой машине трения РП.

На следующем этапе проводились исследования изменения в процессе трения топографических характеристик контактирующих поверхностей. Измерение профиля поверхности подложки и параметра  $R_a$  в исходном состоянии образца с ТСП осуществлялось на поверхности кольца, подвергнутого пескоструйной обработке в соответствии с принятой технологией подготовки металлических поверхностей перед нанесением ТСП [70], а в случае приработанных поверхностей — в месте отслоения смазочной плёнки на образце с наработкой, близкой по продолжительности к ресурсу рассматриваемого покрытия. Измерения производились на профилографе – профилометре модели 252 завода «Калибр».

Микроанализ указанных поверхностей проводился с помощью анализатора LINK серии 860 (Великобритания-Япония) на основе бомбардировки поверхности электронами с последующим анализом рентгеновского спектра излучения. Исследовались пары трения, изготовленные из ШХ15, с композиционным покрытием ТСП ВНИИ НП 212 с различной

степенью наработки, которая осуществлялась на машине трения СМТ-1 при нагрузке  $N = 1000$  Н и скорости скольжения  $V = 0,5$  м/с.

На следующем этапе была разработана методика оценки интенсивности изнашивания рассматриваемых пар трения на основе проведённых экспериментальных исследований и обработки литературных данных. Определены терморегрессионные зависимости, необходимые для её реализации применительно к парам трения различных составов. В основу предлагаемого метода положено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания  $I_h$  рассматриваемых пар трения с ТСП как для условий нормальной атмосферы, так и для вакуума, подтверждённое результатами проведённых экспериментов (см. гл. 5). Определив температуру трения  $T_{тр.}$  и зная терморегрессионные зависимости  $I_h$  от  $T_{тр.}$ , можно рассчитать интенсивность изнашивания рассматриваемой пары трения с ТСП с использованием термокорреляционных функций  $I_h = f(T_{тр.})$ . Так как температура трения  $T_{тр.}$  является функцией двух основных определяющих её эксплуатационных факторов контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ , для расчёта  $I_h$  пар трения с ТСП необходимо иметь зависимости, позволяющие производить оценку температуры трения для произвольного сочетания нагрузочно – скоростных параметров реальных узлов трения с ТСП, т.е. зависимости типа  $T_{тр.} = f(P, V)$ , что и было реализовано экспериментально и с использованием литературных данных.

Для оценки антифрикционных характеристик анализируемых фрикционных сопряжений разработана методика и на основе проведённых экспериментальных исследований и обработки литературных данных определены терморегрессионные зависимости, необходимые для её реализации применительно к парам трения различных составов.

Предложенный подход к оценке работоспособности пар трения с ТСП был реализован для условий вакуума.

Разработана методика и произведена оценка интенсивности

изнашивания и антифрикционных характеристик рассматриваемых пар трения на основе термодинамических зависимостей для условий вакуума.

### 2.1.1.2 Методика комплексной оценки

В соответствии с поставленными выше задачами в данном разделе производилась разработка на основе математического эксперимента расчетного метода комплексной оценки работоспособности узлов трения с ТСП. На основе проведенного анализа эксплуатационно-технологических факторов, влияющих на работоспособность узлов трения с ТСП, были выявлены наиболее существенные факторы. Очевидно, что обилие факторов и необходимость комплексной оценки их влияния приводит к необходимости проведения значительного числа экспериментов. Поэтому автором был разработан расчетный метод комплексной оценки работоспособности, основанный на обобщении результатов математического эксперимента, в котором использовались имеющиеся в литературе однофакторные зависимости.

С помощью предложенного метода на первом этапе математического эксперимента было проведено практическое опробование разработанного алгоритма на примере анализа эксплуатационно-технологических факторов, определяющих работоспособность пар трения с ТСП в нормальных атмосферных условиях, с целью количественной оценки факторов и выделения наиболее существенных. Применительно к условиям испытаний ТСП, определенным по ГОСТ 11613-65, было построено уравнение регрессии для выбранных наиболее существенных факторов.

На втором этапе математического эксперимента, учитывая нелинейный характер исследуемых однофакторных зависимостей, с целью получения математической модели 2-го порядка, решалась задача комплексной оценки на основе предложенного расчетного метода влияния выделенных ранее эксплуатационно-технологических факторов на ресурс пар трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с органическими связующими в условиях нормальной атмосферы.

Экспериментальная оценка достоверности модели, полученной в результате проведения математического эксперимента в нормальных атмосферных условиях, производилась как путем проведения испытаний на машине трения «РП», так и при помощи сравнения с экспериментальными данными других исследователей.

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

$$I_h = \frac{\delta_{\text{прир.}}}{V \cdot 60 \cdot \tau} \cdot 10^{-6}, \quad (2.1)$$

где  $\delta_{\text{прир.}} = 2\text{мкм}$  – толщина приработанной плёнки ТСП со связующими смолами (см. главу 3);  $V$  – скорость скольжения [м/с];  $\tau$  – ресурс пары трения до разрушения [мин.].

### 2.1.1.3 Методика оценки триботехнических показателей на основе регрессионных зависимостей для условий нормальной атмосферы и вакуума

#### 2.1.1.3.1 Методика оценки интенсивности изнашивания

На следующем этапе была разработана методика оценки интенсивности изнашивания рассматриваемых пар трения на основе проведённых экспериментальных исследований и обработки литературных данных. Определены терморегрессионные зависимости, необходимые для её реализации применительно к парам трения различных составов. В основу предлагаемого метода положено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания  $I_h$  рассматриваемых пар трения с ТСП как для условий нормальной атмосферы, так и для вакуума, подтверждённое результатами проведённых экспериментов (см. гл. 5). Определив температуру трения  $T_{\text{тр.}}$  и зная терморегрессионные зависимости  $I_h$  от  $T_{\text{тр.}}$ , можно рассчитать интенсивность изнашивания рассматриваемой пары трения с ТСП с использованием термокорреляционных функций  $I_h = f(T_{\text{тр.}})$ . Так как температура трения  $T_{\text{тр.}}$  является функцией двух основных определяющих её эксплуатационных факторов контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ ,

для расчёта  $I_n$  пар трения с ТСП необходимо иметь зависимости, позволяющие производить оценку температуры трения для произвольного сочетания нагрузочно – скоростных параметров реальных узлов трения с ТСП, т.е. зависимости типа  $T_{тр.}=f(P,V)$ , что и было реализовано экспериментально и с использованием литературных данных.

Интенсивность изнашивания согласно ГОСТ 27674-88 определялась как отношение значения износа смазочной плёнки ТСП (толщина которой после приработки составляет  $\delta_{пр.р.} = 2$  мкм – см. разделы 1.3.4; 3.1.2) к пути трения по формуле (2.1).

#### 2.1.1.3.2 Методика оценки антифрикционных характеристик

Для оценки антифрикционных характеристик анализируемых фрикционных сопряжений разработана методика и на основе проведённых экспериментальных исследований и обработки литературных данных определены регрессионные зависимости, необходимые для её реализации применительно к парам трения различных составов.

#### 2.1.2 Методика оценки влияния технологических факторов

Как указывалось выше, одной из наиболее важных операций технологического процесса нанесения ТСП является сам процесс напыления покрытия [89]. Очевидно, что качество поверхности последнего, наносимого без использования специальных приспособлений, т.е. вручную, зачастую получается с большими погрешностями формы. С другой стороны, необходимо отметить также и тот факт, что получение достоверного результата экспериментов предполагает подготовку образцов с возможно более близкими топографическими характеристиками поверхностного слоя ТСП (толщина покрытия, волнистость, отклонения от правильной геометрической формы и др.), которые весьма затруднительно обеспечить без механизированного нанесения ТСП, в связи с чем было разработано и изготовлено переносное приспособление для механизированного нанесения ТСП (см. рисунок 2.3).

Обработка режимов механизированного нанесения ТСП производилась на стальных валиках (рисунок 2.1), имеющих те же габаритные размеры, что и у многоместной оправки (рисунок 2.9), на которую предстояло наносить ТСП.

Контроль качества получаемого покрытия (толщины слоя ТСП) осуществлялся следующим образом. Вначале производилась наклейка изоленды как в осевом, так и в радиальном направлениях, что позволило измерять толщину ТСП в трех диаметральных сечениях и вдоль валика. После напыления ТСП с валиков (рисунок 2.1) снималась изоляционная лента, закрывающая часть их наружной поверхности, что давало возможность после отверждения покрытий производить измерение толщины ТСП на измерительном микроскопе типа УИМ-21 при помощи измерительной головки (цена деления -1мкм), укрепленного на индикаторной стойке. В дальнейшем при механизированном нанесении ТСП на образцы, укрепленные на многоместной оправке (рисунок 2.9), проверка качества напыления производилась при помощи трех контрольных образцов, расположенных по краям и в центре оправки и предварительно закрытых наполовину изоляцией.

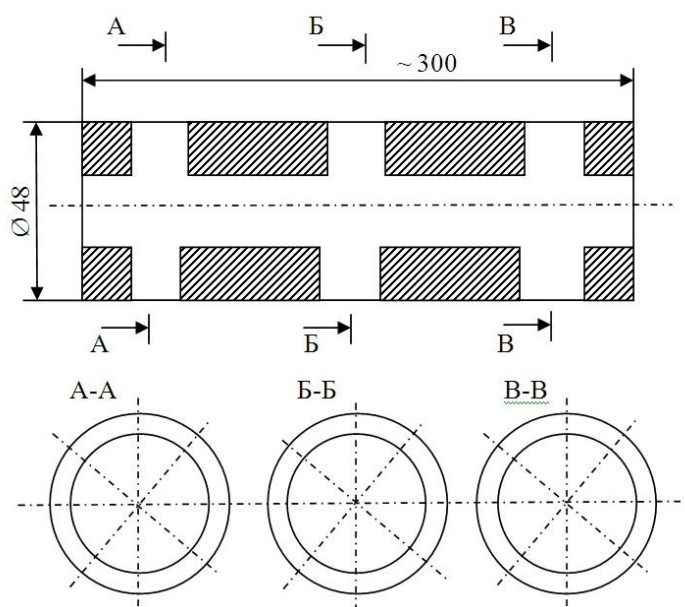




Рисунок 2.1 - Схема измерения толщины ТСП после механизированного нанесения:  - поверхность с ТСП;  - участки исходной поверхности

Экспериментально были определены следующие режимы механизированного нанесения ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , обеспечившие качественное напыление покрытия: угловая скорость вращения оправки с образцами – 150



об/мин., скорость перемещения подвижной каретки с закрепленным на ней пистолетом-распылителем (подача) -50 мм/с.

При нанесении ТСП ВНИИ НП 212 требуемая оптимальная толщина покрытия  $20 \pm 3$  мкм, обеспечивающая максимальную долговечность (см. гл.1, п.1.3) получалась за 2 прохода, для ВНИИ НП 213, 230, 229 – за 4-5 проходов при условии предварительной настройки мощности напыления (при помощи специального регулятора) в соответствии с указаниями инструкции [70].

В дальнейшем все последующие испытания производились на образцах с ТСП, нанесёнными при помощи этого приспособления на режимах, определенных выше.

Методика экспериментов по исследованию эффективности механизированного нанесения ТСП состояла в следующем. Вначале механизированным способом с использованием приспособления (рисунок 2.8) на специально изготовленные широкие образцы (см. рисунок 2.29), закрепленные на многоместной оправке (рисунок 2.4) за два прохода наносилось ТСП ВНИИ НП 212 (серия из 7 образцов -№№ 1-7). Затем на 6 образцов (№№ 8-13) покрытие напылялось вручную. После нанесения все образцы с исследуемым покрытием испытывались на машине трения типа «РП». В качестве контрольных образцов использовались стандартные кольца подшипника № 7204. Причем наработка производилась в несколько этапов: приработка, истирание длительностью  $\tau = 1$  час – дважды,  $\tau=2$  часа – 1 раз и, наконец, трение до полного изнашивания. Кроме того, после каждого этапа наработки при помощи индикатора часового типа с ценой деления 1 мкм, укрепленного на индикаторной стойке, на измерительном микроскопе УИМ-21 в восьми сечениях образцов производились замеры величины износа. Такой режим испытаний позволил проследить динамику изменения величины износа смазочной пленки ТСП по мере наработки.

На следующем этапе работы оценивалось влияние материала основы и его предварительной обработки на триботехнические показатели различных типов ТСП. Вначале на машине трения СМТ-1 ( $N=980$  Н,  $V = 0,5$  м/с)

исследовались сравнительные ресурс ( $\tau$ ) и антифрикционные свойства ( $f_{тр.}$ ) следующих типов ТСП: ВНИИ НП 212, ВАП-2, ЦВСП-3 и электрофоретического графитового покрытия (пара трения ШХ15-ШХ15).

Затем оценивались триботехнические показатели ТСП на титановой основе. Исследовались ТСП ВАП-2, ЦВСП-3, нанесённые на титановый сплав ВТ-20 с предварительно нанесёнными гальваническим хромом, химическим никелем и электроискровым покрытием ВК6М. Пары трения ВТ20-ШХ15 испытывались на СМТ-1 при  $F = 980 \text{ Н}$ ,  $V = 0,5 \text{ м/с}$ .

На следующем этапе работы ставилась задача исследования комплексного влияния технологических факторов на интенсивность изнашивания и прирабатываемость пар трения с ТСП.

Следует отметить, что, несмотря на известную практическую значимость изучения этого процесса при работе с ТСП до настоящего времени этому вопросу уделяется недостаточное внимание. Поэтому на следующем этапе работы ставилась задача оценки степени влияния различных технологических факторов на интенсивность изнашивания и длительность периода приработки ( $\tau_{\text{прир.}}$ ) пар трения с ТСП.

На основе анализа литературных данных (глава 1) были выявлены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на износостойкость пар трения с ТСП: толщина наносимого покрытия ( $\delta$ ), шероховатость ( $R_{a0}$ ) и твердость материала основы ( $HRC_0$ ), а также шероховатость ( $R_{ak}$ ) и твердость контртела ( $HRC_k$ ). Испытания проводились на машине трения типа «РП» по методике, рекомендованной ГОСТ 11613-65 (метод определения истираемости и антифрикционных свойств ТСП). Режим работы пары трения был следующим: нагрузка в контакте 980 Н, скорость скольжения 0,492 м/с. Материал образцов – термообработанная легированная сталь 30ХГСА. Испытывалось ТСП ВНИИ НП 212. Различная шероховатость материала основы достигалась при помощи пескоструйной обработки электрокорундом ( $R_{a0} = 0,75 \text{ мкм}$ ) и корундом марки «шлифпорошок» 25А, ОСТ 2МТ 71-5-78

( $R_{a0} = 2,0$  мкм) Шероховатость контртела  $R_{ak}=0,4$  мкм была получена шлифованием,  $R_{ak} = 0,04$  мкм – шлифованием с последующей полировкой.

Для экспериментального решения поставленной выше задачи было применено математическое планирование по методу случайного баланса (сверхнасыщенный план) [36, 75], позволяющее по результатам относительно небольшого числа опытов воспроизвести ранжированный ряд и при помощи регрессионного анализа оценить наиболее значимые эффекты факторов, которые выделялись на «шумовом поле», издаваемом факторами, несущественно влияющими на результаты опытов.

В качестве параметра оптимизации была принят ресурс пары трения  $\tau$ . Наименование факторов и уровни их варьирования, выбранные с учетом реальных параметров узлов трения, приведены в таблице 2.1.

Для получения среднего статистического значения на каждом режиме испытывалось по 3 образца. С целью уменьшения систематических погрешностей опыты осуществлялись в случайном порядке с применением рандомизации при помощи таблиц случайных чисел [72].

Прирабатываемость пары трения оценивалась по времени от начала испытания до момента достижения установившегося значения  $f_{тр}$ . Наименование факторов и уровни их варьирования, приведены в таблице 2.1.

На следующем этапе работы решалась задача исследования влияния технологических факторов на явление «стоп-эффекта» при работе узлов трения с ТСП на основе  $MoS_2$ . Данный эффект проявляется в виде возрастания  $f_{тр}$ . При возобновлении скольжения после останова пары трения с ТСП.

Оборудование и методика эксперимента были аналогичными с условиями испытаний при оценке влияния технологических факторов на прирабатываемость рассматриваемых фрикционных сопряжений, а именно – исследования на машине трения «РП» проводились с применением математического планирования эксперимента по методу случайного баланса. В качестве параметра оптимизации был принят коэффициент трения «стоп-

эффекта»  $f_{тр.с.э.}$  возникающий при возобновлении скольжения после останова длительностью более 12 часов.

Таблица 2.1 – Наименование факторов и уровни их варьирования в задаче исследования комплексного влияния технологических факторов на триботехнические свойства пар трения с ТСП

№ п/п	Фактор	Размер- ность	Обозначение		Уровни варьирования		
			натуральное	кодо- вое	кодовые		
					0	+1	-I
					натуральные		
1	Толщина покрытия	мкм	$\delta$	$X_1$	23	18	28
2	Шероховатость основы	мкм	$R_{a0}$	$X_2$	1,375	0,75	2,0
3	Шероховатость контртела	мкм	$R_{ak}$	$X_3$	0,22	0,4	0,04
4	Твердость контртела	ед.	HRC <sub>к</sub>	$X_4$	42	50	34
5	Твердость основы	ед.	HRC <sub>о</sub>	$X_5$	39	50	28

Анализ математической модели, полученной по результатам этого эксперимента, должен был указать факторы, в наибольшей степени влияющие на исследуемое явление. В дальнейшем предполагалось проведение дополнительного более углубленного исследования этих факторов с целью построения физической модели и всесторонней оценки явления «стоп-эффекта».

### 2.1.3 Методика оценки влияния эксплуатационных условий

#### 2.1.3.1 Методика исследования влияния температурного фактора в нормальных атмосферных условиях

##### 2.1.3.1.1 Методика исследование влияния нагрузочно – скоростных факторов при повышенной температуре

В соответствии с температурным методом, разработанным проф. Р. М. Матвеевским [64], принимаем, за общую температуру испытаний  $T$  сумму объемной температуры  $T_{об}$  и температуры вспышки или температуры трения  $T_{тр.}$ , которая или рассчитывается по теоретическим формулам, или замеряется экспериментально, как и было осуществлено в настоящей работе (методика измерения  $T_{тр.}$  изложена в п. 2.1.1):

$$T = T_{тр.} + T_{об}. \quad (2.2)$$

Исходя из того, что  $T_{тр.}$  является производной нагрузочно-скоростных фрикционных параметров, а  $T_{об}$ . В конструкторской практике задается как воздействие внешних по отношению к паре трения факторов, была использована следующая методика задания  $T_{об}$ . Для того, чтобы исключить из общей температуры испытаний ( $T$ ) температуру, возникающую при трении ( $T_{тр.}$ ), в процессе эксперимента нагрев до заданной  $T_{об}$ . производился после приработки, когда  $T_{тр.}$  выходила на свой установившийся режим. Это значение и принималось за точку отсчета, которая регистрировалась при помощи специальной термопары (рисунке 2.2) с выводом показаний на самопишущий потенциометр КСП-4. Так как нагрев пары трения осуществлялся равномерно со всех сторон, то предполагалось, что объемные температуры контрообразца для данной схемы близки. Текущее значение  $T_{об}$ . (с

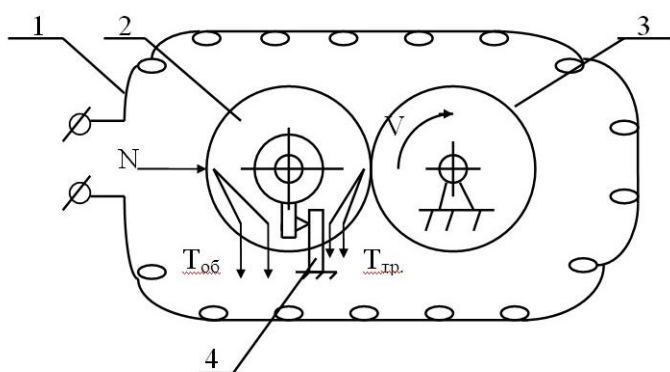


Рисунок 2.2 - Схема испытаний в эксперименте по исследованию триботехнических свойств пар трения с ТСП при повышенной температуре: 1 – нагреватель; 2 – контрообразец; 3 - образец с ТСП; 4 -тензобалка

учетом фрикционного нагрева) устанавливалось на КСП-4 при помощи концевых выключателей, которые через промежуточный силовой блок

управляли нагревателем, автоматически поддерживая в процессе испытаний заданную  $T_{об}$ . Далее покрытие испытывалось до разрушения.

Таким образом, в процессе одного испытания при заранее установленных условиях по абсолютной нагрузке  $N$ , скорости  $V$  и температуре нагрева  $T_{об}$ . Фиксировались  $f_{тр.}$ ,  $T_{тр.}$  и долговечность работы пары трения  $\tau$ .

Результаты экспериментов по определению влияния технологических факторов на работоспособность пар трения с ТСП, проведённые по методу случайного баланса (см. п. 4.2), позволили выявить технологические характеристики пар трения с ТСП, обеспечивающие максимальную долговечность при наименьшем времени приработки рассматриваемого фрикционного сопряжения. Исходя из этого, при проведении всех дальнейших испытаний были обеспечены оптимальные технологические параметры пар трения с ТСП. Поэтому было признано целесообразным включение в число эксплуатационных факторов, определяющих работоспособность пар трения с ТСП, следующих параметров: скорость скольжения  $V$ , контактное давление  $P_{конт}$ . Или нагрузка  $N$ , объемная температура нагрева  $T_{об}$ . Диапазоны варьирования вышеназванных факторов выбирались, исходя из диапазонов изменения нагрузочно-скоростных характеристик трения реальных узлов ЛА, функционирующих в заданных условиях. Наибольший практический интерес представило комплексное исследование работоспособности пары трения с ТСП при  $V = 0,4-1,2$  м/с,  $N = 400-1200$  Н и  $T_{об} = 20-200^{\circ}\text{C}$ .

Исходя из анализа литературных данных (см. раздел 1.4), с учётом диапазонов работы реальных узлов (см. раздел 2.1.1.2), а также учитывая нелинейный характер влияния исследуемых факторов на ресурс пары трения с ТСП, который был принята в качестве параметра оптимизации, решение задачи осуществлялось методом центрального композиционного ортогонального планирования 2-го порядка, включающим матрицу, состоящую из 15 опытов [74]. Диапазоны варьирования и уровни факторов представлены в таблице 2.2а. Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в таблице 2.3. После испытаний на контробразце были измерены дорожки трения,

соответствующие каждому опыту, после чего рассчитана зависимость вида  $P=f(N, V)$  или  $N = (P, V)$ , которая и использовалась при пересчете  $N$  в  $R_{\text{конт}}$ . Данный прием был использован на основании известного положения о том, что «если исходить из микрогеометрии приработанных поверхностей, то можно с достаточной точностью производить расчеты для фрикционного контакта, пользуясь формулами, полученными для статических условий» [26, 2].

Таблица 2.2 – Уровни и диапазоны варьирования факторов в эксперименте по исследованию триботехнических свойств пары трения с ТСП при повышенной температуре (а) и при определении температурной характеристики аналогичной пары трения (б)

Уровни факторов	Натуральные значения		
	$V$ [м/с]	$N$ , [Н] б	Тоб. [°С] а
Интервал варьирования	0,4/0,8	392/560	-
Основной уровень	0,66/2,6	784/1000	-
Верхний уровень	1,06/3,4	1176/1560	-
Нижний уровень	0,26/1,8	392/440	-
Звездные точки: +1,41	1,224/3,728	1337/1790	-
-1,41	0,096/1,472	236/210	-
Интервал варьирования	0,4	400	80
Основной уровень	0,66	800	120
Верхний уровень	1,06	1200	200
Нижний уровень	0,26	400	40
Звездные точки: +1,215	1,146	1260	217
-1,215	0,174	308	23

#### Примечания

1. Значения в числителе использованы для определения зависимости  $R_{\text{опт.}}=f(V_{\text{опт.}})$  при испытаниях на модернизированной машине трения РП.
2. Значения в знаменателе использованы для определения зависимости  $R_{\text{пред.}}=f(V_{\text{пред.}})$  при проведении испытаний на машине трения СМТ-1.

Это положение экспериментально было подтверждено и результатами испытаний пар трения с ТСП, проведенными нами и удовлетворительно согласующимися с данными других исследователей [77,48,17].

Таблица 2.3 – Матрица планирования и результаты эксперимента в задаче исследовании влияния эксплуатационных факторов на триботехнические свойства пар трения с ТСП при повышенной температуре с использованием центрального композиционного ортогонального плана 2-го порядка

№ опыта	Уровни факторов									
	В кодовом масштабе									
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1=$ $X_1^2-0,73$	$X_2=$ $X_2^2-0,73$	$X_3=$ $X_3^2-0,73$
1.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
2.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
3.	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
4.	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
5.	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
6.	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
7.	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
8.	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27



9.	+1	+1,215	0	0	0	0	0	+0,745	-0,73	-0,73
10.	+1	-1,215	0	0	0	0	0	+0,745	-0,73	-0,73
11.	+1	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	+0,745	-0,73
12.	+1	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	+0,745	-0,73
13.	+1	0	0	+1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,745
14.	+1	0	0	-1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,745
15.	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
16.	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
17.	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
18.	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
19.	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
20.	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

Продолжение таблицы 2.3

	Уровни факторов	Измеряемые параметры
--	-----------------	----------------------

№ опыт а	в натуральном масштабе			по окончании приработки			с нагревом			
	V, м/с	N, x9,8Н	T <sub>об.</sub> , °С	τ прир., мин.	f <sub>тр.</sub> прир.	T <sub>тр.пр</sub> ир. °С	τ, мин.	f <sub>тр.</sub>	T <sub>тр.</sub> , °С	R <sub>конт.</sub> , МПа
1.	1,06	120	200	4,3	0,050	209	113	0,035	336	90, 0
2.	0,26	120	200	49	0,064	129	191	0,047	286	116,0
3.	1,06	40	200	10	0,083	186	130	0,057	276	28,2
4.	0,26	40	200	58	0,121	121	244	0,069	255	41,4
5.	1,06	120	40	8,8	0,052	222	160	0,034	241	96,6
6.	0,26	120	40	52	0,060	115	491	0,039	141	104,3
7.	1,06	40	40	14	0,093	178	326	0,075	172	35,4
8.	0,26	40	40	65	0,144	99	944	0,092	116	45,3
9.	1,146	80	120	9	0,051	218	111	0,044	245	67,3
10.	0,174	80	120	115	0,081	99	454	0,045	186	74,5
11.	0,66	128,6	120	12	0,048	178	146	0,031	256	128,7
12.	0,66	31,4	120	26	0,110	160	340	0,067	227	31,0
13.	0,66	80	217	19	0,056	175	148	0,043	329	73,2
14.	0,66	80	23	26	0,078	167	475	0,049	166	64,1
15.	0,66	80	120	20	0,069	181	151	0,043	237	75,5
16.	0,66	80	120	20	0,073	146	120	0,050	229	62,0
17.	0,66	80	120	20	0,060	160	200	0,039	260	69,3
18.	0,66	80	120	23,7	0,053	167	118	0,043	251	73,3
19.	0,66	80	120	22,5	0,061	145	130	0,038	245	68,0
20.	0,66	80	120	23	0,061	145	156	0,047	245	60,5

2.1.3.1.2 Методика разработки и опробования метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных материалов.

Следующим этапом работы явилась разработка и экспериментальное опробование на примере пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных материалов.

Экспериментально метод был реализован следующим образом. При помощи центрального композиционного ротатбельного униформ – планирования 2-го порядка строилась матрица (см. таблицу 2.4), в которой варьируемыми факторами являлись значения контактной нагрузки  $N$  и скорости скольжения  $V$ , а параметром оптимизации – температура трения  $T_{тр}$ . Затем после приработки пары трения с испытуемым смазочным материалом (ТСП ВНИИ НП 212) на основном уровне факторов в процессе

Таблица 2.4 – Матрица планирования и результаты эксперимента в задаче определения зависимостей вида  $T_{тр} = f(N, V)$  и  $f_{тр} = \varphi(N, V)$  для пары трения с ТСП ВНИИ НИ 212 (модернизированная машина трения РП)

№ оп ы- та	Уровни факторов						в натуральном масштабе		Параметр оптимизации	
	в кодовом масштабе									
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1X_2$	$V$ , м/с	$N$ , х9,8Н	$T_{тр}$ . °С	$f_{тр}$ .
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1,06	120	184	0,050
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	0,26	120	112	0,060
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	1,06	40	151	0,090
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,26	40	94	0,136

5	+1	+1,41	0	+1,99	0	0	1,224	80	182	0,067
6	+1	-1,41	0	+1,99	0	0	0,096	80	74	0,104
7	+1	0	+1,41	0	+1,99	0	0,66	136,4	158	0,048
8	+1.	0	-1,41	0	+1,99	0	0,66	23,6	115	0,141
9	+1	0	0	0	0	0	0,66	80	142	0,064
10	+1	0	0	0	0	0	0,66	80	146	0,072
11	+1	0	0	0	0	0	0,66	80	145	0,063
12	+1	0	0	0	0	0	0,66	80	145	0,066
13	+1	0	0	0	0	0	0,66	80	146	0,075

одного испытания факторы  $N$  и  $V$  изменялись по заданному в матрице планирования эксперимента закону. При этом производилась непрерывная запись соответствующих значений температуры трения  $T_{тр.}$  на стационарном уровне (одновременно регистрировались также соответствующие значения  $f_{тр.}$ ). После математической обработки полученных данных при помощи ЭВМ было рассчитано уравнение поверхности отклика типа  $T_{тр.} = f(N, V)$ , являющееся также и температурной характеристикой рассматриваемой пары трения. С учетом измеренных после испытаний размеров дорожки трения полученное выше уравнение было преобразовано к универсальному виду  $T_{тр.} = f(P_{конт.}, V)$ . После подстановки в последнее температуры, соответствующей

размягчению связующего ( $T_{\text{опт.}} = 100^{\circ}\text{C}$ ) была получена зависимость типа  $R_{\text{опт.}} = f(V_{\text{опт.}})$ .

Для нахождения предельных режимов трения был разработан и реализован алгоритм, представленный на рисунке 2.3. При решении представленных в алгоритме задач использовалось планирование 2 порядка, матрица экспериментов которого представлена в таблице 2.5.

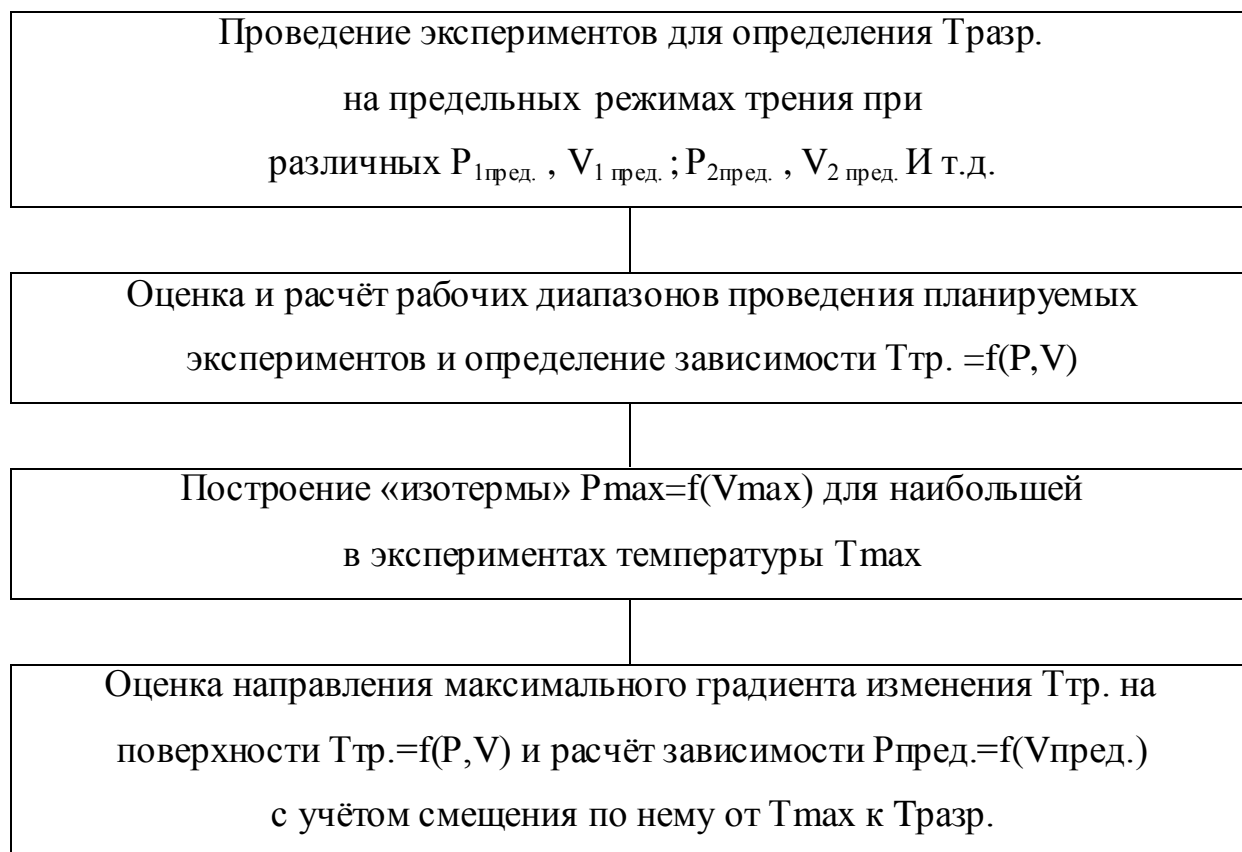


Рисунок 2.3 – Последовательность этапов при нахождении предельных режимов трения

Для исследования совместного влияния  $P$  и  $V$  на  $T_{\text{тр.}}$  и  $f_{\text{тр.}}$  пары с ТСП для других типов ТСП и условий работы по другим схемам трения был спланирован эксперимент по методу центрального композиционного ротатбельного униформ – планирования 2 порядка. Уровни и диапазоны варьирования факторов приведены в таблица 2.4.

Таблица 2.4 – Уровни и диапазоны варьирования факторов в экспериментах по исследованию теплофрикционных характеристик пар трения с ТСП Molykote 7409 (торцевая схема трения, стенд «шайба-диск»)

Уровни факторов		Натуральные значения			
		V, м/с	N, Н	P, МПа	P, кгс/мм <sup>2</sup>
Интервал варьирования	(1)	0,05	3000	21,8	2,18
Основной уровень	(0)	0,18	5000	36,4	3,64
Верхний уровень	(+1)	0,23	8000	58,2	5,82
Нижний уровень	(-1)	0,13	2000	14,6	1,46
Звёздные точки: (+1,41)		0,25	9230	67,2	6,72
(-1,41)		0,11	770	5,6	0,56

Таблица 2.5 – Матрица планирования и результаты эксперимента в задаче определения зависимостей вида  $T_{тр.} = f(N, V)$  и  $f_{тр.} = \varphi(N, V)$  (на предельных режимах трения для пары трения с ТСП ВНИИ НИ 212 (машина трения СМТ-1) – значения в числителе; для диапазона малых скоростей и давлений (ТСП Molykote 7409, стенд «шайба-диск») – значения в знаменателе)

№ опы- та	Уровни факторов						Параметр оптимизации					
	в кодовом масштабе						в натуральном масштабе		Ттр. °С		fтр.	
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	V, м/с	N, x9,8Н				
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,4/ 0,23	156/ 800	256/ 119		0,04/ 0,062	
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	1,8/ 0,13	156/ 800	192/ 97		0,048/ 0,066	
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	3,4/ 0,23	44/ 200	189/ 67		0,040/ 0,092	
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	1,8/ 0,13	44/ 200	159/ 73		0,050/ 0,100	

5	+1	+1,41	0	+1,99	0	0	3,728/ 0,25	100/ 500	229/ 104	0,038/ 0,075
6	+1	-1,41	0	+1,99	0	0	1,472/ 0,11	100/ 500	163/ 77	0,055/ 0,082
7	+1	0	+1,41	0	+1,99	0	2,6/ 0,18	179/ 923	238/ 103	0,0378/ 0,052
8	+1	0	-1,41	0	+1,99	0	2,6/ 0,18	21/ 77	140/ 59	0,050/ 0,135
9	+1	0	0	0	0	0	2,6/ 0,18	100/ 500	198/ 93	0,046/ 0,076
10	+1	0	0	0	0	0	2,6/ 0,18	100/ 500	200/ 95	0,046/ 0,078
11	+1	0	0	0	0	0	2,6/ 0,18	100/ 500	192/ 93	0,043/ 0,074
12	+1	0	0	0	0	0	2,6/ 0,18	100/ 500	195/ 91	0,040/ 0,076
13	+1	0	0	0	0	0	2,6/ 0,18	100/ 500	207/ 93	0,044/ 0,076

#### 2.1.2.1.3 Методика оценки антифрикционных характеристик

Поскольку при проведении последнего эксперимента, кроме записи, Тгр. производилась непрерывная регистрация fтр., то был произведен расчет и по этому, одному из определяющих работоспособность узлов трения с ТСП, параметру, в результате чего получена комплексная зависимость влияния нагрузочно-скоростных факторов на антифрикционные свойства пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 в нормальных атмосферных условиях.

#### 2.1.2.1.4 Методика сравнительной оценки триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов

Сравнительная оценка триботехнических свойств самосмазывающихся материалов (СМ) и ТСП при трении в нормальных атмосферных условиях производилась для следующих типов СМ:

- высокотемпературный углеграфитовый антифрикционный материал АТГ (прочность при сжатии 100-110 МПа), предназначенный для применения на воздухе, в среде углекислого газа и в вакууме (в интервале температур 20-700°С);
- наполненные фторопластовые антифрикционные материалы ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-1 (прочность при сжатии 12-22,7 МПа);
- графитопласт АМС-5М (прочность при сжатии 150-200 МПа), изготовленный на основе эпоксикремнийорганического связующего и графитизированной ткани, обладающей хорошими антифрикционными свойствами, как на воздухе, так и в среде углекислого газа при температуре до 200°С.

Образцы изготавливались в зависимости от вида исходных материалов (пруток или полоса) в виде колец с конической посадочной поверхностью (СМ АТГ, ГФ-5М – см. рисунок 2.30) или в виде цилиндрических колец, укрепленных на специальной разборной оправке (СМ ВОЛАН-Ф, АМС-5М, КВП-1 – см. рисунок 2.31).

Сравнительная оценка триботехнических характеристик СМ проводилась следующим образом. В качестве пробного образца было выбрано кольцо, изготовленное из материала, обладающего наиболее низкими прочностными характеристиками (КВП-1). На выходном валу испытательного стенда устанавливалось стандартное (согласно ГОСТ 11613-65) число оборотов, равное 200 об/мин. Затем производилась приработка при минимальной нагрузке  $N$ . После этого  $N$  ступенчато увеличивали до механического разрушения образца, что определяло предельно допустимую нагрузку. Затем при этой нагрузке проводили основные испытания всех исследуемых образцов из СМ с непрерывной регистрацией  $f_{тр}$ . И  $T_{тр}$  при различных  $V$ . Контактное давление определяли после измерения ширины дорожки трения на



контробразце. Применялись шлифованные контртела из закалённой стали ХВГ с твёрдостью по Роквеллу  $HRC > 60$ , шарикоподшипниковой стали ШХ15 и нержавеющей стали I2XI8H9T.

### 2.1.2.2 Методика исследования влияния вакуума

#### 2.1.2.2.1 Методика исследования влияния нагрузочно – скоростных факторов

Для комплексного исследования влияния вакуума на триботехнические характеристики фрикционных сопряжений с ТСП был разработан ряд оригинальных конструкций для испытаний материалов на трение и износ в этих условиях [116,117,118], отличающихся рядом преимуществ, повышающих точность и эффективность испытаний.

При исследовании влияния нагрузочно-скоростных факторов на интенсивность изнашивания и антифрикционные свойства пар трения с ТСП в условиях вакуума была разработана следующая методика проведения экспериментов.

Исследования проводились с использованием математического планирования экспериментов по методу центрального композиционного ротатбельного равномер-планирования 2-го порядка на стенде для изучения трения и износа в вакууме (см. рисунок 2.15). В качестве влияющих факторов были выбраны контактная нагрузка  $N$  и скорость скольжения  $V$ . Диапазоны варьирования факторов, выбранные, исходя из условий функционирования реальных узлов трения с ТСП и диапазонов изменения контактного давления, и скорости скольжения сопряжений с ТСП, функционирующих в условиях космического пространства (см. раздел 1.4), представлены в таблице 2.8.

Приработка образцов осуществлялась также в разряженной атмосфере по достижении заранее заданной глубины вакуума ( $p = 4$  мПа). В процессе испытаний производилась непрерывная запись  $f_{тр.}$ ,  $T_{тр.}$ , и регистрировался ресурс фрикционного сопряжения  $\tau$ . После испытаний на контробразце были измерены дорожки трения, соответствующие каждому опыту, после чего были

определены зависимости вида  $P = f(N, V)$  или  $N = \varphi(P, V)$ , которые использовались при пересчете  $N$  в  $P$ .

Таблица 2.8 – Уровни и диапазоны варьирования факторов в эксперименте по исследованию триботехнических характеристик пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума

Уровни факторов	Натуральные значения		Кодовые значения	
	V, [м/с]	N, [*9,8Н]	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
Интервал варьирования	0,148	25	I	I
Основной уровень	0,295	95,25	0	0
Верхний уровень	0,443	120,25	+1	+1
Нижний уровень	0,147	70,25	-1	-1
Звездные точки: + $\alpha$ - $\alpha$	0,504	130,5	+1,41	+1,41
	0,087	60,0	-1,41	-1,41

Ресурс пар с ТСП определялся как отношение значения износа смазочной плёнки ТСП (толщина которой после приработки составляет  $\delta_{\text{прир.}} = 2$  мкм – см. разделы 1.3.4; 3.1.2) к пути трения.

#### 2.1.2.2.2 Методика сравнительной оценки триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов

Сравнительная оценка триботехнических свойств ТСП и СМ указанных выше типов при трении в вакууме осуществлялась аналогично разработанной ранее методике (см. п. 2.1.2.1.4) на стенде для изучения трения и износа в вакууме (рисунок 2.15).

#### 2.1.3 Методика исследования влияния атмосферы соляного тумана

При экспериментальном исследовании воздействия атмосферы соляного тумана на триботехнические показатели пар трения с ТСП была разработана следующая методика.

Все образцы с ТСП различных типов были разделены на две партии. Образцы 1-й партии прошли приработку на машине трения «РП» при контактной нагрузке  $N = 980 \text{ Н}$ , скорости скольжения  $V=0,492 \text{ м/с}$ . Образцы 2-й партии прошли испытания в камере соляного тумана без предварительной приработки. Перед помещением в камеру с целью сохранения от коррозии внутренней посадочной поверхности образцов (для крепления на машине трения «РП») на нее наносилась консервационная смазка АМС-5 (ГОСТ 2712-75). После чего все образцы размещались на деревянных оправках, которые выдерживались в атмосфере соляного тумана 1, 2, 3, 5 и 7 суток по 8 образцов (4 приработанных и 4 неприработанных) на каждый режим.

Затем проводились фрикционные испытания поверхностей трения колец с исследуемыми ТСП на машине трения РП при  $N = 980 \text{ Н}$ ,  $V = 0,492 \text{ м/с}$ . Во время испытаний фиксировался ресурс, пересчитываемый в интенсивность изнашивания пары трения, и коэффициент трения установившегося режима  $f_{тр}$ . (или диапазон его изменения, если последний не стабилизировался).

## 2.2 Оборудование, аппаратура и материалы

### *Оборудование*

Одной из основных схем трения была роликовая, моделирующая условия работы зубчатых зацеплений, кулачков и подобных кинематических пар, в которых реализуются высокие значения контактных давлений при малой площади фактического контакта. Данная схема трения, с одной стороны, позволяет при сравнительно невысокой абсолютной нагрузке проводить испытания в значительно более широком диапазоне контактных давлений, чем торцевая схема или «вал-втулка», где из-за большой площади контакта для создания подобных давлений требуются значительные нагрузки. С другой стороны, в схеме трения «ролик-ролик» в отличие от вышеназванных практически вся поверхность образца с ТСП активно взаимодействует с окружающей средой, что особенно важно при проведении вакуумных испытаний. Следует также отметить значительно более эффективное использование в роликовой

схеме трения контробразца, который служит при проведении 30 и более циклов испытаний, что существенно повышает качество экспериментов. Большим преимуществом выбранной схемы трения является возможность точного измерения размеров пятна контакта после проведения испытаний, что позволяет получать зависимости, где аргументом служит не величина абсолютной нагрузки, а универсальный параметр контактного давления.

Для проведения испытаний пар трения с ТСП на ресурс и антифрикционные свойства был выбран роликовый прибор (РП). Внешний вид машины представлен на рисунке 2.6. Конструкция машины трения типа РП приведена на рисунке 2.7.

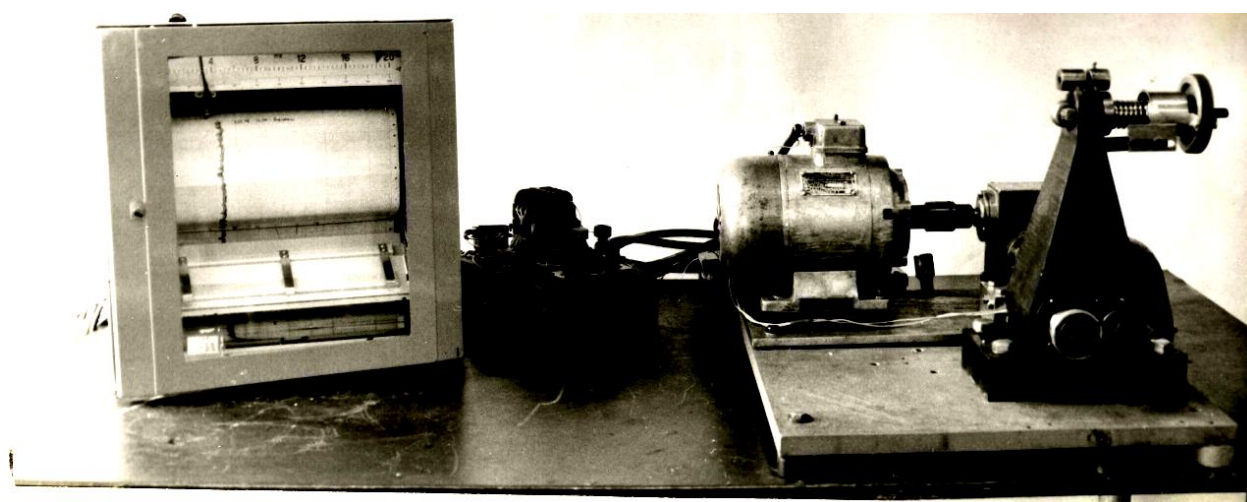


Рисунок 2.6 – Внешний вид машины трения типа «РП» (роликовый прибор). Известные преимущества представляет также шарнирное крепление конца нагрузочного винта (13), позволяющее нагружать систему в строго горизонтальном положении [47, 65].

На основании (I) установлен электродвигатель переменного тока ДПТ 21-4-С2 мощностью 0,27 кВт на 380 В с числом оборотов 1400 об/мин. От него через упругие муфты-сухари (2) и редуктор червячного типа (3) с передаточным отношением 7:1 вращение передается на ведущий вал (4), который установлен на игольчатых подшипниках в кронштейне (5) так же, как и ведомый вал (7) в ответном подвижном кронштейне (6), имеющем возможность поворачиваться вокруг оси «а-а». На специальные посадочные

места валов устанавливаются и крепятся образцы (8), причем неподвижный образец установлен шарнирно и может поворачиваться вокруг оси «б-б», обеспечивая правильную взаимную ориентацию поверхностей касания образцов. Нагружение последних производится механизмом, состоящим из пружины (9), нагрузочного маховичка (10) со шкалой (11) и лимбом (12), на который нанесены деления. Нагружение образцов осуществляется по схеме рычага, что позволяет, с одной стороны, получить большое контактное давление, а с другой стороны, повысить точность нагружения.

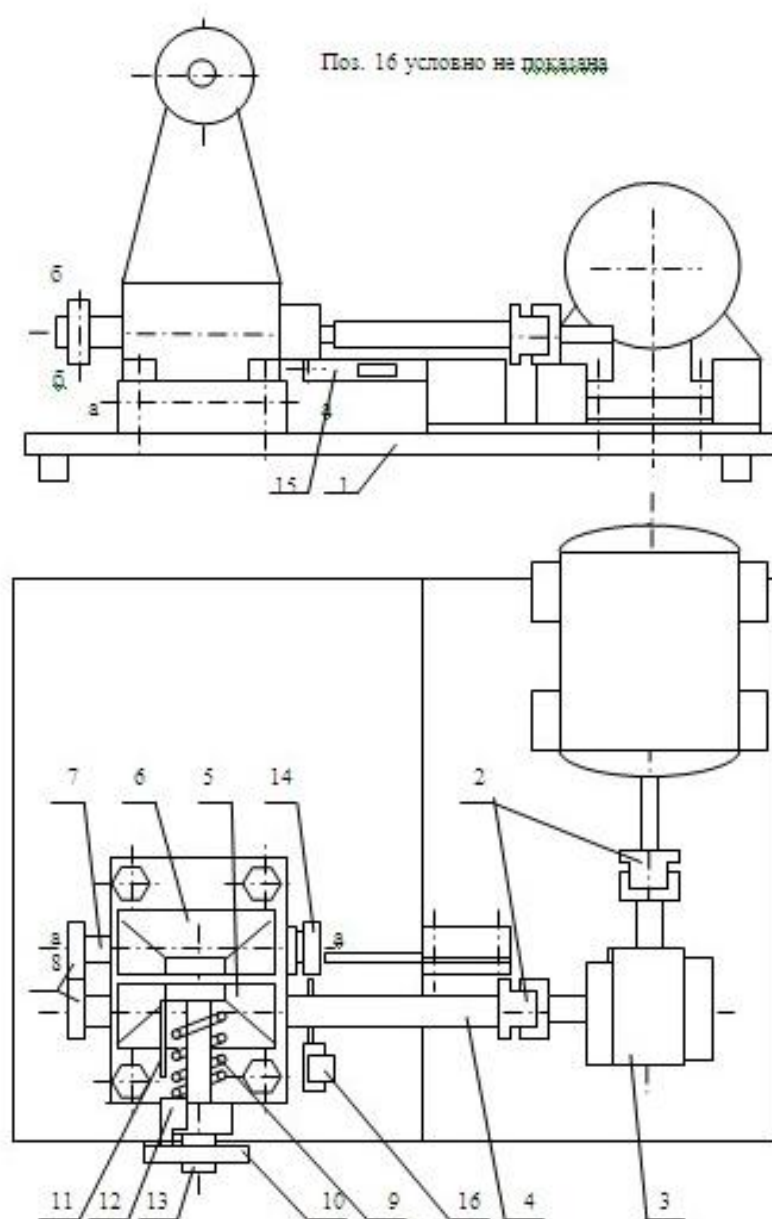


Рисунок 2.7 – Конструкция машины трения типа «РП»

Для качественного нанесения ТСП было разработано и изготовлено механизированное приспособление (см. рис. 2.8), включающее: плиту (1), закрепленную на основании (2); многоместную оправку (3) для установки и закрепления образцов (4), устанавливаемую на переносной плите (5) (из комплекта оснастки для шлифовальных станков) между задней бабкой с опорным подшипником (6) и передней бабкой с укрепленным на ней двигателем (7); ходовой винт (8) в подшипниковых опорах (9), (10); съемные направляющие уголки (11); подвижную каретку для крепления пистолета-распылителя типа «Ореол-5М» (технические условия ВС 2.940.002 ТУ, диаметр сопла 0,7 мм) и перемещения его в продольном направлении; системы управления приспособлением (12).

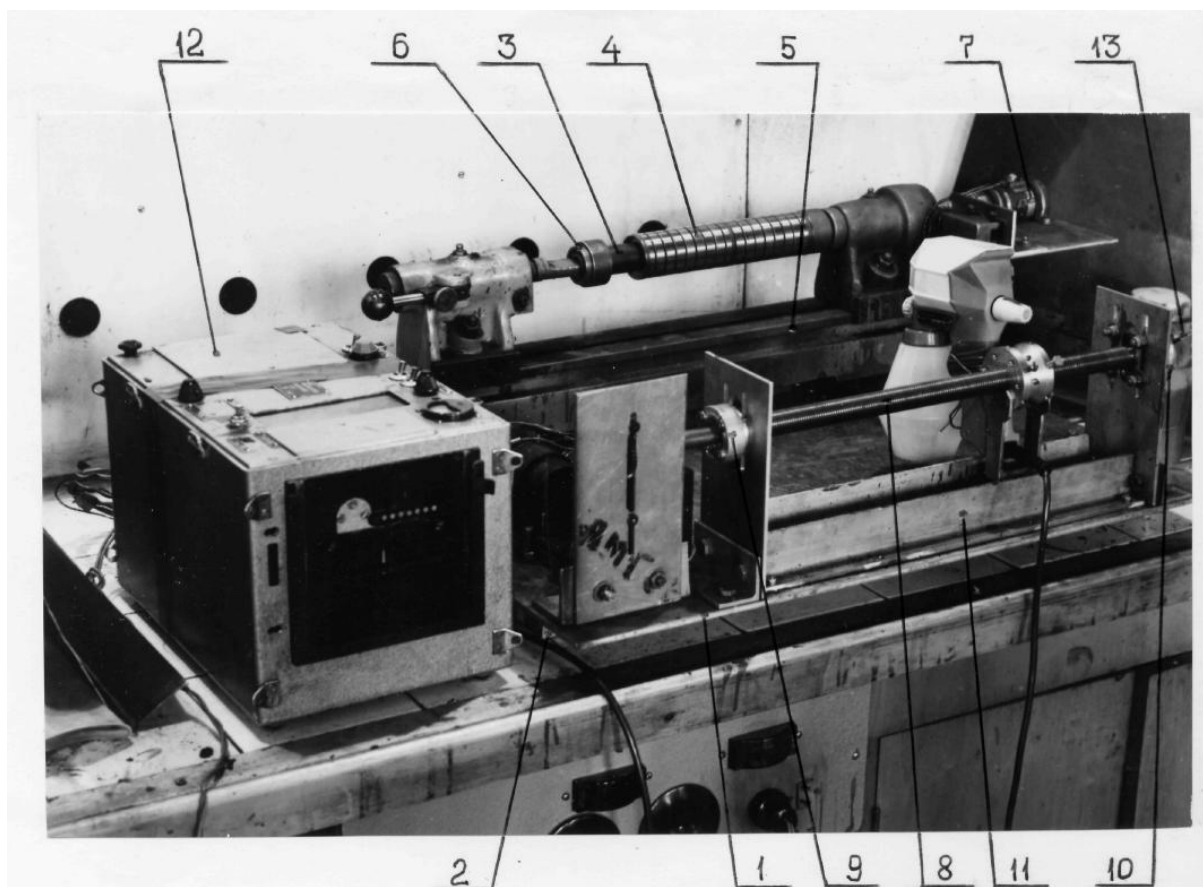


Рисунок 2.8 – Приспособление для механизированного нанесения ТСП методом напыления

Многоместная оправка с закрепленными на ней образцами до и после нанесения ТСП показана на рисунке 2.9. Конструкция оправки приведена на

рисунке 2.10.

Система привода подачи (рисунок 2.8) состоит из электродвигателя постоянного тока марки ДМ 3234702, МА-40А на 27В, трехступенчатого редуктора со встроенной электромагнитной муфтой (ЭММ), которая позволяет быстро отключать привод подачи. Предусмотрено также перемещение каретки вручную при помощи маховичка (13).

Система управления, смонтированная на пульте (12), позволяет кроме включения электродвигателей вращения оправки и привода подачи производить быстрое отключение последнего через ЭММ, а также возврат каретки в исходное положение путем включения реверса при изменении полярности двигателя.

Исследование триботехнических характеристик пар трения с ТСП в зависимости от температурного фактора производилось на модернизированной установке для проведения комплексных испытаний на трение при повышенной

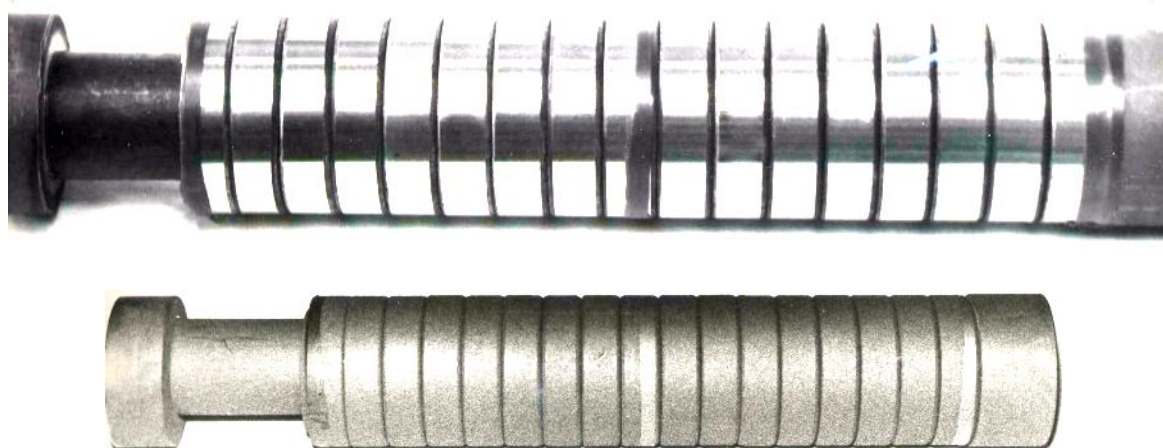


Рисунок 2.9 – Многоместная оправка с закрепленными на ней образцами до (вверху) и после (внизу) нанесения ТСП

температуре с бесступенчатой регулировкой параметров трения (рисунке 2.11). Установка была смонтирована на базе машины трения «РП» (описание



конструкции см. рисунок 2.6, 2.7), рекомендованной ГОСТ 11613-65 на метод определения истираемости и антифрикционных свойств ТСП. Разработанная

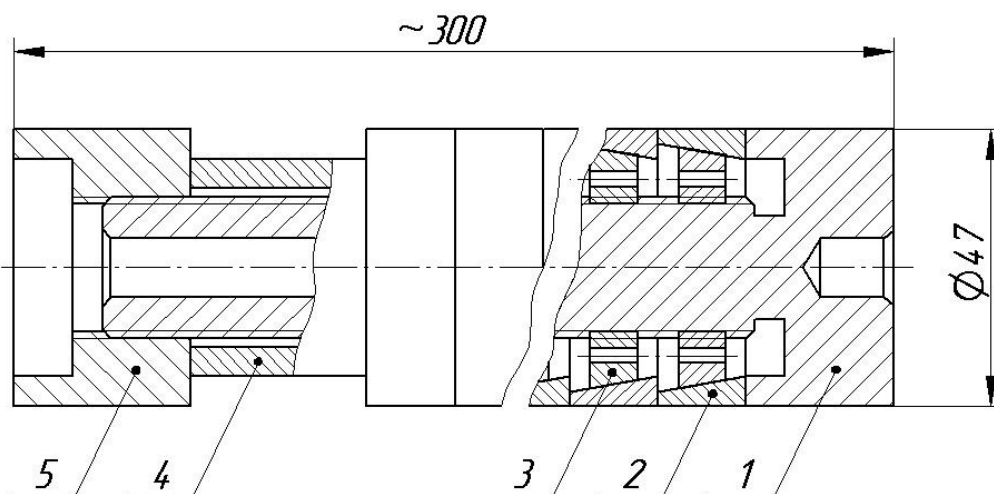


Рисунок 2.10 – Конструкция многоместной оправки для механизированного нанесения ТСП: 1 – корпус; 2 – обоймы (образцы); 3 – гайки крепежные; 4 – втулка; 5 – спецгайка

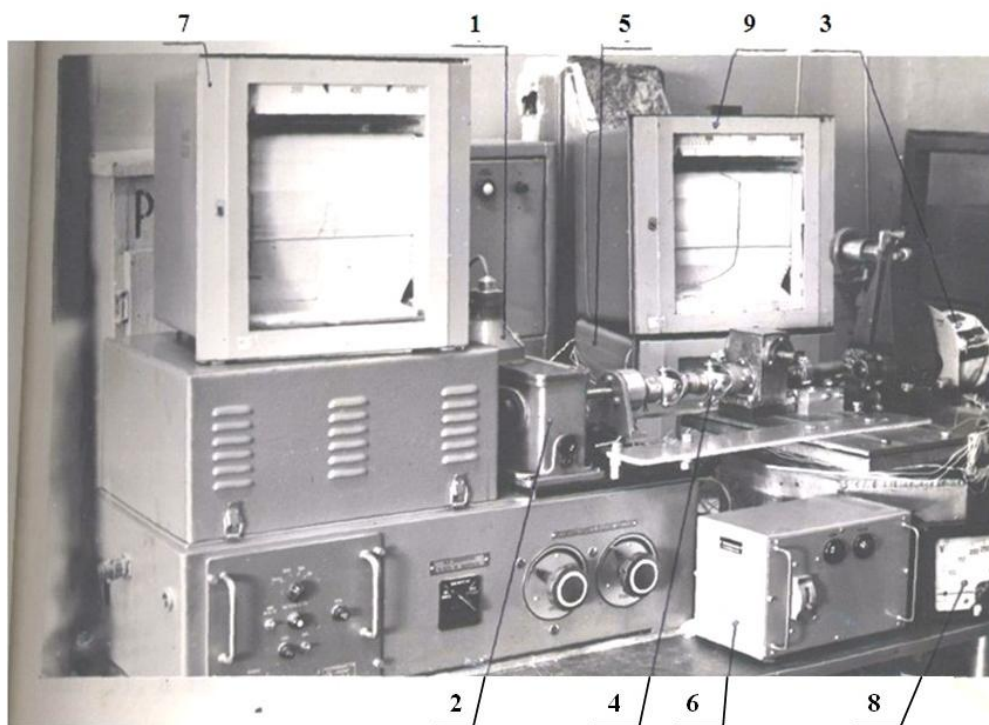


Рисунок 2.11 – Модернизированная установка на базе машины трения «РП» для проведения комплексных испытаний на трение при повышенной температуре с бесступенчатой регулировкой параметров трения



конструкция позволила производить в процессе испытаний бесступенчатое варьирование в широких диапазонах нагрузочно-скоростными и температурным факторами за счет использования соответственно нагрузочного устройства прибора «РП», привода от тахометрической установки типа ТН-60 Рижского экспериментального завода измерительных приборов «Эталон» и нагревателя.

Определение величины угловой скорости и ее поддержание на заданном уровне осуществлялось при помощи стробоскопа (1), в котором применена импульсная лампа ИСШ-15, питаемая образцовой частотой; получаемой от кварцевого генератора типа ГК-8-2. Кинематическая схема установки включает кроме двигателя постоянного тока (диапазон изменения числа оборотов 200 - 3000 об/мин.) пятиступенчатый редуктор (2). Компоновка модернизированной установки типа «РП» была осуществлена с использованием 2-й ступени редуктора привода, диапазон изменения оборотов которой обеспечил необходимые технические характеристики. В качестве теплового источника энергии был применен нагреватель (3), включающий нихромовую спираль с керамическими и асбоцементными изолирующими проставками, закрытую снаружи несколькими слоями стеклоткани. С целью исключения возможных при монтаже установки перекосов осей использовалась карданная развязка (4).

Для проведения испытаний на предельных режимах трения была использована роликовая схема в серийно изготавливаемой (г. Иваново) машине типа СМТ-1, имеющей непрерывные диапазоны изменения оборотов  $n = 0 - 1600$  об/мин. И контактной нагрузки  $N = 0 - 2000$  Н. Системы измерения обеспечивали непрерывную запись коэффициента трения  $f_{тр}$ . И температуры трения  $T_{тр}$ . Однако данная конструкция имела ряд недостатков: не предусмотрена самоустановка образцов; на систему измерения  $f_{тр}$ . Торсионного типа влияли потери на трение в опорных подшипниках. Поэтому были спроектированы и изготовлены механизм самоустановки контрообразца и тензометрическая приставка (рисунок 2.12) для непосредственного измерения

фгг. Применительно к тем же стандартным образцам, которые использовались в машине РП.

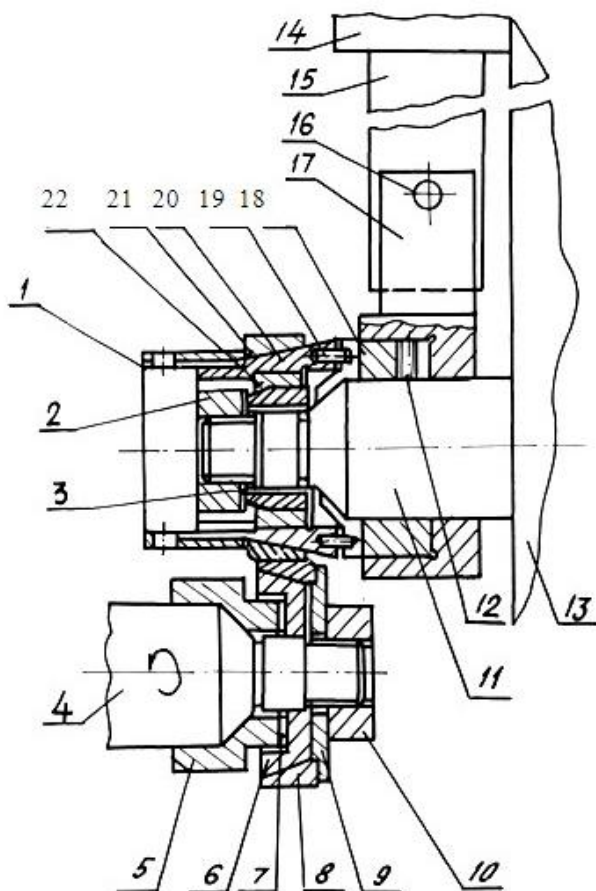


Рисунок 2.12 – Механизм самоустановки контробразца и тензометрическая приставка к машине трения СМТ-I

Образец с ТСП (8) центрировался по конусу (6), установленному на посадочное место ведущего вала (4). Крепление образца осуществлялось гайкой (10) через шайбу (9). Контрообразец (21), центрирующийся по конической поверхности посадочной втулки (20), закреплялся на ней спецгайкой (1). Сама втулка (20) устанавливалась на шаровом подшипнике (22), закреплённом гайкой (2) через шайбу (3) на ведомом валу (11).

Запрессованные во втулке (20) два штифта (19) входили в пазы втулки (18), обеспечивая возможность покачивания деталей друг относительно друга, но предотвращая, с другой стороны, их взаимное проворачивание. Тензометрическая приставка была выполнена в виде тензобалки (15), закреплённой в корпусе (14), жёстко зафиксированном к неподвижной плоскости (13). Измерение силы трения осуществлялось в результате воздействия крутящего момента трения от контробразца (21) через винт (16), установленный во втулке-рычаге (17), на тензобалку (15).

Влияние материала и вида обработки основы на работоспособность ТСП оценивалось на стенде «шайба-диск» (в ходе научной стажировки в Германии,

г. Хемниц (Карл-Маркс-Штадт), ВТШ, лаборатория кафедры «Триботехника»).

Внешний вид станда, работающего по торцевой схеме, представлен на рисунке 2.13. Схема трения приведена на рисунке 2.14.

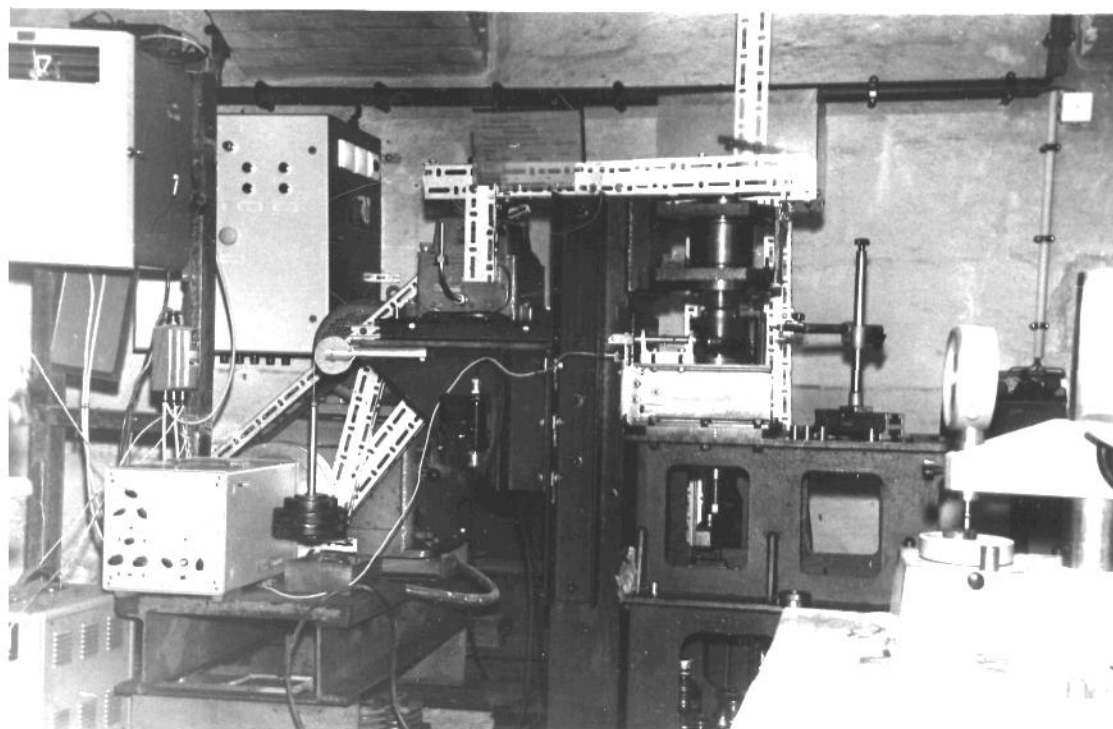


Рисунок 2.13. Внешний вид испытательного станда «шайба-диск» (торцевая схема трения)

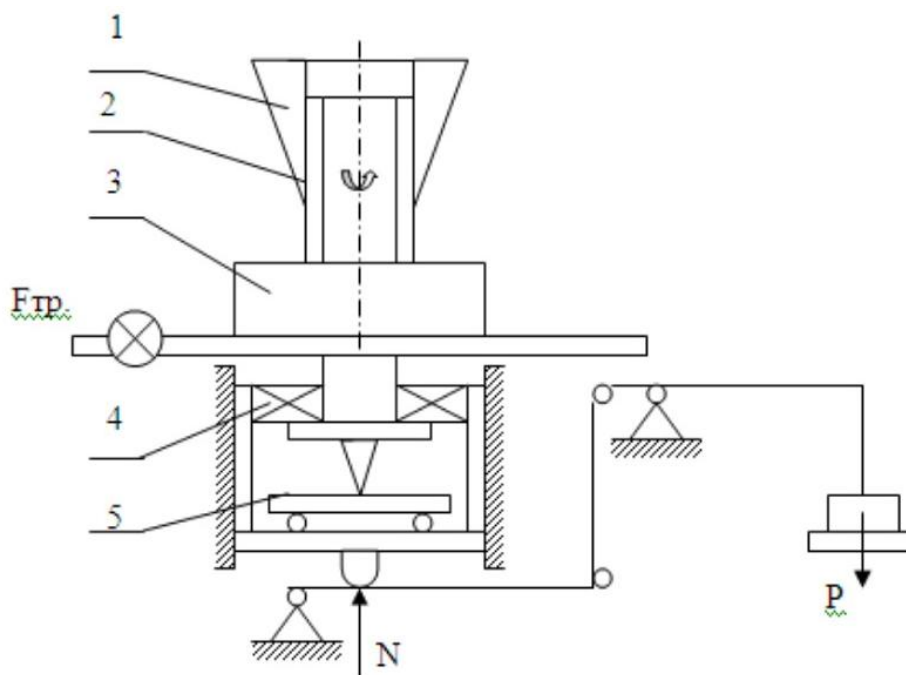


Рисунок 2.14 – Схема трения испытательного станда «шайба – диск»

В державке (1) устанавливался верхний цилиндрический контрообразец (2), который при трении взаимодействовал с нижним дисковым образцом (3). Нагрузка в контакте  $N$  передавалась посредством грузов  $P$  через систему рычагов. Взаимная установка образцов достигалась благодаря применению упорного шарикоподшипника (5) и качающегося роликоподшипника (4). При вращении от привода верхнего образца со скоростью  $V$  возникает сила трения  $F_{тр}$ . Технические характеристики стенда следующие: диапазон непрерывного изменения оборотов  $n = 0 - 400$  об/мин., контактная нагрузка  $N = 0 - 16000$  Н. Проведённая автором модернизация стенда позволила производить непрерывную запись  $f_{тр}$  и  $T_{тр}$ .

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 (рисунок 2.15), включающий вакуумную камеру (I) с системой откачных средств, нагрузочно-измерительный механизм с нагревателем (см. рисунок 2.16), размещенный внутри камеры, привод типа ТХ 1-60 (2) (тахометрическая установка), вакуумный ввод вращения (3), а также системы управления стендом, измерения глубины вакуума и тепло-фрикционных характеристик исследуемой пары трения.

Вакуумная камера, изготовленная из нержавеющей стали, состоит из днища (4), установленного на раме (5), и верхней съемной крышки (6). В корпусе камеры имеются фланцы для подстыковки к откачным насосам (7), установки смотрового окна (8), крепления вакуумного ввода (9), размещения измерительных вакуумных ламп (10) и крана напуска атмосферы (на рисунок 2.10 с обратной стороны камеры). Все неподвижные соединения герметизируются при помощи вакуумной резины. Разработанный и изготовленный специально для проведения вакуумных фрикционных испытаний ввод вращения уплотнялся при помощи двух резиновых манжет (резина марки ИРП 1118) с наружным относительно уплотнений расположением опорных

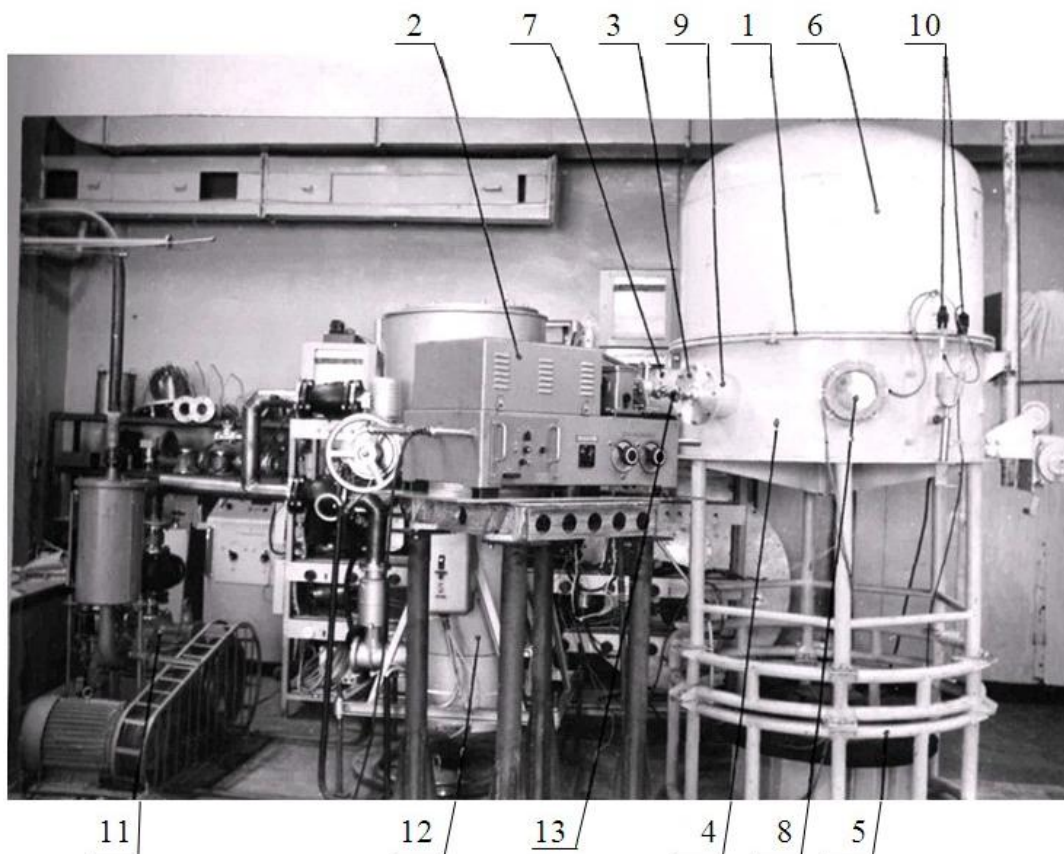


Рисунок 2.15 – Стенд для изучения трения и износа в вакууме

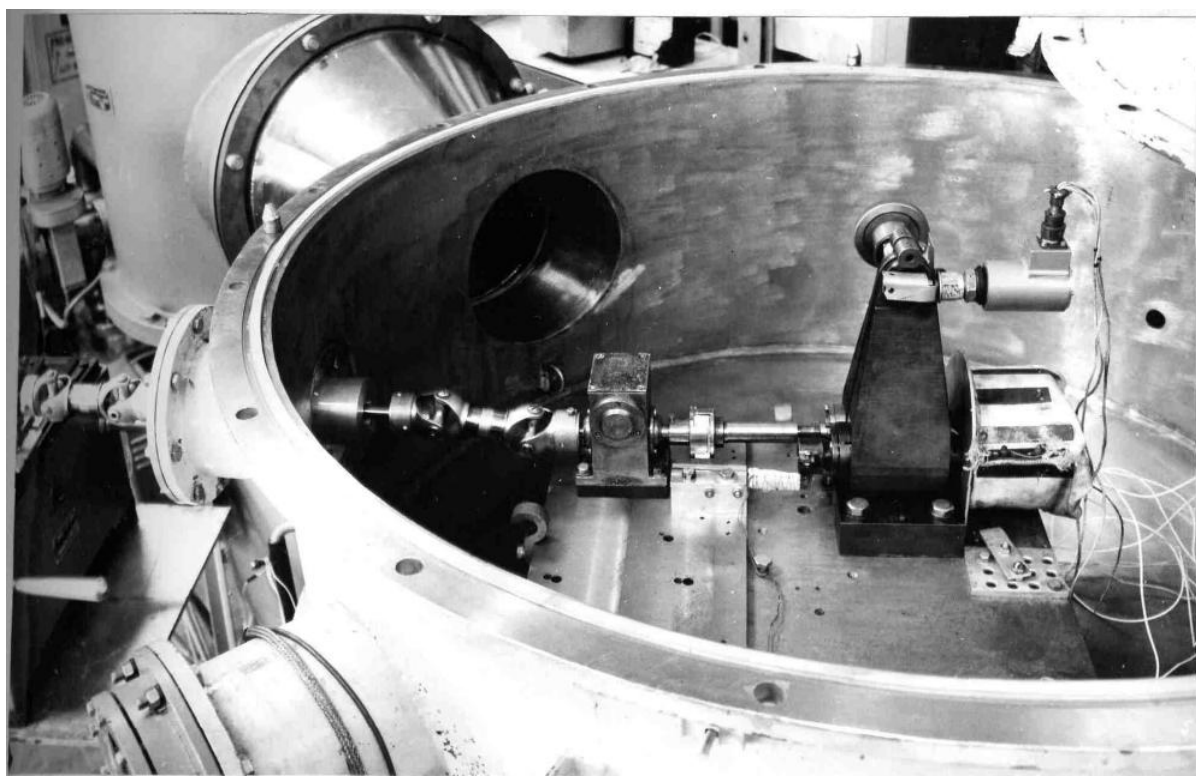


Рисунок 2.16 – Компоновка нагрузочно-измерительного механизма стенда для изучения трения и износа в вакууме

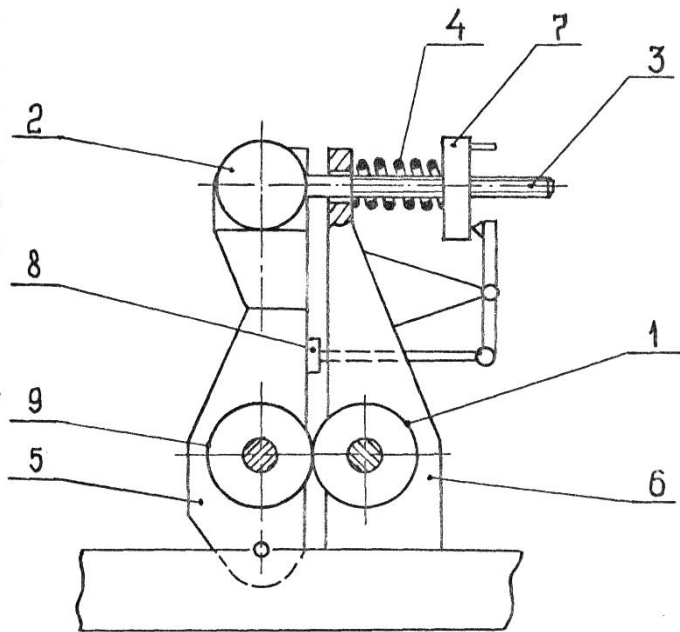


Рисунок 2.17 – Конструкция нагрузочно – измерительного механизма стенда для изучения трения и износа в вакууме

подшипников. Смазка резиновых уплотнений осуществлялась при помощи сальника, пропитанного вакуумным маслом ВМ-4 (ГОСТ 7903-75). Система откачных средств состояла из форвакуумного механического насоса ВН-7 (11) и вакуумного агрегата типа ВА-8-Пр (12) на основе паромасляного диффузионного насоса. Конструкция нагревателя и привода типа ТХ 1-60 были описаны выше. С целью исключения возможных перекосов осей в конструкции стенда использовались две карданные развязки (13).

При разработке стенда по материалам отечественной и зарубежной литературы и патентной информации был проведен анализ перспективных конструкций для проведения термовакуумных испытаний на износостойкость [62,66,123], позволивший наряду с известными преимуществами ранее разработанных установок выявить тот недостаток в их конструкции, что после остановки износившейся пары трения образцы остаются в контакте до окончания процесса испытания, что может привести к прочному сцеплению в вакууме нагретых при трении (или под действием нагревателя) поверхностей пар трения, находящихся к тому же под нагрузкой. В результате этого затруднялась дефектация образцов после окончания испытаний, так как исключалась возможность качественного анализа дорожек трения образцов вследствие изменения состояния поверхностей трения после разъединения адгезионно сцепленных образцов [79,134,138].



С целью ликвидации указанного недостатка и повышения качества испытаний была разработана конструкция нагрузочно-измерительного механизма, представленная на рисунок 2.17 (описание основных узлов – см. описание конструкции машины трения «РП»).

Отличительной особенностью данного устройства является конструкция механизма отключения пары трения, срабатывающего следующим образом. После истирания покрытия на исследуемом образце (I) сила трения резко возрастает, что фиксируется потенциометром, и при достижении заранее установленного значения автоматически срабатывает микровыключатель потенциометра, замыкая цепь электромагнита (2) (рисунок 2.12). Сердечник электромагнита перемещаясь, выдергивает чеку из проушины штока (3), который под воздействием пружины (4) проходит через отверстие подвижного кронштейна (5) и задерживается в неподвижном кронштейне (6), имеющем меньший диаметр отверстия. Одновременно при движении вместе со штоком (3) маховик (7) воздействует на плечо рычага-толкателя (8), шарнирно укрепленного на неподвижном кронштейне (6) и заранее установленного перед маховиком (7). В результате под действием толкателя (8) освобожденный от штока (3) подвижный кронштейн (5) перемещается в крайнее нерабочее положение (мертвую точку), в котором контрообразец (9) остается разъединенным с испытуемым образцом (I) до окончания испытания. Такое выполнение механизма отключения пары трения позволяет повысить качество испытаний за счет гарантированного разъединения образцов по окончании истирания пары трения. В результате этого создается возможность проведения качественного исследования дорожек трения образцов после окончания испытания пары трения. Указанный механизм может быть применен как в случае использования индивидуальных приводов вращения, так и при испытаниях с одним приводным валом в вакуумной камере. Конструкция описанного стенда для изучения трения и износа в вакууме признана в качестве изобретения (авторское свидетельство № 926573 «Устройство для испытания материалов на трение и износ» [107]).

Экспериментальное исследование воздействия атмосферы соляного тумана на истираемость и антифрикционные характеристики пар трения с ТСП проводилось с использованием машины трения типа «РП» и камеры соляного тумана, обеспечивающей режимы, рекомендованные ГОСТ 9.054-75 для проведения ускоренных испытаний с целью оценки защитных свойств консервационных материалов (метод № 3): температура в камере  $35\pm 2^\circ\text{C}$ , атмосфера соляного тумана создавалась распылителем 5%-го раствора хлористого натрия, дисперсность и водность которого контролировались согласно ГОСТ 15151-69.

### *Аппаратура*

Электрическая схема системы управления машиной трения типа «РП» показана на рис. 2.18. После включения рубильника и кнопки контактора (ВКЛ.) происходит срабатывание реле (МП), нормально разомкнутые контакты которого блокируют кнопку (ВКЛ.) и обеспечивают питание электродвигателя (М1).

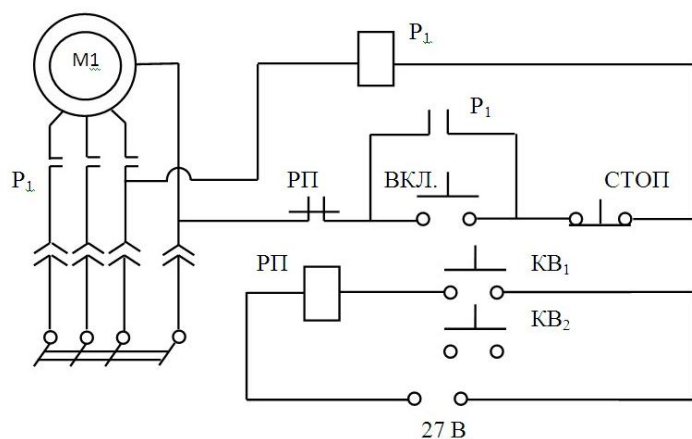


Рисунок 2.18 –  
Электросхема  
системы управления  
машины трения типа  
«роликовый прибор»

Выключение последнего обеспечивается кнопкой (СТОП). Автоматическое отключение привода по достижении заранее заданного момента трения (после изнашивания ТСП) осуществляется при помощи концевых выключателей (KB<sub>1</sub>) и (KB<sub>2</sub>), первый из которых установлен на самопишущем потенциометре КСП-4, производящем непрерывную запись  $f_{тр.}$ , а второй (дублирующий) типа МП1 установлен сразу за упругой планкой (поз.16, рисунок 2.7) и срабатывает при ее



аварийном прогибе, когда момент трения превышает допустимый уровень (6-7 Н·м согласно ГОСТ 11613-65).

Система измерения момента трения (или  $f_{тр}$ ) машины типа «РП» работает следующим образом. Измерение силы трения, возникающей между образцами (образец с ТСП скользит относительно неподвижного образца) производится при помощи рычага-втулки (поз. 14, рисунок 2.7), укрепленной с противоположной относительно неподвижного образца стороны кронштейна. Усилие от рычага воспринимает укрепленная в державке упругая планка (15), на которую наклеены тензодатчики (тип 11,  $R = 201,8+0,3 \text{ Ом}$ ), собранные в мостовую схему. Сигнал разбаланса после усилителя типа ТА-5 поступает на самопишущий потенциометр типа КСП-4 (модель 41.130.50.039, класс точности 0,25; ГОСТ 7164-71, основная приведенная погрешность  $+0,25\%$ , вариация показаний  $-0,21$ ), производящий непрерывную запись  $f_{тр}$ . Блок-схема системы измерения  $f_{тр}$  представлена на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Блок-схема системы измерения  $f_{тр}$ .

Тарировка системы измерения  $f_{тр}$ . Производилась следующим образом (рисунок 2.20). Предварительно снимались оба образца. Положение подвижного кронштейна (1) относительно неподвижного (2) (как если бы образцы находились на посадочных местах в рабочем положении), фиксировалось посредством специальной вставки (3), которая зажималась между кронштейнами. Затем на неподвижном валу в горизонтальном положении устанавливался и закреплялся нагрузочный рычаг (4), к которому подвешивались разновесы, имитирующие воздействие на планку силы трения  $F_{тр}$ . Сигнал через усилитель записывался на диаграммной ленте прибора КСП – 4. При последовательном нагружении и разгрузке системы на ленте самописца

получался ступенчатый график (5).

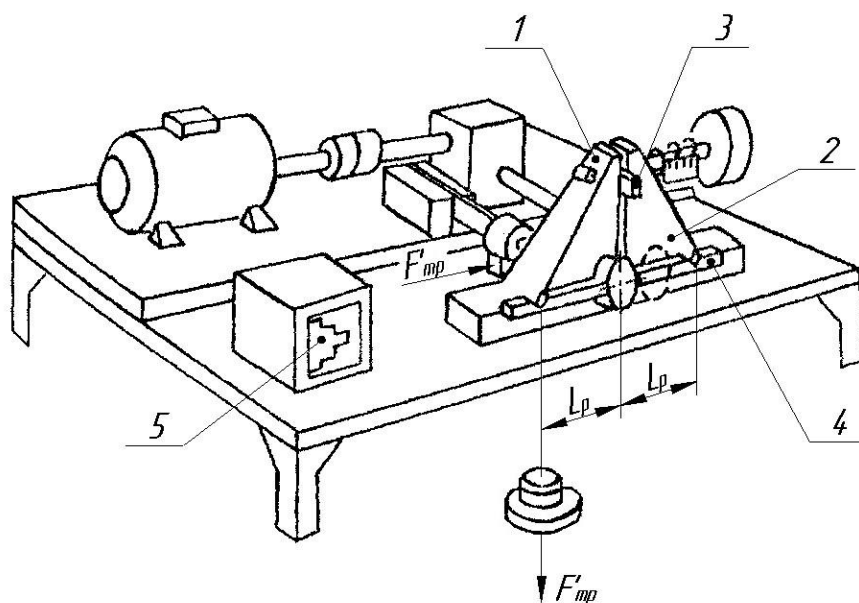


Рисунок 2.20 -  
Компоновка  
машины трения  
«РП» для  
проведения  
тарировки  
системы  
измерения  $f_{тр}$ .

Цикл «нагружение-разгрузка» измерительной системы машины «РП» повторялся 3-5 раз, после чего производилась статистическая обработка результатов с вычислением тарировочного коэффициента  $K$ , рассчитываемого по формуле:

$$K = \frac{M_{тр.}}{n} \quad (2.3)$$

где  $M_{тр.}$  – момент «трения» при нагружении;

$n$  – число соответствующих делений по ленте самописца

Операция тарировки системы измерения  $f_{тр}$ . Производилась перед каждой серией испытаний, а также после перестановки при демонтаже отдельных узлов и деталей конструкции. Тарировка нагрузочного устройства прибора «РП» осуществлялась путем проведения силовых испытаний, применяемых обычно при тарировке пружин, в результате которых определялась зависимость нагрузки от деформации. Проведенный статистический анализ показал, что суммарная погрешность измерения  $f_{тр}$ . С помощью описанной системы измерения составляет  $\pm 5,3\%$ .

В конструкции модернизированной установки на базе машины трения «РП» для проведения комплексных испытаний на трение была использована

следующая аппаратура и измерительные средства.

Система измерения  $f_{тр.}$ , обеспечивающая непрерывную запись в процессе испытания этого параметра, осуществлялась, как и в описанной ранее конструкции машины трения типа «РП», при помощи тензометрической балки с наклеенными на нее тензодатчиками, собранными в мостовую схему с выводом показаний на КСП-4 (рисунок 2.7).

Система нагрева и поддержания заданной температуры в процессе испытаний состояла из термопары типа ХК (хромель-копель), нагревателя (рисунок 2.11, поз.3), трансформатора типа РНО-250-5 (напряжение – до 250 В, сила тока – до 20 А), промежуточного силового блока (6) и самопишущего потенциометра типа КСП-4 (7) (модель 41.143.50.011, ГОСТ 7164-66, 1971 г., Гр. ХК, класс точности 0,25, предел измерения до 600°С). Текущее значение объемной температуры нагрева пары трения ( $T_{об.}$ ) устанавливалось с учетом фрикционного нагрева (подробнее см. п. 2.1.2.4.1) на КСП-4 при помощи концевых выключателей, которые через промежуточный силовой блок управляли нагревателем, автоматически поддерживая в процессе испытаний заданную  $T_{об.}$  Мощность нагрева выбиралась экспериментально; напряжение, подаваемое на нагреватель составляло до 70 В и регистрировалось вольтметром (рисунок 2.11, поз.8).

Для проведения одновременной оценки антифрикционных характеристик и теплового режима трения испытываемой пары с нанесенным ТСП или другим смазочным материалом на машине трения типа «РП» была разработана следующая система измерения контактной температуры трения в процессе наработки [82,85].

Вследствие сложности определения температуры непосредственно на поверхности при трении обычно используемыми методами (например, зачеканкой термопары) измерение температуры производилось по показаниям термопары, укрепленной в специальном отверстии неподвижного образца, внешний вид которого изображен на рисунке 2.21.

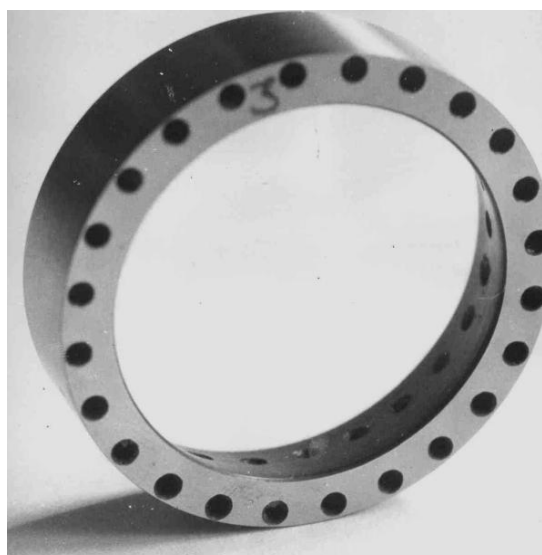


Рисунок 2.21 - Внешний вид неподвижного образца с отверстиями для крепления термопары

Конструкция неподвижного образца и схема закрепления в нем термопары №1 приведены на рис. 2.22, где (I) – образец с ТСП, укрепленный на подвижном валу при помощи гайки через шайбу (2); (3) – неподвижный образец, устанавливаемый на валу (4) при помощи гайки (5) и спецшайбы (6). Причем при установке контрообразца с помощью пальца (7), воздействующего на упругую прокладку (8), происходит плотное поджатие к стенке отверстия сая (9) термопары (10), предварительно вставленной в отверстие и зафиксированной в нем посредством упругой оплетки (II), надетой на окончание термопары.

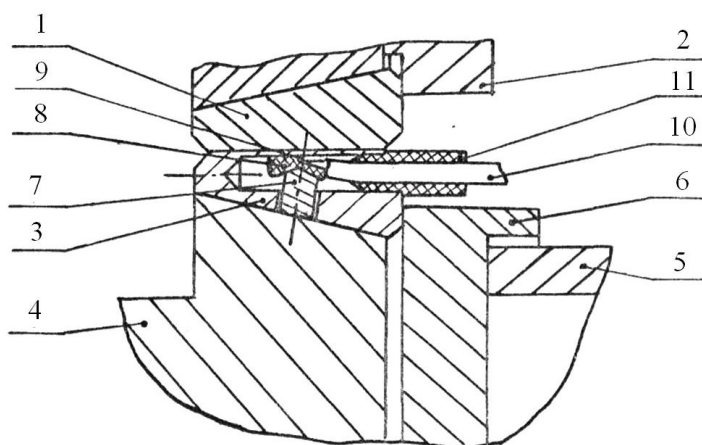


Рисунок 2.22 – Схема закрепления в неподвижном образце термопары для измерения контактной температуры трения

Для определения характера зависимости температуры, регистрируемой основной термопарой ( $T_{внутр}$ ) от температуры на поверхности образца ( $T_{нар}$ ) была проведена тарировка с имитацией нагрева зоны контакта как перед фрикционными испытаниями, так и после наработки.

Компоновка устройства показана на рисунке 2.23.

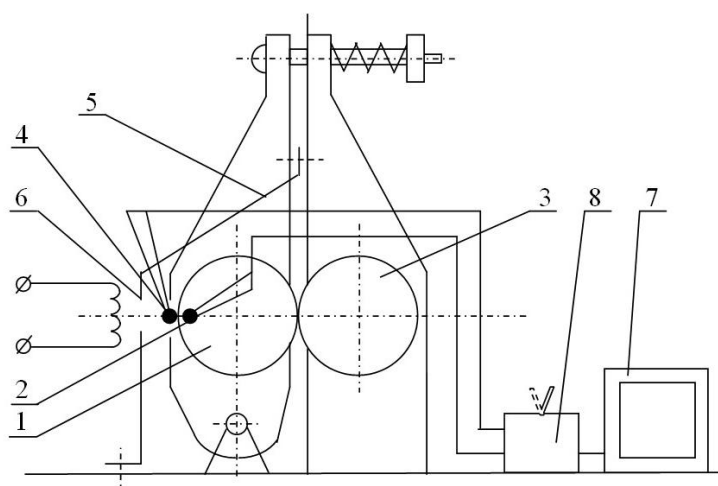


Рисунок 2.23 – Компоновка машины трения «РП» для имитации фрикционного нагрева

На машине трения «РП» по посадочному месту устанавливались и закреплялись неподвижный образец (1) с зафиксированной в нем основной термопарой (2) и подвижный образец (3). Местоположение пятна контакта перед испытаниями определялось при помощи копировальной бумаги, зажимаемой между образцами при введении их в контакт. В случае необходимости производилась корректировка места установки термопары в неподвижном образце до совпадения с пятном контакта (путем поворота контрообразца). После чего последний (вместе с валом) поворачивался в положение, показанное на рисунке 2.23. Снаружи к неподвижному образцу прижималась контрольная термопара (4). Для имитации фрикционного нагрева использовался экран (5) с окном (6) для местного нагрева зоны контакта. В качестве источника тепловой энергии была использована нихромовая спираль, степень нагрева которой регулировалась через ЛАТР (на рисунке 2.23 не показан). Регистрация температур производилась с использованием термопар типа ХК в сочетании с 6-ти точечным потенциометром КСП-4 (Гр. ХК, ГОСТ 7164-71) (7) с диапазоном измерения температур от  $-50$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Для облегчения условий работы с термопарами и увеличения надежности показаний был применен двухпозиционный переключатель (8). В положении «I» производилась тарировка системы измерения температуры трения ( $T_{\text{тр}}$ ), когда поочередно включаются обе термопары. При проведении измерения  $T_{\text{тр}}$ . В процессе испытаний переключатель переводился в положение «II», когда все

точки КСП-4 выводились на основную термопару (2). Нагрев при тарировке производился ступенчато на нескольких режимах (по мощности); в расчет принималась только установившаяся температура теплового баланса, что близко к реальным условиям трения.

В результате испытания получены данные, представленные в таблице 2.9(а) и на рисунке 2.24. Зависимость носит линейный характер и описывается уравнением регрессии вида:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x, \quad (2.4)$$

где  $y$  –  $T_{нар.}$ ;  $x$  –  $T$  внутр.

Коэффициенты уравнения регрессии (2.4), рассчитанные по методу наименьших квадратов [1], составили  $b_0 = -1,94$ ;  $b_1 = 1,95$ . Корректность расчета была подтверждена двумя проверками.

Таблица 2.9 – Экспериментальные результаты оценки погрешности: а) измерения внутренней термопарой  $T$  внутр. по отношению к температуре поверхности  $T_{нар.}$ ; б) оценки погрешности измерения  $T$  нар. (сравнением с температурой зачеканенной термопары  $T$  зач.)

а) Результаты измерения тарировки $T_{нар.} = f(T_{внутр.})$															
$T_{нар.}$	44	63	82	110	134	86	60	52	54	102	138	166	63	62	71
$T_{внутр.}$	22	33	42	54	76	42	36	28	45	68	86	33	36		
б) Результаты оценки погрешности измерения наружной термопарой $T_{нар.}$ по отношению к температуре, фиксируемой зачеканенной термопарой $T_{зач.}$															
$T_{зач.}$	94	125	174	69	84	132	164	124	88	60	82	114			
$T_{нар.}$	103	135	188	72	90	137	173	128	90	74	103	144			
$\frac{T_{зач.}}{T_{наруж.}}$	0,913	0,926	0,926	0,258	0,934	0,963	0,948	0,968	0,978	0,810	0,795	0,792			

**Т нар., оС**

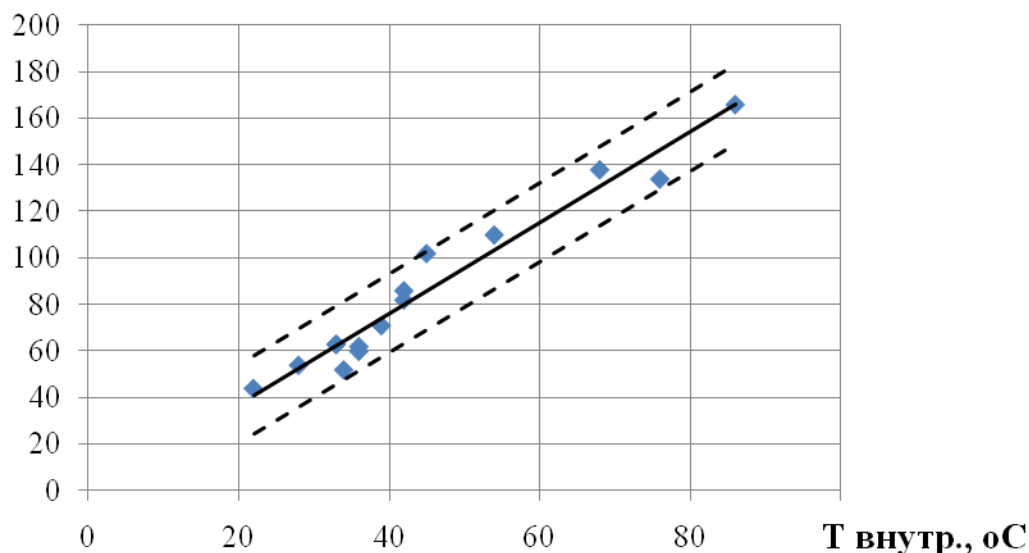


Рисунок 2.24 - График изменения температуры на поверхности образца Тнар. в зависимости от температуры, регистрируемой основной термопарой №1 Твнутр. с границами доверительной 95% области

Таким образом, окончательно было получено следующее уравнение (величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9556$ ):

$$T_{нар.} = -1,94 + 1,95 \cdot T_{внутр.} \quad (2.5)$$

С целью оценки погрешности измерения температуры на поверхности образца (Тнар.) из-за возможных дефектов установки контрольной термопары (поз. 4, рисунок 2.23) была проведена дополнительная тарировка. За действительную температуру поверхности принимались показания термопары, зачеканенной на поверхности неподвижного образца (Тзач). Надежность прижимного приспособления была подтверждена при измерении температур после неоднократной перестановки прижимной контрольной термопары. Полученные на графике точки располагались вблизи расчетной прямой. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.9 (б).

Зависимость температуры зачеканенной термопары Тзач. от показаний термопары, прижатой к поверхности Тнар., можно представить в виде уравнения  $T_{зач.} = b \cdot T_{нар.}$  (величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,952$ ). Вычисленное среднее арифметическое значение коэффициента составило  $b = 0,91$ . Следовательно:

$$T_{\text{зач.}} = 0,91 \cdot T_{\text{нар.}} \quad (2.6)$$

Систематическая ошибка показаний КСП-4, измеренная дополнительно, составила  $\delta_{\text{сист.}} = +10^{\circ}\text{C}$ . Подставляя уравнение (2.6) в (2.5) и учитывая  $\delta_{\text{сист.}}$ , окончательно получаем зависимость:

$$T_{\text{пов.}} = 1,775 \cdot T_{\text{внутр.}} + 8,2 \quad (2.7)$$

Для регистрации  $T_{\text{тр.}}$  использовался прибор КСП-4 изображенный на рисунке 2.11, поз. 9. Смена прибора КСП-4 была вызвана большим диапазоном измерения температур, чем ранее. Систематическую ошибку показаний данного прибора, как показала проверка, можно было не учитывать. Вследствие этого уравнение (2.7) приняло вид:

$$T_{\text{тр.}} = 1,775 \cdot T_{\text{внутр.}} - 2. \quad (2.8)$$

Так как при установке измеряющей термопары по месту могли возникнуть погрешности, влияющие на точность измерения  $T_{\text{тр.}}$ , тарировка системы измерения температуры трения, описанная выше, проводилась дополнительно после каждого опыта без изменения положения измеряющей термопары, соответствующего ее рабочему креплению.

Результаты измерений подтвердили корректность полученного выше уравнения (2.8).

Системы измерения  $f_{\text{тр.}}$  и  $T_{\text{тр.}}$  на машине СМТ-I аналогичны рассмотренным выше для прибора РП.

Для стенда «шайба-диск» автором было разработано приспособление для непрерывного измерения  $f_{\text{тр.}}$  (рисунок 2.25), работающее следующим образом. Возникающая при трении верхнего образца (5) относительно нижнего 4 сила трения  $F_{\text{тр.}}$  воздействует через вал (6) на упругую балку (3), деформация которой фиксируется индуктивным датчиком пути (2), сигнал от которого через усилитель выводился на измерительный потенциометр. Тарировка системы осуществлялась с помощью грузов Р, воздействующих через блок (I) и U – образную проставку (9) на балку (3).

Для непрерывного измерения  $T_{\text{тр.}}$  в процессе испытаний была



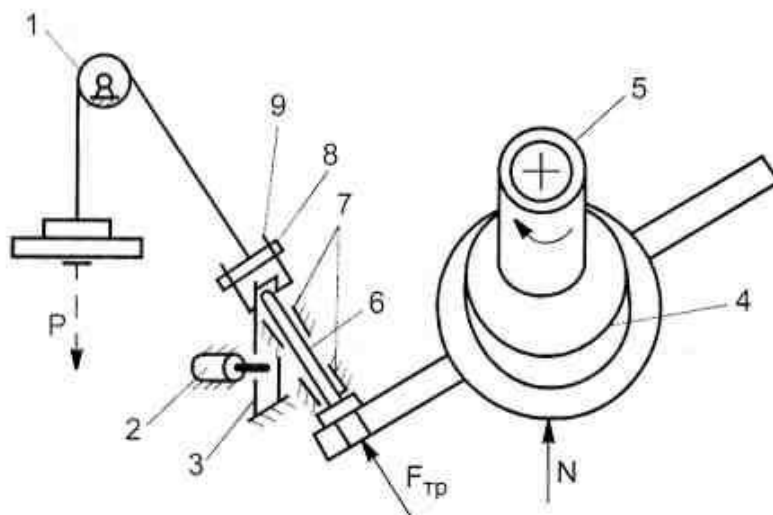


Рисунок 2.25 - Приспособление для измерения  $f_{тр}$  стенда «шайба-диск»

использована разработанная автором методика [81]. Схема комплекса для измерения теплофрикционного состояния пары трения представлена на рисунке 2.26.

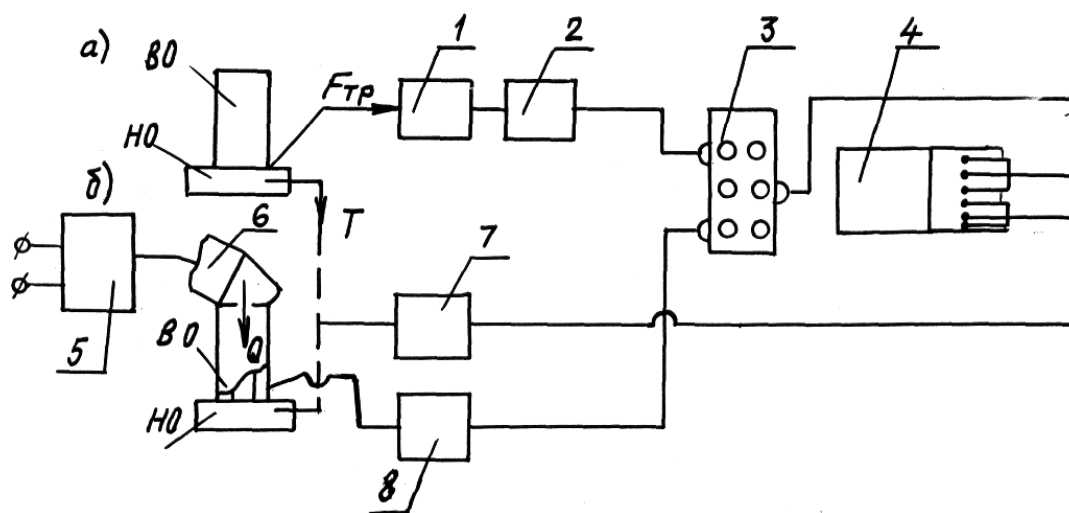


Рисунок 2.26 – Комплекс для непрерывного измерения теплофрикционного состояния пары трения на стенде «шайба-диск»: 1 – индуктивный датчик пути IWT 202; 2 – усилитель Тур MKV-16; 3 – переключатель MS 30-216«Schmidt»; 4 – универсальный измерительный прибор UM111; 5 – трансформатор; 6- паяльник; 7,8 – оболочковые термопары; а – при испытаниях; б – в режиме тарировки

Все описанные системы были использованы также и в конструкции стенда для изучения трения и износа в вакууме. Дополнительная аппаратура

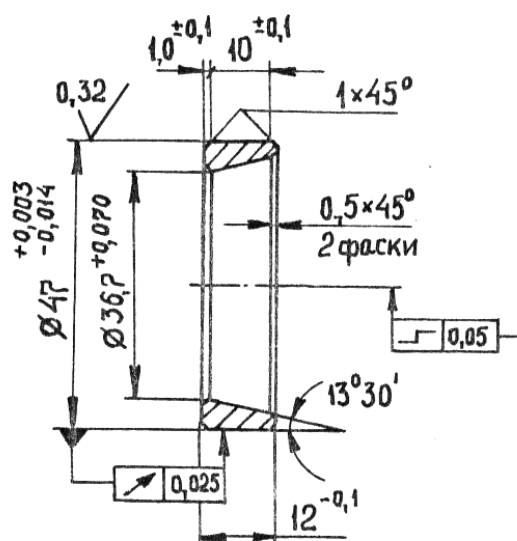
была применена лишь для измерения глубины вакуума. Данная система измерения состояла из термодаточной (см. рисунок 2.15) (ПМТ-2) и ионизационной (ПМИ-2) вакуумных ламп (10) и вакуумметра ВИТ-2. Для проверки воздействия вакуума на точность показаний системы измерения  $f_{тр}$ . (т.к. тензодатчики располагались непосредственно в откачиваемом объеме) проводился дополнительный эксперимент. Для этого нагрузочно-измерительный механизм был переоборудован в конструкцию, приспособленную для проведения тарировок рассматриваемой системы измерения (см. рисунок 2.16). После этого было произведено нагружение системы пробными грузами (момент трения составил 1530 Н·см), герметизация, откачка вакуумной камеры до предельного остаточного давления и последующая ее разгерметизация. В течение всего опыта производилась непрерывная запись « $f_{тр}$ », который практически не изменился. В результате эксперимента было показано, что воздействие разряженной атмосферы на измерительный тракт нагрузочно – измерительного механизма стенда для изучения трения и износа в вакууме незначительно и в расчетах может не учитываться. Коммутация измерительной аппаратуры с датчиками, находящимися внутри вакуумной камеры, была произведена при помощи двух вакуумных штепсельных разъемов (ШР), расположенных на специальном фланце (на рисунок 2.15 с обратной стороны камеры): силового ШР – для подачи напряжения на нагреватель и измерительного – для вывода всех слаботочных цепей систем измерения. Как показали проверки, целостность измерительных каналов после установки коммутирующих разъемов не была нарушена. Точность показаний приборов осталась прежней.

Измерение и запись характеристик качества поверхности образцов пар трения производилось на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр» [31]. Волнистость поверхности образцов исследовалась в продольном направлении по рельефу в соответствии с проектом стандарта, разработанным проф. П.Е.Дьяченко. Измерения выполнялись на кругломере модели 218 завода «Калибр».

## Материалы

С целью практического использования результатов работы в качестве объекта исследований было выбрано твердосмазочное покрытие на основе  $\text{MoS}_2$  с органическим связующим ТСП ВНИИ НП 212 (ТУ 38-101594-75, связующее – мочевиноформальдегидная смола) и другие типы ТСП как отечественного, так и зарубежного производства, широко применяющиеся для узлов трения летательных аппаратов.

В качестве образцов пары трения в машине типа «РП» были применены наружные кольца конических роликовых подшипников (рисунок 2.27): технические требования по ГОСТ 520-71 и РТМ 37.006.062-73, тип кольца 7204, материал ШХ15, HRC > 60 ед., шероховатость наружной поверхности  $R_a = 0,28$  мкм, ширина дорожки трения 10 мм, что отвечает требованиям ГОСТ 11613-65, предъявляемым к техническим характеристикам образцов для испытаний ТСП. Единственным несущественным отличием образцов для машины «РП» от рекомендованных колец является несколько больший диаметр роликов ( $\varnothing 47$  мм по сравнению с  $\varnothing 40$  по ГОСТ 11613-65). Внешний вид образцов на разных стадиях нанесения и испытания ТСП приведен на рисунке 2.28.



2,5 ✓

Рисунок 2.27 – Конструкция образца для машины трения типа «РП»

При исследовании влияния технологических факторов образцы изготавливались из термообработанной легированной стали марки 30ХГСА различной твердости в соответствии с

условиями проведения эксперимента. Различная шероховатость материала основы перед нанесением ТСП достигалась при помощи пескоструйной обработки электрокорундом ( $R_{ak} = 0,75$  мкм) и корундом марки «Шлиф-порошок» 25А, ОСТ 2МТ 71-5-78 ( $R_{ak} = 2,0$  мкм). Шероховатость контртела  $R_{ak} = 0,4$  мкм была получена шлифованием,  $R_{ak} = 0,04$  мкм – шлифованием с последующей полировкой поверхности.

При проведении исследования явления «стоп-эффекта» контробразцы были изготовлены из легированной термообработанной стали марки ХВГ (HRC > 60 ед.) и 12Х18Н9Т. Использование в качестве материала контробразца закаленной стали ХВГ было вызвано необходимостью выполнения системы отверстий, позволяющих осуществить подвод термопары максимально близко к

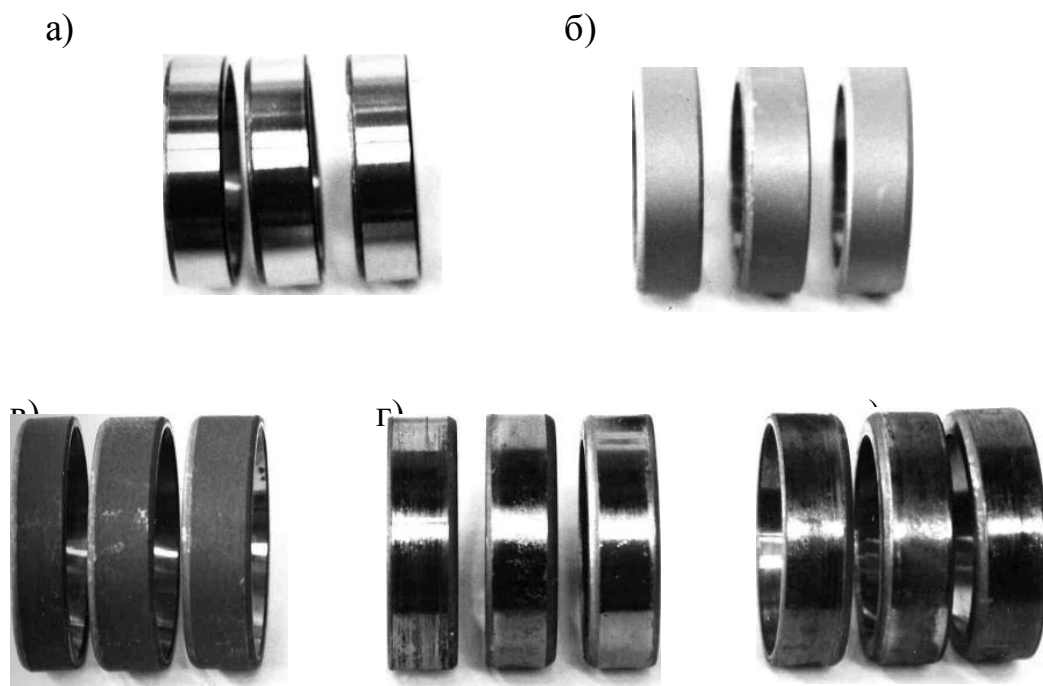


Рисунок 2.28 – Внешний вид образцов из ШХ15: а – исходные; б – после пескоструйной обработки; в – с нанесенным ТСП ВНИИ НП 212; г – после наработки; д – после истирания покрытия

зоне трения при измерении контактной температуры, т.к. выполнить такие отверстия с необходимой точностью в готовом кольце стандартного типа № 7204 не представлялось возможным вследствие высокой твердости материала (ШХ15, HRC > 60 ед.). Поэтому отверстия в контробразце, изготовленном из

стали ХВГ, выполнялись в незакаленном состоянии, после чего производилась термообработка и последующая шлифовка наружной поверхности кольца.

При измерении динамики износа ТСП в процессе наработки были использованы специально изготовленные широкие образцы (рисунок 2.29) (шириной 20 мм по сравнению с дорожкой трения 10 мм для «стандартных» образцов). Материал колец – легированная термообработанная сталь 30ХГСА, HRC = 38-42 ед.

При экспериментальном исследовании воздействия атмосферы соляного тумана на работоспособность пар трения с ТСП исследовались следующие покрытия: ВНИИ НП 212 (ТУ 38-101594-75), ВНИИ НП 213 (ТУ 38-1-01-87-75), ВНИИ НП 230 (ТУ 38-101558-75) и новое ТСП типа ВНИИ НП 212М, обладающее улучшенными защитными свойствами.



Рисунок 2.29 – Внешний вид широких образцов с дорожками трения, полученными после наработки (ТСП ВНИИ НП 212)

Исследовалась работоспособность ТСП в парах трения, изготовленных из следующих материалов: ШХ15, ВГ-20, ХВГ (HRC>60ед.), Х18Н9Т, сталь 45, 16MnCr5, 30CrMoV9, С60 (HV<sub>30</sub> 300, 500, 700-800). В качестве предварительной обработки основы применялись гальваническое хромирование, химическое никелирование, электроискровое легирование ВК6М. Сравнительные испытания производились для ТСП ВНИИ НП 212, ВАП-2, ЦВСП-3 и электрофоретического графитового покрытия.

В качестве образцов для машины трения СМТ-І использовались, также как и в приборе РП, наружные кольца конических роликовых подшипников № 7204. При исследовании самосмазывающихся материалов (СМ) на вакуумном стенде образцы изготавливались в зависимости от вида исходных материалов (пруток или полоса) в виде колец с конической посадочной поверхностью (АТГ, ГФ-5М) (см. рисунок 2.30) или в виде цилиндрических колец, укрепленных на специальной разборной оправке (ВОЛАН-Ф, АМС-5М, КВП-1) (см. рисунок 2.31) [112].

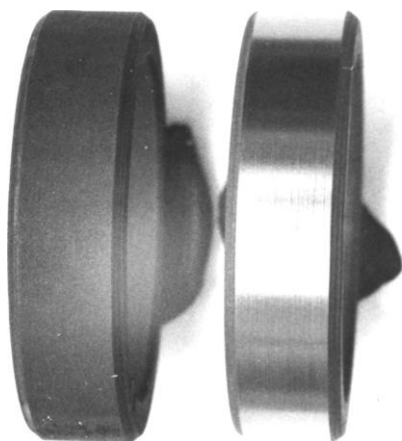


Рисунок 2.30 – Образцы из СМ типа АТГ: исходный (слева), с наработкой на воздухе (справа)

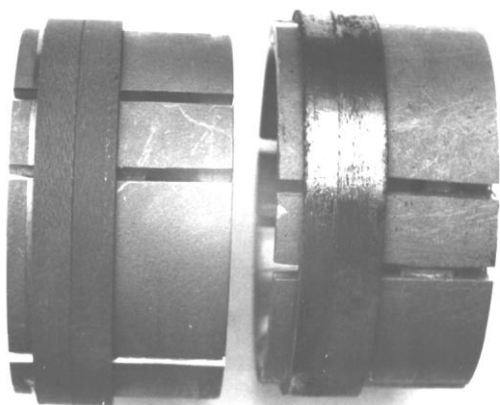
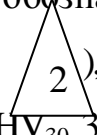
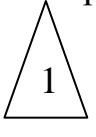



Рисунок 2.31 – Образцы из СМ типа АМС-5М, укрепленные на разборной оправке: исходные (слева), с наработкой (справа)

Конструкция образцов для стенда «шайба-диск» представлена на рисунке 2.32. Материал образцов – сталь 45 (условное обозначение далее за исключением особых случаев), 16MnCr6 (  ), 30CrMoV9 (  ),  ), остальные С60, закаленная до  $HV_{30}$  300-415,  $HV_{30}$  500,  $HV_{50}$  700-800, а также сталь 45 в нормализованном состоянии –  $HV_{30}$  200. Для крепления термопары в нижнем образце (НО) в непосредственной близости от

поверхности предусмотрены отверстия. Спай термопар прижимался к поверхности при помощи винта М4 снизу. От проворачивания образцы фиксировались: НО – тремя штифтами  $\varnothing 3\text{мм}$ , ВО – одним штифтом по пазу (5).

Исследовались композиционные ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  производства Германии – YgDE LFS 6I2/04 с эпоксидной смолой в качестве связующего и ТСП производства Германии Molykote 7409.

Из числа отечественных ТСП исследовались также композиционные ТСП ВАП-2 на основе  $\text{MoS}_2$ , ЦВСП-3 и электрофоретическое покрытие на основе графита С-1.

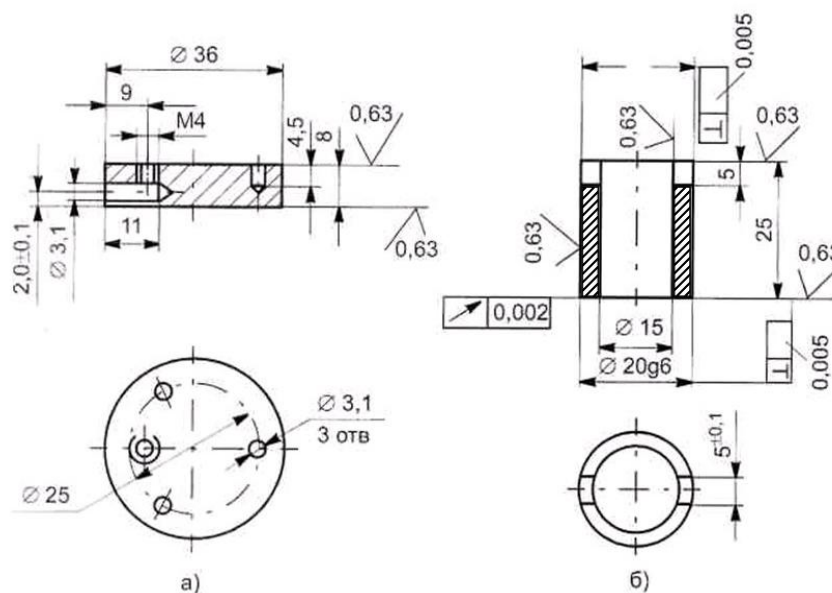


Рисунок 2.32 - Конструкция образцов для стенда "шайба-диск": а - нижний образец (НО); б - верхний образец (ВО).

### 2.3 Выводы к главе 2

Исходя из цели и задач исследований, разработаны:

1. Структура и порядок исследований.
2. Методика комплексной оценки триботехнических показателей.
3. Методика оценки влияния технологических факторов.

4. Методика оценки влияния эксплуатационных условий: температурного фактора в нормальных атмосферных условиях (исследование влияния нагрузочно – скоростных факторов при повышенной температуре, опробование метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных материалов, оценки антифрикционных характеристик); сравнительная оценка триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов как в условиях нормальной атмосферы, так и вакуума; исследование влияния вакуума и атмосферы соляного тумана.

5. Спроектированы и изготовлены установки для комплексных исследований при повышенной температуре и в условиях вакуума. Изготовлены образцы и оснастка.



## ГЛАВА 3 КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

### 3.1 Микроанализ контактирующих поверхностей трения с ТСП

#### 3.1.1 Растровое сканирование контактирующих поверхностей

Как отмечалось в литературном обзоре, несмотря на большое количество исследований  $\text{MoS}_2$ , до настоящего времени нет единой теории трения, объясняющей всё многообразие его смазочных свойств. Не рассматривался также механизм трения ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  связующими веществами. В связи со сказанным автором были проведены дополнительные исследования.

На первом этапе было осуществлено сканирование поверхности образца с ТСП ВНИИ НП 212 в исходном и приработанном состоянии при помощи сканирующего рентгеновского микроскопа «Super Probe – 733» японской фирмы «JEOL» во вторичной электронной эмиссии при ускоряющем напряжении  $E=25$  кВ и токе зонда  $I=3 \cdot 10^{-8}$  А. Граничный участок исходной и приработанной поверхностей образца с ТСП, представленный на рисунке 3.1, показывает, что в процессе приработки исходная структура поверхности ТСП претерпевает существенные изменения. Частицы  $\text{MoS}_2$ , хаотически закреплённые после напыления в связующем полимере (см. рисунок 3.3), после приработки ориентируются своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения (см. рисунок 3.4). Внешний вид приработанной смазочной плёнки  $\text{MoS}_2$  представлен на рисунке 3.2, где на однородной поверхности образца с ТСП имеют место локальные отслоения смазочной плёнки  $\text{MoS}_2$ . Визуальный микроанализ мест разрушений позволил обнаружить наличие на смазочной поверхности:

1. глубоких рисок, оставленных выступами шероховатой поверхности контртела, между которыми и располагаются несущие слои смазочной плёнки  $\text{MoS}_2$ ;
2. мелких точечных вздутий, идентичных пузырьковым образованиям, отмеченным в работе [25];
3. локальных отслоений смазочной плёнки.

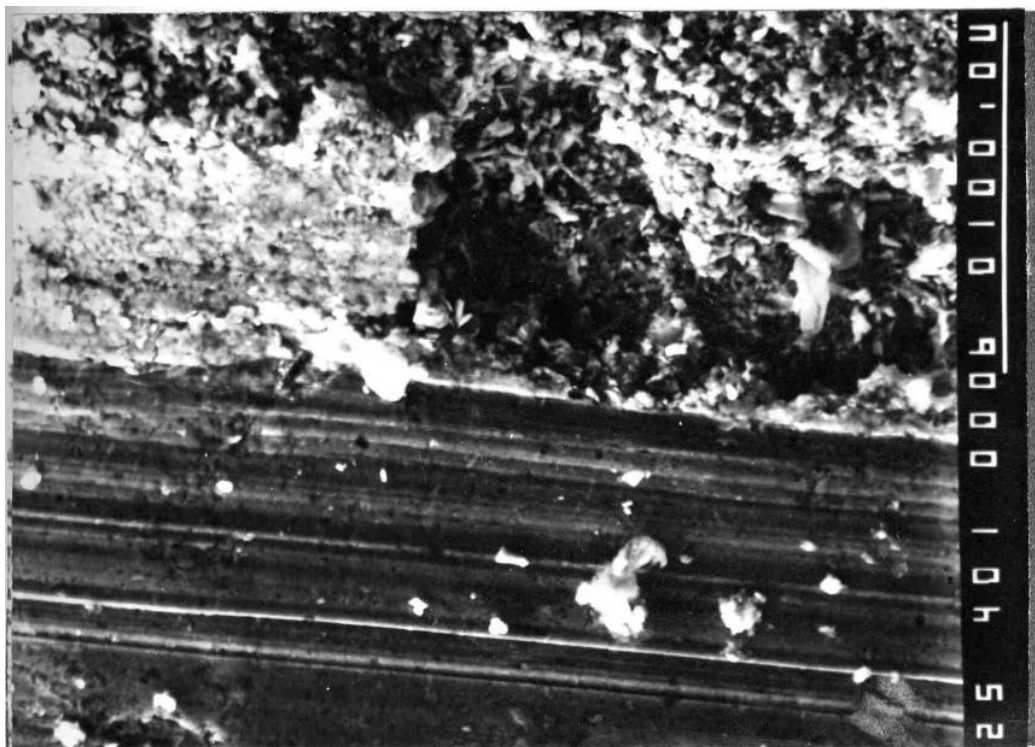


Рисунок 3.1 – Граничный участок исходной и приработанной поверхностей образца с ТСП (x 400)



Рисунок 3.2 - Внешний вид приработанной поверхности образца с ТСП (x 40)



Рисунок 3.3 – Структура исходной поверхности образца с ТСП (x4000)

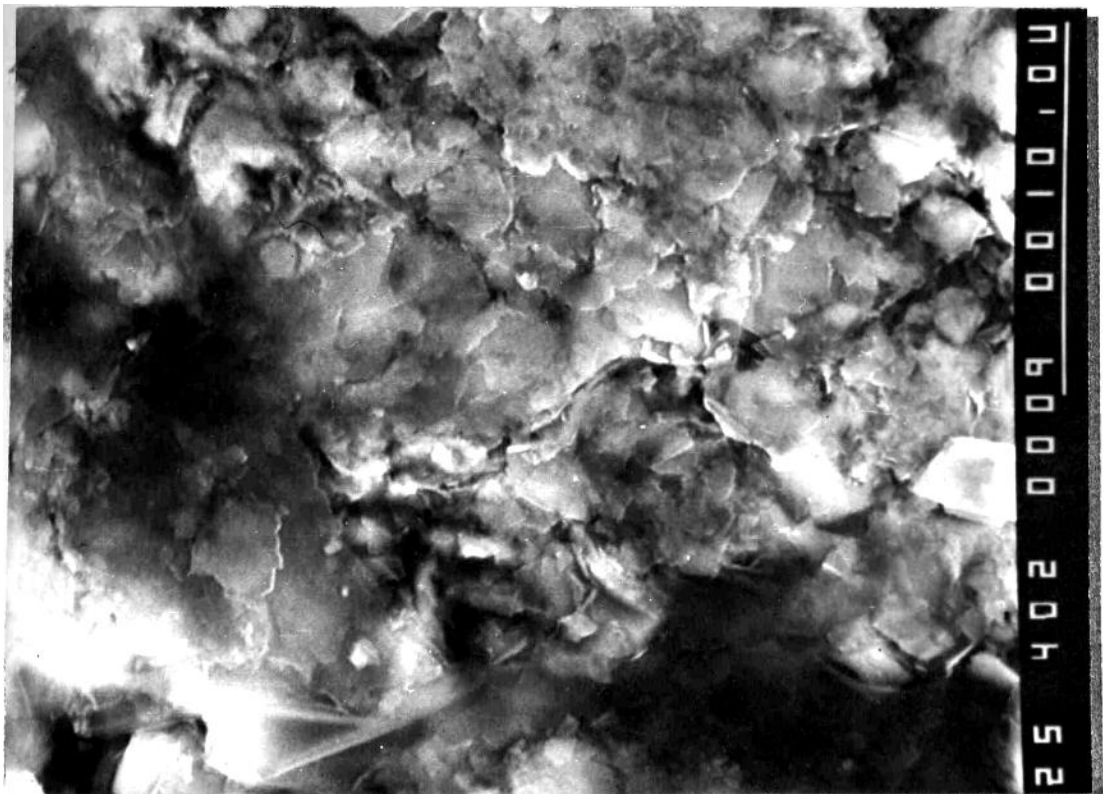


Рисунок 3.4 – Структура приработанной поверхности образца с ТСП (x 4000)

Очевидно, что поверхностные разрушения связаны с механизмом взаимодействия связки, самой смазочной плёнки и микронеровностей поверхностей основы и контртела.

### 3.1.2 Оценка микро топографии поверхностей трения

В связи с вышесказанным на следующем этапе были проведены исследования изменения в процессе трения топографических характеристик контактирующих поверхностей. Полученные профили поверхностей образца с ТСП и контртела в исходном состоянии и после приработки представлены на рисунках 3.5, 3.6 соответственно. Результаты измерения динамики изменения величины износа рассматриваемого покрытия приведены на рисунке 3.7.

Согласно полученным данным (рисунок 3.7) 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, приведённых на рисунках 3.5, 3.6, показывает, что в процессе приработки существенно изменяется топографическое состояние контактных поверхностей трения пары с ТСП. Кроме изнашивания исходного слоя покрытия ( $\delta = 20$  мкм) до толщины 2-3 мкм происходит приработка поверхностей образца с ТСП и контртела до близких значений равновесной шероховатости  $R_a$  контртела  $= 0,18$  мкм,  $R_a$  ТСП  $= 0,22$  мкм). С учётом известного соотношения [31]:

$$R_{\max} = 6 \cdot R_a \quad (3.1)$$

сумма значений наибольшей высоты неровностей профиля материала основы и контртела после приработки составила ( $R_{\max}$  осн. +  $R_{\max}$  контртела) для исходного состояния составила 6,18 мкм, а после приработки – 4,92 мкм. На основании этого можно заключить, что для рассматриваемых условий трения

исходная толщина ТСП ( $\cong 20\text{мкм}$ ) уменьшается настолько ( $2\text{-}5\text{мкм}$ ), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную плёнку  $\text{MoS}_2$ . Причём это взаимодействие наступает именно в тот момент, когда коэффициент трения стабилизируется, т.е. наступают наиболее благоприятные условия смазывания поверхностей. Графическая интерпретация топографической модели трения пары с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующим представлена на рисунке 3.8.

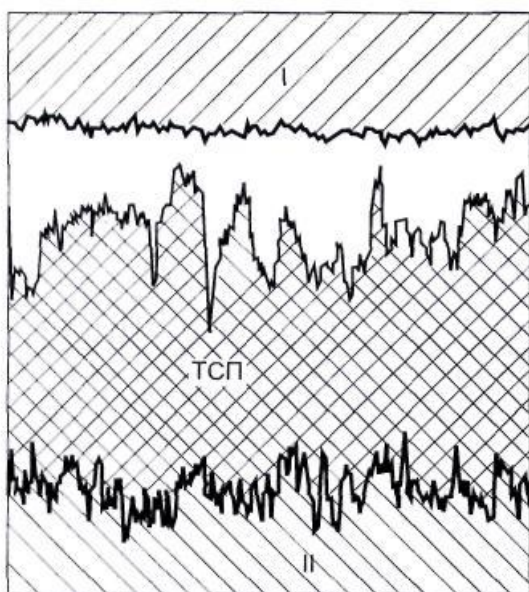


Рисунок 3.5 - Совмещенные профилограммы поверхностей (сверху вниз) контртела 1, ТСП ВНИИ НП 212 (на образце) и подложки 11 (после пескоструйной обработки) в исходном состоянии пары трения перед испытаниями (верт. увел.  $\times 5000$ , гориз. увел.

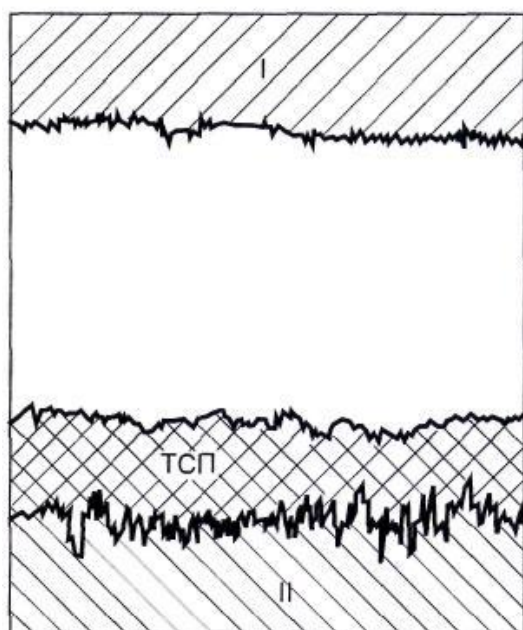


Рисунок 3.6 - Совмещенные профилограммы поверхностей (сверху вниз) контртела 1, смазочной пленки ТСП ВНИИ НП 212 (на образце) и подложки (основы) 11 после приработки пары трения (верт. увел.  $\times 5000$ , гориз. увел.  $\times 100$ ) ( $R_{a\text{ ТСП}} = 0,22\text{ мкм}$ ;  $\delta = 2\text{-}3\text{ мкм}$ ;  $R_{a\text{ основы}} = 0,64$





Рисунок 3.7 - Динамика изменения величины износа ТСП ВНИИ НП 212 в парах трения 30ХГСА (HRC = 38-42 ед.) x ШХ 15 (HRC > 60 ед.) по мере наработки (1 – образцы № 12,13; 2 - № 10, 11; 3 - № 1-7; 4 - № 8,9)

Используя предложенную модель трения, можно предположить, что причиной образования микродефектов, которые наблюдались многими исследователями сразу после образования сплошной смазочной плёнки [10, 25], является выход на поверхность отдельных наиболее высоких микро выступов неровностей материала основы.

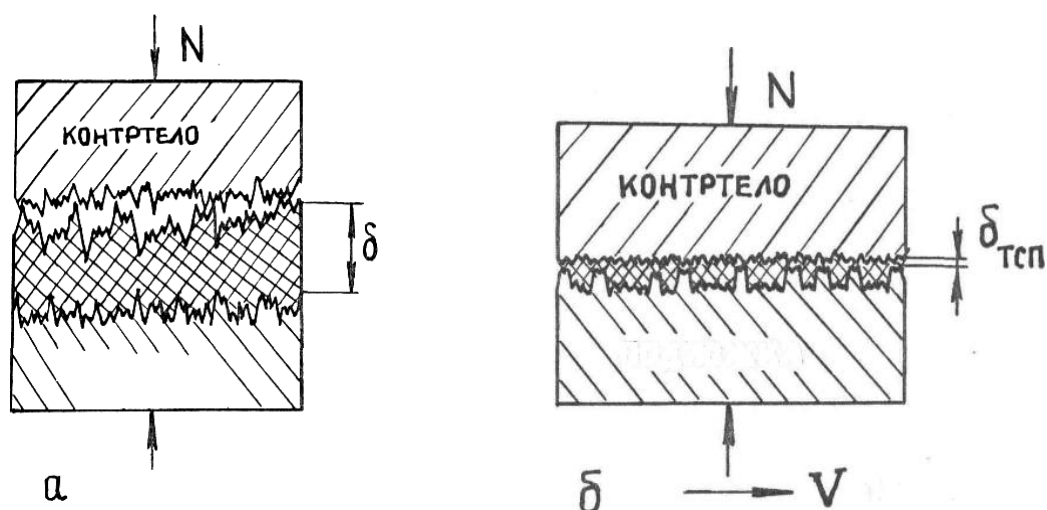


Рисунок 3.8 – Топографическая модель трения пары о ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующим веществом: а – в исходном состоянии; б – после приработки

### 3.1.3 Элементный микроанализ трущихся поверхностей

Для проверки указанного выше предположения на следующем этапе работы проводился рентгеновский микроанализ поверхностей с помощью

анализатора LINK серии 860. Результаты микроанализа поверхностей трения с ТСП ВНИИ НП 212 (материал основы – закалённая сталь ШХ15), имеющих различную степень наработки на машине трения СМТ-1 при нагрузке  $N=1000$  Н и скорости скольжения  $V=0,5$  м/с представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты элементного микроанализа поверхностей трения пары с ТСП ВНИИ НП 212 на различных этапах наработки

Время наработки $\tau$ , мин.	Исследуемый участок	Элементный состав поверхности, %			
		S	Fe	Mo	Cr
$\tau=0$ (исходная поверхность)	исходная поверхность	75,82	-	24,18	-
$\tau=28$ мин. (после приработки)	неповреждённый участок	64,99	16,28	18,73	-
	повреждённый участок	11,77	81,72	6,51	-
$\tau=180$ мин. (середина наработки)	неповреждённый участок	56,97	24,66	18,24	0,13
	повреждённый участок	15,76	77,43	4,79	2,02
$\tau=360$ мин. (в конце наработки)	неповреждённый участок	43,91	44,08	12,01	-
	повреждённый участок	13,95	79,5	5,84	0,71

Анализ полученных данных, представленных в таблице 3.1, показал, что:

1. на всех этапах наработки, начиная с окончания приработки, кроме основных элементов смазочной плёнки  $MoS_2$ , т.е. Mo и S, на диаграммах наблюдается Fe;

2. по мере наработки на неповреждённых участках, где сохранилась плёнка ТСП, мощность пика, соответствующего железу, возрастает, т.е. всё большее число неровностей основы или выступает на поверхность, или оказывается в непосредственной близости от неё; так, например, при времени наработки  $\tau = 28$  мин. – Fe = 16%; при  $\tau = 180$  мин. – Fe = 25%; а при  $\tau = 360$  мин. – Fe = 44%;

3. пик Fe наблюдается не только на повреждённых местах, но и в структуре смазочной плёнки (на неповреждённых участках), хотя и существенно меньший по мощности, причём содержание Fe близко к содержанию основных элементов смазочной плёнки MoS<sub>2</sub>;

4. большая интенсивность пика S по сравнению с Mo связана с тем, что в структуре MoS<sub>2</sub> на один атом молибдена приходится два атома S;

5. появление в незначительных количествах хрома определяется химическим составом металла основы, т.е. подшипниковой стали ШХ15, где Cr имеет наибольший процент из всех легирующих элементов (1,3-1,65%);

6. снижение содержания Mo и S при переходе от смазочной плёнки (неповреждённые места) к местам дефектов объясняется тем, что частицы MoS<sub>2</sub> распределены хаотично и не дают таких интенсивных пиков, как в смазочной структуре.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что наибольшие выступы микронеровностей металлической основы могут выходить на поверхность трения при уменьшении толщины ТСП с 20 мкм до нескольких микрометров. В этот момент на поверхности трения образуется смазочная плёнка MoS<sub>2</sub>, о чём свидетельствует резкое снижение  $f_{тр}$ . [119]. В дальнейшем на установившемся режиме именно шероховатость поверхности основы выдерживает всю нагрузку на контакт. А низкое трение обеспечивается смазочной плёнкой MoS<sub>2</sub>, удерживаемой на поверхности трения между микронеровностями основы за счёт связующих компонентов композиционного ТСП. Следовательно, если контактная нагрузка не превысит предела текучести



материала основы (что имеет место в данном случае, т.к. использовались образцы из закалённой стали ШХ15, HRC=60), то ресурс работы рассматриваемого типа ТСП будет определяться ресурсом связующего. Подтверждением этому служит тот факт, что без связующего как MoS<sub>2</sub>, так и графит имеют малый срок работы на поверхностях трения.

### 3.2 Разработка расчётного метода комплексной оценки на основе математического эксперимента

#### 3.2.1 Анализ эксплуатационно-технологических факторов, разработка и реализация расчётного метода

В соответствии с поставленными выше задачами был проведён анализ конструкций и эксплуатационно-технологических параметров узлов трения с ТСП ряда агрегатов, функционирующих в экстремальных условиях [41]. Конструкции типовых фрикционных сопряжений с ТСП приведены на рисунке 3.9-3.11. Покрываются наносились как на наружные цилиндрические (рисунки 3.9, 3.10), так и на торцевые поверхности (рисунок 3.11). Детали указанных узлов трения изготавливались из следующих материалов: 1Х15Н4АМЗ-Ш (термообработка до  $\sigma_b = 1500 \frac{+13}{-12}$  МПа), 95Х18 (HRC>56ед.), ВТ14 (в отожжённом состоянии), 09Х16Н4Б, 20Х13, 30ХГСА и др. Технологическая подготовка поверхностей деталей с ТСП и контртел осуществлялась в соответствии с требованиями инструкции [71]. Анализ подобных узлов трения показал, что наиболее часто встречаются следующие схемы трения: вал-втулка, палец-плоскость, ролик-плоскость, цилиндр-поршень и другие при самых разнообразных комбинациях вращательного и поступательного типов движения.

В качестве основной была выбрана роликовая схема трения, одним из основных преимуществ которой помимо перечисленных ранее является возможность точного измерения размеров пятна контакта, что позволяет получить зависимости, где аргументом является не величина абсолютной

нагрузки, а универсальный параметр контактного давления.

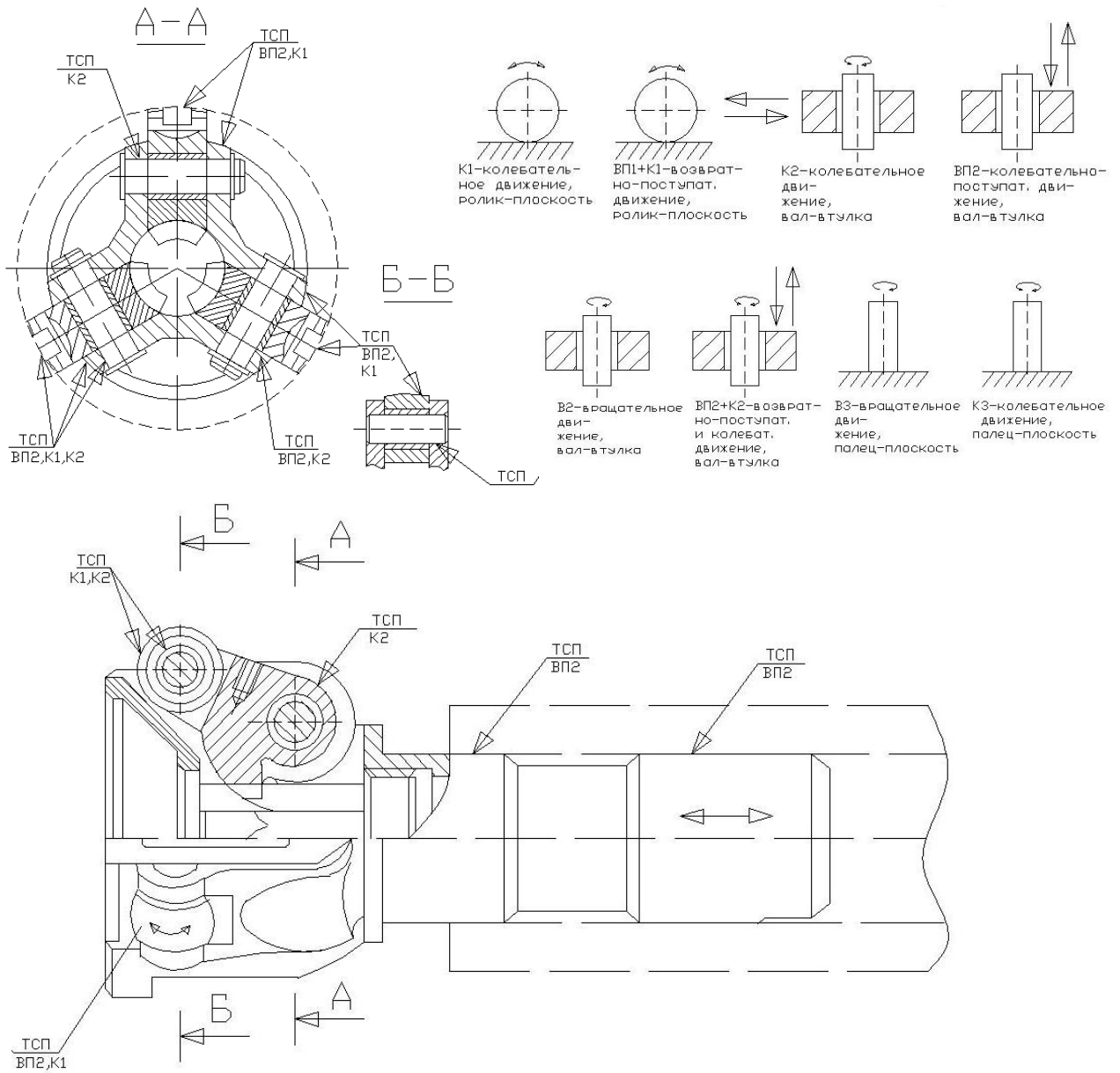


Рисунок 3.9 - Узел трения с применением ТСП типа направляющего штока (места нанесения ТСП и направление взаимного перемещения контактных поверхностей трения показаны стрелками): К1 – колебательное движение, ролик-плоскость; ВП1 + К1 – возвр.-поступ. и колеб. движ.; ролик-плоскость; К2 – колебат. движ. вал-втулка; ВП2 – возвратно-поступ. движ.; вал-втулка; В2-вращательное движение вал-втулка; ВП2+К2 - возвратно-

Последнее обстоятельство дало возможность проведения сравнения

данных автора с экспериментальными результатами, полученными другими исследователями на установках, работающих по различным схемам трения.

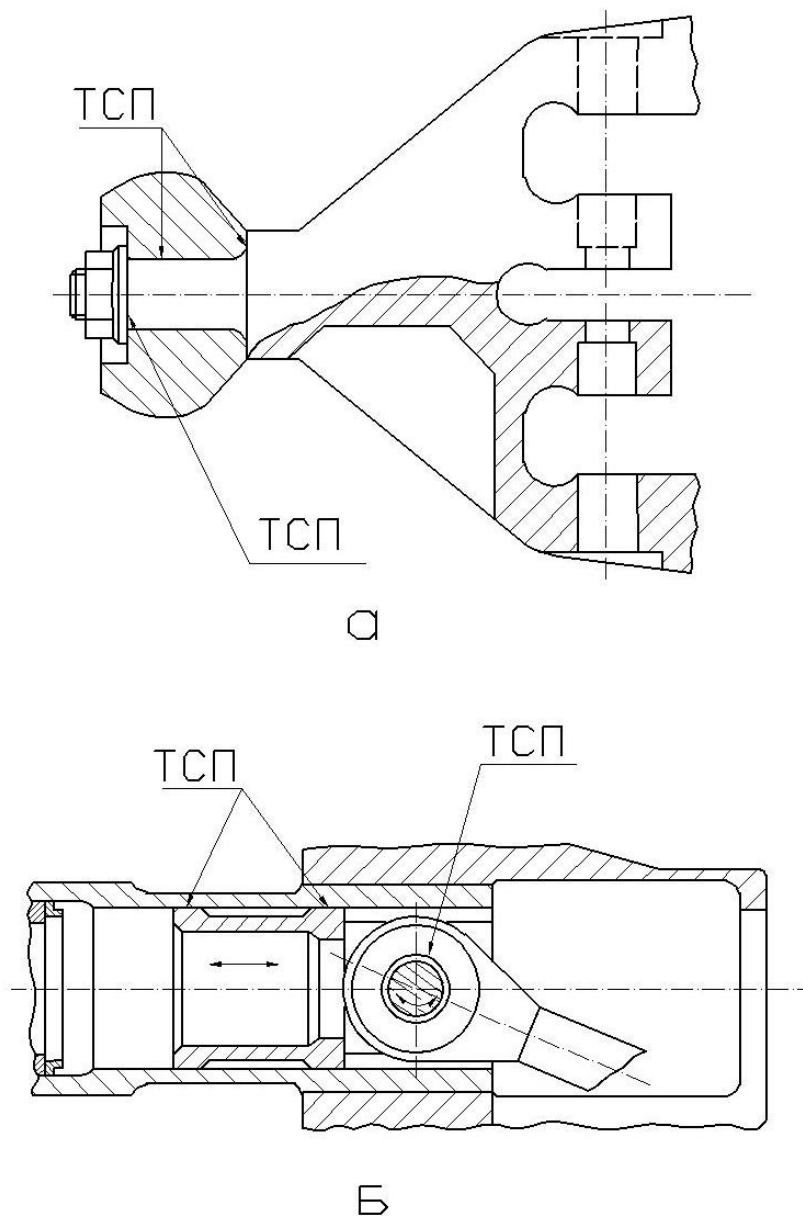


Рисунок 3.10 - Узлы трения с применением ТСП типа "шлиц-шарнир" (а) и "ось-рычаг" (б) (места нанесения ТСП и направление взаимного перемещения контактных поверхностей трения показаны стрелками)

Такое сравнение осуществлялось, с одной стороны, при условии совпадения уровней исходных параметров с диапазонами их изменения, принятыми в настоящей работе, а, с другой стороны, при наличии информации о величине контактного давления (в подавляющем большинстве случаев авторы

указывают лишь значение абсолютной нагрузки). Удовлетворительная сходимость математических моделей, полученных в настоящей работе, с экспериментальными данными других исследователей (что показано ниже) позволила подтвердить корректность моделей и провести с их помощью оценку работоспособности реальных узлов трения с ТСП.

Анализ условий функционирования конкретных узлов трения с ТСП позволил выявить диапазоны изменения эксплуатационно-технологических факторов, которые были взяты за основу при проведении всех дальнейших исследований.

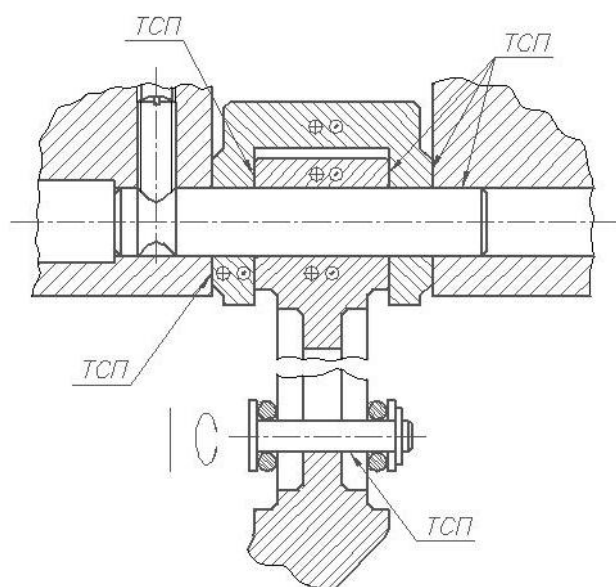


Рисунок 3.11 - Узел трения с применением ТСП типа "ось-рычаг" (места нанесения ТСП и направление взаимного перемещения контактных поверхностей трения показаны стрелками)

На работоспособность узлов трения в целом и, в частности, с применением ТСП, оказывают влияние факторы, которые можно укрупнено подразделить на 3 категории: технологические, конструкционные и эксплуатационные.

К технологическим факторам можно отнести следующие: качество исходной поверхности контактирующих тел пары трения (геометрические параметры по ГОСТ 2789-73 – Ra, Rz, Rmax, S, Sm,  $t_p$ ; физико-механические

характеристики - HRC, E,  $f_{тр.}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{-1}$  и др.), тип и режимы предварительной обработки поверхности подложки и контртела (например, для хромистых и никелевых сталей - обезжиривание и пескоструйная обработка подложки при  $P=(3-4) \cdot 10$  Па, обработка поверхности контртела - шлифование по 8 классу шероховатости [12], тип покрытия, режимы его нанесения и качество получаемой поверхности ТСП - волнистость, отклонение формы поверхности и др. [89].

К конструкционным факторам можно отнести: тип контакта - схема трения (торцевая, вал-втулка, пальчиковая, ролик-ролик и др.), размерные характеристики пары трения и др.

К эксплуатационным факторам следует отнести: контактное давление  $P_{конт.}$ , скорость скольжения  $V$ , рабочую температуру  $T$ , вид окружающей среды (нейтральные газы, степень разряжения), наличие различных видов излучений и др.

Влияние вышеназванных факторов на работоспособность пар трения с ТСП можно представить в виде логической схемы следующего типа. Физико-механические свойства различных компонентов, участвующих во взаимодействии, определяют фрикционные контактные явления, которые в свою очередь связаны непосредственно с технологическими методами предварительной подготовки, нанесения ТСП и последующей обработки пары трения. Технологические режимы обеспечивают оптимальные параметры качества поверхностного слоя ТСП, подложки и контртела, которые наряду с эксплуатационными факторами (такими, как контактная нагрузка, скорость скольжения и др.) и оказывают решающее воздействие на рабочие характеристики пары трения с ТСП. Графологическая структура такого взаимодействия факторов, влияющих на работоспособность пар трения с ТСП, представлена на рисунке 3.12.

Очевидно, что проведение планируемого эксперимента с целью составления комплексного уравнения регрессии по определению влияния всех

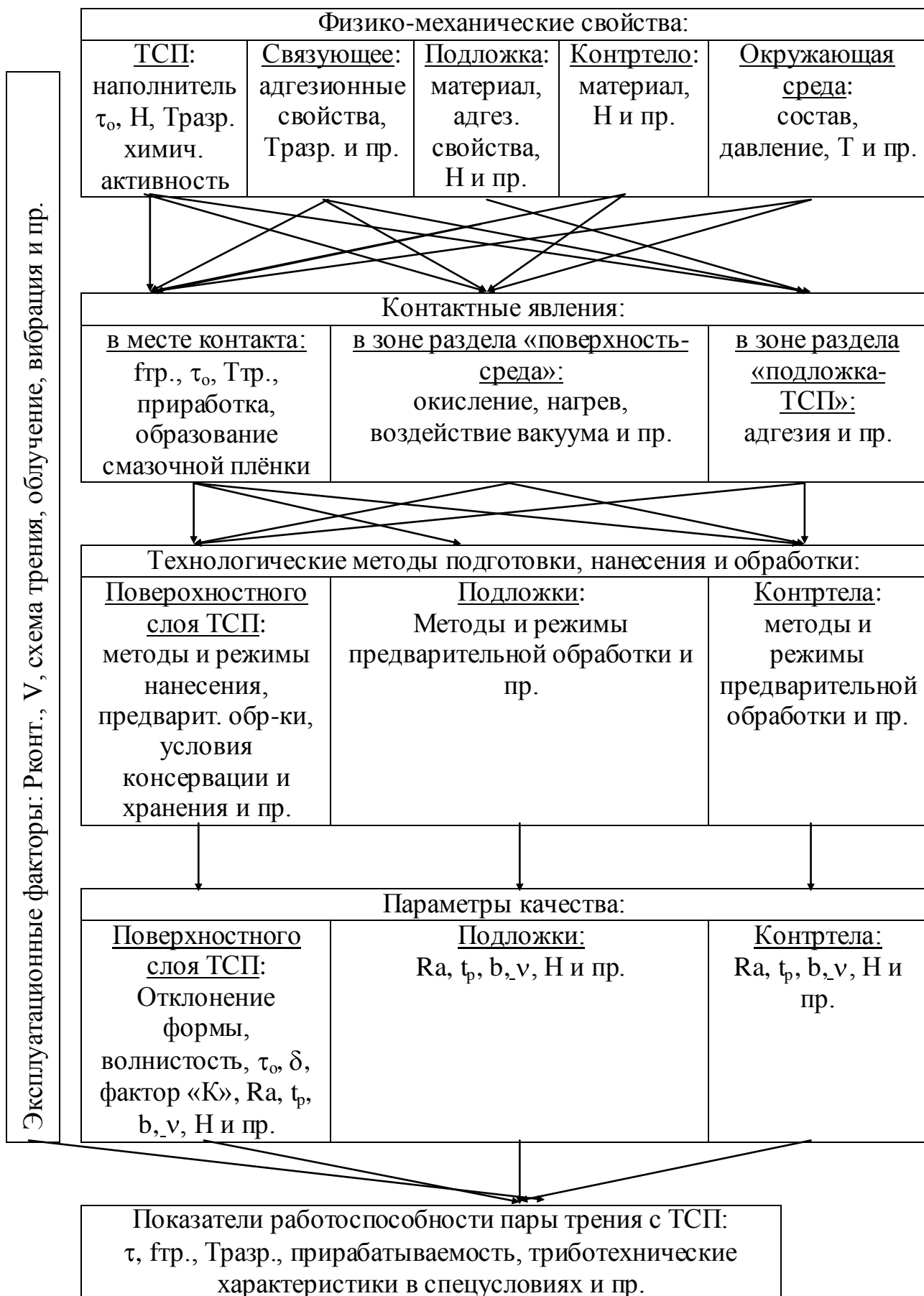


Рисунок 3.12 - Графологическая структура взаимодействия факторов, влияющих на работоспособность пар трения с ТСП

вышеперечисленных факторов на работоспособность пар трения с ТСП сопряжено с большим объемом экспериментальной работы. С целью замены реальных экспериментов математическими, что не только существенно сокращает число экспериментов, но и значительно снижает затраты времени, автором был разработан основанный на математическом эксперименте расчетный метод оценки комплексного влияния эксплуатационно-технологических факторов на работоспособность ТСП в трущихся соединениях ЛА [115]. Основные этапы метода представлены на рисунке 3.13.

На первом этапе математического эксперимента ставились следующие задачи:

1) практическое опробование разработанного алгоритма на примере анализа эксплуатационно-технологических факторов, определяющих работоспособность пар трения с ТСП с целью количественной оценки факторов и выделения наиболее существенных;

2) построение уравнения регрессии для рассматриваемых факторов и их взаимодействий применительно к условиям испытаний ТСП, определенным по ГОСТ 11613-65.

Наиболее существенное влияние на работоспособность ТСП (гл.1) оказывают следующие факторы: шероховатость материала основы (подложки) -  $R_{a0}$ , твердость материала основы -  $HRC_0$ , толщина ТСП -  $\delta$ , твердость контртела -  $HRC_k$ , контактная нагрузка -  $N$ , скорость скольжения -  $V$ , а также температура нагрева -  $T$ , воздействие внешних условий вакуума, радиационного облучения и др. Исходя из того, что для фрикционных сопряжений с ТСП, как указывалось ранее (см. главу 1), оптимальной является шлифованная поверхность контртела, соответствующая 8 классу шероховатости поверхности ( $R_{ak} \approx 0,4$  мкм согласно ГОСТ 2789-73), которая и обеспечивается в условиях производства, влияние этого фактора на работоспособность рассматриваемых пар трения не учитывалось. Остальные перечисленные выше эксплуатационно-технологические факторы для различных пар трения и условий нанесения покрытий могут принимать различные значения, что и предопределило необходимость



Рисунок 3.13 –Этапы основанного на математическом эксперименте расчётного метода комплексной оценки триботехнических характеристик узлов трения с ТСП



исследования их комплексного влияния на работоспособность фрикционных сопряжений ЛА с ТСП. Следует также отметить, что использование для расчетов приведенных в главе 1 зависимостей типа  $\tau = \varphi(T)$  и  $f_{тр.} = f(T)$  (рисунки 1.19, 1.17) затруднено вследствие расхождения температурных характеристик, полученных авторами [93,64] на различных машинах трения (ИТК, КТ-2), объясняемого, по-видимому, разными контактными условиями, методикой испытаний и температурным режимом, так как измерение температуры производилось в одном случае [93] при помощи лепестковой термопары, не имеющей непосредственного контакта с материалом образца, а в другом случае [64] - с использованием термопары, укрепленной в специальном отверстии в непосредственной близости от поверхности контакта.

Учет влияния вакуумных условий на работоспособность пар трения с ТСП согласно данным работы [53] также представляет известные затруднения вследствие разницы условий испытаний, а именно - во-первых, в данном эксперименте испытывались образцы с ТСП, нанесенным на обе контактирующие поверхности, что практически возможно лишь для "открытых" схем трения и поэтому не является характерным для реальных узлов трения в подавляющем большинстве случаев "закрытого" типа (например, "вал-втулка", «цилиндр-поршень» и др.), а во-вторых, эксперименты осуществлялись на машине трения типа УТИ-1 по схеме "кольцо-полусферический индентор", существенно отличающейся по условиям контактирования от схемы "ролик-ролик" (машина трения МИ).

В связи со сказанным, наиболее целесообразным представлялось исследование влияния эксплуатационно-технологических факторов на триботехнические свойства рассматриваемых пар трения с использованием установки, работающей по схеме "ролик-ролик", отдельно для нормальных атмосферных условий, при нагреве и в вакууме. Причем если первая задача (исследование триботехнических показателей в нормальных атмосферных условиях) решалась расчетным путем в настоящей главе, то два последующих исследования были осуществлены экспериментально (см. главу 5). При

необходимости учета комбинации этих условий (например, при нагреве в условиях вакуума) для получения комплексной зависимости возможно использование предложенного ниже расчетного метода.

С целью возможности дальнейшего практического использования результатов работы наиболее целесообразным представлялось проведение комплексных исследований ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с органическими связующими типа ВНИИ НП 212 (связующее - мочевиноформальдегидная смола) и ВНИИ НП 230 (связующее - эпоксидная смола), длительно работоспособные как на воздухе, так и в условиях вакуума (см. главу 1).

В качестве параметра оптимизации был принят ресурс ТСП (с возможностью последующего пересчёта в интенсивность изнашивания), нанесенного на подвижный образец пары трения.

В соответствии с алгоритмом математического эксперимента на первом этапе производилось аналитическое описание (аппроксимация) искомых однофакторных зависимостей.

1. Влияние шероховатости материала основы на ресурс исследовалось для ТСП ВНИИ НП 209 (связующее - кремнийорганическая смола) [94]. График, отражающий эту функцию  $\tau=f(Rz)$  (рисунок 3.14) в соответствии с рекомендациями работ [8, 36] был описан следующей экспоненциальной зависимостью:

$$\tau = 306,72 \cdot (Rz - 0,2)^{0,69} \cdot e^{-0,31(Rz-0,2)} \quad (3.2)$$

2. Экспериментальные данные о влиянии твердости материала основы [98] представлены на рисунок 3.15. График, построенный по результатам этих экспериментов, аппроксимирован нами функцией:

$$\tau = \frac{10^6}{0,46(HRC_0 - 30)^2 + 54^2} + 1100 \quad (3.3)$$

3. Исследование влияния толщины ТСП производилось по данным работы [94]. Экспериментальные данные приведены на рисунок 3.16.

График, построенный по результатам экспериментов, был описан при помощи зависимости:

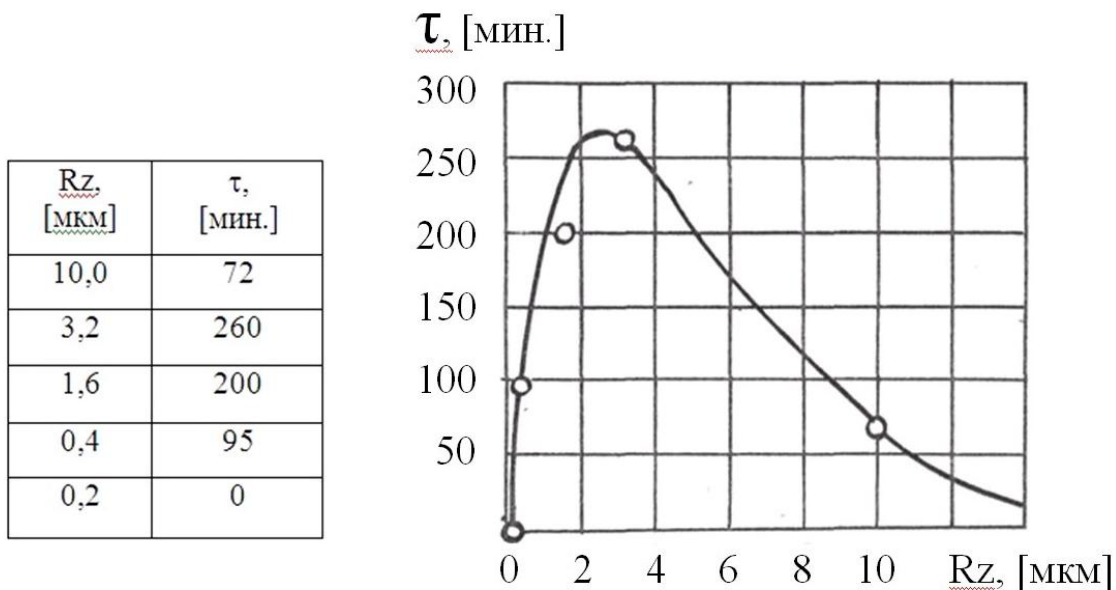


Рисунок 3.14 - Экспериментальная зависимость типа  $\tau=f(Rz)$  по данным [94]:  
машина трения МИ, материал основы ЭИ-347, ТСП ВНИИ НИ 209

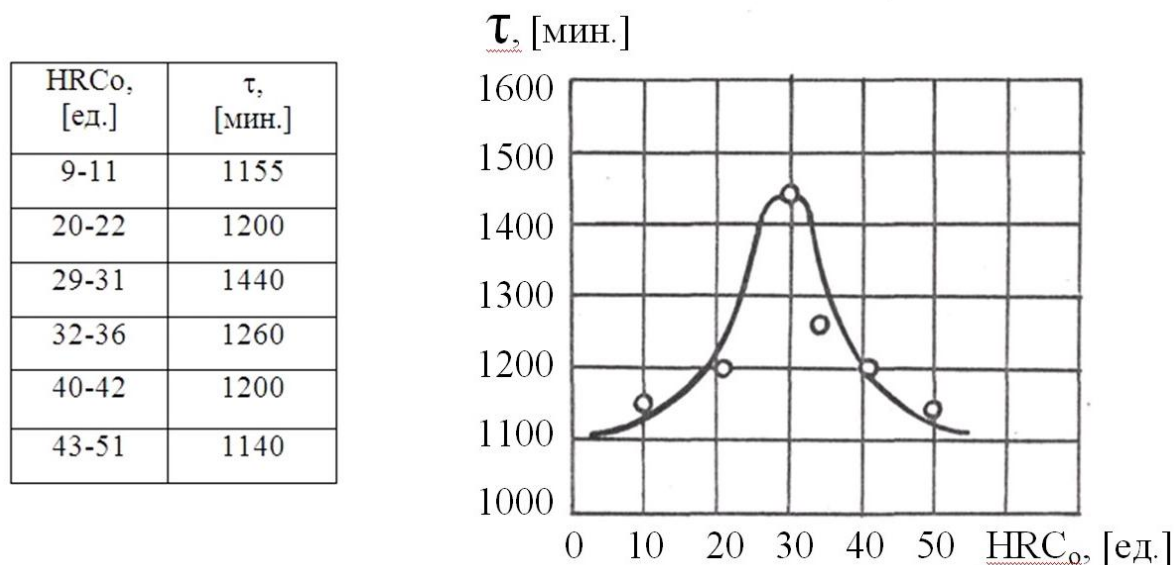


Рисунок 3.15 - Экспериментальная зависимость типа  $\tau=f(HRC_o)$  по данным [98]  
машина трения МИ,  $N=1600$  Н,  $\delta=20$  мкм,  $HRC_k = 60$  ед., связующее  
Э-116

$$\tau = 0,0017 \cdot \delta^{5,56} \cdot e^{-0,285\delta} \quad (3.4)$$

$\delta$ , [МКМ]	$\tau$ , [МИН.]
10	35
20	95
30	52
60	8

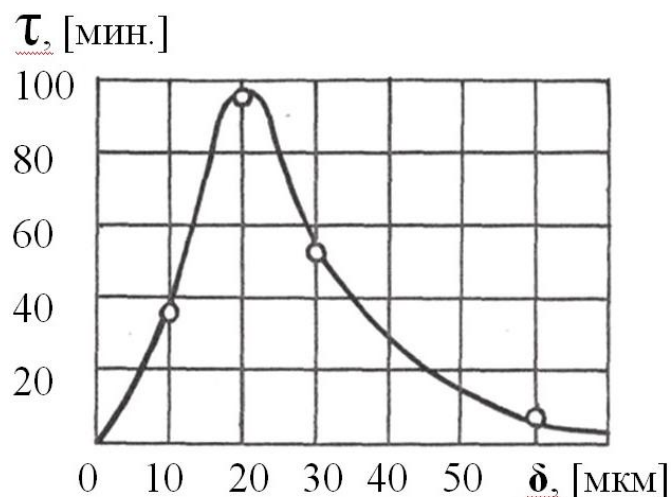


Рисунок 3.16 - Экспериментальная зависимость типа  $\tau = f(\delta)$  по данным [94], полученная на машине трения типа МИ

4. Исследование влияния твердости контртела производилось по данным работы [98]. Экспериментальные данные приведены на рисунке 3.17.

HRCк, [ед.]	$\tau$ [МИН.]
9-11	445
30-33	810
60-62	1440

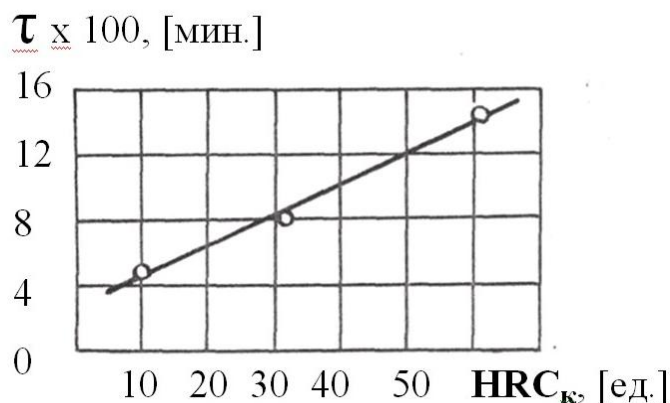


Рисунок 3.17- Экспериментальная зависимость типа  $\tau = f(HRCк)$  по данным [98]; машина трения МИ, связующее -Э-116,  $K=0,5$ ,  $N=1600$  Н,  $\delta = 20$  мкм,  $HRC_0 = 60-62$  ед.

График, построенный по результатам экспериментов, может быть описан с помощью зависимости вида  $\tau = a + b \cdot HRCк$ . После обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов было получено уравнение:

$$\tau = 231,52 + 19,61 \cdot HRCк \quad (3.5)$$

5. Влияние контактной нагрузки исследовано для ТСП ВНИИ НП 230 (связующее - эпоксидная смола) [95]. Экспериментальные данные представлены на рисунке 3.18.

График, построенный по результатам экспериментов, аппроксимирован функцией:

$$\tau = 1,19 \cdot 10^{9,08} \cdot N^{-2,08} \quad (3.6)$$

N, [Н]	$\tau$ , [мин.]
1600	310
700	1730
280	2810

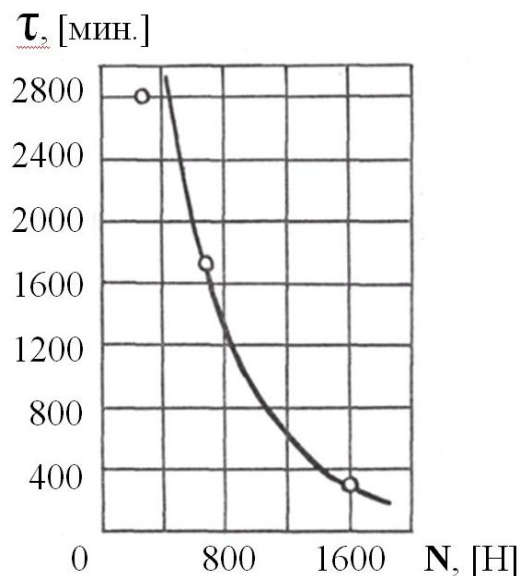


Рисунок 3.18- Экспериментальная зависимость типа  $\tau = f(N)$  по данным [95]: машина трения МИ,  $V = 0,42$  м/с, пара ЭИ 474 - ЭИ-474, ТСП ВНИИ НП 230

6. Экспериментальные данные о влиянии скорости скольжения [95] представлены на рисунке 3.19. График, построенный по результатам этих экспериментов, был описан при помощи зависимости:

$$\tau = 225,84 \cdot V^{-1,559} \quad (3.7)$$

Проведенный статистический анализ полученных моделей (3.1) - (3.6) и проверка гипотезы об адекватности по критерию Фишера показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных (дисперсия опытов рассчитывалась по результатам испытаний на воспроизводимость, проведенных в аналогичных условиях теми же авторами, экспериментальные данные которых были использованы выше при аналитическом описании однофакторных зависимостей [94]).

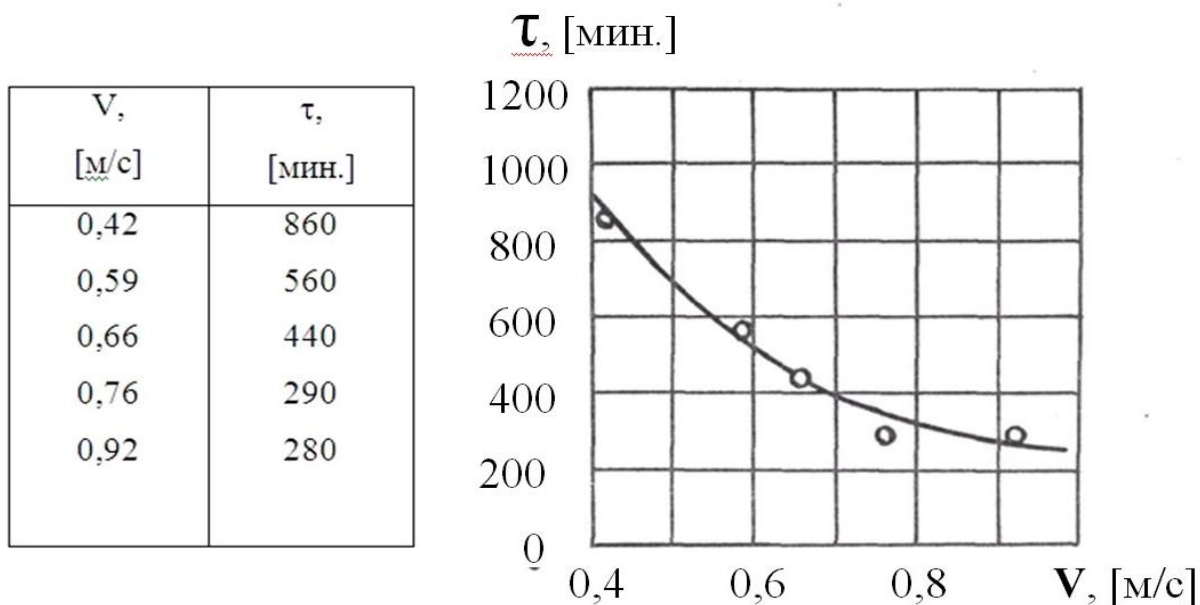


Рисунок 3.19 - Экспериментальная зависимость типа  $\tau=f(V)$  по данным [95]: машина трения МИ,  $N=1600$  Н, пара ЭИ-347 - ЭИ-347, ТСП ВНИИ НП 212

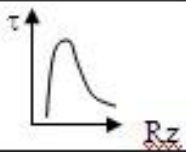
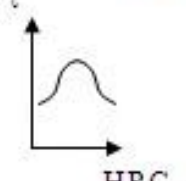
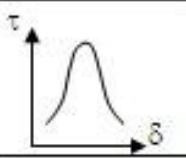
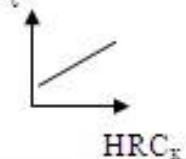
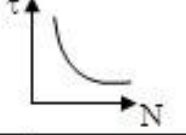
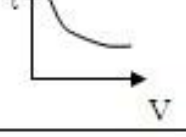
Полученные экспериментальные однофакторные зависимости ресурса от основных эксплуатационно-технологических параметров представлены в таблице 3.2. Несмотря на то, что приведенные в таблице 3.2 данные получены для разных ТСП, априори было принято, что корреляционные функции для них будут носить идентичный характер.

Вследствие того, что фактор скорости скольжения  $V$ , тесно связанный с температурой в зоне контакта, оказывает наибольшее влияние на параметр оптимизации, зависимость  $\tau = f(V)$ , полученная для рассматриваемого типа ТСП ВНИИ НП 212, была принята в качестве "опорной" зависимости, а фактор  $V$  - в качестве "опорного" фактора.

Для увязки всех приведенных в таблице 3.2 зависимостей между собой по ресурсу была проведена корректировка фиксированных уровней однофакторных зависимостей по фактору  $V$ . На рисунке 3.20 графическая интерпретация корректировки показана на примере зависимости  $\tau = f(Rz)$ .

Для оптимального по ресурсу значения  $Rz_{\text{опт}} = 3,2$  мкм (рис.3.14) по ф. (3.2)  $\tau = 260$  мин., что по зависимости (3.6) соответствует скорости

Таблица 3.2 - Экспериментальные однофакторные зависимости ресурса от основных эксплуатационно-технологических факторов, полученные аппроксимацией опубликованных опытных данных

Вид графика	Экспериментальные зависимости типа $\tau=f(\text{фактор})$	Фиксированные уровни остальных факторов						Исходный тип ТСП
		$Rz$ осн. [МЭМ]	HRC <sub>о</sub>	$\delta$ , [МЭМ]	HRC <sub>к</sub>	N, [Н]	V, [м/с]	
	$\tau = 306,79(Rz - 0,2)^{0,69} \cdot e^{-0,31(Rz - 0,2)}$ (4.1)	0,2-10	60	20	60	1600	0,91	ВНИИ НП 209
	$\tau = \frac{10^7}{0,46HRC_o - 1017 + 54} + 1100$ (4.2)	3,2	10-50	20	60	1600	0,36	ТСП со связующим Э-116
	$\tau = 0,0017 \cdot \delta^{14} \cdot e^{-0,25\delta}$ (4.3)	3,2	60	10-60	60	1600	1,72	ТСП на основе MoS <sub>2</sub> со связ.
	$\tau = 231,52 + 19,61 \cdot HRC_k$ (4.4)	3,2	60	20	10-60	1600	0,31	ТСП со связующим Э-116
	$\tau = 1,19 \cdot 10^{110} \cdot N^{-2,108}$ (4.5)	3,2	60	20	60	280- 1600	0,82	ВНИИ НП 230
	$\tau = 225,84 \cdot V^{-1,559}$ (4.6)	3,2	60	20	60	1600	0,49 - 0,92	ВНИИ НП 212

скольжения, равной:

$$\tau = \frac{225,84}{V^{1,559}} = 260; \quad V = 0,914 \text{ (м/с)}. \quad (3.8)$$

Аналогично были получены скорректированные значения скоростей скольжения для других зависимостей.

Необходимо подчеркнуть, что математическая обработка экспериментальных данных по предложенному алгоритму в связи с небольшой,



по сравнению с чисто экспериментальной работой, трудоемкостью не ограничена количеством опытов в матрице планирования эксперимента, и, следовательно, может быть использован любой удобный в каждом конкретном случае метод планирования.

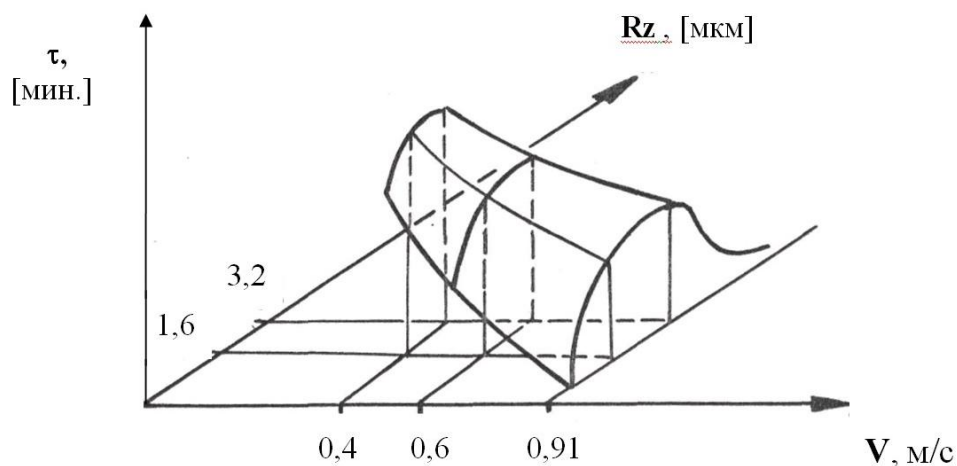


Рисунок 3.20 - Графическая интерпретация принципа корректировки фиксированных уровней однофакторных зависимостей по скорости

Для решения поставленной выше задачи был применен полный факторный эксперимент ПФЭ  $2^6$  [1,72]. Уровни и диапазоны варьирования факторов, представленные в таблице 3.3, были выбраны близкими к параметрам, рекомендованным ГОСТ 11613-65, а также к оптимальным условиям согласно литературных данных, проанализированных выше. Так, например, согласно рисунков 3.6 и 3.8 верхний уровень по фактору  $R_z$  и нижний уровень по фактору  $\delta$  соответствуют максимальной долговечности пары трения с ТСП.

Для каждого фактора на всех уровнях варьирования производился подсчет значений параметра оптимизации, скорректированных для соответствующих уровней "опорного" фактора (скорости скольжения) при фиксированных уровнях остальных факторов. Так, например, для подсчета значения ресурса и, соответствующего верхнему уровню (+1) фактора  $R_{z+1} =$



$X_1 = 3,2$  мкм при скорости скольжения  $V_{\text{табл.}} = 0,914$  м/с (см. табл. 3.1) воспользуемся ф. (3.2):

$$\tau = 306,72 \cdot (R_z - 0,2)^{0,69} \cdot e^{-0,31(R_z - 0,2)} = \dots = 260 \text{ (мин.)}$$

Аналогично определялся ресурс для шероховатости материала основы, соответствующей нижнему уровню ( $R_{z-1} = 1,6$  мкм).

Значение ресурса составило:

$$\tau_{R_{z-1}, V_{\text{табл.}}} = 200 \text{ мин.}$$

Таблица 3.3 - Уровни и диапазоны варьирования факторов в математическом эксперименте ПФЭ  $2^6$

Факторы	Rz, мкм	HRC <sub>o</sub> , ед.	$\delta$ , мкм	HRC <sub>к</sub> , ед.	N, Н	V, м/с
Основной уровень (X <sub>0</sub> )	2,4	55	25	55	1500	0,5
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	0,8	5	5	5	100	0,1
Верхний уровень (+1)	3,2	60	30	60	1600	0,6
Нижний уровень (-1)	1,6	50	20	50	1400	0,4
Код	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
Стандартные условия по ГОСТ 11613-65	3,2	60	20	60	1600	0,42

Для подсчета значений  $\tau$ , соответствующих верхнему и нижнему уровню фактора Rz, но подсчитанных для обоих уровней "опорного" фактора V, вводилась корректировка по принципу, изложенному выше (см. рисунок 3.20). Для  $V_{+1} = 0,6$  м/с получено:

$$\left(\frac{\tau_{R_{z+1}}}{\tau_{R_{z-1}}}\right)_{V_{\text{табл.}}} = \left(\frac{\tau_{R_{z+1}}}{\tau_{R_{z-1}}}\right)_{V_{+1}}, \quad (3.9)$$

откуда:

$$\tau_{Rz-1,V+1} = \left(\frac{\tau_{Rz-1}}{\tau_{Rz+1}}\right)_{Vmmab} \cdot \tau_{Rz+1,V+1}$$

С учётом ф. (4.6) получается:

$$\tau_{Rz+1,Vmmab} = \frac{225,84}{V^{1,559}} = \frac{225,84}{0,6^{1,559}} = 501(\text{мин.})$$

Подставляя найденное значение  $\tau_{Rz+1,V+1}$  в формулу (3.9), получаем:

$$\tau_{Rz-1,V-1} = \frac{200}{260} \cdot 501 = 385(\text{мин.})$$

Аналогично расчет производился и для остальных факторов. Итоговые результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Значения параметра оптимизации для каждого фактора на всех уровнях варьирования, скорректированные для соответствующих уровней фактора  $X_1$  (скорости) при фиксированных уровнях остальных факторов

Факторы		$X_1$		$X_2$		$X_3$		$X_4$		$X_5$		$X_6$	
Уровни фактора		+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
Значения параметров оптимизации и $\tau$ , мин.	$V_+$	50	38	50	52	27	50	50	43	50	661	50	-
	$V_-$	94	72	94	98	51	94	94	81	94	124	-	94
		1	5	1	5	4	1	1	1	1		1	
		2	5	2	6	6	2	2	1	2	3		2

Далее в соответствии с разработанным алгоритмом (рисунок 3.5) производилось заполнение матрицы планирования математического эксперимента (см. приложение А). Причем вначале заполнялась графа (8), где представлены значения параметра оптимизации для соответствующих уровней "опорного" фактора  $X_6$ , и затем в зависимости от его уровня по таблице 3.3 подбирались соответствующие значения параметра оптимизации для остальных факторов (графы (3) - (7)). После этого производился подсчет значений параметра оптимизации для каждого опыта в целом с учетом всего набора комбинаций различных факторов. При этом был использован принцип

корректировки, изложенный выше (см. рисунок 3.20). Так, например, для опыта № 4 получено следующее сочетание значений параметра оптимизации по всем факторам (табл. 3.5).

Таблица 3.5 - Сочетание значений параметра оптимизации по всем факторам для опыта № 4

№ опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub> (Rz)	X <sub>2</sub> (HRC <sub>0</sub> )	X <sub>3</sub> (δ)	X <sub>4</sub> (HRC <sub>k</sub> )	X <sub>5</sub> (N)	X <sub>6</sub> (V)	...	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	...	24
4	+	-385 (Y <sub>1</sub> )	-525 (Y <sub>2</sub> )	+274 (Y <sub>3</sub> )	+501 (Y <sub>4</sub> )	+501 (Y <sub>5</sub> )	+501 (Y <sub>6</sub> )		

Произведем корректировку значения параметра оптимизации для фактора X<sub>1</sub> (Y<sub>1</sub> = τ<sub>Rz-1, HRC<sub>0</sub></sub>, табл. = 385 мин.) под условия факторов X<sub>2</sub> (HRC<sub>0</sub>), для которого = τ<sub>Rz+1, HRC-1</sub>, табл. = 525 мин.).

Составляем пропорцию, аналогичную зависимости (3.8):

$$\left(\frac{\tau_{Rz+1}}{\tau_{Rz-1}}\right)_{HRC_{0\text{табл}}} = \left(\frac{\tau_{Rz+1}}{\tau_{Rz-1}}\right)_{HRC_{0-1}}$$

Откуда:

$$\tau_{Rz-1, HRC_{0-1}} = \tau_{Rz+1, HRC_{0-1}} \left(\frac{\tau_{Rz-1}}{\tau_{Rz+1}}\right)_{HRC_{0\text{табл}}} = 525 \cdot \frac{385}{501} = 403,4(\text{мин.}),$$

где τ<sub>Rz-1, HRC<sub>0</sub></sub> табл. - значение параметра оптимизации на стандартном уровне (см. таблицу 3.3 и таблицу 3.4).

Аналогично производилась дальнейшая корректировка параметра оптимизации под условия фактора X<sub>3</sub> (δ):

$$\left(\frac{\tau_{HRC_{0+1}}}{\tau_{HRC_{0-1}}}\right)_{\delta\text{табл}} = \left(\frac{\tau_{HRC_{0+1}}}{\tau_{HRC_{0-1}}}\right)_{\delta+1}$$

$$\text{Откуда: } \tau_{HRC_{0-1}, \delta+1} = \tau_{HRC_{0+1}, \delta+1} \left(\frac{\tau_{HRC_{0-1}}}{\tau_{HRC_{0+1}}}\right)_{\delta\text{табл}} = 274 \cdot \frac{403,4}{501} = 221(\text{мин.})$$

Уровни остальных факторов совпадают со стандартными значениями факторов (см. таблицу 3.3). Поэтому дальнейшей корректировки полученного значения параметра оптимизации не произойдет. Окончательно для условий опыта № 4 имеем  $Y = \tau = 221$  мин. Значения параметра оптимизации, полученные таким образом, представлены в графе (24) таблицы (см. приложение А).

На следующем этапе производилась реализация плана с целью построения линейной математической модели вида:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i,j=1}^k b_{i,j} X_i X_j, \quad (3.10)$$

где  $y$  - параметр оптимизации;

$i, j$  - порядковые номера факторов;

$b_i$  - основные коэффициенты линейной модели;

$b_{i,j}$  - коэффициенты парных эффектов взаимодействия факторов.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии (3.10) и проверка их статистической значимости производилась в соответствии с рекомендациями работы [73]. С учетом статистически значимых коэффициентов уравнение регрессии приняло вид:

$$\begin{aligned} Y = & 545,43 + 71,12 \cdot X_1 - 159,44 \cdot X_3 + 40,8 \cdot X_4 - 75,13 \cdot X_5 - \\ & - 166,88 \cdot X_6 + 48,69 \cdot X_3 \cdot X_6 + 23 \cdot X_5 \cdot X_6 + 22 \cdot X_3 \cdot X_5 - 21,56 \cdot X_1 \cdot X_6 - \\ & - 20,87 \cdot X_1 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Был проведен статистический анализ полученной модели. С этой целью была проверена гипотеза об адекватности полученного уравнения по критерию Фишера [73]. Так как расчетное значение F-критерия  $F^{\text{расч.}}_{f_2, f_1} = 1,38$  не превышает при 5% уровне значимости ( $\alpha = 0,05$ ) табличное значение F-критерия  $F_{53,5} = 4,46$ , то гипотеза об адекватности уравнения (3.11) не отвергается.

Математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид:

$$\tau = 6596 + 354 \cdot Rz - 134,1 \cdot \delta + 8,2 \cdot \text{HRC}_K - 3 \cdot N - 6907 \cdot V + 97,4 \cdot \delta \cdot V +$$

$$+2,3 \cdot N \cdot V + 0,044 \cdot \delta \cdot N - 269,5 \cdot Rz \cdot V - 5,22 \cdot Rz \cdot \delta \quad (3.12)$$

В заключение проводился анализ полученных результатов. Влияние выделенных факторов было проиллюстрировано графически, путём построения в ранжированный ряд эффектов факторов по степени влияния каждого из них (рисунке 3.21). Из полученной диаграмм следует, что в рассмотренных диапазонах варьирования наибольшее влияние на долговечность пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 оказывает скорость скольжения (фактор  $X_6$ ) и толщина ТСП (фактор  $X_3$ ). Причем меньшей скорости скольжения пары трения (нижний

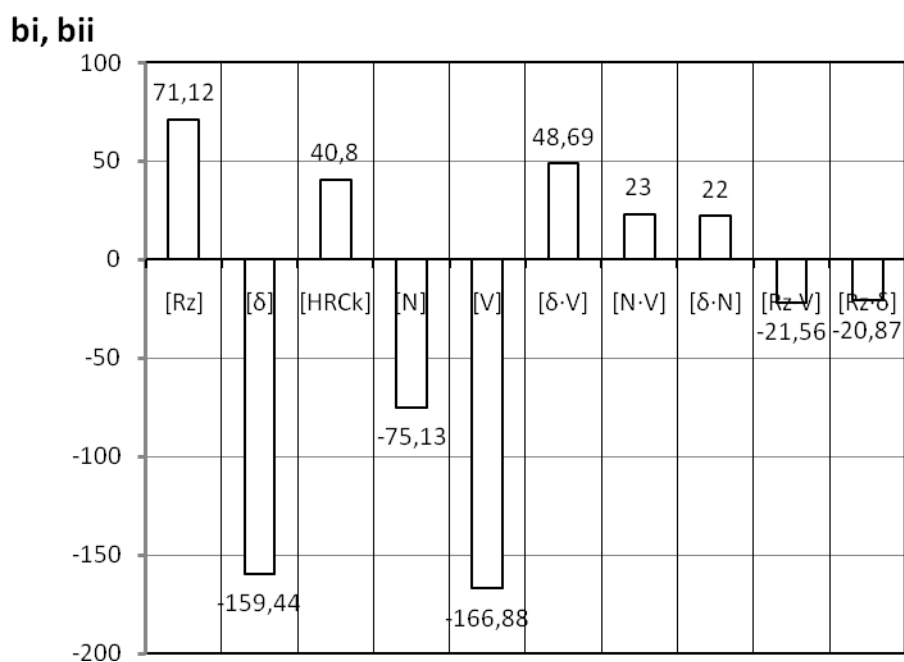


Рисунок 3.21. Диаграмма эффектов выделенных факторов и парных взаимодействий по результатам математического многофакторного

уровень фактора  $V_{-1} = 0,4$  м/с) соответствует большой ресурс, так как коэффициент в уравнении регрессии для этого фактора имеет отрицательный знак. Аналогичный характер зависимости получен и для факторов  $\delta$ ,  $N$  и парных взаимодействий ( $Rz \cdot V$ ) и ( $Rz \cdot \delta$ ). Удовлетворительная сходимость с исходными экспериментальными зависимостями была получена и для остальных факторов. Учитывая, что, с одной стороны, полученная выше математическая модель (3.12) описывает линейное взаимодействие исследуемых факторов (так как первоначально ставилась задача практического опробования

предложенного расчетного метода для выделения наиболее существенных факторов и их взаимодействий), а, с другой стороны, практически все графики (рисунки 3.6-3.11) описываются нелинейными зависимостями (см. таблицу 3.2), на следующем этапе с целью получения универсальной зависимости 2-го порядка решалась задача математического описания комплексного влияния выделенных ранее факторов на ресурс пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с использованием центрального композиционного ротатбельного планирования 2-го порядка [36,74]. При решении поставленной задачи рассматривалось влияние 5 факторов, выделенных на первом этапе математического эксперимента, которые по степени их значимости были расположены в следующем порядке:  $V$ ,  $\delta$ ,  $N$ ,  $Rz$ ,  $HRC_k$ . Уровни и диапазоны варьирования факторов, представленные в таблице 3.4, были выбраны близкими к

Таблица 3.6 - Уровни и диапазоны варьирования факторов в математическом многофакторном эксперименте по типу центрального ротатбельного композиционного плана 2-го порядка для 5 факторов

Факторы		$V$ , м/с	$\delta$ , мкм	$N$ , Н	$Rz$ , мкм	$HRC_k$ , ед.
Основной уровень ( $X_{i0}$ )		0,66	20	800	3,2	35
Верхний уровень (+1)		0,80	25	1050	4,2	45
Нижний уровень (-1)		0,52	15	550	2,2	25
Звёздные точки:	$+\alpha$ (+2,378)	0,99	31,9	1395	5,6	59
	$-\alpha$ (-2,378)	0,33	8,1	20,55	0,8	11
Код		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$

интервалам их изменения по исходным литературным данным (рисунки 3.6-3.11). Например, по данным рисунка 3.19, скорость скольжения пары трения изменялась в диапазоне от 0,42 до 0,92 м/с. По таблице 3.4 диапазон варьирования этого фактора был выбран в интервале от 0,33 до 0,99 м/с. Для факторов  $\delta$  и  $Rz$  рассматривались их оптимальные области. В связи с

повышением требований к точности расчета при мощности математической модели в виде нелинейного уравнения 2-го порядка, было проведено уточнение некоторых исходных зависимостей с помощью параболического интерполирования по методу наименьших квадратов (МНК) [58]. Уточненные исходные зависимости, использованные в математическом эксперименте 2-го порядка, представлены в таблице 3.7.

Расчет математической модели 2-го порядка производился в соответствии с ранее предложенным алгоритмом (рисунок 3.5). В качестве "опорного" фактора также был использован фактор  $V = X_1$ . Значения параметра оптимизации для каждого фактора на 5-ти уровнях варьирования, скорректированные для соответствующих уровней фактора  $X_1$  при фиксированных уровнях остальных факторов, представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.7 - Уточненные исходные зависимости, использованные в математическом эксперименте 2-го порядка

Тип зависимости	Вид уравнения
$\tau = f(V)$	$\tau = 2317 - 4459,4 \cdot V + 2425,8 \cdot V^2$
$\tau = f(\delta)$	$\tau = 0,0017 \cdot \delta^{5,56} \cdot e^{-0,285 \cdot \delta}$
$\tau = f(N)$	$\tau = 3675,9 - 3,3 \cdot N + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot N^2$
$\tau = f(Rz)$	$\tau = 233,8 (Rz - 0,2)^{1,196} \cdot e^{-0,3987 (Rz - 0,2)}$
$\tau = f(HRCk)$	$\tau = 231,52 + 19,61 \cdot HRCk$

Матрица планирования математического многофакторного эксперимента по типу центрального композиционного ротatableльного равномерного планирования второго порядка для 5-ти факторов представлена в таблице (см. приложение Б). Определение значений параметра оптимизации  $Y$  для опытов №№ 43-52 (на основном уровне) производилось путём корректировки величины  $Y_{43}$  (значение параметра оптимизации для опыта № 43 на основном уровне) по следующей формуле:

$$Y = Y_{43} \cdot K_i, \quad (3.13)$$

где  $i = 43-52$  - порядковые номера опытов;  $K_i$  - коэффициент, учитывающий разброс исходных экспериментальных результатов относительно своего среднего значения (по результатам испытаний на воспроизводимость согласно таблице 6 работы [94]) (табл. 3.8).

Таблица 3.8 – Значения коэффициента  $K_i$ , учитывающего разброс исходных экспериментальных результатов относительно своего среднего значения (по результатам испытаний на воспроизводимость согласно таблице 6 работы [94])

Значение $Y_i$	$Y_{43}$	$Y_{44}$	$Y_{45}$	$Y_{46}$	$Y_{47}$	$Y_{48}$	$Y_{49}$	$Y_{50}$	$Y_{51}$	$Y_{52}$
$K_i$	0,88	1,082	0,945	0,698	1,18	1,11	1,092	0,908	1,092	0,908

Таблица 3.9 - Значения параметра оптимизации для каждого фактора на 5 уровнях варьирования, скорректированные для соответствующих уровней фактора  $X_1$  при фиксированных уровнях остальных факторов

Факторы	Уровни факторов	Уровни фактора $X_1$				
		0	+1	-1	+ $\alpha$	- $\alpha$
$X_1$	- $\alpha$	-	-	-	-	1110
	+ $\alpha$	-	-	-	229	-
	-1	-	-	654	-	-
	+1	-	302	-	-	-
	0	430	-	-	-	-
$X_2$	- $\alpha$	85	60	129	45	220
	+ $\alpha$	193	135	293	103	497
	-1	363	255	552	193	937
	+1	358	252	545	191	925
	0	430	302	654	229	1110
$X_3$	- $\alpha$	4120	2894	6267	2194	10636
	+ $\alpha$	724	508	1101	386	1869
	-1	2841	1995	4321	1513	7334
	+1	1412	992	2148	752	3646
	0	2063	1449	3138	1099	5325
$X_4$	- $\alpha$	163	115	249	87	422
	+ $\alpha$	334	234	507	178	861



	-1	394	277	599	210	1017
	+1	407	286	619	217	1051
	0	430	302	654	229	1110
X <sub>5</sub>	-α	137	96	208	73	352
	+α	424	298	645	226	1095
	-1	220	155	335	117	569
	+1	340	239	517	181	878
	0	280	197	426	149	724

Расчет коэффициентов уравнения регрессии и дисперсионный анализ полученных результатов производился на ЭВМ.

Обработка результатов эксперимента, проведенная в соответствии с рекомендациями работ [36,72,73], представлена в приложении В.

После проверки адекватности с учетом статистически значимых коэффициентов уравнение регрессии приняло вид (адекватность модели (3.13) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{\text{расч.}}_{0,05; 33; 9} (0,867) < F^{\text{табл.}}_{0,05; 33; 9} (2,86)$ ):

$$Y = 1358,5 - 405,5 \cdot X_1 - 408,1 \cdot X_3 + 261,3 \cdot X_5 - 159,7 \cdot X_2^2 + 42,3 \cdot X_3^2 - 99,3 \cdot X_4^2 + 132,0 \cdot X_1 \cdot X_3 - 110,8 \cdot X_1 X_5 - 102,6 \cdot X_3 \cdot X_5 \quad (3.14)$$

В натуральных значениях факторов математическая модель приняла вид:

$$\tau = -463,7 - 3142,4 \cdot V - 3,76 \cdot N + 111,1 \cdot \text{HRC}_K + 255,5 \cdot \delta + 635,5 \cdot \text{Rz} - 6,4 \cdot \delta^2 + 6,77 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 - 99,3 \cdot \text{Rz}^2 + 3,77 \cdot V \cdot N - 79,1 \cdot V \cdot \text{HRC}_K - 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot N \cdot \text{HRC}_K \quad (3.15)$$

Пересчет значений  $\tau$  в триботехнический параметр линейной интенсивности изнашивания  $I_h$  производится по формуле:

$$I_h = \frac{\delta_{\text{прир.}}}{V \cdot 60 \cdot \tau} \cdot 10^{-6} \quad (3.16)$$

где  $\delta_{\text{прир.}} = 2 \text{ мкм}$  – толщина приработанной плёнки ТСП со связующими смолами (см. разделы 1.3.4; 3.1.2);

$V$  – скорость скольжения [м/с];

$\tau$  – ресурс пары трения до разрушения [мин.].

Произведем анализ полученной выше модели (3.15). Диаграммы выделенных эффектов представлены на рисунке 3.22.

Как и предполагалось, наиболее значимыми оказались эффекты факторов

$X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , т.е. решающее влияние на ресурс пар трения с ТСП оказывают скорость скольжения, контактная нагрузка и толщина ТСП.

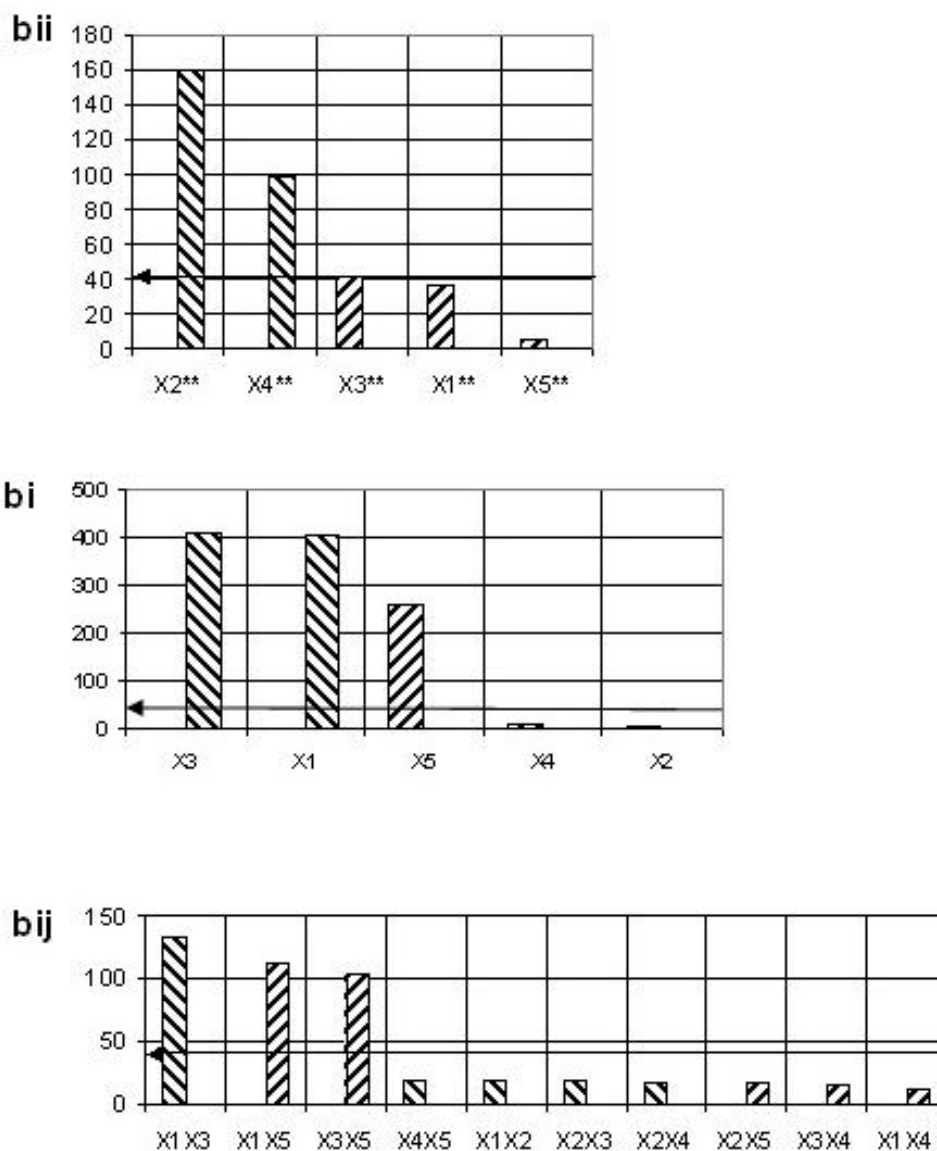


Рисунок 3.22 - Диаграммы выделенных эффектов по результатам математического многофакторного эксперимента 2-го порядка: - положительное влияние; - отрицательное влияние; ← - уровни доверительных интервалов

Причем наибольшие значения коэффициентов при квадратных членах уравнения (с отрицательным знаком) имеют факторы толщины ТСП и шероховатости материала основы. Это свидетельствует о том, что даже при небольших отклонениях от оптимальных значений этих параметров

долговечность пары трения резко снижается. Следует отметить, что линейные эффекты этих факторов оказались статистически незначимыми, что подтверждает корректность проведенных расчетов, так как основные уровни этих факторов соответствовали их оптимальным значениям. Среди линейных эффектов наибольшими оказались влияния факторов контактной нагрузки и скорости скольжения. Отрицательный знак коэффициентов регрессии этих факторов показывает, что с ростом значений  $V$  и  $N$  величина параметра оптимизации, т.е. долговечности фрикционного сопряжения с ТСП, падает.

Положительный эффект фактора  $HRck$  обнаруживает обратную зависимость - с повышением твердости контртела долговечность рассматриваемой пары трения возрастает. Среди 10 парных взаимодействий статистически значимыми оказались эффекты  $(V \cdot N)$ ,  $(V \cdot HRck)$ ,  $(N \cdot HRck)$ .

### 3.2.2 Экспериментальная оценка достоверности полученной модели

Экспериментальная проверка модели (3.15), полученной в результате проведения математического эксперимента (п. 3.2) типа  $\tau = f(N, V, \delta, Rz, HRck)$  по параметру  $I_h$  проводилась на машине трения типа "РП" для пары с ТСП на основе  $MoS_2$  с органическим связующим. Условия испытаний были выбраны согласно рекомендаций ГОСТ 11613-65:  $N = 1600$  Н,  $V = 0,5$  м/с,  $HRck = 60$  ед.,  $\delta = 20$  мкм,  $Rz = 3,75$  мкм ( $Ra_0 = 0,75$  мкм). Отклонение расчетного значения интенсивности изнашивания  $I_h$ , вычисленного при помощи математической модели ( $I_{h \text{ расч.}} = 1,126 \cdot 10^{-10}$ ) от полученных в эксперименте ( $I_{h \text{ эксп.}} = 1,377 \cdot 10^{-10}$ ) составило 18,2%, что считается удовлетворительным при испытаниях на трение и износ.

Корректность проверяемой модели (3.15) была также подтверждена результатами испытаний рассматриваемого типа ТСП на машине трения "МИ", представленными в табл. 2 работы [95]. Эти эксперименты проводились по схеме "ролик-ролик" при  $N = 1600$  Н,  $V = 0,42$  м/с,  $\delta = 20$  мкм,  $HRck = 60$  ед.,  $Rz = 3,2$  мкм. Для рассматриваемых пар трения отклонение расчетного значения долговечности, вычисленного при помощи модели (3.13) ( $I_{h \text{ расч.}} =$

$1,03 \cdot 10^{-10}$ ) от полученного в эксперименте (для ТСП ВНИИ НП 212 с мочевино-формальдегидным связующим  $I_{h \text{ эксп.}} = 9,23 \cdot 10^{-11}$ , а для ТСП ВНИИ НП 230 с эпоксидным связующим  $I_{h \text{ эксп.}} = 1,087 \cdot 10^{-10}$  составило соответственно 11,6% и 5,3%, что считается удовлетворительным при испытаниях на трение и износ.

Таким образом, проведенные проверки показали, что полученная в результате математического эксперимента модель позволяет с достаточной для практики точностью оценивать интенсивность изнашивания не только исследованного в работе, но и других типов фрикционных сопряжений узлов трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с органическими связующими.

В целом, можно заключить, что предложенный алгоритм математического многофакторного эксперимента как с целью анализа факторов, определяющих триботехнические свойства пар трения, так и при математическом описании их комплексного влияния на параметр оптимизации с использованием планирования 2-го порядка может быть использован для решения задач подобного типа. Предложенный расчетный метод является универсальным, так как, во-первых, в качестве параметра оптимизации может быть выбран любой искомый критерий (например, коэффициент трения, весовой или линейный износ и др.), а во-вторых, метод может быть использован для любых других пар трения и смазочных материалов. Данный расчетный метод позволяет значительно снизить объем экспериментальных исследований, которые сводятся лишь к постановке контрольных экспериментов.

### 3.3 Методика и оценка интенсивности изнашивания на основе регрессионных зависимостей в нормальных атмосферных условиях

Проведёнными выше исследованиями (профилометрированием и микроанализом поверхностей трения) было показано, что после приработки возможен выход на поверхность наиболее высоких микронеровностей, которые и принимают на себя через тонкую смазочную плёнку  $\text{MoS}_2$  всю нагрузку.

Связка, находящаяся между этими неровностями, обеспечивает лишь адгезию частиц  $\text{MoS}_2$  и является "резервуаром" для их пополнения при истирании (рисунок 3.23).

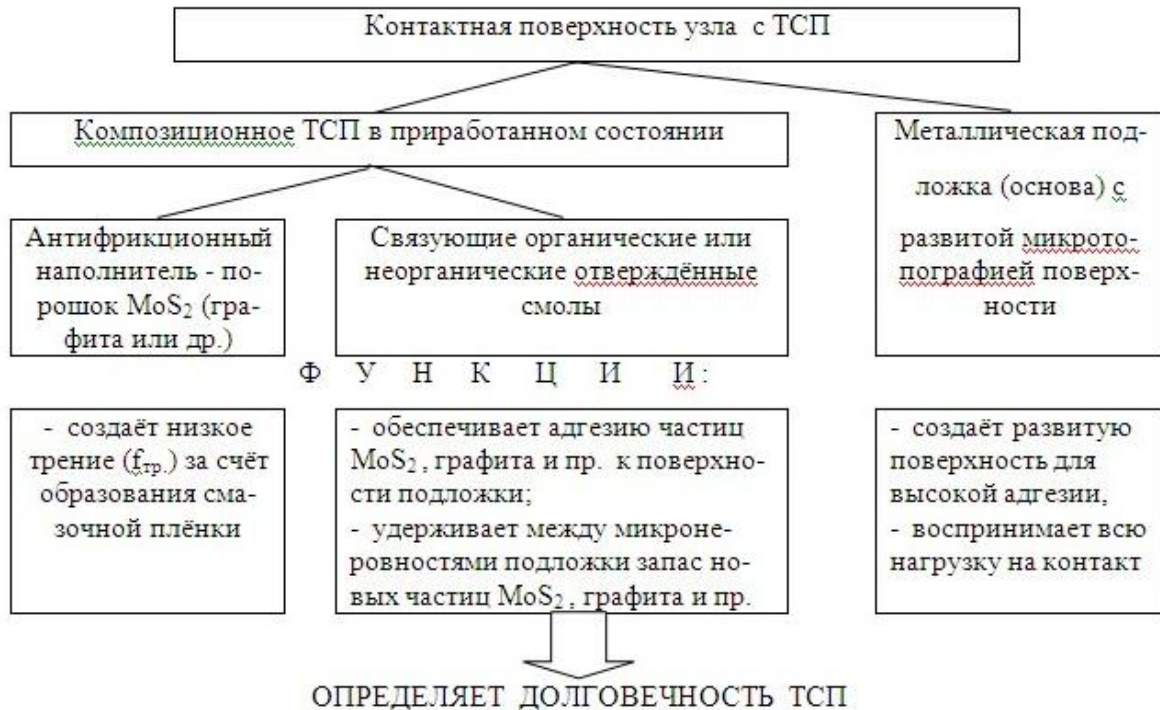


Рисунок 3.23 - Функции отдельных компонентов ТСП, нанесённого на металлическую подложку, при нагрузках, не превышающих предела текучести материала основы

С использованием результатов экспериментальных исследований при повышенной температуре, представленных в разделе 5.1.1 и литературных данных работы [94] (данные получены при испытаниях на машине трения ИТК по схеме «ролик – лента» при вращении ролика диаметром 5 мм с частотой  $n=800$  об/мин., что соответствовало скорости скольжения  $V=0,21$  м/с) для пары с ТСП ВНИИ НП 212 была построена зависимость интенсивности изнашивания от суммарной температуры трения, представленная на рис.3.24 (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,6765$ ):

$$I_h = 7,034 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,0035 \cdot T_{тр.}} + 7,049 \cdot 10^{-14} \cdot e^{0,0296 \cdot T_{тр.}} \quad (3.17)$$

На рис.3.25 представлена также альтернативная зависимость ресурса  $\tau$  от температуры трения, описываемая уравнением (величина достоверности

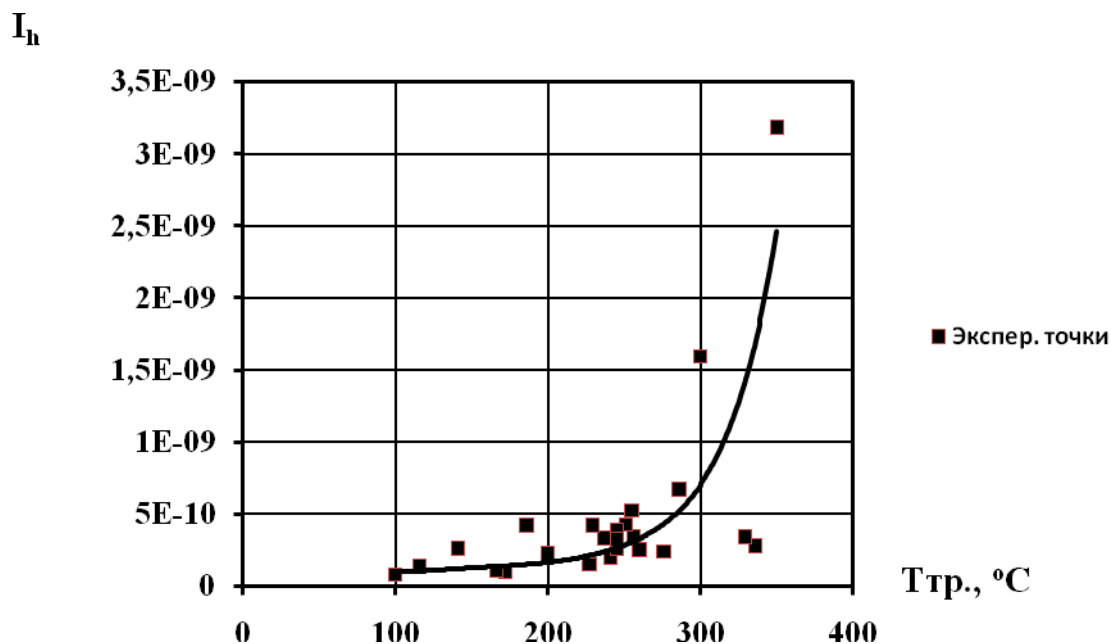


Рис.3.24. Регрессионная зависимость  $I_h=f(T_{тр.})$  для ТСП ВНИИ НП 212 с учётом результатов автора и литературных данных [94]

аппроксимации  $R^2=0,7373$ ):

$$\tau = 9 \cdot 10^6 \cdot T_{тр.}^{-1,969}, \quad (3.18)$$

где  $\tau$  - ресурс в мин.;  $T_{тр.}$  - температура трения в °C.

Для расчёта интенсивности изнашивания пар трения с ТСП, кроме уравнения (3.18) необходимо иметь зависимость типа  $T_{тр.}=f(P,V)$ , т.к.  $T_{тр.}$  является функцией двух основных определяющих её эксплуатационных факторов контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ . Зная эту зависимость, последовательность расчёта интенсивности изнашивания пар трения с ТСП может быть записана в виде, представленном на рисунке 3.26.

В связи со сказанным на следующем этапе решалась задача оперативного получения комплексной зависимости  $T_{тр.} = f(P,V)$  применительно к ТСП ВНИИ НП 212 на испытаниях на установке, представленной на рисунке 2.11.

Экспериментальное решение задачи осуществлялось методом центрального композиционного ротатабельного униформ - планирования 2-го порядка. Уровни и диапазоны варьирования факторов представлены в таблице

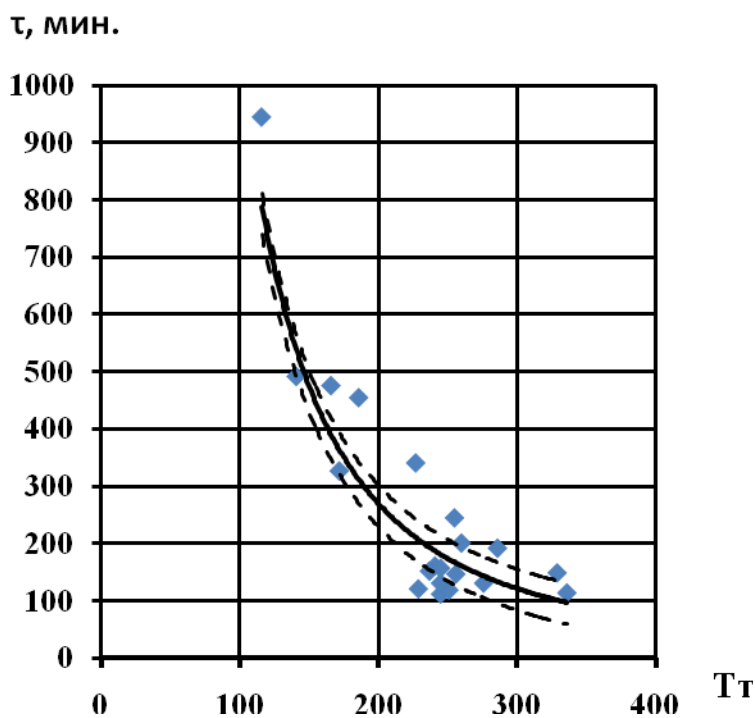


Рисунок 3.25 -  
 Экспериментальные  
 результаты  
 изменения срока  
 службы пары трения  
 с ТСП ВНИИ НП  
 212 в зависимости от  
 температуры трения  
 (при различных Р, V,  
 температуре  
 нагрева Т<sub>об</sub>.) с 95%  
 доверительной  
 областью

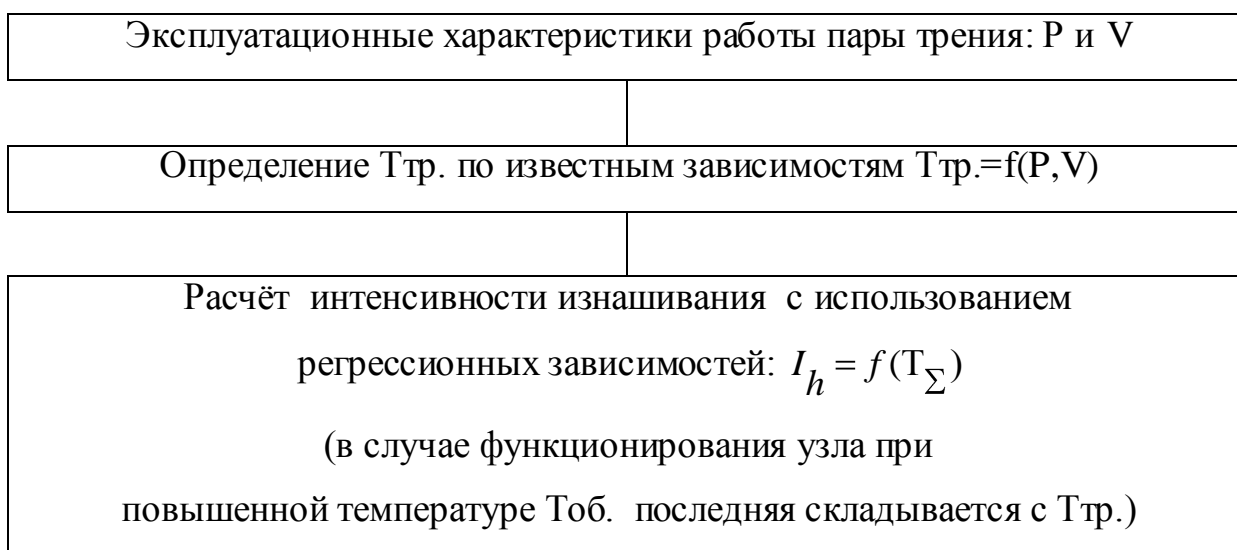


Рисунок 3.26 - Последовательность расчёта интенсивности изнашивания пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> со связующими веществами 2.2 б (в числителе) для машины трения РП. Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить комплексную зависимость влияния нагрузочно-скоростных режимов на температуру трения Т<sub>тр</sub>. рассматриваемой пары (контактное давление рассчитывалось с учётом измеренной после опытов площади пятна контакта) (адекватность модели (3.19) не отвергается при α=0,01, т.к. F<sup>расч.</sup><sub>0,01; 3; 4</sub> (13,7) < F<sup>табл.</sup><sub>0,01; 3; 4</sub> (16,69)):

$$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 47,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 \quad (3.19)$$

Для возможности оценки ресурса работы ТСП по указанной выше методике для различных схем трения с целью получения зависимости  $T_{тр.}=f(P,V)$  были проведены эксперименты по методу центрального композиционного ротатабельного униформ - планирования 2 порядка (таблицы 2.4б и 2.5) и получены математические модели зависимости  $T_{тр.}=f(P,V)$  для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов (таблица 3.10).

Таблица 3.10 - Зависимости  $T_{тр.}=f(P, V)$  для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов

Тип ТСП на основе MoS <sub>2</sub>	Схема трения	Диапазоны изменения		Зависимости $T_{тр.}=f(P,V)$
		N, Н (P, МПа)	V, м/с	
ВНИИ НП 212	Роликовая (модернизиро ванная 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	$T_{тр.} = 67,27 - 98,96 \cdot V + 0,464 \cdot P + 6,42 \cdot P \cdot V - 0,011 \cdot P^2$ (адекватность модели не отвергается при



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

Примечание -  $V$  – м/с;  $P$  - МПа;  $T_{тр.}$  – °С.

Таким образом, в результате проведённых исследований получены зависимости типа  $T_{тр.}=f(P,V)$  и  $I_h = f(T_{тр.})$ , позволяющие реализовать предложенную методику для различных схем трения и условий работы применительно к рассматриваемому типу ТСП. Данная методика может быть использована для оценки интенсивности изнашивания различных типов ТСП и условий трения.

На следующем этапе решалась задача определения корреляционных зависимостей типа  $I_h = f(T_{тр.})$  для ТСП различных составов для возможности широкого использования методики на практике.

Анализ литературы показал, что искомые зависимости могут быть получены из экспериментальных данных, приведённых в монографии [94] путем математической обработки зависимостей ресурса от температуры трения  $\tau = f(T_{тр.})$  для температур свыше 100°С, при которых образуется эффективная смазочная плёнка и коэффициент трения резко снижается до значений  $f_{тр.} \cong 0,02-0,05$  с последующим их пересчётом в параметр интенсивности изнашивания  $I_h$ .

В результате обработки указанных данных были получены зависимости  $I_h = f(T_{тр.})$  для наиболее часто используемых составов суспензионных ТСП (таблице 3.11).

Таблица 3.11 – Регрессионные зависимости интенсивности изнашивания пар трения с ТСП ( $I_h$ ) от температуры трения ( $T_{тр.}$ ) [°С] и альтернативные зависимости для оценки ресурса  $\tau = f(T_{тр.})$

Состав ТСП		Корреляционные зависимости $I_h=f(T_{тр.})$ и $\tau = f(T_{тр.})$ , $\tau$ [мин.], $T_{тр.}$ [°С]
наполнитель	связующее	

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

### 3.4 Методика и оценка антифрикционных характеристик основе регрессионных зависимостей в нормальных атмосферных условиях

Экспериментальными исследованиями, приведёнными в разделе 5.1, установлена тесная корреляционная связь между антифрикционными характеристиками пар трения с ТСП ( $f_{тр.}$ ) и температурой трения ( $T_{тр.}$ ) (рис.3.27).

Характер полученной зависимости объясняется тем, что при  $T_{тр.} < 100-120^\circ\text{C}$  тепловой уровень в ТСП недостаточен для размягчения связующих, что приводит к росту  $f_{тр.}$  с повышением температуры, независимо от того происходит ли это вследствие фрикционного нагрева или под действием внешнего источника тепла, температура становится достаточной для размягчения связующих и ориентации частиц MoS<sub>2</sub> своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения ( $f_{тр.}$  снижается до 0,03-0,04).

Зная регрессионные зависимости  $f_{тр.} = f(T_{тр.})$  для различных ТСП, можно оценить соответствующие антифрикционные характеристики для

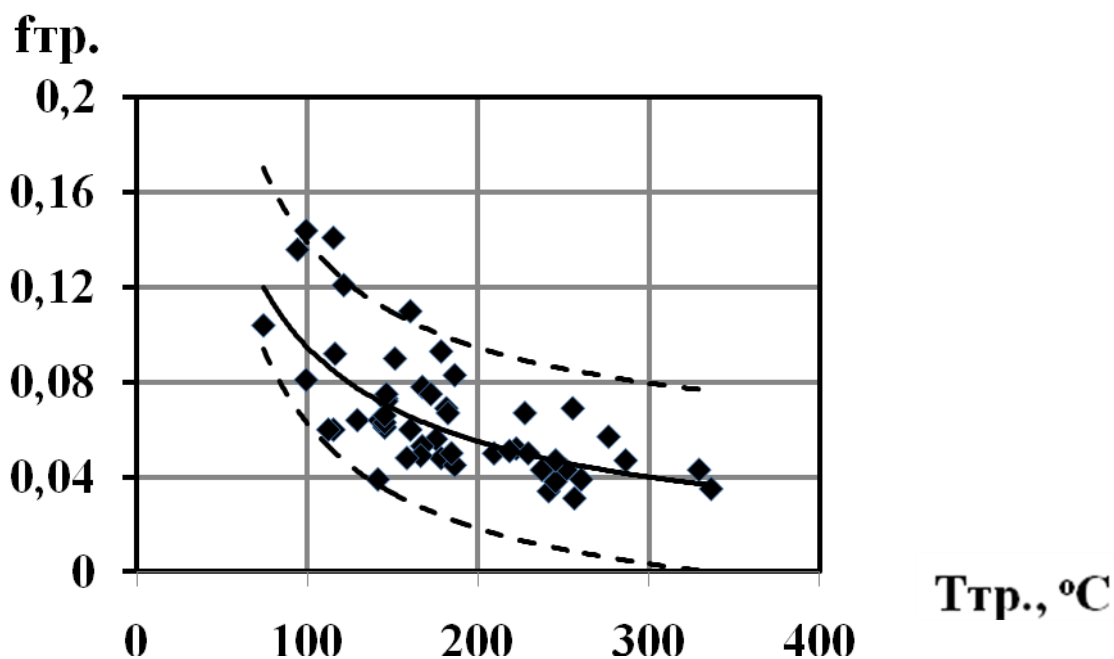


Рис. 3.27. Результаты экспериментального исследования теплофрикционного состояния пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 для режимов: установившегося трения (до нагрева пары трения); наработки при нагреве; установившегося трения (по данным эксперимента без нагрева при получении зависимости  $f_{тр.}=f(P, V)$  с границами 95% доверительной области

этого сопряжения. Последовательность основных этапов предложенной методики представлена на рис.3.28.

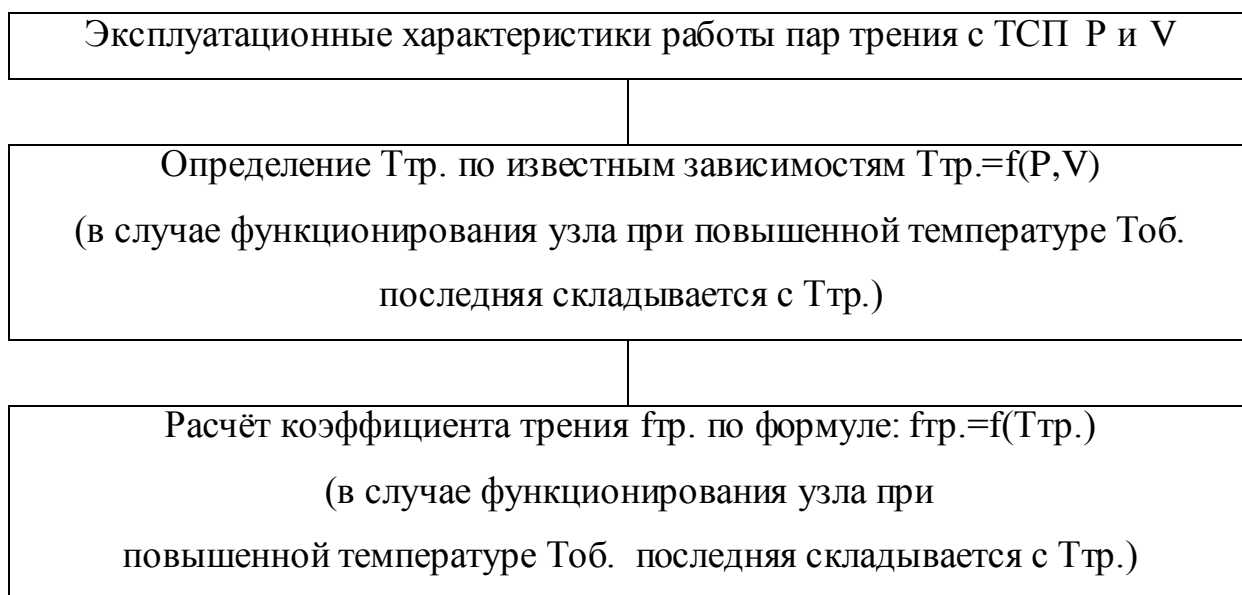


Рис.3.28. Методика расчёта коэффициента трения пар с ТСП на основе регрессионных зависимостей

Для реализации 2 этапа оценки  $f_{тр.}$  согласно алгоритма, представленного на рис.3.28, расчёт  $T_{тр.}$  по корреляционным зависимостям  $T_{тр.}=f(P,V)$  производится с использованием зависимостей, найденные ранее (см. табл. 3.1).

Для реализации 3 этапа методики, приведённой на рис.3.28, необходимо иметь регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ . В результате обработки данных автора для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с использованием ранее полученных данных (рис. 3.27) была построена зависимость  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ , адекватно описываемая уравнением (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,5153$ ):

$$f_{тр.} = 0,01197 + 8,881 \cdot T_{тр.}^{-1} \quad (3.20)$$

На следующем этапе решалась задача определения расчётных зависимостей типа  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для ТСП различных составов, применяемых в производстве. Для расчёта коэффициента трения пар трения с ТСП ВНИИ НП 213 по предложенной выше методике была использована зависимость, полученная проф. Р.М. Матвеевским [65].

В результате аппроксимации графика  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для ТСП ВНИИ НП 213, проведённой методом параболического интерполирования [58], была получена зависимость (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,9764$ ):

$$f_{тр.} = 0,1223 - 0,00047 \cdot T_{тр.} + 6,29 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2, \quad (3.21)$$

В конструкторской практике широко используются высокотемпературные ТСП типа ЦВСП-3с и ВНИИ НП 229 (с силикатом натрия в качестве связующего). В связи с этим на следующем этапе производился анализ экспериментальных данных по этим типам ТСП, представленных в работе [Криони Н.К. Высокотемпературные твёрдые смазочные покрытия в опорах скольжения. ж. Вестник УГАТУ.2009,т.12, №4(33), с.102-105].

В результате аппроксимации указанных графиков типа  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для различных типов ТСП были получены соответствующие зависимости (табл. 3.12).

Проверка корректности предложенной методики оценки

Таблица 3.12 – Регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для пар трения с ТСП различных составов

Тип ТСП	Состав	Регрессионные зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$
ВНИИ НП 212 (данные автора)	MoS <sub>2</sub> + мочевиноформальдегидная смола	$f_{тр.} = 0,01197 + 8,881 \cdot T_{тр.}^{-1}$ (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,5153$ )
ВНИИ НП 213 [65]	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 [52]	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 [52]	MoS <sub>2</sub> + силикат натрия	$f_{тр.} = 0,0821 - 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 2,72 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$ ( $R^2=0,9944$ )

антифрикционных свойств рассматриваемых пар трения, результаты которой представлены в табл. 3.7, показали отклонение расчётных данных от экспериментальных от 15,7 до 30,2 % что признаётся удовлетворительным при испытаниях на трение (табл. 3.13).

Таблица 3.13- Проверка корректности регрессионной зависимости  $f_{тр.}= f(T_{тр.})$  (3.5) для оценки коэффициента трения пары с ТСП ВНИИ НП 212

Тип пары трения	Литературные данные		Расчётные данные по ф.(3)	% отклонения
	T <sub>тр.</sub> , °C	f <sub>тр.</sub>	f <sub>тр.</sub>	
«4-х – шариковая схема», ТСП ВНИИ НП 212 , машина	70	0,12	0,139	15,7
	120	0,11	0,086	21,8
	170	0,08	0,064	19,7

трения КТ-2 [65]	220	0,075	0,052	30,2
------------------	-----	-------	-------	------

### 3.5 Методика и оценка интенсивности изнашивания на основе регрессионных зависимостей в вакууме

С использованием результатов экспериментальных исследований в вакууме (п. 5.3.1) для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 было подтверждено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания рассматриваемых пар трения с ТСП (рис.3.29). На рис.3.30 представлена также альтернативная зависимость ресурса  $\tau$  от температуры трения.

В результате обработки экспериментальных данных, представленных на рис.3.29, для оценки интенсивности изнашивания рассматриваемых фрикционных сопряжений была получена следующая регрессионная зависимость (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,4266$ ):

$$I_h = 10^{-12} \cdot T_{\text{тр.}}^{1,0202}, \quad (3.22)$$

где  $I_h$  – интенсивность изнашивания, мин.;  $T_{\text{тр.}}$  – температура трения, °С.

Для оценки альтернативного показателя ресурса с использованием данных рис.3.30 была получена следующая регрессионная зависимость

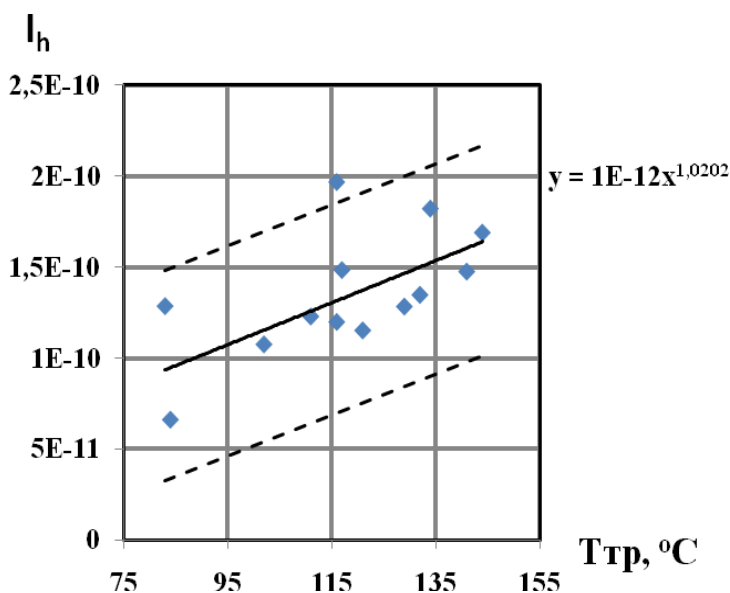


Рис. 3.29. Зависимость  $I_h$  пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме от температуры трения (получена для различных сочетаний контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ ) с границами доверительной 95% области

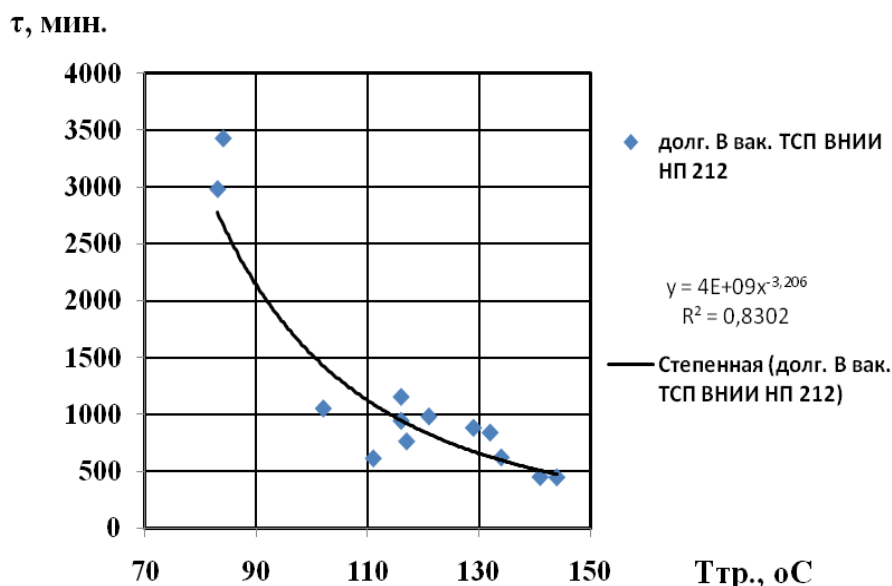


Рис.3.30.  
 Зависимость ресурса пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме от температуры трения от  $T_{тр.}$ .

(величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,8302$ ):

$$\tau = 4 \cdot 10^9 \cdot T_{тр.}^{-3,206}, \quad (3.23)$$

где  $\tau$  – ресурс, мин.;  $T_{тр.}$  – температура трения,  $^\circ\text{C}$ .

Так как температура трения  $T_{тр.}$  является функцией основных определяющих её эксплуатационных факторов контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ , для расчёта интенсивности изнашивания ( $I_h$ ) пар трения с ТСП необходимо иметь регрессионные зависимости типа  $T_{тр.}=f(P,V)$ , позволяющие производить оценку температуры трения для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров. В этом случае алгоритм оценки ресурса пар трения с ТСП может быть записан в виде, представленном ранее на рис.3.26. Регрессионная зависимость для пары с ТСП ВНИИ НП 212, полученная в результате экспериментальных исследований в условиях вакуума (см. раздел 5.3.2) имеет вид (адекватность модели (3.24) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 5; 4} (1,56) < F^{табл.}_{0,05; 5; 4} (6,26)$ ):

$$T_{тр.} = 3,31 + 291,64 \cdot V + 0,643 \cdot P - 282,19 \cdot V^2, \quad (3.24)$$

где  $P$  – [МПа],  $V$ - [м/с],  $T_{тр.}$  - [ $^\circ\text{C}$ ].

### 3.6 Методика и оценка антифрикционных свойств на основе регрессионных зависимостей в вакууме

В результате проведения экспериментальных исследований в вакууме (раздел 5.3.2) установлена корреляционная зависимость антифрикционных характеристик рассматриваемых фрикционных сопряжений от температуры трения (рис.3.31).

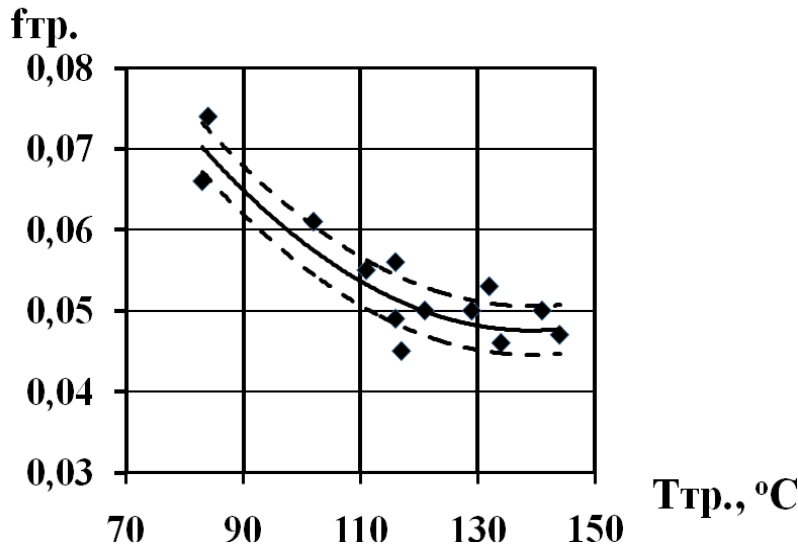


Рис.3.31. Регрессионная зависимость  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума с границами доверительной 95% области

Для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 была рассчитана регрессионная зависимость  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ , адекватно описываемая уравнением (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,8362$ ):

$$f_{тр.} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot T_{тр.}^2 - 0,002 \cdot T_{тр.} + 0,190 \quad (3.25)$$

Учитывая полученную ранее зависимость  $T_{тр.}=f(P,V)$  (3.24) алгоритм расчёта коэффициента трения для рассматриваемых пар с ТСП может быть представлен в виде, представленном ранее на рис.3.28.

Для оценки антифрикционных характеристик пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума, искомые регрессионные зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  были построены с использованием экспериментальных данных, приведённых в работе [94]. Аппроксимация литературных данных осуществлялась при помощи метода параболического интерполирования [58].

В результате аппроксимации графиков  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$  для рассматриваемых типов ТСП были получены следующие зависимости:



- для ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с кремнийорганическим связующим К-55 (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,8693$ ):

$$f_{\text{тр.}} = 0,0905 - 3,46 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{тр.}} + 5,86 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{тр.}}^2, \quad (3.26)$$

- для ТСП на основе графита с кремнийорганическим связующим К-55 (величина достоверности аппроксимации  $R^2= 0,9568$ ):

$$f_{\text{тр.}} = 0,152 - 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{тр.}} + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{тр.}}^2, \quad (3.27)$$

- для ТСП на основе графита со связующим  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,9668$ ):

$$f_{\text{тр.}} = 0,1167 - 3,99 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{тр.}} + 4,23 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{тр.}}^2, \quad (3.28)$$

где  $T_{\text{тр.}}$  - [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Таким образом, для реализации методики оценки антифрикционных характеристик пар трения с ТСП (рисунок 3.28), функционирующих в условиях вакуума, получены корреляционные зависимости  $f_{\text{тр.}}=f(T_{\text{тр.}})$  для пар трения с ТСП различных составов, представленные в таблице 3.14.

Таблица 3.14 - Регрессионные зависимости  $f_{\text{тр.}}=f(T_{\text{тр.}})$  для пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума

Тип ТСП	Состав	Регрессионные зависимости $f_{\text{тр.}}=f(T_{\text{тр.}})$
ВНИИ НП 212 (данные автора)	$\text{MoS}_2$ + мочевино - формальдегидная смола	$f_{\text{тр.}} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{тр.}}^2 - 0,002 \cdot T_{\text{тр.}} + 0,190$ для расширенного диапазона температур $\Delta T=12-144^{\circ}\text{C}$ – по формуле: $f_{\text{тр.}} = 0,381 \cdot T_{\text{тр.}}^{-0,41}$
ВНИИ НП	$\text{MoS}_2$ +	$f_{\text{тр.}} = 0,0905 - 3,46 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{тр.}} +$

213 [94]	кремнийорганическое связующее К-55	$5,86 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$
Типа ЦВСП - 3с [94]	графит + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр.} = 0,152 - 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$
[94]	графит + силикат натрия	$f_{тр.} = 0,1167 - 3,99 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 4,23 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$

Найденную для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 для диапазона  $\Delta T_{тр.} = 83 - 144$  °С термокорреляционную зависимость  $f_{тр.} = f(T_{тр.})$  (3.10) можно уточнять с учётом приведённых в литературе данных. Так, например, для условий космического вакуума, представленных в табл. 3.15, была проведена

Таблица 3.15 - Литературные данные, использованные для уточнения термокорреляционной зависимости  $f_{тр.} = f(T_{тр.})$  применительно к паре с ТСП ВНИИ НП 212 для условий вакуума [127]

Тип пары трения	Литературные данные			Расчётные значения	
	P, МПа	V, м/с	$f_{тр.}$	$T_{тр.},$ °С	$f_{тр.}$
Схема «вал-втулка», $p = 10^{-3} - 10^{-4}$ Па, ТСП ВНИИ НП 212 для условий космоса [127]	9,8 (выход за пределы варьирования)	0,008 (выход за пределы варьирования)	0,13*	11,93	0,138

\* $f_{тр.} = 0,13$  был принят для установившегося режима; при пуске  $f_{тр.} = 0,25$ ; при наработке  $\tau = 10$  час. -  $f_{тр.} = 0,11$ ; при наработке  $\tau = 130$  час. -  $f_{тр.} = 0,035$ .

корректировки термкорреляционной зависимости (3.28), графическая интерпретация которой представлена на рис.3.18.

С учётом этого результата регрессионная зависимость для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 приняла вид (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,8954$ ):

$$f_{гр.} = 0,381 \cdot T_{гр.}^{-0,41} \quad (3.29)$$

для диапазона температур  $\Delta T_{гр.} = 12 - 144 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для условий космического пространства согласно данным работы [127] необходимо учитывать следующую динамику изменения коэффициента трения узлов с ТСП ВНИИ НП 212:

1. при пусках узлов  $f_{гр.} = 0,24-0,29$  (вследствие явления «стоп-эффекта»);
2. на установившемся режиме трения  $f_{гр.} = 0,12-0,14$  (расчёт производится по корреляционной зависимости, предложенной автором (3.16));
3. через 10 часов наработки  $f_{гр.} = 0,10-0,12$ ;
4. через 15 месяцев эксплуатации  $f_{гр.} = 0,03-0,04$ .

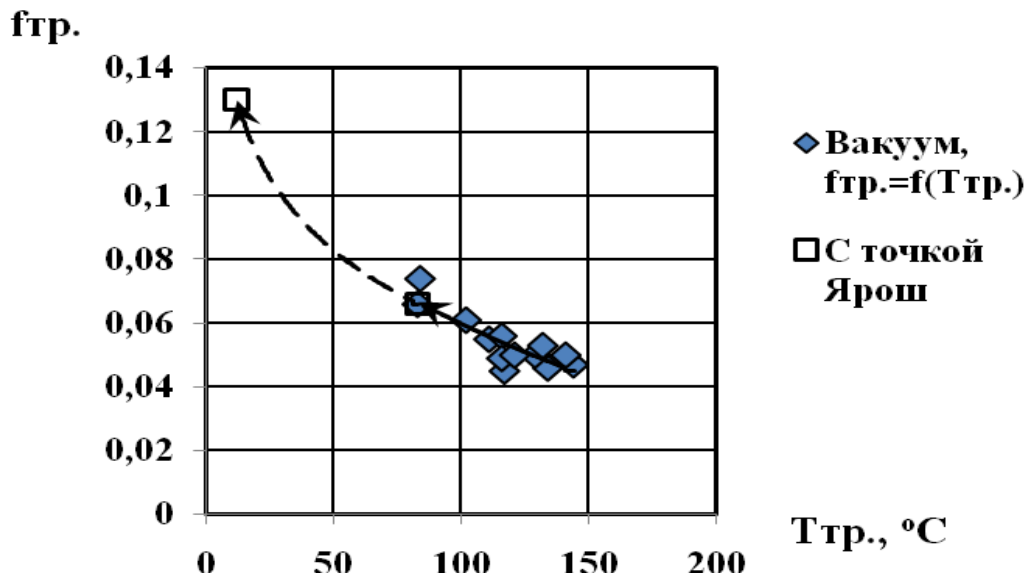


Рис.3.32. Графическая интерпретация корректировки регрессионной зависимости  $f_{гр.}=f(T_{гр.})$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с учётом литературных данных [127]

### 3.7 Выводы к главе 3

В результате выполнения главы 3 были получены следующие выводы:

1. вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75-80%) приходится на период приработки и лишь 20-25% - на установившийся режим трения, т.е. смазочная плёнка толщиной в 2-3 микрометра обеспечивает в основном функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия;

2. в процессе приработки исходная толщина ТСП (15-20мкм) уменьшается настолько (2-5мкм), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную плёнку  $\text{MoS}_2$ ;

3. в результате рентгеновского микроанализа трущихся поверхностей установлено:

- на всех этапах наработки, начиная с окончания приработки, кроме основных элементов смазочной плёнки  $\text{MoS}_2$ , т.е. Mo и S, на диаграммах наблюдается Fe;

- по мере наработки на неповреждённых участках, где сохранилась плёнка ТСП, мощность пика, соответствующего железу, возрастает;

4. ресурс работы сопряжений с ТСП определяется ресурсом связующих составляющих;

5. разработана методика основанного на математическом эксперименте расчётного метода комплексной оценки триботехнических показателей узлов трения с ТСП;

6. в результате проведения математического полнофакторного эксперимента ПФЭ  $2^6$  для факторов скорости скольжения ( $V=0,4-0,6\text{м/с}$ ), контактной нагрузки ( $N=1400-1600\text{ Н}$ ), толщины ТСП ( $\delta =20-30\text{ мкм}$ ), шероховатости основы ( $R_z =1,6-3,2\text{ мкм}$ ), твёрдости контртела и основы ( $\text{HRC}_o =50-60$ ,  $\text{HRC}_k=50-60$  соответственно) несущественным было признано влияние фактора твёрдости основы  $\text{HRC}_o$ ;

7. с целью получения универсальной зависимости 2-го порядка на втором этапе решалась задача математического описания комплексного влияния

выделенных ранее факторов на ресурс пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 с использованием центрального композиционного ротатбельного планирования 2-го порядка; диапазоны варьирования факторов:  $V=0,33-0,99\text{ м/с}$ ;  $N=20,5-1395\text{ Н}$ ;  $\delta =8,1-31,9\text{ мкм}$ ;  $Rz =0,8-5,6\text{ мкм}$ ;  $HRC_k=11-59$ ; в результате проведения математического эксперимента получена соответствующая модель, адекватность которой была проверена по коэффициенту Фишера;

8. корректность полученной в результате реализации математического эксперимента модели 2 порядка была подтверждена сравнением с результатами испытаний рассматриваемого типа ТСП;

9. выявлено определяющее влияние температурного фактора на интенсивность изнашивания и коэффициент трения рассматриваемых сопряжений для условий нормальной атмосферы и вакуума;

10. разработана методика оценки интенсивность изнашивания пар трения с ТСП с использованием универсальных регрессионных зависимостей температуры трения от нагрузочно - скоростных параметров работы узла и термокорреляционных зависимостей интенсивности изнашивания от температуры трения для нормальной атмосферы и вакуума; получены соответствующие модели применительно к парам трения с ТСП различных составов;

11. разработана методика оценки антифрикционных свойств пар трения с ТСП на основе использования регрессионных зависимостей температуры трения от контактного давления и скорости скольжения узла и термокорреляционных зависимостей коэффициента трения от температуры трения для нормальной атмосферы и вакуума; определены соответствующие модели для ТСП различных составов.

## ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТОРСКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

### 4.1 Влияние материала основы и его предварительной обработки

#### 4.1.1 Сравнение интенсивности изнашивания, антифрикционных свойств

Сравнительные испытания на износостойкость и антифрикционные свойства различных типов композиционных ТСП проводились в соответствии с методикой, изложенной в п.2.1.2. Анализ результатов экспериментов, представленных в таблице 4.1 и на рис. 4.1, показал, что наибольшей износостойкостью при низком значении  $f_{тр.}$  обладают ТСП ВНИИ НП 212 ( $I_h = 1,7 \cdot 10^{-10}$ ;  $f_{тр.} = 0,056$ ) и ВАП-2 ( $I_h = 1,77 \cdot 10^{-10}$ ;  $f_{тр.} = 0,044$ ), т.е. покрытия с  $MoS_2$  наполнителем.

Таблица 4.1 - Сравнительные интенсивность изнашивания и антифрикционные свойства различных типов ТСП (машина трения СМТ-1, пара ШХ15-ШХ15,  $N=980$  Н;  $V=0,5$  м/с)

Тип ТСП	Наполнитель	Связка	$I_h$	$f_{тр.}$	
				приработка	установ. режим
ВНИИ НП 212	$MoS_2$	карбомидная смола	$1,7 \cdot 10^{-10}$	0,163	0,056
ВАП-2	$MoS_2$	эпоксидная смола	$1,77 \cdot 10^{-10}$	0,078	0,044
ЦВСП-3	графит С-1 + $CdO$	кремнийорганич. смола	$4,01 \cdot 10^{-10}$	0,070	0,040
Электрофоретическое покрытие	графит С-1	эмаль	$2,0 \cdot 10^{-9}$	0,076	0,076

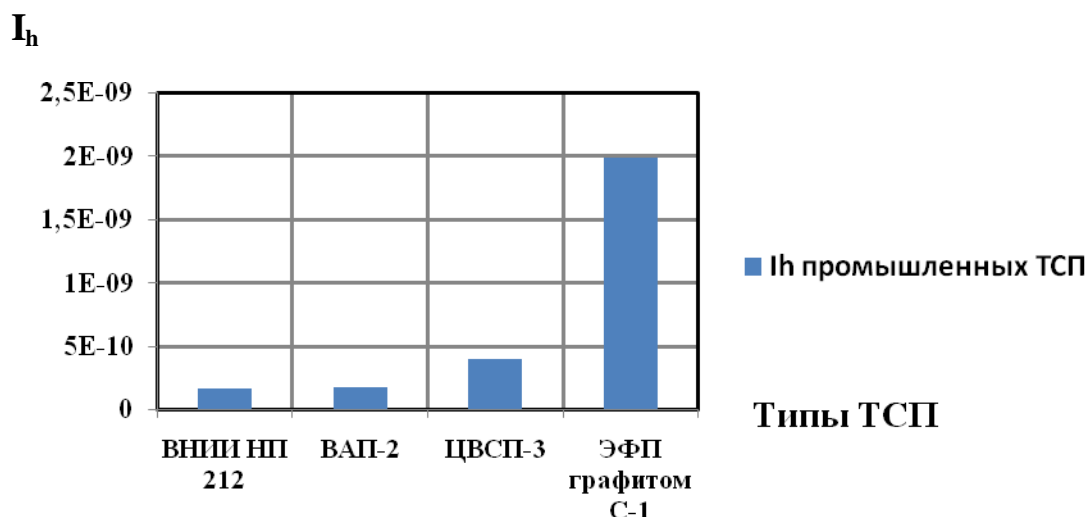


Рис.4.1. Сравнительная износостойкость различных типов промышленных ТСП (машина трения СМТ-1, пара ШХ15-ШХ15, N=980 Н; V=0,5м/с)

#### 4.1.2 Триботехнические показатели твёрдосмазочных покрытий на титановой основе

В связи с тем, что многие пары трения изготавливаются из титановых сплавов, имеющих низкие антифрикционные характеристики, были проведены исследования работоспособности указанных пар с ТСП, нанесёнными на предварительные подслои (таблица 4.2, рисунок 4.2). Из числа исследованных наилучшие характеристики показало предварительное гальванохромирование и химическое никелирование.

Таблица 4.2– Триботехнические показатели ТСП на титановой основе (машина трения СМТ-1, пара ВТ20-ШХ15; N=980 Н; V=0,5м/с)

Тип ТСП	Предварительная обработка основы	$\tau$ , мин.	$I_h$	$f_{тр.}$	
				прираб отка	устан. режим
ВАП-2	-	13	$5,21 \cdot 10^{-9}$	0,070	0,052
---- « ---	гальванический Cr	86	$7,88 \cdot 10^{-10}$	0,120	0,048

	( $\delta=4\text{мкм}$ )				
--- « ---	электроискровое легирование (ВК6М)	19	$3,57 \cdot 10^{-9}$	0,069	0,049
ЦВСП-3	-	-	-	-	-
--- « ----	гальванический Cr ( $\delta=4\text{мкм}$ )	160	$4,23 \cdot 10^{-10}$	0,080	0,040
--- « -----	химический Ni ( $\delta=6\text{мкм}$ )	180	$3,76 \cdot 10^{-10}$	0,050	0,034
--- « ---	электроискровое легирование (ВК6М)	22,3	$3,04 \cdot 10^{-9}$	0,079	0,046

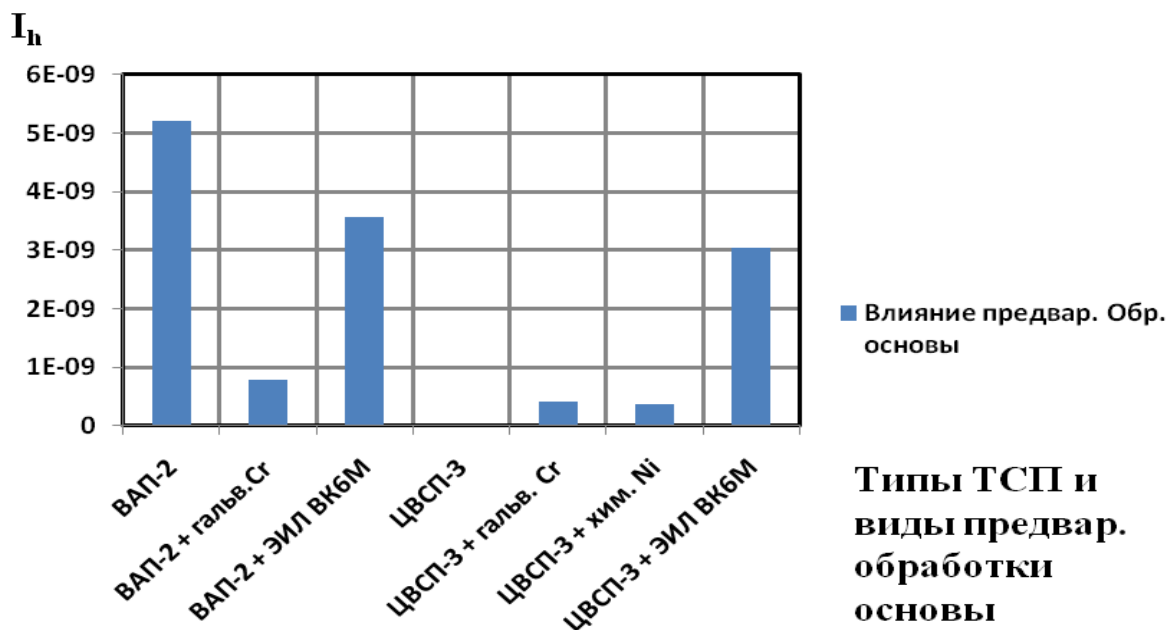


Рис. 4.2. Триботехнические показатели ТСП на титановой основе (машина трения СМТ-1, пара ВТ20-ШХ15; N=980 Н; V=0,5м/с)

#### 4.2 Оценка комплексного влияния конструкторско-технологических факторов

Известно, что высокая надежность работы ТСП в узлах трения может быть обеспечена лишь при условии поддержания оптимальных технологических параметров. Однако до настоящего времени в технической



литературе решению задачи технологической оптимизации пар трения с ТСП не уделялось достаточного внимания. В связи со сказанным в настоящей работе ставилась задача исследования комплексного влияния технологических факторов на ресурс пар трения с использованием ТСП (согласно ГОСТ 11613-65).

Исследования проводились по методике, изложенной выше с использованием математического планирования эксперимента по методу случайного баланса. Для построения матрицы испытаний была применена матрица полного факторного эксперимента типа  $2^3$ . Первые три столбца, построенные по обычному плану, составили полуреплику типа  $2^{3-1}$ . Факторы  $X_4$  и  $X_5$  образовали вторую полуреплику при генерирующих соотношениях:  $X_4 = (-X_1 \cdot X_2)$  и  $X_5 = (-X_2 \cdot X_3)$ . Матрица планирования и результаты эксперимента, проведенного по методу случайного баланса представлены в таблице 4.3 ( $X_1$  – толщина ТСП в мкм;  $X_2$  и  $X_3$  – шероховатость основы и контртела по параметру  $R_a$ ,  $X_4$  и  $X_5$  - соответственно твёрдость основы и контртела).

Таблица 4.3 - Матрица планирования и результаты эксперимента в задаче исследования комплексного влияния технологических факторов на ресурс  $\tau$  пар трения с ТСП

№ опы та	Факторы					Парные взаимодействия			У= $\tau$ , мин.	У*, мин.	У**, мин.	fтр.
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_1X_3$	$X_2X_5$	$X_4X_5$				
	$\delta$	$R_{ao}$	$R_{ak}$	HRC <sub>k</sub>	HRC <sub>o</sub>							
1.	+	+	+	-	-	+	-	+	592	430	228	0,045
2.	+	+	-	-	+	-	+	-	566	404	359	0,048
3.	+	-	+	+	+	+	-	+	547	431	229	0,042
4.	+	-	-	+	-	-	+	-	462	346	301	0,048
5.	-	+	+	+	-	-	-	-	385	339	339	0,046
6.	-	+	-	+	+	+	+	+	484	438	191	0,046

7.	-	-	+	-	+	-	-	-	320	320	320	0,047
8.	-	-	-	-	-	+	+	+	514	514	267	0,044

Однородность ряда дисперсий при равном числе испытаний на каждом режиме оценивалась при помощи критерия Кохрана [102]. Условие  $G_{\max} < G_{\text{табл}}$  оказалось выполненным, т.к.  $G_{\max} = 0,33$ , а по табл. УШ [100] для  $\alpha = 0,05$ ,  $k = m = 8$ ,  $n - 1 = 2$   $G_{\text{табл}} = 0,5157$ . На основании этого была принята гипотеза об однородности дисперсий. Дисперсия воспроизводимости составила  $S_y = 4,01$ .

Оценка значимости влияния отдельных факторов на ресурс ( $\tau$ ) производилась при помощи диаграмм рассеяния средних значений результатов наблюдений по уровням факторов (рисунок 4.3).

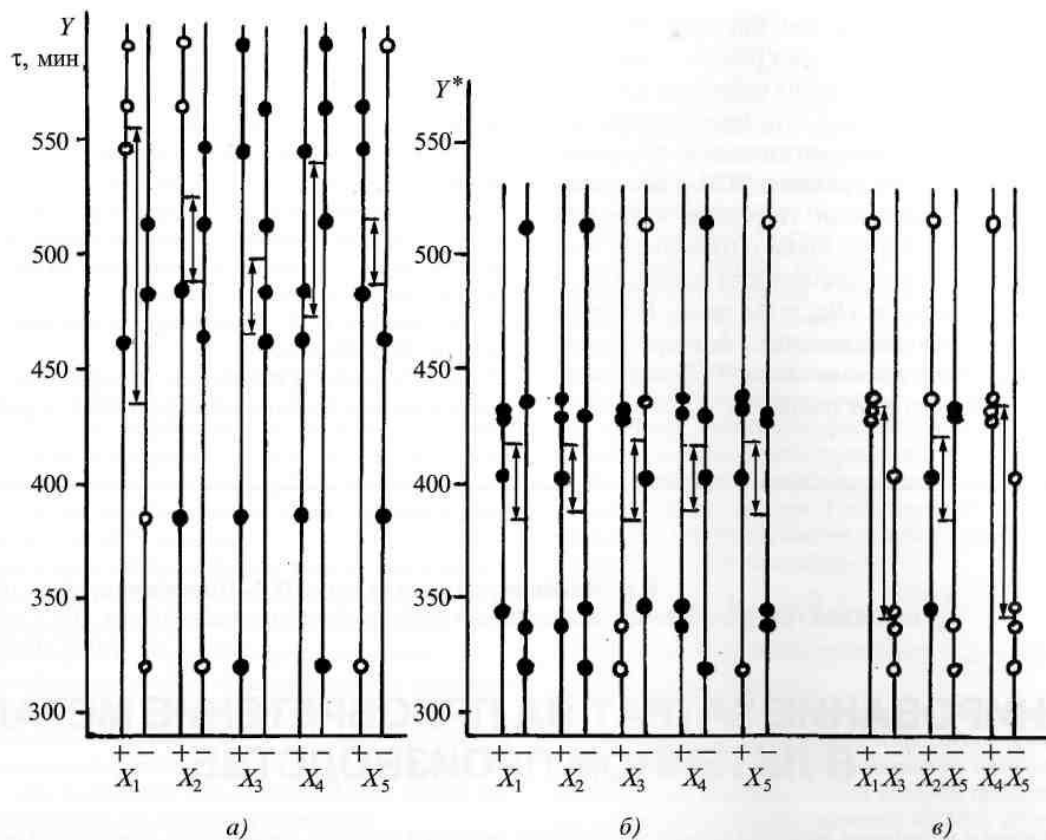


Рисунок 4.3 - Диаграммы рассеяния результатов наблюдений в задаче исследования влияния технологических факторов на ресурс пар трения с ТСП ВНИИ 212: а - по исходным данным; б - по скорректированным данным на втором этапе выделения значимых факторов; в – для парных взаимодействий

Обработка результатов эксперимента по исследованию влияния технологических факторов на ресурс пары трения с ТСП производилась по методике, изложенной в работах [75,40].

Статистически значимыми коэффициентами уравнения регрессии оказались следующие эффекты:  $b_0 = 484$ ;  $b_1 = 58$ ;  $b_{13} = -51$ ;  $b_{45} = -51$ .

Таким образом, была получена следующая математическая модель рассматриваемого взаимодействия:

$$Y = 484 + 58 \cdot X_1 + 51 \cdot X_1 \cdot X_3 + 51 \cdot X_4 \cdot X_5 \quad (4.1)$$

Диаграммы эффектов, выделенных по методу случайного баланса, представлены на рисунке 4.4.

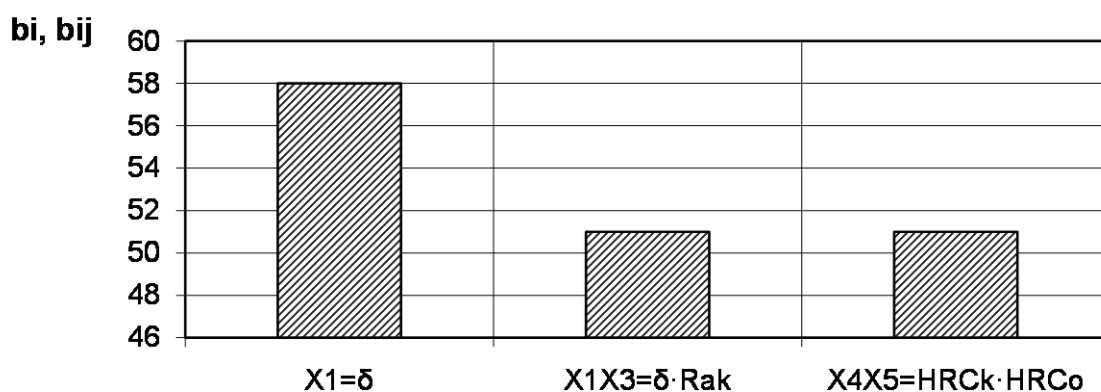



Рисунок. 4.4. Диаграммы эффектов, выделенных по методу случайного баланса при исследовании комплексного влияния конструкторско - технологических факторов на ресурс пар трения с ТСП:  - положительное влияние

Анализ вышеприведённых данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Из числа рассмотренных конструкторско - технологических факторов наибольшее влияние на ресурс ТСП оказывает толщина нанесённого слоя покрытия. В результате эксперимента подтверждено, что оптимальной толщиной ТСП типа ВНИИ НП следует считать величину  $20 \text{ мкм} \pm (2 - 3) \text{ мкм}$ , так как с повышением толщины покрытия (что соответствует нижнему уровню фактора ( $\delta_0 = 28 \text{ мкм}$ )), происходит снижение ресурса пары трения скольжения с ТСП, что удовлетворительно согласуется с литературными данными [95].

Таким образом, технологическое обеспечение качественного нанесения ТСП по толщине покрытия является одним из решающих условий надежного функционирования узла трения с применением ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ .

2. Близкими по значимости с эффектом  $X_1$  являются эффекты парных взаимодействий  $X_1X_3$  и  $X_4X_5$ , то есть совместное влияние толщины покрытия ( $\delta_o$ ) и шероховатости контртела ( $R_{ак}$ ), а также сочетание твердостей материала основы и контртела. Рассматривая первый парный эффект и учитывая оптимальный уровень толщины покрытия 20 мкм, следует отметить, что большей истираемости узла трения способствует большая шероховатость поверхности (из рассматриваемого диапазона), то есть  $R = 0,4$  мкм. Этот вывод также удовлетворительно согласуется с литературными: данными [13], а именно - шлифованная поверхность контртела является в данном фрикционном сопряжении оптимальной.

Рассматривая второе парное  $X_4X_5$ , характеризующее совместное влияние твердостей материала основы и контртела, необходимо отметить, что оптимальной по истираемости, вероятно, окажется та пара трения, в которой твердости материала основы и контртела будут возможно более близкими. Для рассмотренной задачи этот случай соответствует сочетанию  $\text{HRC}_o = 50$  ед.,  $\text{H5C}_к = 50$  ед. на верхнем уровне, а также  $\text{HRC}_o = 28$  ед. и  $\text{H5C}_к = 34$  ед. на нижнем уровне.

3. Влияние технологических факторов на коэффициент трения установившегося режима в рассмотренных диапазонах варьирования незначительно.

Наряду с параметром ресурса важное значение при оценке триботехнических свойств пар трения с ТСП имеет способность данных покрытий к приработке, т.е. прирабатываемость, которая оценивается чаще всего длительностью процесса приработки [43].

В связи со сказанным в настоящей работе ставилась задача исследования комплексного влияния конструкторско - технологических факторов на прирабатываемость пар трения с использованием ТСП. Технологические

факторы и методика экспериментов были аналогичны рассмотренным ранее при оценке их влияния на истираемость.

Матрица планирования и результаты эксперимента, проведенного по методу случайного баланса представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Матрица планирования и результаты эксперимента в задаче исследования комплексного влияния конструкторско - технологических факторов на время приработки  $\tau_{\text{прир.}}$  пар трения ЛА с ТСП

№ опы та	Факторы					Парные взаимодействия			У= $\tau_{\text{прир.}}$ мин.	У*, мин.	У**, мин.	fтр.
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>5</sub>	X <sub>4</sub> X <sub>5</sub>				
	$\delta$	R <sub>ао</sub>	R <sub>ак</sub>	HRC <sub>к</sub>	HRC <sub>о</sub>							
1.	+	+	+	-	-	+	-	+	18,0	11,6	15,4	0,045
2.	+	+	-	-	+	-	+	-	19,3	12,9	12,9	0,048
3.	+	-	+	+	+	+	-	+	12,0	9,8	13,6	0,042
4.	+	-	-	+	-	-	+	-	17,0	14,8	14,8	0,048
5.	-	+	+	+	-	-	-	-	19,3	10,7	12,8	0,046
6.	-	+	-	+	+	+	+	+	18,2	9,6	15,5	0,046
7.	-	-	+	-	+	-	-	-	10,3	10,3	12,4	0,047
8.	-	-	-	-	-	+	+	+	10,3	10,3	16,2	0,044

Однородность ряда дисперсий при равном числе испытаний на каждом режиме оценивалась при помощи критерия Кохрана [102]. Условие  $G_{\text{max}} < G_{\text{табл}}$  оказалось выполненным, т.к.  $G_{\text{max}} = 0,405$ , а по табл. У111 [101] для  $\alpha = 0,05$ ,  $k = m = 8$ ,  $n - 1 = 2$   $G_{\text{табл}} = 0,5157$ . На основании этого была принята гипотеза об однородности дисперсий. Дисперсия воспроизводимости составила  $S_y = 4,01$ .

Оценка значимости влияния отдельных факторов на длительность приработки ( $\tau_{\text{прир}}$ ) производилась при помощи диаграмм рассеяния средних значений результатов наблюдений по уровням факторов (рисунок 4.5). Момент прекращения отсеивания был зафиксирован с помощью критерия Фишера.

Статистически значимыми коэффициентами уравнения регрессии оказались следующие эффекты:  $b_0 = 15,55$ ;  $b_2 = 3,2$ ;  $b_{24} = -1,03$ ;  $b_{13} = -0,93$ ;  $b_{45} = -0,93$ .

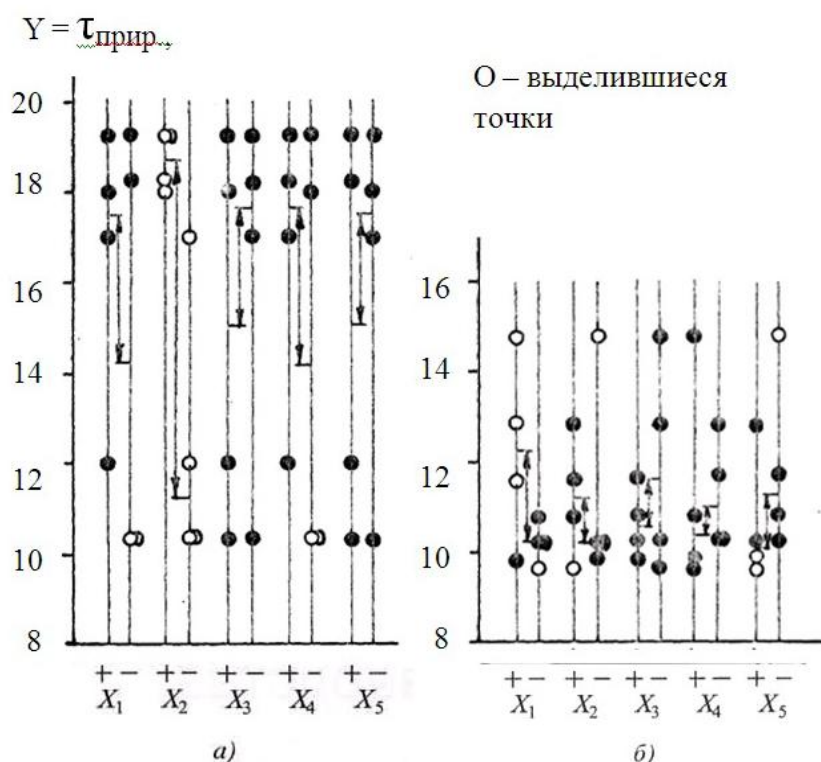


Рисунок 4.5 - Диаграмма рассеяния результатов наблюдений в задаче исследования влияния конструкторско - технологических факторов на прирабатываемость пар трения с применением ТСП ВНИИ 212: а - по исходным данным; б - по скорректированным данным на втором этапе

Таким образом, была получена следующая математическая модель рассматриваемого взаимодействия:

$$y = 15,55 + 3,2 \cdot X_2 - 1,03 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,93 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,93 \cdot X_4 \cdot X_5, \quad (4.2)$$

Проведенный статистический анализ адекватности полученного уравнения (4.2) с экспериментальными данными по критерию Фишера показал, что гипотеза об адекватности данной математической модели не отвергается.

Диаграммы эффектов, выделенных по методу случайного баланса, представлены на рисунке 4.6.

После подстановки и соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид:

$$\tau_{\text{прир.}} = 22,41 - 13,77 \cdot R_{\text{ao}} + 0,206 \cdot R_{\text{ao}} \cdot \text{HRCk} + 1,03 \cdot \delta \cdot R_{\text{ak}} - 0,0106 \cdot \text{HRCo} \cdot \text{HRCk} \quad (4.3)$$

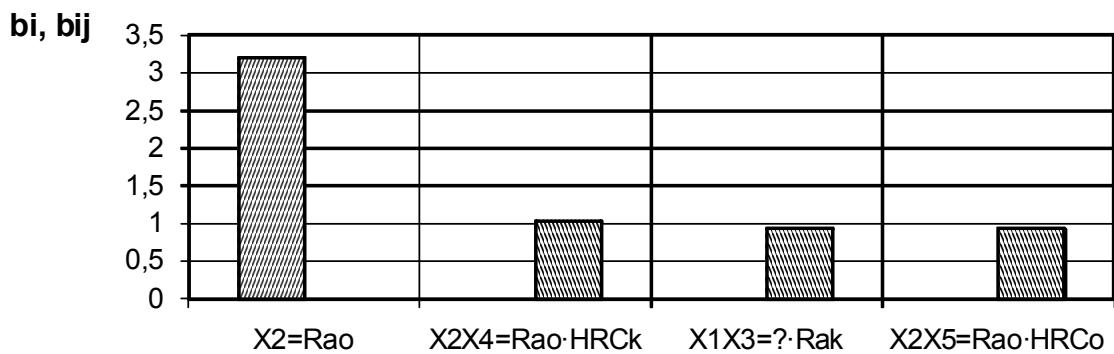




Рисунок 4.6 - Диаграммы эффектов, выделенных по методу случайного баланса при исследовании комплексного влияния конструкторско - технологических факторов на прирабатываемость пар трения ЛА с ТСП:  - положительное влияние;  - отрицательное влияние

Анализируя полученную выше модель (4.3), следует отметить, что наиболее существенное влияние на продолжительность периода приработки пары трения с ТСП оказывает фактор  $X_2$ , т.е. шероховатость материала основы. Причем оптимальная по долговечности шероховатость  $R_{\text{ao}} = 0,75$  мкм приводит к увеличению времени приработки фрикционного сопряжения, т.е. способствует образованию высокоэффективной долговечной смазочной пленки на поверхности трения. Обработка материала основы с более грубой шероховатостью, полученная также в результате пескоструйной обработки, но с использованием более крупного абразива (корунда), приводит понижению периода приработки, что согласно топографической модели (см. главу 3) происходит вследствие ускорения момента касания отдельных неровностей поверхности контртела с более высокими для этого случая выступами

неровностей профиля поверхности материала основы при абразивном характере процесса изнашивания ТСП в период приработки.

Статистически значимыми оказались также парные эффекты  $X_2 \cdot X_4 = R_{ao} \cdot HRC_o$ ;  $X_1 \cdot X_3 = \delta \cdot R_{ak}$ ;  $X_4 \cdot X_5 = HRC_k \cdot HRC_o$ . Рассматривая первое взаимодействие, следует отметить, что сокращению периода приработки при оптимальной по долговечности шероховатости материала основы  $R_{ao} = 0,75$  мкм способствует повышенная твердость материала контртела и, наоборот, при более высокой шероховатости материала основы - пониженная твердость контртела. В обоих случаях быстрее происходит сближение поверхностей трения до оптимальных расстояний, соответствующих установившемуся режиму трения.

Рассматривая второе парное взаимодействие, характеризующее совместное влияние толщины ТСП и шероховатости материала контртела, необходимо отметить, что сокращению приработки пары трения с ТСП при оптимальной по долговечности толщине последнего способствует повышенная шероховатость поверхности контртела, а при увеличенной толщине ТСП аналогичный эффект наблюдается при снижении шероховатости контртела, что, вероятно, связано с неоптимальными режимами трения в этом случае, т.к. только повышенная  $R_{ak}$  (в данном случае шлифовальная поверхность контробразца) способствует хорошему удержанию  $MoS_2$  на поверхности трения, т.е. созданию благоприятных условий для протекания процессов избирательного переноса. Анализ третьего парного взаимодействия показывает, что сокращению периода приработки способствует также подбор материалов с возможно более близкими значениями твердости.

Таким образом, учитывая результаты математического эксперимента по исследованию влияния эксплуатационно-технологических факторов на долговечность пары трения с ТСП, следует отметить, что при условии обеспечения максимальной долговечности рассматриваемой пары, т.е. при  $\delta = 18$  мкм,  $R_{ao} = 0,75$  мкм ( $R_z = 3,2$  мкм),  $R_{ak} = 0,4$  мкм, сокращения периода приработки можно добиться увеличением твердости материала контртела



(HRC<sub>к</sub> = 50 ед. и выше), т.к. исходя из влияния парного эффекта X<sub>2</sub> · X<sub>4</sub> при оптимальном по долговечности значении шероховатости материала основы R<sub>ао</sub> = 0,75 мкм время приработки для более твердого материала контртела будет меньше. Учитывая эффект влияния парного взаимодействия X<sub>4</sub> · X<sub>5</sub> полученный выше результат (HRC<sub>к</sub> = 50 ед.), приходим к выводу, что снижение периода приработки будет обеспечено также и при высокой твердости материала основы (HRC<sub>о</sub> = 50 ед.). Это сочетание твердостей образцов пары трения с ТСП также отвечает и условию обеспечения максимальной долговечности рассматриваемой пары трения.

Анализ изменения f<sub>тр.</sub> по данным таблицы 4.4 показывает слабое влияние технологических факторов на антифрикционные свойства ТСП в данных условиях. Для подтверждения этого вывода был проведен однофакторный дисперсионный анализ с целью проверки равенства средних значений f<sub>тр.</sub> (по результатам трех испытаний на каждом уровне) [101]. В результате расчета показано, что рассмотренные значения f<sub>тр.</sub> принадлежат одной генеральной совокупности, распределенной нормально с параметрами σ<sup>2</sup> и а. Оценкой σ<sup>2</sup> служит выборочная полная (общая) дисперсия S<sup>2</sup> = 1,157·10<sup>-5</sup>, а оценкой а - выборочное общее среднее  $\bar{X} = 0,046$ .

Таким образом, влияние технологических факторов на f<sub>тр.</sub> установившегося режима при трении пары с ТСП ВНИИ НП 212 в рассмотренных диапазонах варьирования факторов незначительно.

Одним из важных параметров, определяющих работоспособность ТСП, является приработка. Учитывая, что до 85% ТСП изнашивается именно на этом этапе, становится очевидной актуальность расчёта оптимальных режимов её проведения. В результате экспериментальных исследований была получена зависимость времени приработки (τ<sub>прир.</sub>) от температуры (рисунок 4.7):

$$\tau_{\text{прир.}} = -66,484 + 14624,94 \cdot T_{\text{тр.}}^{-1} \quad (4.4)$$

Анализ приведённых на рис.4.7 зависимостей показывает, что при T<sub>тр.</sub> < 120 - 160°С процесс истирания носит абразивный характер, т.к. данный

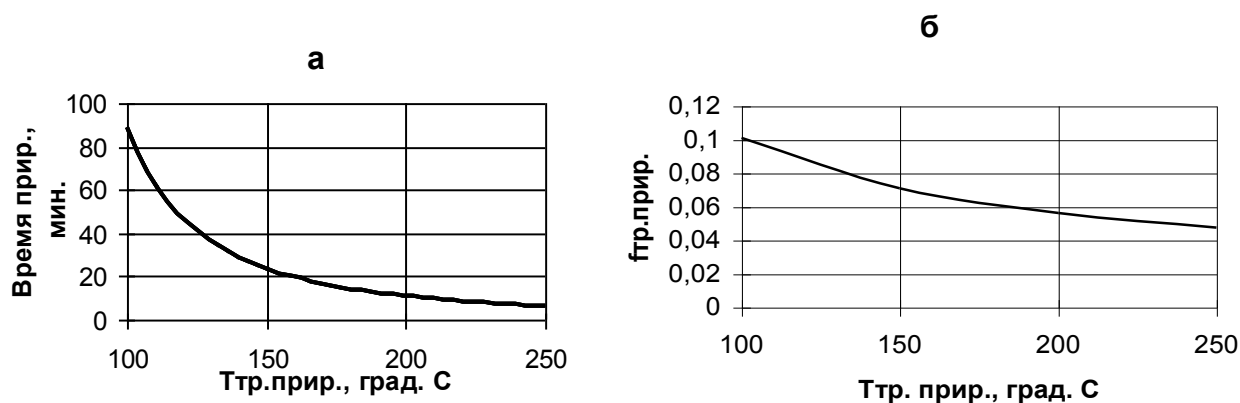


Рисунок 4.7 - Графики изменения времени приработки  $\tau_{\text{прир.}}$  (а) и  $f_{\text{тр. прир.}}$  (б) в зависимости от  $T_{\text{тр.}}$  во время приработки ТСП ВНИИ НП 212

диапазон температур недостаточен для размягчения связки и ориентации частиц  $\text{MoS}_2$  вдоль поверхности трения. Поэтому режимы приработки должны обеспечивать  $T_{\text{тр.}} > 120 - 160^\circ\text{C}$ , но не превышать  $T$  разрушения ТСП, определяемую температурой деструкции плёнкообразующей связки.

### 4.3 Результаты исследования явления «стоп-эффекта»

#### 4.3.1 Исследование комплексного влияния технологических факторов

В подавляющем большинстве случаев узлы трения ЛА с применением ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  функционируют периодически, с наличием перерывов в работе. При возобновлении скольжения  $f_{\text{тр.}}$  таких фрикционных сопряжений возрастает примерно в 2 раза в сравнении с его установившимся значением [12].

В технической литературе это явление получило название "стоп-эффекта" [14] и объясняется следующим образом: в процессе трения  $\text{MoS}_2$  на воздухе возможно образование  $\text{MoO}_3$  на отдельных участках фактического контакта. Трехокись молибдена гидрофильна и в периоды остановки узла трения может поглощать влагу из воздуха, что вызывает повышение коэффициента трения в первые минуты после возобновления скольжения. По мере наработки под воздействием возникающего при трении тепла происходит удаление влаги с

поверхности трения, и коэффициент трения снижается до своего установившегося значения. Данный эффект наблюдался и при испытаниях в вакууме, где окисление  $\text{MoS}_2$  затруднено [12]. В этих условиях при подведении тепла к узлу трения (температура поверхности составляла  $60-80^\circ\text{C}$ ) явления "стоп-эффекта" не наблюдалось. Аналогичные результаты были получены и другими исследователями [30, 38].

Однако в ряде случаев при проведении стендовых испытаний явление "стоп-эффекта" не проявлялось, чем и была вызвана необходимость проведения дополнительных исследований.

Испытания проводились на машине трения типа "РП" по методике, изложенной в п. 2.1.2 [82].

Исследовались факторы конструкторско - технологического порядка, которые могли существенно повлиять на "стоп-эффект": толщина ТСП ( $\delta$ ), шероховатость материала основы ( $R_{\text{ao}}$ ), шероховатость материала контртела ( $R_{\text{ак}}$ ), твердость контртела ( $\text{HRC}_k$ ) и твердость материала основы ( $\text{HRC}_o$ ). Материал образцов - термообработанная легированная сталь 30 ХГСА. Испытывалось ТСП ВНИИ НП 212, нанесённое на образцы по методике ВНИИ НП.

Для экспериментального решения задачи было применено математическое планирование эксперимента по методу случайного баланса [36]. В качестве параметра оптимизации был принят коэффициент трения "стоп-эффекта" ( $f_{\text{тр.с.э.}}$ ), возникающий при возобновлении скольжения после остановки более 12 часов. Наименование факторов и уровни их варьирования представлены в таблице 2.1. Матрица и результаты эксперимента представлены в таблице 4.5. Обработка результатов испытаний, как и ранее, проводилась по методу, изложенной в работе [75].

Для определения значимости влияния отдельных факторов на параметр оптимизации на всех этапах выделения факторов строились диаграммы рассеяния средних значений результатов наблюдений по уровням факторов. Выделенные факторы количественно оценивались при помощи таблиц с двумя

входами, после чего производилась проверка статистической значимости эффектов.

Таблица 4.5 - Матрица планирования и результаты эксперимента по исследованию комплексного влияния технологических факторов на  $f_{TP.c.э.}$

№ опы та	Факторы					Парные взаимодействия				$y =$ $f_{TP.c.э.}$	$y^*$	$y^{**}$	$y^{***}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_1X_3$	$X_3X_4$	$X_4X_5$	$X_1X_5$				
	$\delta$	$R_{ao}$	$R_{ak}$	$HRC_k$	$HRC_o$								
1.	+	+	+	-	-	+	-	+	-	0,113	0,058	0,058	0,026
2.	+	+	-	-	+	-	+	-	+	0,065	0,028	0,033	0,042
3.	+	-	+	+	+	+	+	+	+	0,079	0,061	0,050	0,026
4.	+	-	-	+	-	-	-	-	-	0,059	0,059	0,042	0,042
5.	-	+	+	+	-	-	+	-	+	0,099	0,044	0,027	0,036
6.	-	+	-	+	+	+	-	+	-	0,100	0,063	0,052	0,020
7.	-	-	+	-	+	-	-	-	-	0,049	0,031	0,036	0,036
8.	-	-	-	-	-	+	+	+	+	0,043	0,043	0,043	0,020

В результате расчетов была получена математическая модель в виде неполного квадратного уравнения, адекватно описывающая экспериментальные данные:

$$Y = 0,759 + 0,0185 \cdot X_2 + 0,0084 \cdot X_4 + 0,008 \cdot X_4 \cdot X_5 + \\ + 0,008 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (4.5)$$

Анализ полученного уравнения показал следующее.

1. Наибольшее влияние на "стоп-эффект" оказывает шероховатость материала основы, в наибольшей степени этот эффект проявляется при оптимальной с точки зрения долговечности шероховатости материала основы ( $R_{ao} = 0,75$  мкм). Данный эффект может быть объяснен с позиций предложенной топографической модели трения пары с ТСП (глава 3, п.3.1.2) следующим образом. На поверхности фрикционного контакта образца с ТСП, предварительно опескоструенного до более грубой шероховатости поверхности  $R_{ao} = 2,0$  мкм, после приработки вследствие более высокой (по сравнению с оптимальной  $R_{ao} = 0,75$  мкм) высоты неровностей количество их вершин, "выступающих" на поверхности контакта, больше. Поэтому при одинаковой окисленности поверхностей трения для обоих случаев после остановки пары трения при возобновлении скольжения  $f_{тр.с.э.}$  в первом случае будет меньше вследствие более быстрого истирания окисленного слоя "выступающими" вершинами неровностей поверхности.

2. Значительное влияние на величину "стоп-эффекта" оказывает твердость контртела, причем высокая твердость последнего ( $HRC = 50$  ед.) приводит к возрастанию "стоп-эффекта" по сравнению с более низкой твердостью ( $HRC = 34$  ед.).

3. Из парных взаимодействий наибольшее влияние оказывают сочетание твердостей материала основы и контртела, а также сочетание толщины покрытия и шероховатости контртела.

Из анализа полученных данных был сделан вывод о перспективности исследования влияния твердости контртела на величину "стоп-эффекта", так как, во-первых, фактор твердости контртела ( $X_4$ ) встречается в модели дважды,

а, следовательно, указывает на большую значимость фактора, и, во-вторых, варьирование фактора шероховатости материала основы ( $X_2$ ) с целью понижения "стоп-эффекта" нежелательно, так как приводит к обработке материала основы с неоптимальной по долговечности шероховатостью.

С целью проверки полученных данных о влиянии твердости контртела на величину "стоп-эффекта" на следующем этапе исследований в качестве контробразцов были использованы кольца, изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н9Т и легированной закаленной стали ХВГ (HRC = 60-62 ед.). В качестве образцов были использованы кольца из ШХ15, покрытые ТСП ВНИИ НП 212. В процессе испытаний производилась непрерывная запись коэффициента трения  $f_{тр.}$  и температуры трения  $T_{тр.}$  по методике, описанной ранее (см. п. 2.1.1).

Полученные данные, представленные на рисунках 4.8 и 4.9, полностью совпадают с предыдущими результатами эксперимента по выявлению влияния

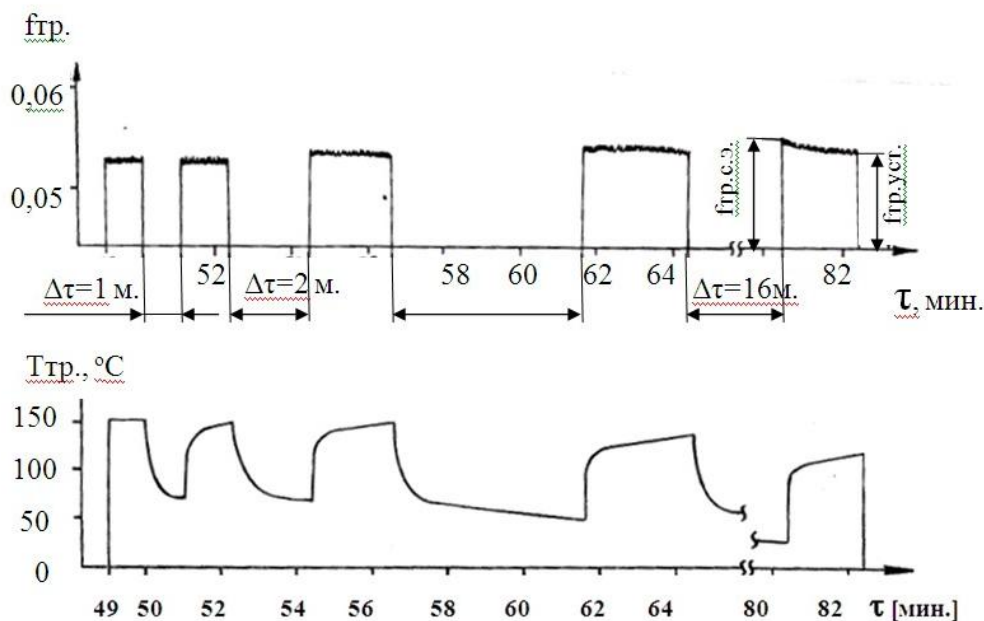


Рисунок 4.8 - Диаграмма изменения во времени  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  при «стоп-эффекте» для ТСП ВНИИ НП 212 (образец – ШХ15, контртело – 12Х18Н9Т)

технологических факторов на  $f_{тр.с.э.}$ . Явление "стоп-эффекта" практически не было зафиксировано при трении образца с ТСП по кольцу, изготовленному из

нержавеющей стали I2X18H9T, и в тоже время указанный эффект ярко проявился при использовании в качестве контртела кольца, изготовленного из закаленной стали ХВГ (рисунок 4.9).

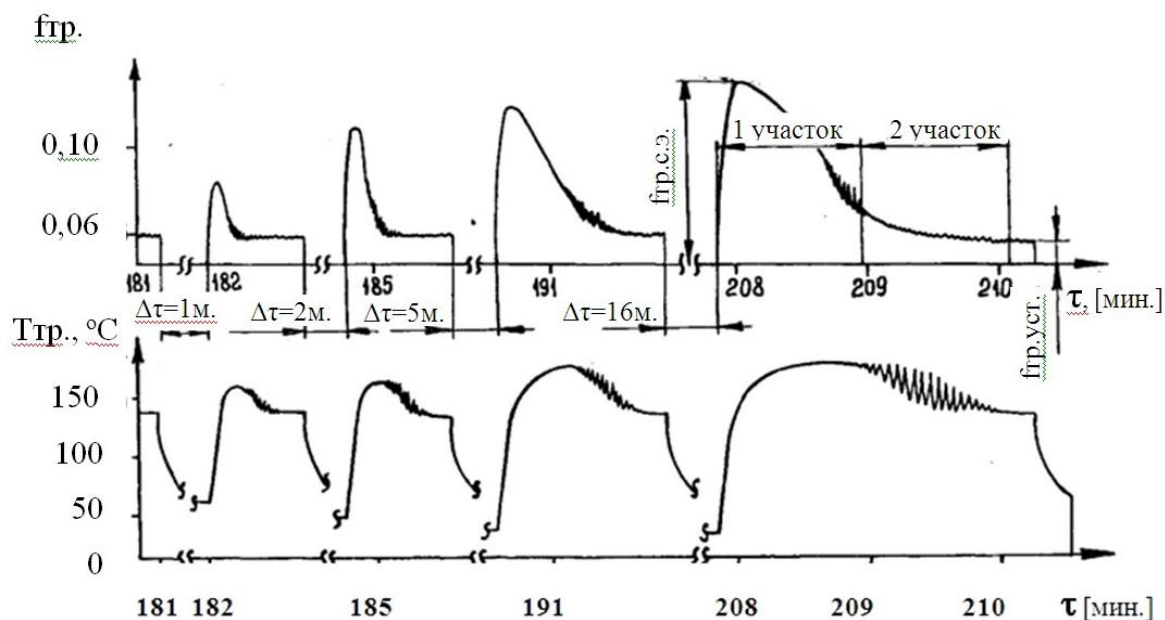


Рисунок 4.9 - Диаграммы изменения во времени  $f_{тр.с.э.}$  и  $T_{тр.}$  при "стоп-эффекте" для ТСП ВНИИ НП 212 (образец - ШХ15, контртело - ХВГ, HRC > 60 ед.)

Причем во втором случае на величине "стоп-эффекта" сказывалась длительность останова пары трения, которая в обоих опытах варьировалась в пределах  $\Delta\tau = 1 \div 16$  минут. С увеличением последней происходило возрастание и  $f_{тр.с.э.}$ . Дополнительные исследования показали, что при меньшей длительности останова пары трения в этих условиях ( $\Delta\tau = 30$  с.) возрастания  $f_{тр.с.э.}$  после возобновления скольжения не происходило, и, с другой стороны, при большей длительности останова дальнейшего возрастания  $f_{тр.с.э.}$  также не наблюдалось, что свидетельствует об окончании действия всех физических процессов, влияющих на "стоп-эффект" при остановках длительностью свыше 16 минут.

К числу этих процессов необходимо отнести окисление смазочной поверхности  $MoS_2$  при трении. График изменения температуры, возникающей

при трении на контактной поверхности, в целом совпадает с изменением  $f_{тр.}$ , причем пиковые начальные участки полностью совпадают по времени (рисунок 4.8, участок I).

Однако последующее менее интенсивное снижение  $f_{тр.}$  (участок 2) сопровождается на графике  $T_{тр.} = f(\tau)$  амплитудными колебаниями  $T_{тр.}$ , что говорит о наличии переходных физико-химических процессов на поверхности трения. В дальнейшем  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  стабилизируются до своих установившихся режимных значений. Интересно отметить тот факт, что порядок температур, при которых наступает окисление  $MoS_2$  при трении ( $T_{тр.} = 150-170^{\circ}C$ ) совпал с результатами, ранее полученными Брейтуэйтом [7] и другими авторами [12].

Таким образом, на основе вышеизложенных результатов окончательно был сделан вывод о влиянии твердости контртела на величину "стоп-эффекта" при трении ТСП на основе  $MoS_2$ . Данный эффект весьма просто объясняется с позиций упруго - пластических свойств материалов, а точнее - способности контактной дорожки трения к упругому восстановлению при останове пары трения и последующем быстром охлаждении контртела, в результате чего за счет упругих деформаций в материале контртела происходит изменение геометрии контактной зоны. Однако известно, что восстановление лунки, выработанной при трении после снятия нагрузки происходит неравномерно [69]. Дно лунки восстанавливается значительно сильнее, чем ее края, что приводит к образованию выемки неправильной формы (рисунок 4.10).

Данный эффект сильнее проявляется у закаленных материалов, к числу которых относится и материал контробразца, испытанного во втором опыте - ХВГ (HRC = 60-62 ед.), и практически не проявляется у пластичных незакаленных материалов, к числу которых следует отнести и нержавеющей сталь марки 12X18H9T, из которой был изготовлен контробразец в первом опыте.

Следовательно, при "стоп-эффекте" имеют место два явления, вызывающие повышение при возобновлении скольжения - окисление поверхностной пленки  $MoS_2$  и упругая деформация контртела. Исходя из этих



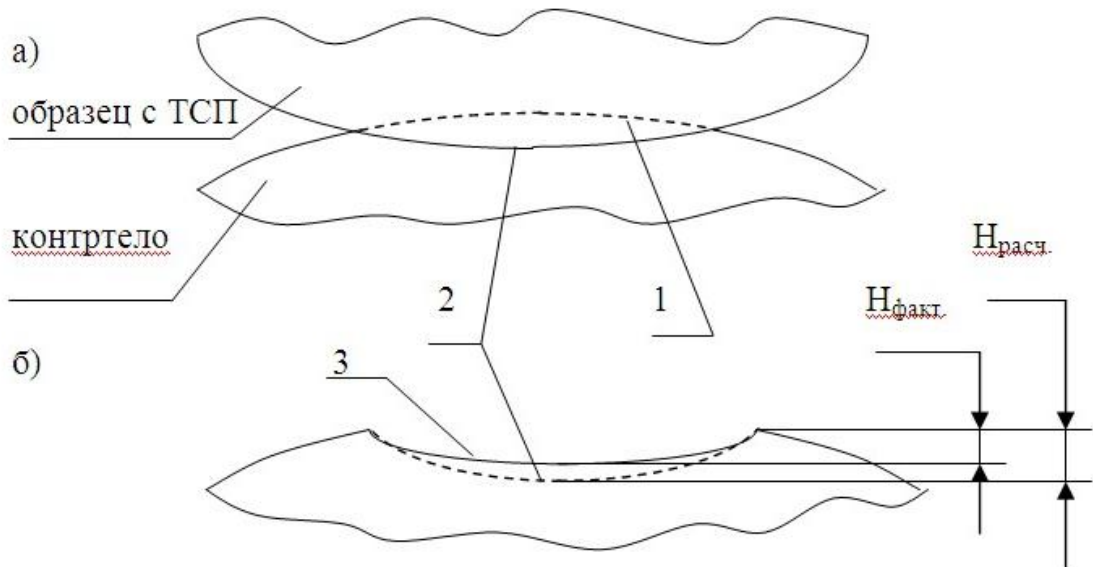


Рисунок 4.10 - Конфигурация образцов, испытанных на машине трения типа РП (образец – ШХ15, контрообразец - ХВГ, HRC > 60 ед.): 1 - исходный контур контртела; 2 - форма контактной дорожки в процессе трения; 3 - форма контактной дорожки контртела после снятия нагрузки; а - контакт образцов при трении; б - изменение формы дорожки трения на контртеле после снятия нагрузки

соображений, можно объяснить наличие двух участков на графиках изменения  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  во времени (рис. 4.9). На первом участке, вероятно, происходит интенсивный износ триоксида молибдена  $MoO_3$ , образовавшейся при окислении смазочной поверхности  $MoS_2$ , одновременно происходит нагрев контртела, но дорожка трения восстанавливается еще не полностью. Абразивный износ происходит достаточно равномерно и не вызывает амплитудных колебаний образцов, а, следовательно, и температуры трения. На втором участке абразивный износ  $MoS_2$ , судя по достаточно низкому значению  $f_{тр.}$ , уже заканчивается, происходит восстановление смазочной пленки  $MoS_2$ , что подтверждается незначительной амплитудой колебаний  $f_{тр.}$ . Но лунка износа восстанавливается еще не полностью, что и вызывает колебательные движения контртела относительно образца с ТСП, которые приводят к амплитудным изменениям  $T_{тр.}$ , так как пятно контакта образцов изменяет свое

положение относительно места заделки регистрирующей термопары. И, наконец, на установившемся режиме амплитуды колебаний  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  отсутствуют, и значения этих характеристик становятся стабильными.

С целью экспериментальной проверки вышеназванного эффекта проводилось измерение глубины лунки на контробразцах, изготовленных из закаленной легированной стали ХВГ и нержавеющей стали 12Х18Н9Т, на кругломере модели 218 завода "Калибр". В результате измерений фактическая глубина лунки на контробразце, изготовленном из закаленной стали, оказалась меньше расчетной (рисунок 4.10:  $H_{факт.} = 10$  мкм,  $H_{расч.} = 20,5$  мкм, диаметр кольца - 47 мм) в то время, как изменение глубины лунки на контробразце, изготовленном из нержавеющей стали, было незначительным ( $H_{факт.} = 28$  мкм,  $H_{расч.} = 30$  мкм).

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что при "стоп-эффекте", повышение коэффициента трения ТСП на основе  $MoS_2$  при возобновлении скольжения вызывается не только окислением смазочной поверхности  $MoS_2$  до абразивной триоксида молибдена, но также и формоизменением контактной площадки на величину упругих деформаций материала контртела. В качестве одного, из эффективных способов борьбы с явлением "стоп-эффекта" при работе с ТСП на основе  $MoS_2$  можно рекомендовать использование материала контртела пары трения скольжения с более выраженными пластическими свойствами, то есть с меньшей твердостью.

#### 4.3.2 Новый способ контроля времени приработки пар трения скольжения

[101]

Как указывалось выше, одним из параметров, определяющих триботехнические показатели пар трения с ТСП является их прирабатываемость, которая чаще всего оценивается длительностью периода приработки. В настоящее время в исследовательской практике чаще всего время окончания этого периода оценивается по стабилизации  $f_{тр.}$  после приработки [43]. Такой способ не позволяет точно оценить момент окончания

приработки во время проведения испытаний, так как из-за разброса экспериментальных результатов по  $f_{тр.}$ , достигающих при испытаниях пар с ТСП 15% [54], в каждом опыте заранее не известно значение  $f_{тр.}$  на установившемся режиме. Поэтому можно или ошибочно окончить приработку натурной пары трения ранее действительного ее окончания (в случае, если  $f_{тр.}$  на установившемся режиме в данном эксперименте будет ниже предполагаемого среднего значения  $f_{тр.}$ ), или продолжить испытания после действительного окончания приработки (в случае, если  $f_{тр.}$  на установившемся режиме в данном эксперименте будет выше предполагаемого среднего значения  $f_{тр.}$ ).

С целью повышения точности и эффективности определения времени окончания приработки пары трения скольжения был разработан следующий способ, основанный на явлении "стоп-эффекта". В основу способа положено свойство повышенной химической активности неприработанной поверхности пары трения скольжения по сравнению с приработанной структурой поверхностного слоя, соответствующей установившемуся режиму трения [43]. Данное свойство проявляется в повышенной окислительной способности неприработанной пары трения скольжения, а именно - в образовании окислов на поверхности во время останова фрикционного сопряжения, что приводит к резкому повышению  $f_{тр.}$  после возобновления скольжения.

Были проведены испытания ТСП типа ВНИИ НП 212 и 213 на машине трения РП при нагрузке  $N = 980$  Н и скорости скольжения  $V=0,492$  м/с (200 об/мин) на "стандартных" образцах (кольца № 7204 - см. п.2.1.1). В начале испытания проводились на установившемся режиме трения с остановами длительностью  $\Delta t = 1, 2, 3, 6, 12, 20$  мин. и 1 сутки. При возобновлении скольжения после остановов длительностью до 2 мин. увеличение  $f_{тр.}$  практически не наблюдалось. При большей длительности остановов вследствие окисления поверхности имело место возрастание  $f_{тр.}$  после возобновления скольжения до  $f_{тр.с.э.}$  (рис. 4.11).

По мере наработки тепло, возникающее при трении, удаляло окислившийся слой, и  $f_{тр.}$  снижался до своего установившегося значения  $f_{тр.уст.}$

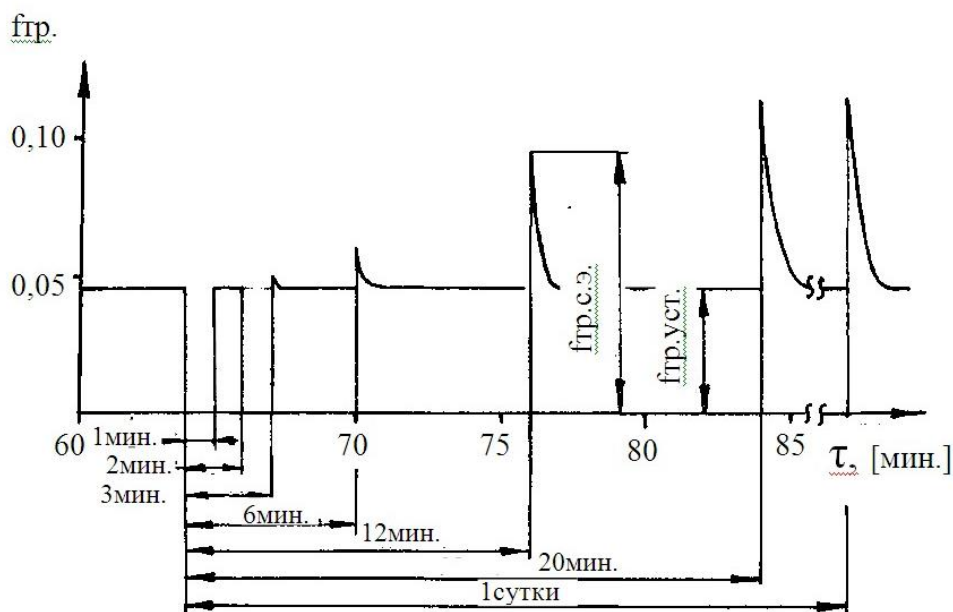


Рисунок 4.11- График изменения  $f_{тр.}$  в зависимости от длительности остановов на установившемся режиме трения для пары с ТСП ВНИИ НП

$= 0,046$ . При  $\Delta\tau > 20$  мин.  $f_{тр.}$  после возобновления скольжения скольжения не возрастал, что свидетельствовало о полной окисляемости поверхности трения в период останова  $\Delta\tau = 20$  мин. Затем аналогичные испытания с различной длительностью остановов были проведены на режиме приработки. 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 (рис. 4.12), что позволило точно установить время ее окончания.

Кратко суть предложенного способа можно сформулировать следующим образом. Способ контроля времени приработки пары трения скольжения заключается в том, что испытания проводят с кратковременными остановами сначала в установившемся режиме трения, регистрируют время, характеризующееся стабилизацией  $f_{тр.}$  при возобновлении скольжения, затем все последующие испытания образцов в режиме приработки с момента понижения  $f_{тр.}$  проводят с остановами на ранее определенное время останова,

характеризующееся стабилизацией  $f_{тр.}$ , и момент достижения постоянного  $f_{тр.}$  считают за момент окончания приработки.

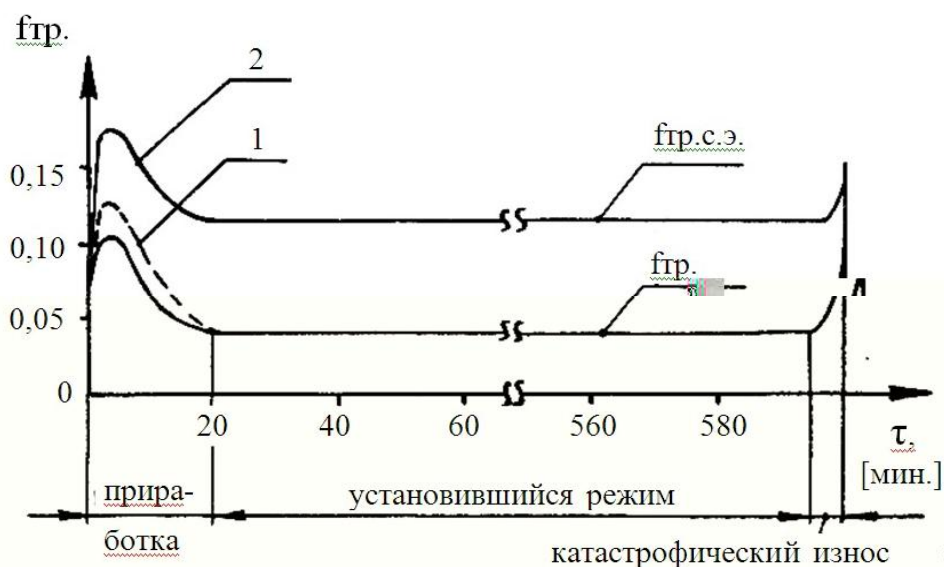


Рисунок 4.12 - График изменения  $f_{тр.}$  и  $f_{тр.с.э.}$  в процессе наработки при длительности остановов: 1 -  $\Delta\tau = 1$  мин.; 2 -  $\Delta\tau = 20$  мин.

Предложенный способ, основанный на свойстве повышенной окислительной способности неприработанной поверхности пары трения скольжения, не зависит от разброса экспериментальных результатов по  $f_{тр.}$  на установившемся режиме и, следовательно, позволяет повысить точность и надежность определения времени окончания приработки. Способ отличается универсальностью и простотой осуществления, так как, во-первых, позволяет качественно определять время окончания приработки для любых схем трения вне зависимости от их конструктивного выполнения и, во-вторых, не требует дополнительного оборудования и измерительных средств. Способ позволяет оперативно оценивать время окончания приработки.

#### 4.4 Выводы к главе 4

В результате выполнения главы 4 были получены следующие выводы:

1. В результате проведения испытаний на интенсивность изнашивания и антифрикционные свойства различных типов ТСП (машина трения СМТ-1,

пара ШХ15-ШХ15,  $N=980$  Н;  $V=0,5$  м/с) выявлено, что наименьшую интенсивность изнашивания при низком значении  $f_{тр}$ . обнаруживают сопряжения с ТСП ВНИИ НП 212 ( $I_h = 1,7 \cdot 10^{-10}$ , ресурс составил  $\tau = 406$  мин.;  $f_{тр} = 0,056$ ) и ВАП-2 ( $I_h = 1,77 \cdot 10^{-10}$ , ресурс составил  $\tau = 383$  мин.;  $f_{тр} = 0,044$ ), т.е. покрытия с  $MoS_2$  наполнителем.

2. Из числа исследованных методов предварительной обработки перед нанесением ТСП поверхностей сопряжений из титановых сплавов наилучшие характеристики показало гальванохромирование и химическое никелирование.

3. В результате проведения планируемого эксперимента по методу случайного баланса при исследовании влияния конструкторско - технологических факторов (толщины ТСП  $\delta=18-28$  мкм; шероховатости основы  $R_{ao} = 0,75-2,0$  мкм и контртела  $R_{ак} = 0,04-0,4$  мкм, твёрдости основы  $HRC_o = 28-50$  и контртела  $HRC_k = 34-50$ ) на ресурс пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 установлено, что:

- из числа рассмотренных конструкторско - технологических факторов наибольшее влияние на ресурс ТСП оказывает толщина нанесённого слоя покрытия;

- большему ресурсу узла трения способствует большая шероховатость поверхности (из рассматриваемого диапазона), то есть  $R = 0,4$  мкм. Этот вывод также удовлетворительно согласуется с литературными данными [13], а именно - шлифованная поверхность контртела является в данном фрикционном сопряжении оптимальной;

- оптимальной по истираемости является сопряжение, в котором твёрдости материала основы и контртела будут возможно более близкими.

4. В результате проведения планируемого эксперимента по методу случайного баланса при исследовании влияния конструкторско - технологических факторов (толщины ТСП  $\delta=18-28$  мкм; шероховатости основы  $R_{ao} = 0,75-2,0$  мкм и контртела  $R_{ак} = 0,04-0,4$  мкм, твёрдости основы  $HRC_o = 28-50$  и контртела  $HRC_k = 34-50$ ) на прирабатываемость пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 установлено, что:

- наиболее существенное влияние на продолжительность периода приработки пары трения с ТСП оказывает фактор шероховатости материала основы; причем оптимальная по долговечности шероховатость  $R_{ao} = 0,75$  мкм приводит к увеличению времени приработки фрикционного сопряжения, т.е. способствует образованию высокоэффективной долговечной смазочной пленки на поверхности трения.

- сокращению периода приработки при оптимальной по истираемости шероховатости материала основы  $R_{ao} = 0,75$  мкм способствует повышенная твёрдость материала контртела и, наоборот, при более высокой шероховатости материала основы - пониженная твердость контртела;

- сокращению приработки пары трения с ТСП при оптимальной по истираемости толщине последнего способствует повышенная шероховатость поверхности контртела;

- сокращению периода приработки способствует также подбор материалов с возможно более близкими значениями твердости;

5. В результате экспериментальных исследований получены зависимости для оценки времени приработки и коэффициента трения от температуры трения.

6. При температурах трения менее  $120 - 160^{\circ}\text{C}$  процесс истирания пар с ТСП в процессе приработки носит абразивный характер, т.к. данный диапазон температур недостаточен для размягчения связки и ориентации частиц  $\text{MoS}_2$  вдоль поверхности трения. Поэтому режимы приработки должны обеспечивать температурах трения выше  $120 - 160^{\circ}\text{C}$ , но не превышать температуру разрушения ТСП, определяемую температурой деструкции плёнкообразующей связки.

7. В результате проведения планируемого эксперимента по методу случайного баланса при исследовании влияния технологических факторов (толщины ТСП  $\delta = 18 - 28$  мкм; шероховатости основы  $R_{ao} = 0,75 - 2,0$  мкм и контртела  $R_{ak} = 0,04 - 0,4$  мкм, твёрдости основы  $\text{HRC}_{Co} = 28 - 50$  и контртела

HRC<sub>к</sub> = 34-50) на коэффициент трения при «стоп-эффекте» пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 установлено, что:

- наибольшее влияние на "стоп-эффект" оказывает шероховатость материала основы, в наибольшей степени этот эффект проявляется при оптимальной с точки зрения долговечности шероховатости материала основы ( $R_{\text{ao}} = 0,75$  мкм);

- значительное влияние на величину "стоп-эффекта" оказывает твердость контртела, причем высокая твердость последнего (HRC = 50 ед.) приводит к возрастанию "стоп-эффекта" по сравнению с более низкой твердостью (HRC = 34 ед.);

8. Явление "стоп-эффекта" практически не было зафиксировано при трении образца с ТСП по кольцу, изготовленному из нержавеющей стали 12Х18Н9Т, и в тоже время указанный эффект ярко проявился при использовании в качестве контртела кольца, изготовленного из закаленной стали ХВГ.

9. В результате проведенных исследований показано, 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 трехокиси молибдена, но также и формоизменением контактной площадки на величину упругих деформаций материала контртела.

10. В качестве одного, из эффективных способов борьбы с явлением "стоп-эффекта" при работе с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> можно рекомендовать использование материала контртела пары трения скольжения с более выраженными пластическими свойствами, то есть с меньшей твердостью.

11. Разработан способ контроля времени приработки пары трения скольжения, заключающийся в том, что испытания проводят с кратковременными остановами сначала в установившемся режиме трения, регистрируют время, характеризующееся стабилизацией  $f_{\text{тр}}$  при возобновлении скольжения, затем все последующие испытания образцов в



режиме приработки с момента понижения  $f_{тр}$ . проводят с остановами на ранее определенное время останова, характеризующееся стабилизацией  $f_{тр}$ ., и момент достижения постоянного  $f_{тр}$ . считают за момент окончания приработки (а. с. 1059485, МКИ<sup>3</sup> G 01 N 3/56).

## ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

В настоящей главе проводилось исследование комплексного влияния эксплуатационных факторов на триботехнические показатели фрикционных сопряжений с композиционными ТСП рассматриваемого типа для условий повышенной температуры и вакуума. В результате проведенного ранее анализа конструкций и эксплуатационно-технологических параметров узлов трения с ТСП, функционирующих в экстремальных условиях (см. главу 3, п. 3.2.1) выявлено, что большинство указанных фрикционных сопряжений используется в агрегатах, подвергающихся воздействию повышенных и пониженных температур, вакуума, различных видов облучений. Причем ряд агрегатов ЛА с применением узлов трения с ТСП функционирует при повышенной температуре в условиях нормальной атмосферы. С другой стороны, во многих механизмах, функционирующих в условиях вакуума, пониженных и повышенных температур (в основном в диапазоне от  $-60$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ), различных видов облучения, также широко используются узлы трения с ТСП. Учитывая, что согласно литературных данных (глава I) пониженные температуры и облучение, также как и повышенные температуры до  $+50^{\circ}\text{C}$ , не значительно влияют на работоспособность ТСП в трущихся соединениях, наиболее существенным фактором для таких фрикционных сопряжений являются вакуумные условия. Необходимо отметить, что оценка работоспособности реальных узлов трения с ТСП как в первом, так и во втором случае затруднена вследствие отсутствия комплексных универсальных моделей, описывающих влияние эксплуатационных факторов на триботехнические показатели рассматриваемых фрикционных сопряжений при повышенной температуре в условиях вакуума.

Поэтому в данной главе решалась задача исследования триботехнических характеристик пар трения с ТСП по параметрам интенсивности изнашивания, коэффициента трения и контактной температуры трения при значениях контактных давлений и скоростей скольжения, соответствующих условиям

функционирования реальных узлов трения ЛА, функционирующих в условиях повышенной температуры и в вакууме, с целью построения универсальных математических моделей, применимых для оценки триботехнических показателей натуральных узлов трения с ТСП, функционирующих в данных условиях. При необходимости учета комбинации этих условий, т.е. при нагреве в вакууме, для получения комплексной зависимости предлагается использование расчетного метода оценки работоспособности узлов трения с ТСП, разработанного автором в главе 3, п. 3.2.

В настоящее время рассматривается также вопрос об использовании ТСП в узлах трения, подвергающихся воздействию атмосферы соляного тумана. В известной литературе совершенно отсутствуют данные о влиянии указанной атмосферы на работоспособность данных фрикционных сопряжений. В связи со сказанным в настоящей главе решалась также задача оценки работоспособности пар трения с ТСП, подвергнутых воздействию атмосферы соляного тумана.

Учитывая перспективность применения для рассматриваемых условий также и самосмазывающихся материалов (СМ), в данной главе проводилась сравнительная оценка конкурирующих смазочных материалов ТСП и СМ, обеспечивающих автономное смазывание зоны трения, как для условий нормальной атмосферы, так и для вакуума.

## 5.1 Результаты исследования влияния температурного фактора в нормальных атмосферных условиях

### 5.1.1 Влияние нагрузочно – скоростных факторов при повышенной температуре

Ставилась задача разработки и экспериментального опробования методики проведения комплексных фрикционных испытаний с учетом условий функционирования реальных узлов трения с ТСП в зависимости от факторов контактного давления, скорости скольжения и температурного воздействия на модернизированной машине трения типа "роликовый прибор" ("РП") (см. рисунок 2.11). Методика проведения исследований подробно изложена в п.

2.1.3.1.1. Матрица планирования и результаты экспериментов представлены в таблице 2.3. Методика обработки полученных данных с целью построения математической модели 2-го порядка производилась в соответствии с рекомендациями, данными в работах [36, 74], в последовательности, изложенной ранее (см. приложение 3). При обработке результатов эксперимента использовалась ЭВМ. После проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид (адекватность модели (5.1) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 6; 5} (1,13) < F^{табл.}_{0,05; 6; 5} (4,95)$ ):

$$\tau = 1690 - 1297 \cdot V - 0,634 \cdot N - 8,02 \cdot T_{об.} + 0,252 \cdot N \cdot V + 2,96 \cdot V \cdot T_{об.} + 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot T_{об.} + 291 \cdot V^2 + 0,01034 \cdot T_{об.}^2 \quad (5.1)$$

На следующем этапе по методике, изложенной в приложении 3, была рассчитана экспериментальная зависимость вида  $N = f(P, V)$ , которая использовалась в последующем для пересчета значений абсолютной нагрузки в контактное давление:

$$N = 11,44 \cdot P + 170,88 \cdot V - 161, \quad (5.2)$$

где  $P$ - [МПа],  $v$ - [м/с],  $N$  - [Н].

После подстановки полученного выражения (5.2) в уравнение (5.1) последняя зависимость приняла вид:

$$\tau = 1794 - 1449 \cdot V - 7,55 \cdot P - 8,37 \cdot T_{об.} + 3 \cdot P \cdot V + 3,33 \cdot V \cdot T_{об.} + 2,55 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot T_{об.} + 334,92 \cdot V^2 + 0,01034 \cdot T_{об.}^2, \quad (5.3)$$

где  $V$  - [м/с],  $P$  - [МПа],  $T_{об.}$  - [°C],  $\tau$  - [мин.].

Графическая интерпретация выражения (5.3) представлена на рис. 5.1.

Анализ полученных данных свидетельствует о существенном влиянии рассмотренных факторов на ресурс пары трения о ТСП ВНИИ НП 212. Из рисунка 5.1 видно, что на предельных режимах трения в исследуемых диапазонах варьирования  $P$  и  $V$  объемная температура нагрева практически перестает оказывать существенное влияние на ресурс пары трения, что вызвано высокой контактной температурой трения, при которой вследствие ускоренного разложения связующего идет быстрый износ смазочной пленки.

Однако даже в этих экстремальных условиях ТСП оказалось работоспособным в течение 1,5-2 часов непрерывной эксплуатации.

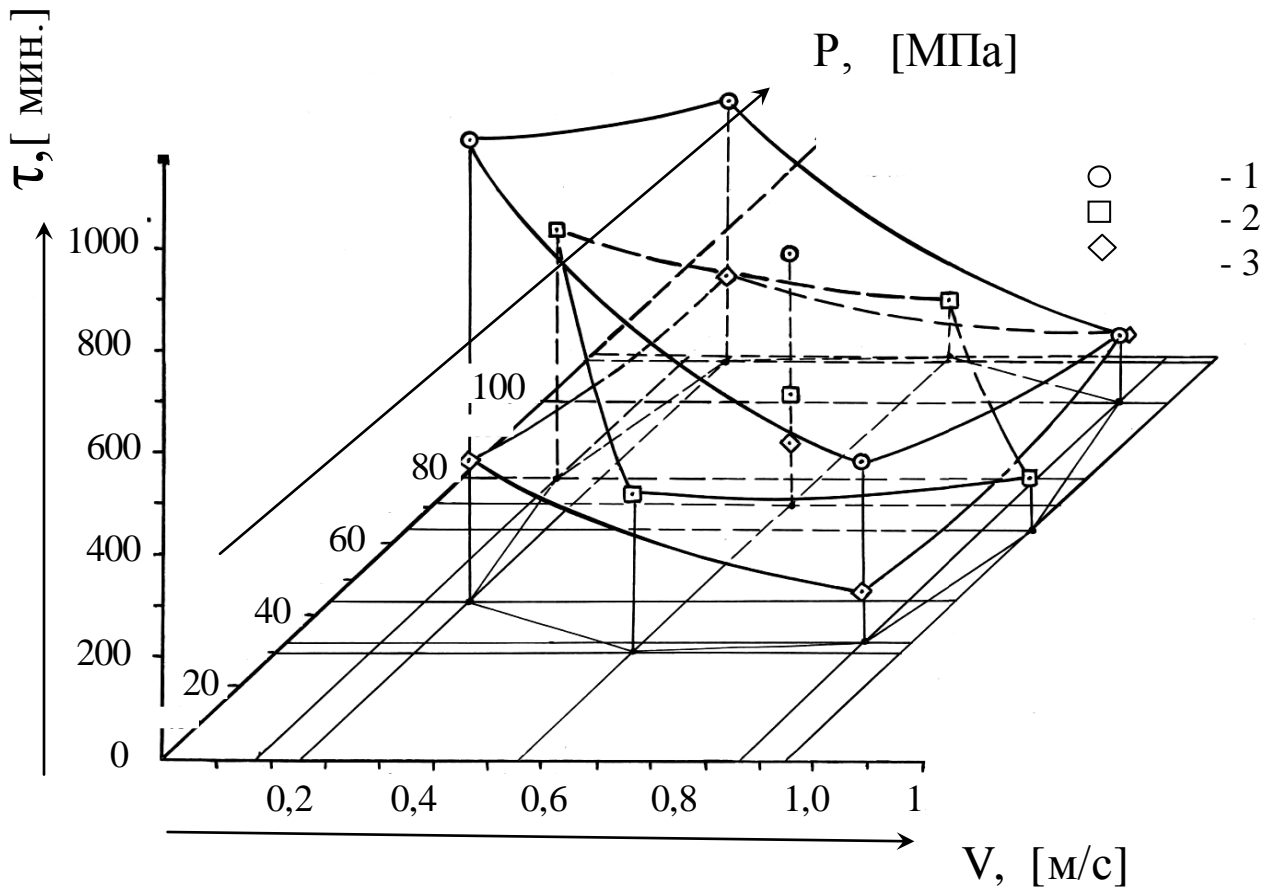


Рисунок 5.1 - Графическая интерпретация зависимости вида  $\tau = f(P, V)$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212:  
 1 –  $T_{об.} = 40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{об.} = 120^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T_{об.} = 200^\circ\text{C}$

Износостойкость ТСП резко повышается при понижении значений исследуемых факторов, особенно скорости скольжения и объемной температуры. Проверка корректности полученной выше математической модели (5.3) типа  $\tau = f(P, V, T_{об.})$  проводилась путем сравнения этой зависимости с экспериментальными результатами, приведенными в работе [94] (см. рисунок 1.19 б) для пар трения с ТСП с органическими и неорганическими связующими (т.к. пленкообразователь ТСП ВНИИ НП 212, мочевиноформальдегидный полимер, обладает близкими к ним характеристиками по износостойкости [94, 95]). Эти эксперименты проводились на машине трения типа ИТК

конструкции К.И.Климова [99] по схеме "лента - цилиндрический ролик" ( $\varnothing$  5 мм) с углом обхвата  $120^\circ$ , что с учетом нормальной нагрузки  $N = 3$  Н соответствует контактному давлению  $P = 0,25$  МПа при относительной скорости скольжения  $V = 0,21$  м/с. После подстановки приведенных исходных данных в математическую модель (5.3), полученную автором, в диапазоне температур от  $150$  до  $300^\circ\text{C}$  включительно отклонение расчетных значений ресурса ( $\tau = 586 - 131$  мин.) от результатов, полученных авторами работы [94] ( $\tau = 650 - 175$  мин.), составило  $9,9-24,3\%$ , что считается удовлетворительным при испытаниях на трение и износ. Некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных при меньшей температуре ( $T < 100^\circ\text{C}$ ) связано, как указывалось ранее (см. главу 1), с абразивным характером износа ТСП в парах трения (которые предварительно не прирабатывались) при малых значениях контактного давления, скорости скольжения и температуры, недостаточных для создания эффективной смазочной пленки на контактной поверхности трения.

На следующем этапе работы решалась задача комплексного исследования влияния нагрузочно-скоростных факторов на коэффициент трения установившегося режима  $f_{\text{тр}}$  пары с ТСП при трении в условиях внешнего нагрева. При расчете были использованы результаты предыдущего эксперимента (см. таблицу 2.3). Методика расчета математической модели была аналогичной использованной ранее (см. приложение В).

После подстановки и проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид (адекватность модели (5.4) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{\text{расч.}}_{0,05; 5; 5}(3,33) < F^{\text{табл.}}_{0,05; 5; 5}(5,05)$ ):

$$f_{\text{тр}} = 0,154 - 43,4 \cdot 10^{-3} \cdot V - 1,38 \cdot 10^{-4} \cdot N - 0,387 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{об.}} + 1,99 \cdot 10^{-7} \cdot N \cdot T_{\text{об.}} + 24,7 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 + 4,55 \cdot 10^{-8} \cdot N^2 + 7,75 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{об.}}^2,$$

где  $V$ - [м/с],  $N$ - [Н],  $T_{\text{об.}}$  - [ $^\circ\text{C}$ ] (5.4)

Для перехода от значений абсолютной нагрузки к контактному давлению осуществлялась подстановка уравнения (5.2) в формулу (5.4). Искомая математическая модель приняла вид:

$$f_{тр.} = 0,177 - 6,94 \cdot 10^{-2} \cdot V - 1,776 \cdot 10^{-3} \cdot P - 4,19 \cdot 10^{-4} \cdot T_{об.} + 2,32 \cdot 10^{-6} \cdot T_{об.} \cdot P + 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot T_{об.} \cdot V + 1,814 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V + 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot V^2 + 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot P + 7,75 \cdot 10^{-7} \cdot T_{об.}^2, \text{ где } P - [\text{МПа}], \quad (5.5)$$

Графическая интерпретация полученного выражения представлена на рисунке 5.2, где в качестве базовых координатных осей были приняты факторы скорости скольжения и объемной температуры нагрева, как параметров, определяющих тепловой режим трения пары в месте контакта, а, следовательно, оказывающих непосредственное влияние на  $f_{тр.}$ . На рисунке 5.2

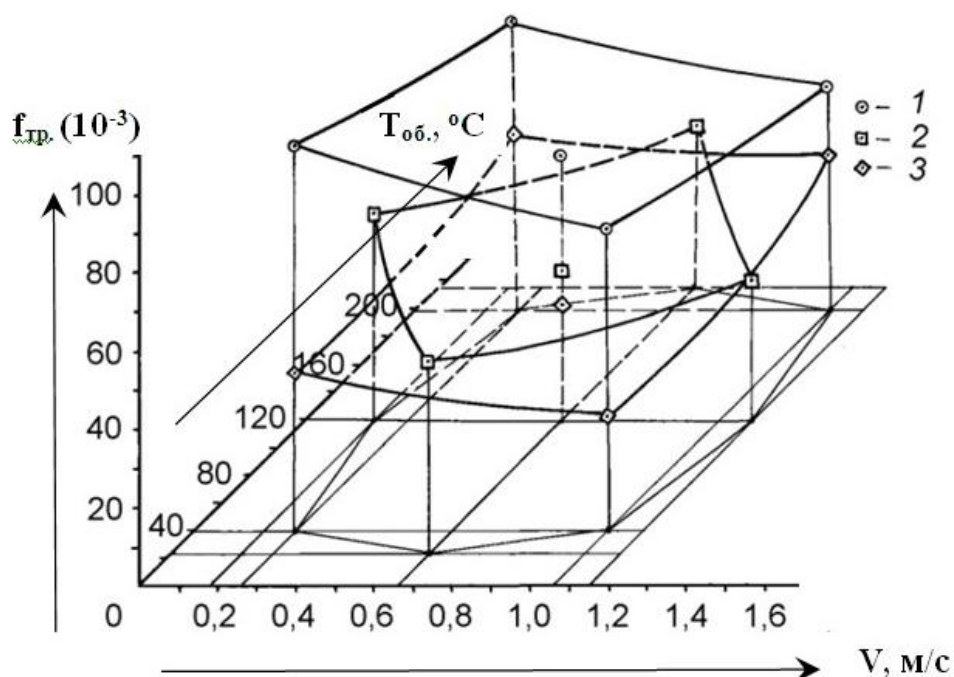


Рисунок 5.2 - Графическая интерпретация зависимости  $f_{тр.} = f(P, V, T_{об.})$  для ТСП ВНИИ НП 212 (1 –  $P=32,5$  МПа; 2 -  $P=72,8$  МПа; 3 –  $P=113$  МПа)

представлены три комплексные зависимости вида  $f_{тр.} = f(V, T_{об.})$  для трех основных уровней контактного давления. Анализ результатов, представленных на рисунке 5.2, показывает, что наибольшее влияние на коэффициент трения в данных условиях оказывает контактное давление, с ростом которого происходит существенное улучшение антифрикционных свойств, что объясняется, по-видимому, размягчением связующих составляющих смазочной пленки вследствие повышения контактной температуры трения. Вероятно, этой

же причиной объясняется сближение значений  $f_{тр.}$  для различных уровней контактного давления при более напряженных режимах трения (при  $V = 1,06$  м/с,  $T_{об.} = 200^{\circ}\text{C}$ ).

Проверка корректности полученной выше математической модели (5.5) типа  $f_{тр.} = f(P, V, T_{об.})$  производилась путем сравнения с экспериментальными результатами, приведенными в работе [65] (см. рисунок 1.18). Эксперименты в указанной работе осуществлялись для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 на 4-х шариковой машине трения КТ-2 при скорости скольжения  $V = 2,4 \cdot 10^{-4}$  м/с и нагрузке на шарик  $N = 45$  Н. С учетом размера пятна на контакта  $S = 0,76$  мм<sup>2</sup>, приведенного для аналогичных условий эксперимента в работе [94], величина контактного давления в рассматриваемом эксперименте составила  $P = 59$  МПа. После подстановки приведенных выше исходных данных в математическую модель (5.5), полученную автором, в диапазоне температур от 50 до 300<sup>o</sup>C отклонение расчетных значений долговечности (через каждые 50<sup>o</sup>) от результатов, полученных автором работы [64], составило от 1,4, до 34,7 %, что считается удовлетворительным при испытаниях на трение и износ.

Диаграммы выделенных в результате математической обработки экспериментальных данных эффектов отдельных факторов и их взаимодействий представлены на рисунке 5.3. Анализ данных показал, что наибольшее влияние на снижение долговечности пары трения с ТСП оказывает возрастание температуры нагрева и скорости скольжения, которая, как известно, вносит наибольший вклад в повышение температуры трения. В результате математической обработки экспериментальных данных для оценки комплексного влияния нагрузочно-скоростных факторов при нагреве на коэффициент трения  $f_{тр.}$  установившегося режима были выделены эффекты отдельных факторов и их взаимодействия (рисунок 5.3 б). Анализ данных выявил наибольшее влияние на величину  $f_{тр.}$  фактора контактной нагрузки, с возрастанием которой коэффициент трения фрикционного сопряжения с ТСП снижается наиболее существенно в сравнении с влиянием других эксплуатационных факторов, что объясняется, по-видимому, размягчением



связующих составляющих смазочной плёнки вследствие повышения контактной температуры трения.

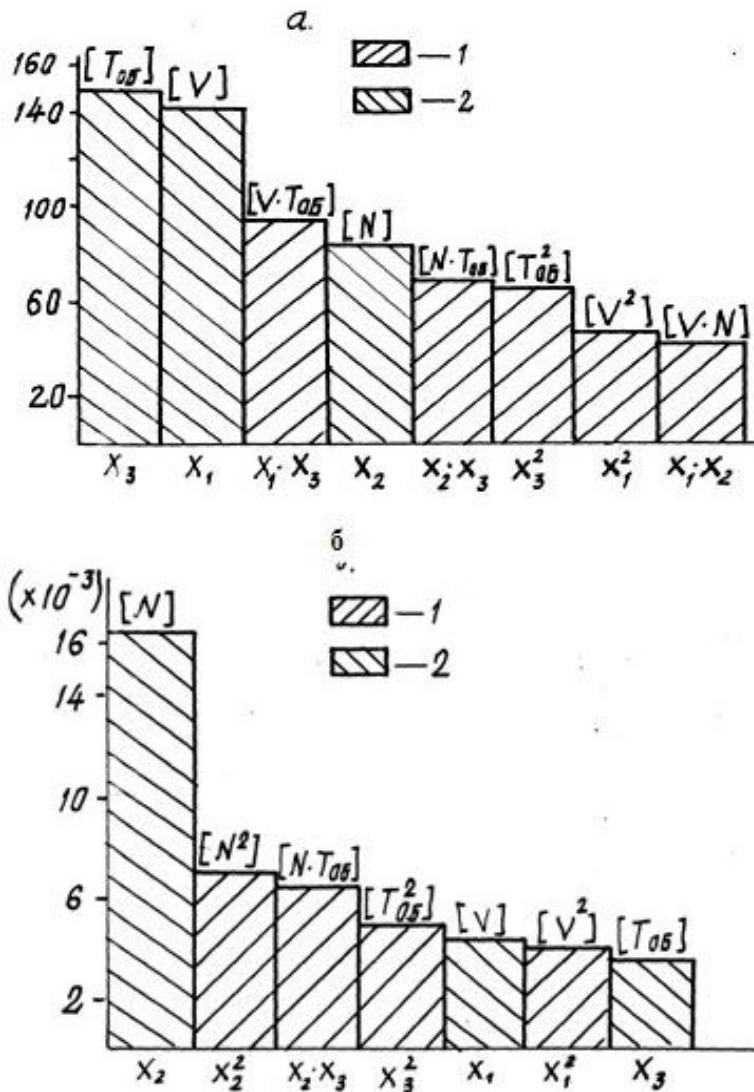


Рисунок 5.3 – Диаграммы выделенных эффектов при исследовании комплексного влияния эксплуатационных факторов на ресурс пары (а) и коэффициент трения (б) для ТСП ВНИИ НП 212: 1 - положительное влияние; 2 - отрицательное влияние

Непрерывная запись в процессе экспериментов как  $f_{тр.}$ , так и  $T_{тр.}$  позволила произвести оценку динамики изменения теплофрикционного режима трения в процессе наработки для исследуемой пары трения с ТСП ВНИИ НП 212. Примеры диаграмм, снятых непосредственно с лент самопишущих приборов, приведены на рисунке 5.4. Из рисунка видно, что период приработки сопровождается резким повышением  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  (в 1,5-2 раза) по сравнению с установившимся уровнем. Причём процесс постепенного увеличения значений  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$ , а затем резкого их снижения происходил многократно и наблюдался практически во всех экспериментах. Проведённые ранее (см.

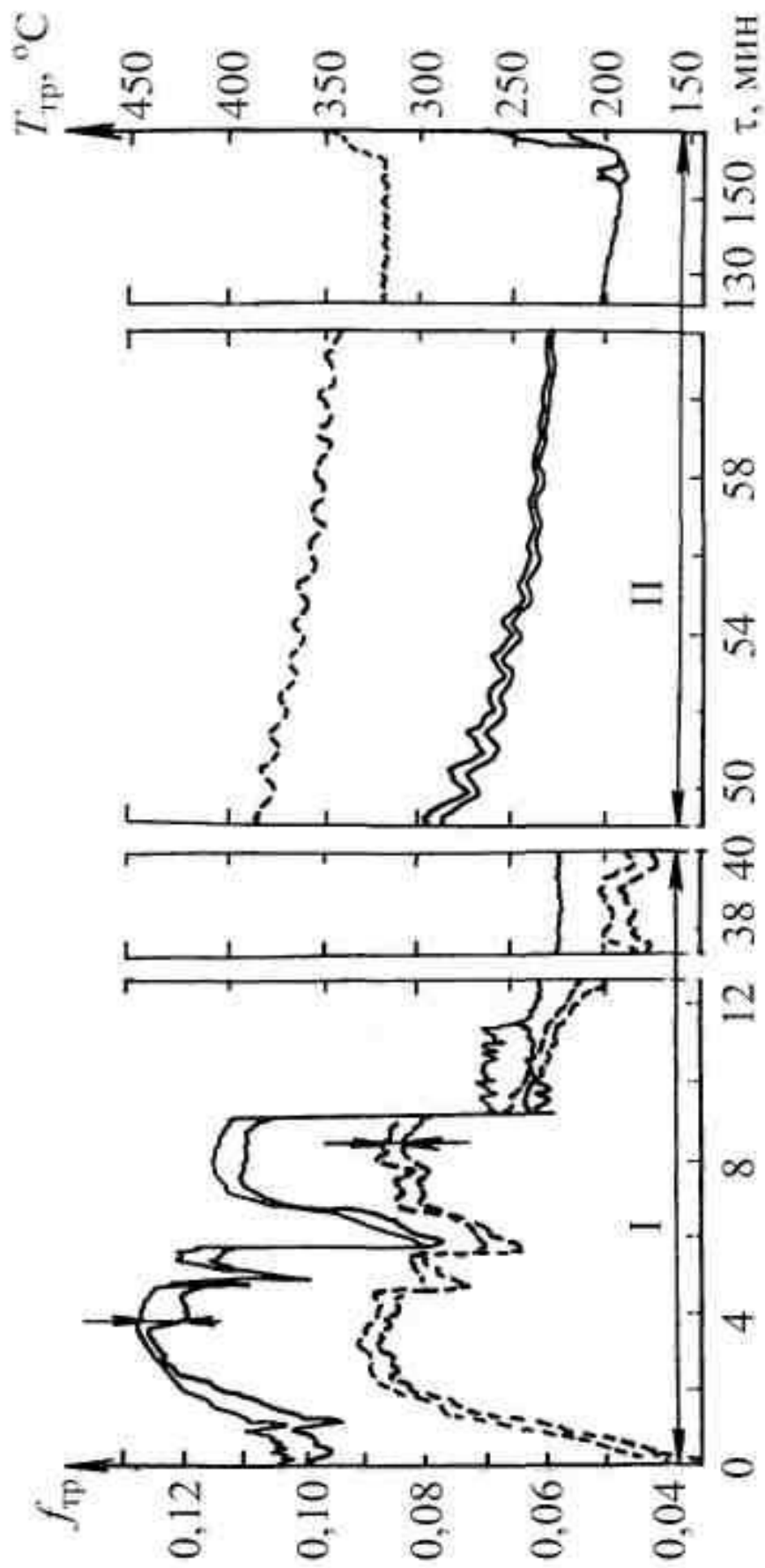


Рисунок 5.4. Изменение  $f_{тр}$ . (сплошные линии) и  $T_{тр}$ . (штриховые) во времени при испытании пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 ( $V=0,66$  м/с,  $P = 72,8$  МПа,  $T_{об} = 120^{\circ}\text{C}$ ). Стрелками показаны границы колебаний  $f_{тр}$ . и  $T_{тр}$ .: 1 – обработка; 2-наработка при нагреве

п.3.1.2) исследования динамики износа ТСП в процессе наработки показали, что вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75-80%) приходится именно на режим приработки и лишь 20-25% - на установившийся режим трения. Поэтому наблюдавшиеся скачки значений  $f_{тр}$  и  $T_{тр}$  можно объяснить постепенным накоплением усталостных повреждений в поверхностном слое покрытия (когда  $f_{тр}$  и  $T_{тр}$  постепенно возрастают) до предельного критического состояния, после которого, по-видимому, происходит отслаивание верхнего слоя (когда  $f_{тр}$  и  $T_{тр}$  резко снижаются). Этот процесс повторяется вплоть до образования тонкой поверхностной смазочной плёнки, которая и обеспечивает всю дальнейшую наработку.

Анализ данных об изменении  $f_{тр}$  в период приработки (см. таблицу 2.3) показывает, что значение  $f_{тр}$  для неприработанных поверхностей превосходит своё установившееся значение в 1,5-2 раза. Учитывая это обстоятельство, становится очевидной важность осуществления процесса приработки в условиях производства для фрикционных сопряжений с ТСП, функционирующих как в нормальных атмосферных условиях, так и при повышенной температуре.

#### 5.1.2 Разработка и опробование метода определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных материалов

Следующим этапом работы явилась разработка метода определения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов на примере исследования ТСП ВНИИ НП 212.

В основу способа положена определяющая зависимость предельных и оптимальных режимов трения многих смазочных материалов от температурного фактора [64]. Известно, что выход из строя пары трения с применением смазочных материалов на предельных по нагрузочно-скоростным параметрам режимах трения обуславливается разрушением смазочной пленки вследствие высокой контактной температуры трения. С другой стороны,

оптимальные нагрузочно-скоростные режимы пары по интенсивности изнашивания, коэффициенту трения или другим факторам, определяющим работоспособность сопряжения, также объясняются, главным образом, благоприятным температурным состоянием контактной поверхности трения. Например, для ТСП - это температура размягчения связующего ( $\approx 100^\circ\text{C}$ ) [94]. Так как  $T_{\text{тр}}$  является функцией от двух определяющих ее эксплуатационных факторов контактного давления и скорости скольжения, то, следовательно, для смазочных материалов, образующих на поверхности трения смазочную пленку, должны существовать комплексные зависимости, определяющие предельные и оптимальные сочетания вышеназванных факторов.

Способ реализуется следующим образом (рисунок 5.5).

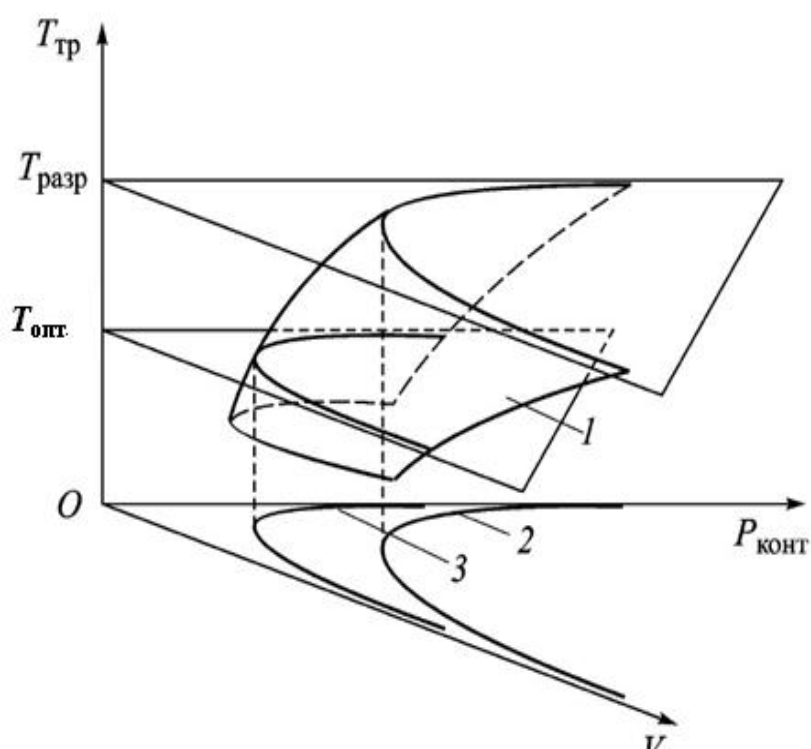


Рисунок 5.5 - Графическое решение задачи нахождения предельных и оптимальных нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов: 1 - температурная характеристика исследуемой пары трения по факторам  $P$  и  $V$ ; 2 - кривая предельных значений  $P_{\text{пред}} = f_1(V_{\text{пред}})$ ; 3 - кривая оптимальных значений  $P_{\text{опт}} = f_2(V_{\text{опт}})$

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  $T_{тр.}$ . Затем после приработки пары трения с испытуемым смазочным материалом на основном уровне факторов в процессе одного испытания факторы  $P$  и  $V$  изменяют по заданному закону, и непрерывно регистрируют соответствующую им  $T_{тр.}$  на установившемся режиме. После 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 соответствующие зависимости вида  $P_{опт.} = f(V_{опт.})$ , позволяющие определить для каждой  $V$  реальной пары трения предельную и оптимальную нагрузку или, наоборот, по известной нагрузке рассчитать предельную и оптимальную скорость.

Экспериментально способ был опробован при испытании ТСП ВНИИ НП 212 на установке, конструкция которой описана выше (рисунок 2.11). Матрица планирования эксперимента и результаты представлены в таблице 2.2. Уровни и диапазоны варьирования факторов  $P$  и  $V$  приведены в таблице 2.2 б (для машины трения РП).

Методика расчета математической модели по результатам эксперимента, проведенного по методу центрального композиционного ротатбельного планирования 2-го порядка аналогична использованной ранее (см. приложение В). После проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид (адекватность модели (5.6) не отвергается при  $\alpha=0,01$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,01; 3; 4} (13,7) < F^{табл.}_{0,01; 3; 4} (16,69)$ ):

$$T_{тр.} = 36,485 + 132,225 \cdot V + 5,46 \cdot 10^{-2} \cdot N + 2,39 \cdot 10^{-2} \cdot V \cdot N - 47,94 \cdot V^2 - 2,187 \cdot 10^{-5} \cdot N^2 \quad (5.6)$$

где  $T_{тр.}$  - [°C],  $V$ - [м/с],  $N$ - [Н].

С учетом измеренной после опыта на контробразце площади пятна контакта уравнение (5.6), записанное в универсальной форме, приняло вид:

$$T_{\text{тр.}} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P_{\text{конт.}} + 0,234 \cdot P_{\text{конт.}} \cdot V - 4,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{конт.}}^2, \quad (5.7)$$

Определение оптимальных эксплуатационных режимов трения пары с ТСП ВНИИ НП 212 производилось следующим образом. Вначале определялись оптимальные эксплуатационные режимы трения путём подстановки в уравнение (5.7) температуры, соответствующей по данным работы [94] образования эффективной поверхностной смазочной плёнки  $\text{MoS}_2$  рассматриваемого ТСП, что также соответствует зоне перехода абразивного механизма трения к термоусталостному виду разрушения. После соответствующих преобразований было получено уравнение:

$$47,94 \cdot V^2 - 0,234 \cdot P \cdot V + 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 132,23 \cdot V - 0,535 \cdot P + 63,51 = 0 \quad (5.8)$$

Графически данная зависимость соответствовала эллипсу, представленному на рисунке 5.6, поз.3. Затем определялись координаты предельных точек эллипса (уравнение (5.8)), расположенных на границе исследуемого диапазона варьирования факторов  $P$  и  $V$  – т.т. А и В, которые были использованы для построения гиперболической зависимости. Далее исходя из координат центра эллипсов (т.О), были найдены уравнения прямых, соответствующих отрезкам АО и ВО. После преобразования уравнение оптимальных по долговечности режимов трения пар с ТСП приняло вид:

$$P_{\text{опт.}} = 6,636 \cdot V_{\text{опт.}}^{-1,759} \quad (5.9)$$

Полученная зависимость позволяет определить оптимальные для исследуемого типа ТСП эксплуатационные режимы по долговечности работы фрикционных сопряжений (для диапазонов варьирования  $P = 34,7 - 106,9$  МПа,  $V = 0,206 - 0,390$  м/с).

Для нахождения предельных режимов трения была разработана методика, представленная на рис.5.7. В соответствии с ним на первом этапе оцениваются предельные режимы трения рассматриваемого ТСП ВНИИ НП 212. С этой целью на машине трения СМТ-I проводились следующие эксперименты. В

первом опыте после приработки при  $N = 1000$  Н скорость скольжения повышалась до  $V_{\max} = 3,88$  м/с. Затем увеличивалась нагрузка до  $N = 1826$  Н ( $P = 97$  МПа), после чего температура трения возросла до  $282$  С, и произошёл выход

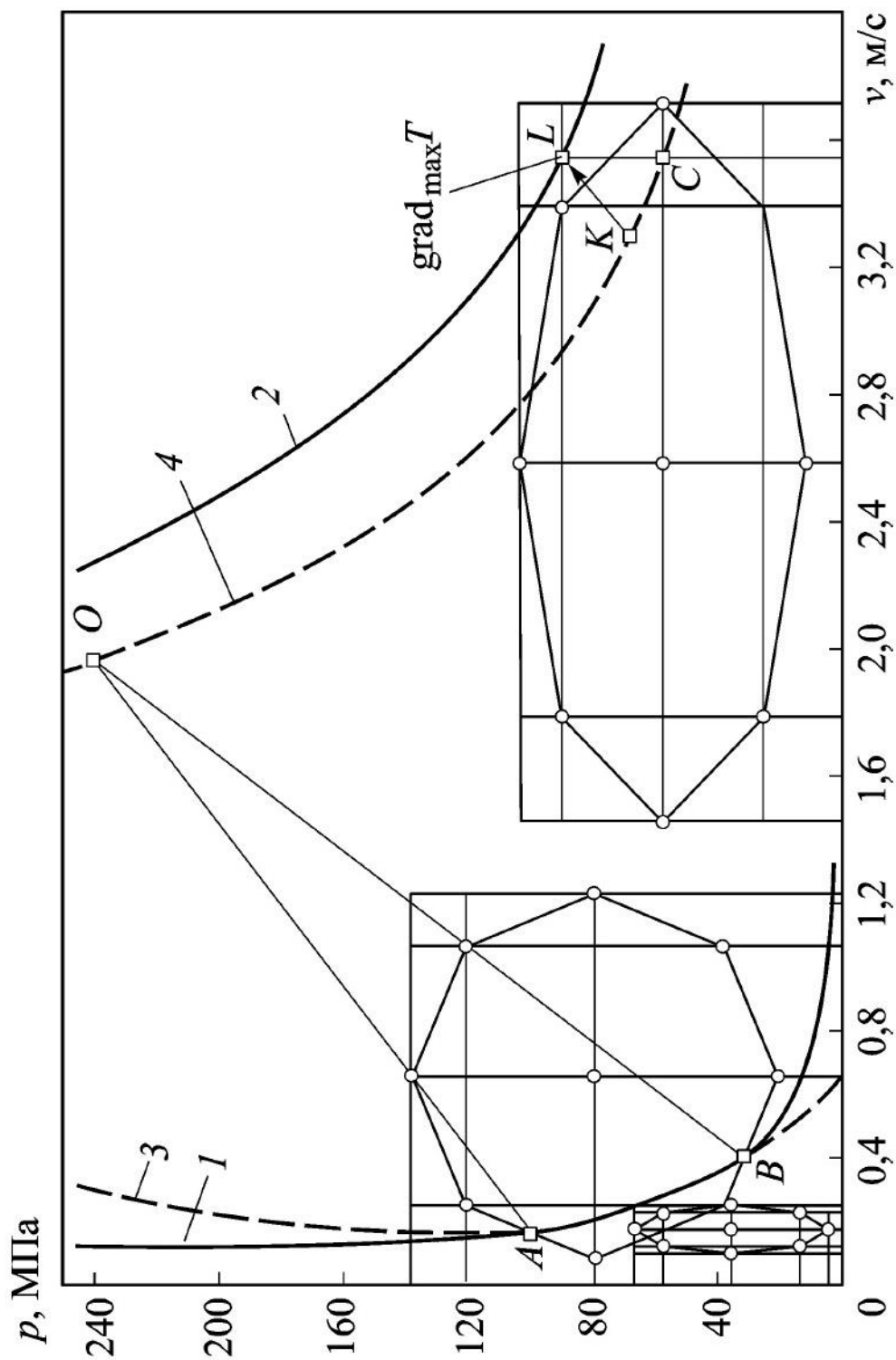


Рисунок 5. 6 - Зависимости типа  $P_{\text{конт.}} = f(v)$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212: 1 - на

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

из строя пары трения. Во втором эксперименте предельные режимы трения составили  $N_{\max} = 1826 \text{ Н}$  ( $P = 95,7 \text{ МПа}$ ),  $V_{\max} = 2,85 \text{ м/с}$ ,  $T_{\text{разр.}} = 260^\circ\text{С}$ . В третьем опыте при  $N_{\max} = 1826 \text{ Н}$  ( $P = 90,6 \text{ МПа}$ ) и  $V_{\max} = 3,88 \text{ м/с}$   $T_{\text{разр.}} = 284^\circ\text{С}$ .

Таким образом, средняя температура разрушения составила  $T_{\text{разр.}} = 275^\circ\text{С}$  (при среднем  $P = 94,4 \text{ МПа}$ ,  $V = 3,54 \text{ м/с}$ - точка L на рисунок 5.6). Данное значение согласуется с данными работы [97], где температура разрушения ТСП рассматриваемого типа определяется диапазоном  $250\text{-}300^\circ\text{С}$ .

На следующем этапе согласно разработанного алгоритма (рисунок 5.7.) с целью исследования комплексной зависимости  $T_{\text{тр.}} = f(P, V)$  для ТСП ВНИИ НП 212 на режимах, близких к предельным, был проведён планируемый эксперимент по типу ЦКРУП 2 порядка на модернизированной машине трения СМТ-1.

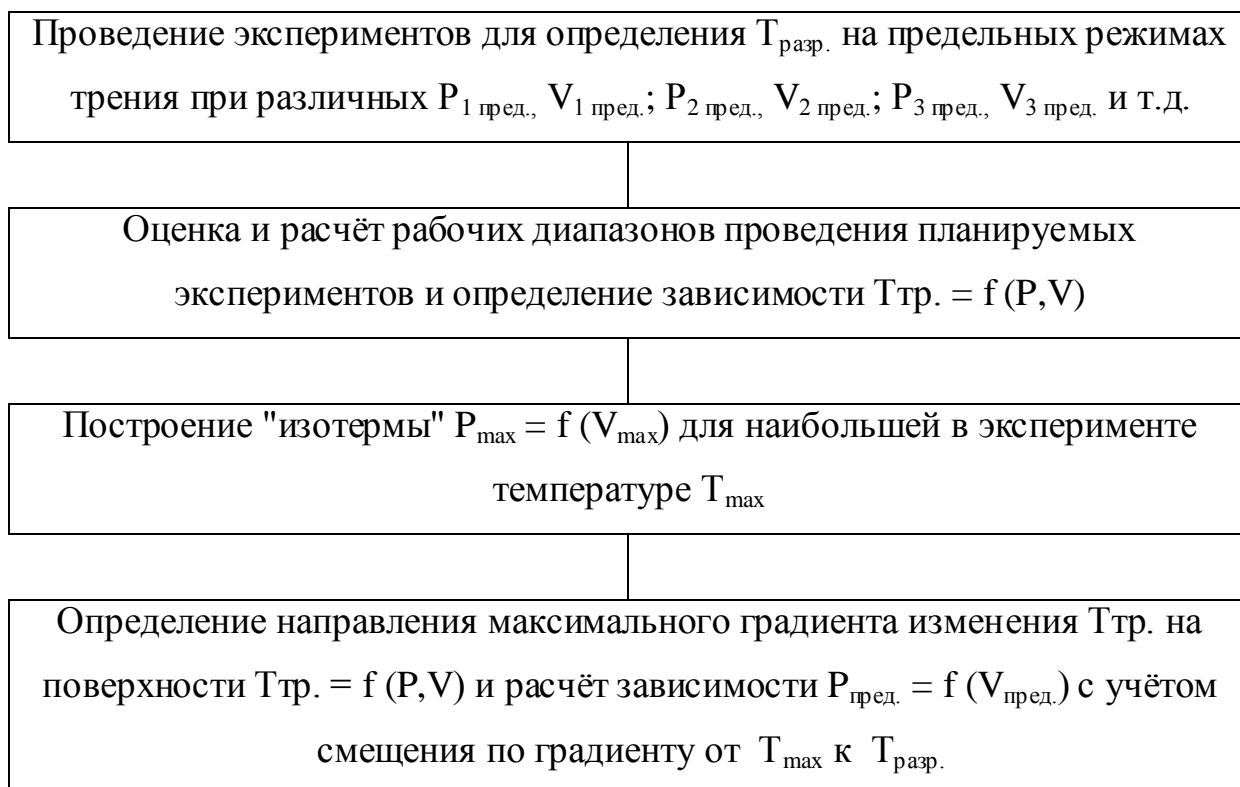


Рисунок 5.7 - Последовательность этапов при нахождении предельных режимов трения



Уровни варьирования факторов представлены в таблице 2.2 б (в знаменателе). Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в таблице 2.7. В результате обработки данных планируемого эксперимента получена следующая математическая модель, адекватность которой не отвергается при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ :

$$T_{тр.} = 119,35 + 10,26 \cdot V + 0,037 \cdot N + 0,19 \cdot V \cdot N, \quad (5.10)$$

где  $T_{тр.}$  - °С,  $V$ - м/с,  $N$  - Н.

С учётом измеренной после опыта на контробразце площади пятна контакта уравнение (5.10), записанное в универсальной форме, приняло вид:

$$T_{тр.} = 119,35 + 10,26 \cdot V + 0,065 \cdot P + 0,335 \cdot V \cdot P \quad (5.11)$$

Корректность полученных зависимостей была проверена на стенде "шайба-диск" для ТСП типа Molykote7409 (обработка основы - перекрёстное шлифование, материал образцов - закалённая сталь С60 –  $HV_{30\text{ ВО}} / HV_{30\text{ НО}} = 770/780$ ). Был осуществлён планируемый эксперимент 2 порядка типа ЦКРУП. Результаты испытаний представлены в таблице 2.7.

В результате проведения эксперимента и обработки полученных данных была рассчитана следующая математическая модель 2 порядка:

$$T_{тр.} = 67,27 - 98,96 \cdot V + 0,464 \cdot P + 6,42 \cdot P \cdot V - 0,011 \cdot P^2, \quad (5.12)$$

где  $V$  – м/с;  $P$  - МПа;  $T_{тр.}$  – °С.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований получены 3 математические модели зависимости  $T_{тр.}=f(P, V)$  для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов (таблица 5.1).

Таблица 5.1 - Зависимости  $T_{тр.}=f(P, V)$  для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов

Тип ТСП на основе MoS <sub>2</sub>	Схема трения	Диапазоны изменения		Зависимости $T_{тр.}=f(P, V)$
		N, Н	V, м/с	

ВНИИ НП 212	Роликовая (машина трения РП)	236- 1337	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	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. $F^{расч.}_{0,05; 5; 4}(2,84) < F^{табл.}_{0,05; 5; 4}(6,26)$ )
Мolykote е 7409	Торцевая (стенд «шайба- диску»)	755- 9045	0,11- 0,25	$T_{тр.} = 67,27 - 98,96 \cdot V + 0,464 \cdot P + 6,42 \cdot P \cdot V - 0,011 \cdot P^2$ (адекватность модели не отвергается при $\alpha=0,01$ , т.к. $F^{расч.}_{0,01; 4; 4}(11,46) < F^{табл.}_{0,01; 4; 4}(15,98)$ )

Примечание -  $V$  – м/с;  $P$  - МПа;  $T_{тр.}$  – °С.

Графическая интерпретация зависимостей типа  $T_{тр.} = f(P, V)$ , представленная на рисунке 5.8 для различных схем трения, показывает удовлетворительную сходимость значений  $T_{тр.}$  для различных схем, что подтверждает корректность полученных результатов.

Далее в соответствии с предложенным алгоритмом (рисунок 5.7) построение "изотермы" для наибольших достигнутых в экспериментах температур ( $P_{max} = f(V_{max})$ ) производилось в следующей последовательности.

Уравнение (5.7) описывает поверхность типа эллиптического параболоида с максимальной точкой т. О (рис. 5.6), в которой  $T_{тр.}$  составляет 230°С. Через эту точку необходимо провести "изотерму", соответствующую  $T_{тр.} = 230°С$ . Вторая точка находилась из уравнения (5.11) для значения  $V$ , соответствующего абсциссе средней предельной температуры разрушения ( $\bar{V} = 3,54$  м/с). Из зависимости (5.11) для  $V = 3,54$  м/с контактное давление составило

$P = 59,42 \text{ МПа}$  (т. С на рисунке 5.6). Используя точки т. О и т. С, полученные для  $T_{\max} = 230^\circ\text{C}$ , было получено искомое уравнение "изотермы":

$$P_{\max} = 1130,8 \cdot V_{\max}^{-2,33} \quad (5.13)$$

Затем на основе анализа уравнения (5.12) находилось направление максимального градиента изменения  $T_{\text{тр.}}$  ( $\approx 45^\circ$ ), в направлении которого смещалась кривая 4 (рисунок 5.6), соответствующая  $T_{\text{тр.}} = 230^\circ\text{C}$ , до найденной ранее средней предельной температуры разрушения  $T_{\text{разр.}} = 275^\circ\text{C}$  (т. L). В результате расчётов с использованием координат  $P_{\text{пред.}}$  и  $V_{\text{пред.}}$  (т. L) получено искомое уравнение  $P_{\text{пред.}} = f(V_{\text{пред.}})$ :

$$P_{\text{пред.}} = 1397,8 \cdot V_{\text{пред.}}^{-2,132} \quad (5.14)$$

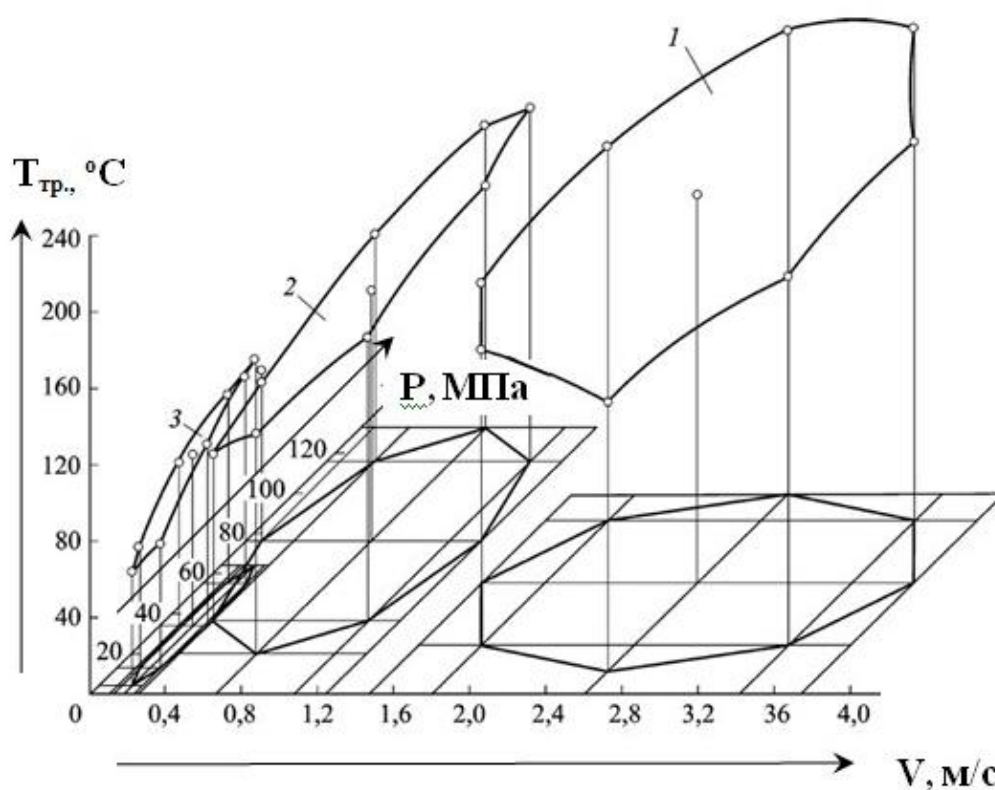


Рисунок 5.8 - Зависимости  $T_{\text{тр.}} = f(P, V)$ , полученные на: 1,2 -машинах трения СМТ-I и РП соответственно (ТСП ВНИИ НП 212);  
3 - стенде "шайба-диск" (ТСП Molykote7409)

Предлагаемый способ позволяет экспериментально определить предельные эксплуатационные режимы трения смазочных материалов для

любого сочетания контактного давления и скорости скольжения пары трения с применением исследуемого смазочного материала, т.е. имея рассчитанное, исходя из конструктивных соображений, значение контактного давления, можно определить предельную и оптимальную скорость скольжения пары с использованием данного смазочного материала и, наоборот, имея заданную скорость скольжения пары трения, можно рассчитать предельное контактное давление и выбрать оптимальные режимы нагрузки или конструкцию узла трения. Способ отличается универсальностью, простотой осуществления и высокой производительностью, так как все необходимые для расчета уравнения регрессии данные можно получить всего лишь за одно испытание, многократно повторив каждый режим трения.

### 5.1.3 Оценка антифрикционных характеристик

В соответствии с ранее разработанным методическим планом (п. 2.1.2.1.3) на следующем этапе работы проводилась оценка влияния нагрузочно-скоростных факторов на антифрикционные свойства пар трения с ТСП в нормальных атмосферных условиях. Для получения комплексной зависимости вида  $f_{тр.} = f(P, V)$  при работе рассматриваемых фрикционных сопряжений в нормальных атмосферных условиях были использованы результаты эксперимента по определению температурной характеристики трения для рассмотренного типа ТСП (см. таблицу 2.4), так как в процессе эксперимента велась непрерывная запись  $f_{тр.}$ .

Обработка результатов эксперимента, проведенного по методу центрального композиционного ротатбельного униформ-планирования 2-го порядка, осуществлялась по методике, изложенной в приложении.

После проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид:

$$f_{тр.} = 0,2489 - 0,1387 \cdot V - 2,37 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,0453 \cdot V^2 +$$

$$+ 7,67 \cdot 10^{-8} \cdot N^2 + 5,74 \cdot 10^{-5} \cdot V \cdot N, \quad (5.15)$$

где  $V$  - [м/с],  $N$  - [Н].

С учетом измеренной на контробразце после опыта площади пятна контакта уравнение (5.15), записанное в универсальной форме, приняло вид:

$$f_{тр.} = 0,2489 - 0,1387 \cdot V - 2,32 \cdot 10^{-3} \cdot P + 0,0453 \cdot V^2 + 7,37 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 5,62 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot P, \quad (5.16)$$

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рисунке 5.9. Анализ полученных данных показывает, что в нормальных атмосферных условиях как и при повышенной температуре скорость скольжения и величина контактного давления оказывают существенное влияние на значение  $f_{тр.}$ , что обуславливается, как указывалось ранее, изменением теплового состояния контактной поверхности трения.

Проверка корректности полученной выше математической модели (5.16) типа  $f_{тр.} = f(P, V)$  производилась путем сравнения с

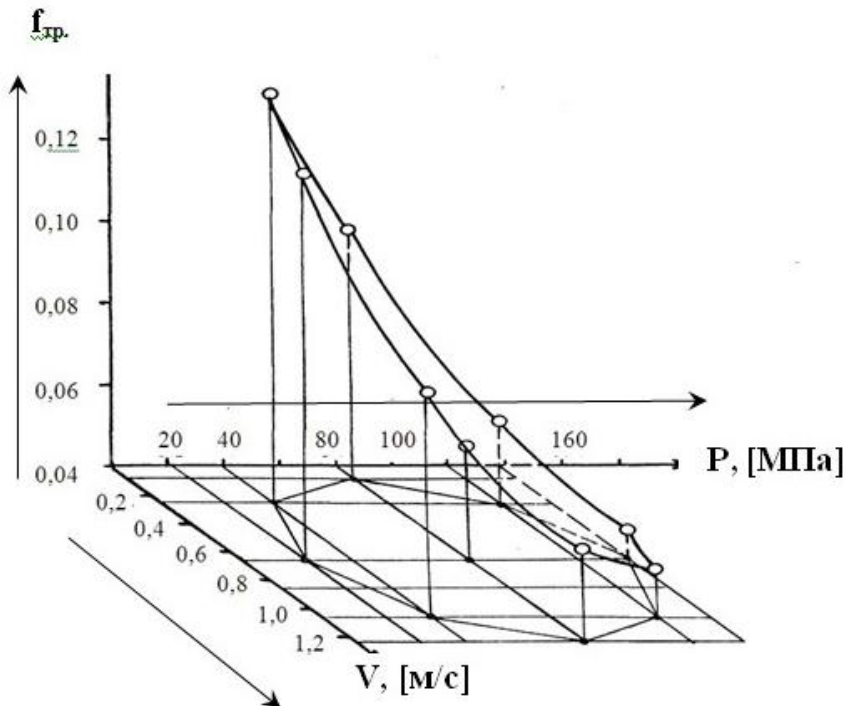


Рисунок 5.9 –  
Графическая  
интерпретация  
зависимости вида  
 $f_{тр.} = f(P, V)$ , полученная  
для пары трения с ТСП  
ВНИИ НИ 212

экспериментальными результатами, приведенными в работе [44]. Эти эксперименты осуществлялись для пар трения с использованием  $MoS_2$  на машине трения СМЦ-2 при контактном давлении  $P = 100$  МПа, которое входит в диапазон изменения этого фактора в эксперименте, проведенном в настоящей

работе, при скорости скольжения  $V = 0,157-0,524$  м/с. Отклонение значений коэффициента трения, рассчитанных для этих условий при помощи модели (5.16) ( $f_{тр.} = 0,0788-0,0597$ ) от экспериментальных данных, полученных в указанной выше работе [44] ( $f_{тр.} = 0,06-0,05$ ), составило 16-24%%, что считается удовлетворительным при проведении испытания на трение и износ.

Таким образом, проведенная проверка показала, что полученная математическая модель позволяет с достаточной для практики точностью рассчитывать работоспособность не только исследованных в работе, но и других типов фрикционных сопряжений узлов трения с ТСП. Полученная выше модель универсальна, так как включает обобщенный фактор контактного давления, что дает возможность широкого ее практического использования.

Характер полученной зависимости объясняется тем, что при  $T_{тр.} < 100-120^{\circ}\text{C}$  тепловой уровень в ТСП недостаточен для размягчения связующих, что приводит к росту  $f_{тр.}$  с повышением температуры, независимо от того происходит ли это вследствие фрикционного нагрева или под действием внешнего источника тепла, температура становится достаточной для размягчения связующих и ориентации частиц  $\text{MoS}_2$  своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения ( $f_{тр.}$  снижается до 0,03-0,04).

## 5.2 Сравнительная оценка триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов в нормальных атмосферных условиях

### 5.2.1 Исследование теплофрикционных показателей самосмазывающихся материалов для различных материалов контртела

Наряду с ТСП одними из наиболее перспективных смазочных материалов для экстремальных условий функционирования пар трения в различных средах, вакууме и при воздействии других факторов являются самосмазывающиеся материалы (СМ). Согласно литературным данным [22] вопросам исследования теплофрикционных характеристик (ТФХ) СМ, являющихся одними из наиболее

важных параметров, и оптимальных условий трения уделялось недостаточное внимание. В этой связи были проведены исследования по методике, изложенной в разделе 2.1.2.1.4.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 5.10 - 5.12.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что для

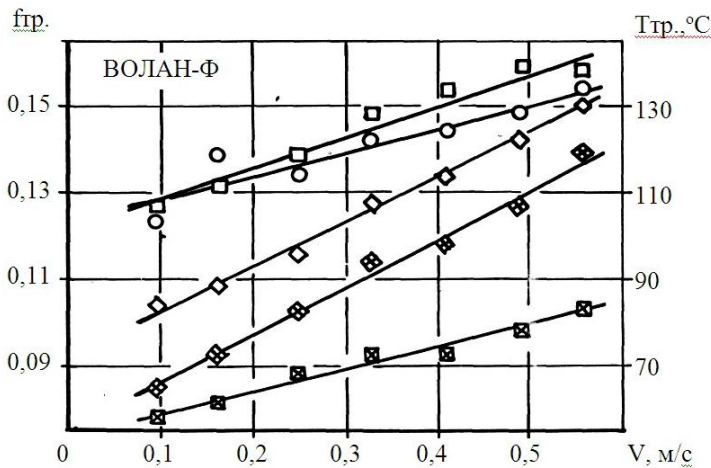


Рисунок 5.10 – Графики изменения

теплофрикционных режимов трения СМ ВОЛАН-Ф зависимости от  $V$  на воздухе:  $O$  –  $f_{тр.}$  (контртело ШХ15,  $P = 15$  МПа);  $\square$  –  $f_{тр.}$ ,  $\boxtimes$  –  $T_{тр.}$  (контртело ХВГ,  $P=12$  МПа);  $\diamond$  –  $f_{тр.}$ ,  $\boxtimes$  –  $T_{тр.}$  (контртело 12Х18Н9Т,  $P = 13,3$  МПа)

рассмотренных пар трения в исследуемых диапазонах изменения скорости скольжения  $V$  наблюдалась резкая разница в характере изменения ТФХ. Так, например, для группы наполненных полимерных антифрикционных материалов на основе ПТФЭ (ВОЛАН-Ф, КВП-1, ГФ-5М – рисунки 5.10, 5.11) в целом с повышением скорости скольжения наблюдается возрастание  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$ . Причём если для СМ типа ВОЛАН-Ф при обоих материалах контртела в данных условиях наблюдалось линейное возрастание  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$ , то в процессе испытаний двух остальных материалов подобная зависимость была получена лишь для СМ типа КВП-1 при работе в паре с контртелом, изготовленным из 12Х18Н9Т. Для СМ ВОЛАН-Ф значение  $f_{тр.}$  при трении по пластичному контртелу (12Х18Н9Т) оказывается более низким, чем для твёрдых материалов (ХВГ, ШХ15), причём  $T_{тр.}$  в последнем случае оказывается более низким, чем в первом случае. При использовании более твёрдого контртела (ХВГ, HRC=60) для материала КВП-1 (рисунок 5.12) на графике  $f_{тр.} = f(V)$  была обнаружена экстремальная область в диапазоне скоростей  $V = 0,3-0,4$  м/с. В данных

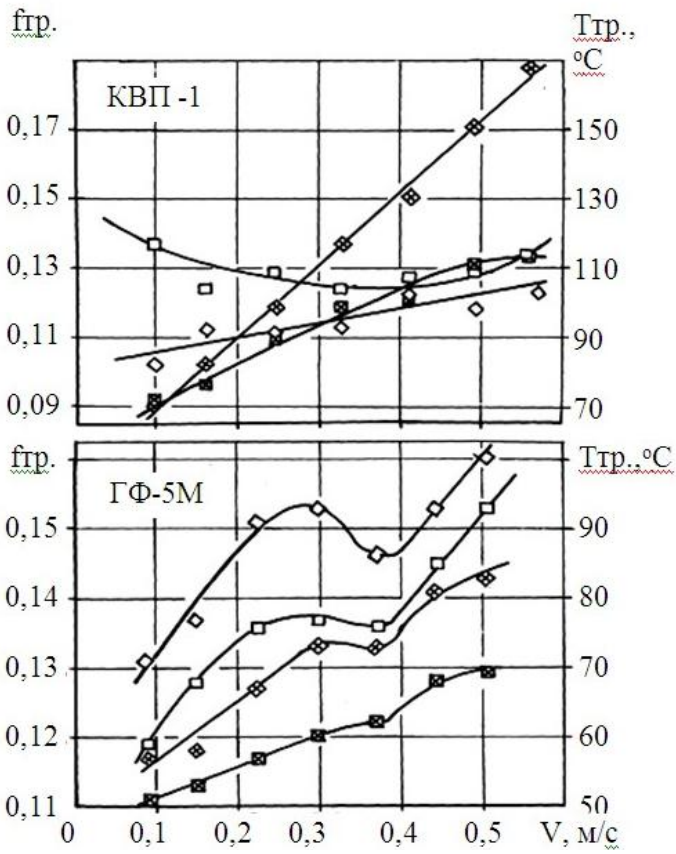


Рисунок 5.11 - Графики изменения теплофрикционных режимов трения СМ KBП-1, ГФ-5М в зависимости от V на воздухе: □ - fтр., ⋈ -Ттр. (контртело ХВГ, P=11,5 МПа); ◊ - fтр., ⋈ - Ттр. (контртело 12Х18Н9Т, P=МПа)

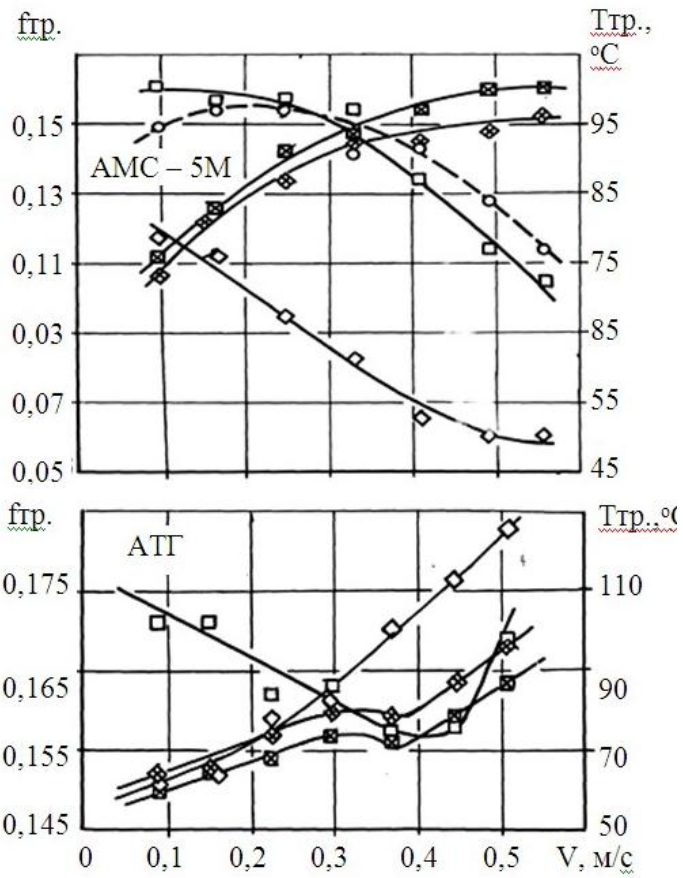


Рисунок 5.12 - Графики изменения теплофрикционных режимов трения СМ АМС-5М, АТГ в зависимости от V на воздухе: O - fтр. (контртело ШХ15); □ - fтр., ⋈ - Ттр. (контртело ХВГ, P=15 МПа); ◊ - fтр., ⋈ - Ттр. (контртело 12Х18Н9Т, P = 13,3-28 МПа)



условиях при  $P = 12$  МПа для рассматриваемого СМ контактная температура трения порядка  $T = 100^\circ\text{C}$  приводит, вероятно, к размягчению полимерной основы и созданию благоприятных антифрикционных условий в зоне трения, в результате чего  $f_{\text{тр}}$  снижается до минимальных значений (оптимальные условия). При повышении  $V$   $f_{\text{тр}}$  и  $T_{\text{тр}}$  возрастают. Следовательно, в качестве режимов, обеспечивающих удовлетворительную смазочную способность в паре трения КВП-I x ХВГ (или для другой стали с  $\text{HRC} = 60$ ) могут быть рекомендованы режимы, менее напряжённые по сравнению с уровнями по  $V$  и  $P$ , соответствующими описанной выше экстремальной области, т.е.  $V \leq 0,4$  м/с,  $P \leq 12$  МПа для контртела высокой твёрдости. Оценивая влияние твёрдости контртела на ТФХ КВП-I следует отметить, что в паре с контробразцом, изготовленным из пластичного материала (I2XI8H9T)  $f_{\text{тр}}$  оказывается более низким, а  $T_{\text{тр}}$  - более высокой, чем для твёрдого контробразца.

Возрастание  $f_{\text{тр}}$  и  $T_{\text{тр}}$  с повышением  $V$  наблюдалось СМ ГФ-5М (рисунок 5.11). Причём также в диапазоне  $V = 0,3-0,4$  м/с для обоих контробразцов наблюдалась или площадка стабилизации, или даже зона снижения обоих параметров ТФХ. Для этой марки СМ значения как  $T_{\text{тр}}$ , так и тесно коррелирующий с ним  $f_{\text{тр}}$  для пары с пластичным контробразцом оказались выше, чем с твёрдым.

Значительно большей прочностью обладает СМ марки АМС-5М. Графики испытаний этого материала, приведённые на рисунок 5.12, показывают, что для данного СМ с повышением скорости скольжения до  $V = 0,4-0,5$  м/с, что соответствовало возрастанию  $T$  до  $95-100^\circ\text{C}$ , в данных условиях наблюдалось резкое снижение  $f_{\text{тр}}$  до значений  $f_{\text{тр}} = 0,06-0,11$ . Для рассмотренных сочетаний материалов контробразцов с СМ АМС-5М весь диапазон исследованных режимов трения обеспечил удовлетворительные антифрикционные свойства данных фрикционных сопряжений. Причём значения  $f_{\text{тр}}$  для пары с пластичным контробразцом (I2XI8H9T) оказалось, как и в

случаях с СМ ВОЛАН-Ф и КВП-1, более низким, чем для твёрдого контртела (ХВГ) при примерно одинаковых  $T_{тр}$ .

Результаты исследования ТФХ для СМ АТГ представлены на графике рисунка 5.12. Отличительной особенностью полученных зависимостей является тот факт, что несмотря на резко противоположный характер изменения  $f_{тр.}$  с повышением  $V$  для рассмотренных пар трения и довольно существенную разницу контактных давлений тепловое состояние поверхности трения изменяется незначительно:  $T_{тр.} = 60-100^{\circ}\text{C}$ , что по-видимому связано с высокой теплостойкостью данного СМ. Характерно, что в данных условиях на графиках  $T_{тр.} = f(V)$  после постепенного незначительного повышения  $T_{тр.}$  в диапазоне скоростей  $V = 0,3-0,4$  м/с наблюдается стабилизация значений  $T_{тр.}$  При более высоких  $V$   $T_{тр.}$  начинает возрастать более интенсивно. Вероятно, данный режим испытаний обеспечивает благоприятные смазочные характеристики, что подтверждается и на графике  $f_{тр.} = f(V)$  для контртела ХВГ при  $P = 18$  МПа и  $V = 0,3-0,4$  м/с. Следовательно, для рассмотренных сочетаний пар трения для СМ марки АТГ нагрузочно-скоростной режим при  $P = 18$  МПа и  $V = 0,3-0,4$  м/с можно считать наиболее благоприятным, а менее напряжённые режимы трения соответствуют удовлетворительной антифрикционной работоспособности данного СМ.

### 5.2.2 Сравнение теплофрикционных показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов

С целью сравнения антифрикционных характеристик СМ и ТСП были построены графики изменения  $f_{тр.} = f(V)$  для всех рассмотренных сочетаний пар трения СМ с контртелами обеих марок (рисунки 5.13, 5.14).

Очевидно, что в рассмотренных нагрузочно-скоростных диапазонах наилучшими антифрикционными параметрами обладает материал АМС-5М, обнаруживающий на режимах  $V = 0,4-0,5$  м/с  $f_{тр.} = 0,06$  и менее для пары трения АМС-5М x I2XI8H9T и  $f_{тр.} = 0,1$  при  $V = 0,5-0,6$  м/с для пары АМС-5М x ХВГ (рисунок 6.14). Для сравнения на рисунках приведён также график

изменения  $f_{тр.} = f(V)$  для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 (контртело - ХВГ,  $P = 13,3$  МПа). Анализ фрикционных характеристик СМ и ТСП данного типа в рассмотренных диапазонах  $P$  и  $V$ , показывает, что при низких контактных давлениях ( $P = 11-18$  МПа) и скоростях скольжения  $V < 0,4$  м/с

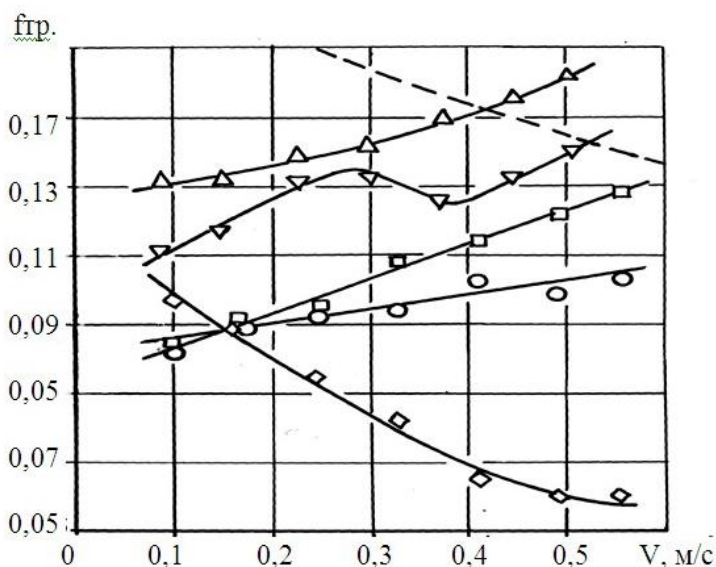


Рисунок 5.13 - Графики изменения  $f_{тр.}$  СМ и ТСП в нормальных атмосферных условиях в зависимости от скорости скольжения (для СМ контртело I2X18H9T): O - КВП-I, □ - ВОЛАН-Ф, ◇ - АМС-5М -  $P=13,3$  МПа, △ - АТГ,  $P=28$  МПа; ▽ - ГФ-5М,  $P=17$  МПа; ---- ТСП ВНИИ НП 212 (контр тело ХВГ,  $P=13,3$  МПа)

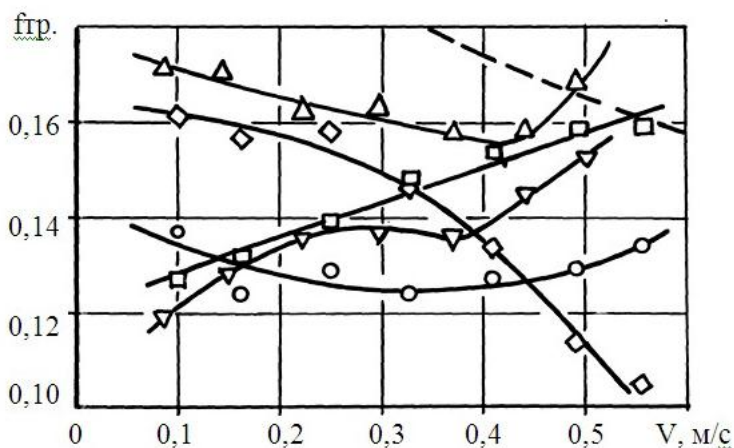


Рисунок 5.14 - Графики изменения  $f_{тр.}$  СМ и ТСП в нормальных атмосферных условиях в зависимости от скорости скольжения (контртело ХВГ, HRC=60): O - КВП-I, ▽ - ВОЛАН-Ф, □ - АМС-5М -  $P=12$  МПа; ◇ - АТГ,  $P=18$  МПа; △ - ГФ-5М,  $P=17$  МПа; ---- ТСП ВНИИ НП 212 ( $P=13,3$  МПа)

антифрикционные свойства СМ превосходят соответствующие характеристики для ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ .

С повышением скорости скольжения  $V > 0,5$  м/с даже на предельных для СМ контактных нагрузках их антифрикционные свойства не превосходят  $f_{\text{тр}}$  ТСП. Исключение составляет СМ АМС-5М, обнаруживший снижение  $f_{\text{тр}}$  до значений  $f_{\text{тр}} = 0,06-0,10$  ниже  $f_{\text{тр}}$  ТСП во всём диапазоне  $V$ . Последний вывод был подтверждён сравнением результатов исследований ТФХ СМ и ТСП на графиках типа  $f_{\text{тр}} = f(T_{\text{тр}})$  (рисунок 5.15), которые позволяют провести оценку теплофрикционного состояния контактных поверхностей соответствующих пар трения.

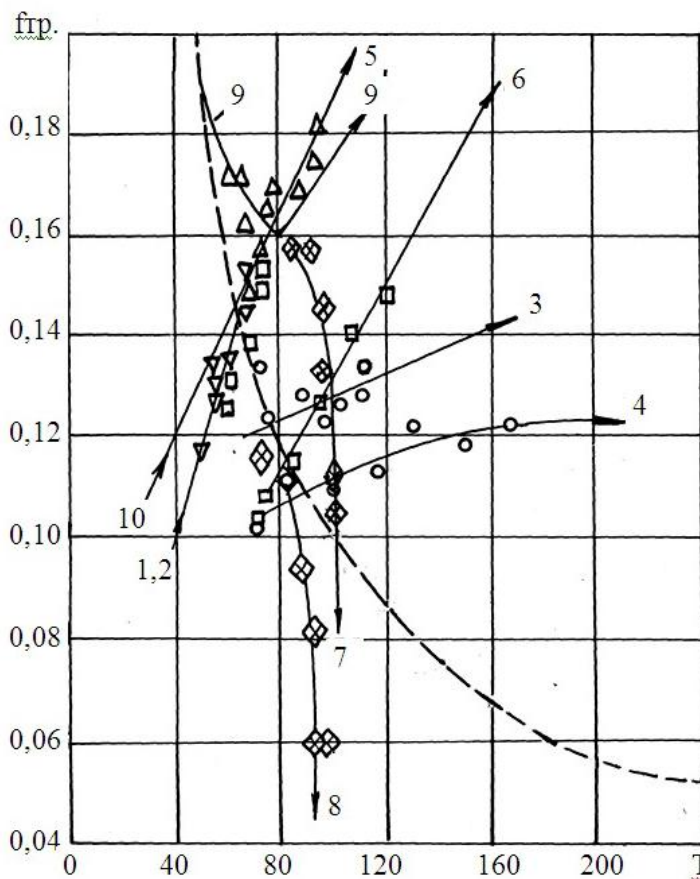


Рисунок 5.15 - Теплофрикционные характеристики различных СМ и ТСП в нормальных атмосферных условиях: 1,2 - ГФ-5М; 3,4 - КВП-1; 5,6 - ВОЛАН-Ф; 7,8 - АМС-5М; 9,10 - АТГ; ----- ТСП ВНИИ НП 212; материал контртела: 1,3,5,7,9 - ХВГ, HRC > 60; 2,4,6,8,10 - I2X18H9T

Анализируя представленные на рисунок 5.15 зависимости, очевидно преимущество СМ типа АМС-5М, имеющего "падающую" характеристику по сравнению с остальными антифрикционными СМ, для которых с увеличением  $f_{\text{тр}}$  повышается и контактная температура трения  $T_{\text{тр}}$ . Исключение составляет

СМ марки АТГ, для которого, как отмечалось ранее, до  $T_{тр.}=80^{\circ}\text{C}$  наблюдалось снижение  $f_{тр.}$ , а при более напряжённых режимах  $f_{тр.}$  резко возрастал. Своеобразие ТФХ СМ АМС-5М объясняется принципиальным отличием состава этого композита от других рассматриваемых марок СМ. Если первый представлял собой достаточно высокопрочную композицию углеродного наполнителя, связанного прочной смолой, то остальные СМ представляют собой наполненные полимеры (КВП-1, ГФ-5М, ВОЛАН-Ф), или пропитанный связкой углеграфитовый материал (АТГ). Поэтому "падающая" характеристика СМ АМС-5М может быть объяснена следующим образом. При температурном режиме до  $T_{тр.} < 80^{\circ}\text{C}$  тепловой уровень недостаточен для размягчения связующего этого СМ. С ростом  $T_{тр.}$  температура в месте контакта становится достаточной для размягчения связующего и ориентации частиц антифрикционного наполнителя вдоль поверхности трения. Это обстоятельство подтверждается высоким  $f_{тр.} = 0,1-0,12$  при  $T_{тр.} < 80^{\circ}\text{C}$  и низким  $f_{тр.} = 0,06$  при  $T_{тр.} > 80^{\circ}\text{C}$ . Аналогичным образом может быть объяснена оптимальная область трения для СМ АТГ (при  $T_{тр.} = 80^{\circ}\text{C}$   $f_{тр.}$  достигает минимума). Однако с повышением  $T_{тр.}$  для этого СМ тепловой уровень достигает значений, приводящих к быстрому разрушению связки, что сопровождается резким ухудшением антифрикционных характеристик. Для остальных СМ типа наполненных полимеров повышение  $f_{тр.}$  возрастанием  $T_{тр.}$  является зависимостью, типичной для полимерных материалов.

Для построения теплофрикционной зависимости ТСП ВНИИ НП 212 использовались результаты испытаний данного ТСП как при повышенной температуре (таблица 2.3), так и без нагрева при получении зависимостей  $T_{тр.}=f(N, V)$  и  $f_{тр.} = f(N, V)$  (таблица 2.4). Характер полученной зависимости может быть объяснён следующим образом. При температурном режиме до  $T_{тр.} < 100 - 120^{\circ}\text{C}$  тепловой уровень недостаточен для размягчения связующих составляющих ТСП. С ростом  $T_{тр.}$  температура в месте контакта становится достаточной для размягчения связующих и ориентации частиц  $\text{MoS}_2$  своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения ( $f_{тр.}$  снижается до 0,03-

0,04). Таким образом, можно предположить, что при режимах трения, обеспечивающих температуру в месте контакта 100-120°C, процесс истирания ТСП носит абразивный характер, так как данный порядок температур недостаточен для свободного перемещения частиц MoS<sub>2</sub> связующем, которые, как известно, в процессе напыления покрытий на поверхности трения ориентированы в плёнкообразующем веществе произвольно (хаотически). Это подтверждается высокими значениями коэффициента трения ( $f_{тр.} = 0,1 - 0,14$ ). Однако при температуре в месте контакта свыше 120~160°C происходит размягчение связующих, достаточное для правильной ориентации частиц MoS<sub>2</sub>. Результатом этого является существенное улучшение антифрикционных характеристик контакта, когда  $f_{тр.} = 0,04 - 0,06$ .

Таким образом, в результате проведённых исследований разработана и опробована сравнительная методика оценки работоспособности различных типа СМ и ТСП. Исследованы теплофрикционные характеристики СМ АТГ, ГФ-5М, ВОЛАН-Ф, КВП-1, АМС-5М и ТСП ВНИИ НП 212. Из числа исследованных СМ наиболее предпочтительные параметры имел СМ АМС-5М, обнаруживший не только меньшее значение  $f_{тр.}$ , но и снижение последнего с возрастанием  $V$ . Выявлена тесная корреляционная связь между параметрами  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  для различных типов СМ, позволяющая произвести оперативную оценку значения  $T_{тр.}$  по величине  $f_{тр.}$ , трудоёмкость измерения которого значительно меньшая, чем первого параметра. Исследование влияния контртела на ТФХ позволило сформулировать следующие рекомендации:

1. для СМ ВОЛАМ, КВП-1, АМС-5М и АТГ (при  $V < 0,3$  м/с и  $P = 11-28$  МПа) использовать в качестве материала контртела более пластичный материал (типа I2XI8H9T), обеспечивающий меньший  $f_{тр.}$  по сравнению с твёрдым контртелом (типа закалённой стали ХВГ, HRC=60);
2. для СМ ГФ-5М, а также АТГ (при  $V > 0,3$  м/с и  $P = 11-28$  МПа) использовать в качестве материала контртела закалённые стали (типа ХВГ, HRC > 60).

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

### 5.3 Результаты исследования влияния вакуума

#### 5.3.1 Влияние нагрузочно – скоростных факторов на триботехнические показатели и температурные характеристики

Исследования проводились в соответствии с методикой, изложенной в п.2.1.2.2. Уровни и диапазоны варьирования факторов представлены в таблице 2.8, матрица планирования - в таблице 5.2.

После проведения преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид (адекватность модели (5.17) не отвергается при  $\alpha=0,01$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,01; 5; 4} (12,7) < F^{табл.}_{0,01; 5; 4} (15,52)$ ):

$$\tau = 9865,3 - 31516,15 \cdot V - 5,835 \cdot N + 20311,36 \cdot V^2 + 14,53 \cdot V \cdot N, \quad (5.17)$$

где  $\tau$  - [мин.],  $V$  – [Н]

Для перехода от значений абсолютной нагрузки к контактному давлению была использована ранее полученная зависимость вида  $N=f(P, V)$  (см. уравнение (5.2)), так как дополнительная проверка с учетом площади дорожек трения на контробразце, измеренных после каждого эксперимента, показала удовлетворительную сходимость контактных характеристик, полученных в условиях вакуума, с аналогичными величинами, определенными по формуле (5.2) для нормальных атмосферных условий. Данный результат согласуется с ранее сделанным выводом о том, что контактные характеристики (уровень контактного давления) в данных условиях трения в основном определяется величиной абсолютной нагрузки.

Таблица 5.2 - Матрица планирования и результаты эксперимента в задаче исследования влияния нагрузочно-скоростных факторов на триботехнические свойства пары трения с ТСПВНИИ НИ 212 в вакууме

№ опыта	Уровни факторов: а) в кодовом масшт.; б) в натур. масшт.										Исследуемые параметры				
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	V, м/с	N, х9,8Н	τ <sub>пр.</sub> , мин.	f <sub>пр.</sub>	τ, мин.	f <sub>тр.</sub>	T <sub>тр.</sub> , °С		
1.	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,147	70,25	720	0,139	3424	0,074	84		
2.	+1	+1	-1	+1	+1	-1	0,443	70,25	243	0,095	612	0,055	111		
3.	+1	-1	+1	+1	+1	-1	0,147	120,25	480	0,081	1152	0,056	116		
4.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,443	120,25	145	0,060	445	0,047	144		
5.	+1	-1,41	0	+1,99	+1	0	0,087	95,25	772	0,078	2978	0,066	83		
6.	+1	+1,41	0	+1,99+	+1	0	0,504	95,25	151	0,074	448	0,050	141		
7.	+1	0	-1,41	0	+1,99	0	0,295	60	418	0,111	4050	0,061	102		
8.	+1	0	+1,41	0	+1,99	0	0,295	130,5	161	0,063	620	0,046	134		
9.	+1	0	0	0	0	0	0,295	95,25	255	0,073	880	0,050	129		
10.	+1	0	0	0	0	0	0,295	95,25	244	0,064	761	0,045	117		
11.	+1	0	0	0	0	0	0,295	95,25	204	0,071	838	0,053	132		
12.	+1	0	0	0	0	0	0,295	95,25	282	0,074	942	0,049	116		
13.	+1	0	0	0	0	0	0,295	95,25	289	0,083	980	0,050	121		



После подстановки зависимости (5.2) в уравнение (5.17) математическая модель приняла вид:

$$\tau = 10804,7 - 34849 \cdot V - 66,75 \cdot P + 22791,34 \cdot V^2 + 166,03 \cdot V \cdot P, \quad (5.18)$$

где  $\tau$  - [мин.],  $V$  - [м/с],  $P$  - [МПа].

Графическая интерпретация полученного выражения представлена на рисунке 5.16. Анализ полученных данных показывает, что наибольшее влияние на долговечность пар трения с ТСП типа ВНИИ НП 212 оказывает скорость скольжения, с понижением которой происходит резкое возрастание ресурса исследуемой пары трения, что вызвано значительным снижением уровня контактных температур (см. таблицу 5.2).

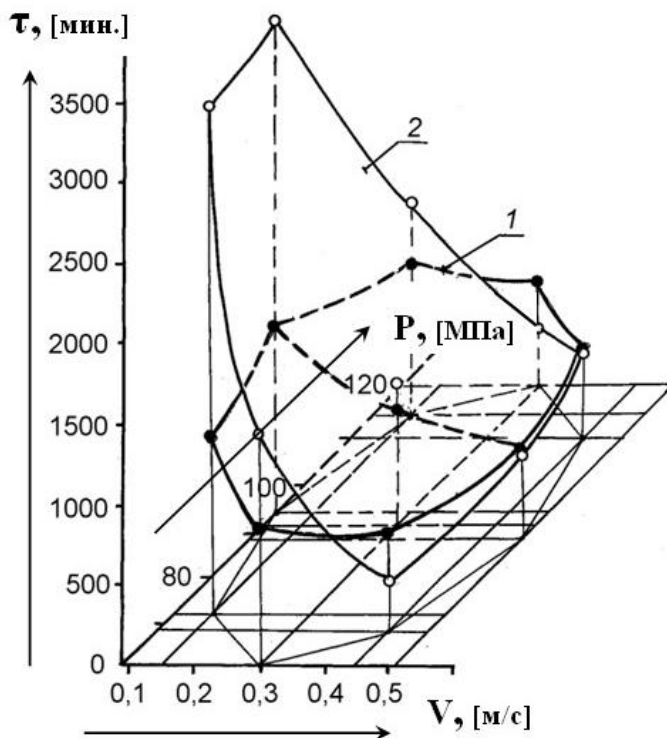


Рисунок 5.16 -  
Графическая  
интерпретация влияния  
нагрузочно - скоростных  
факторов на ресурс  
трения с ТСП ВНИИ НП  
212: —○— - в условиях  
вакуума ( $p \sim 4 \text{ мПа}$ );  
—●— - в нормальных  
атмосферных условиях

Сравнивая приведенные на рисунке 5.16 зависимости ресурса пар трения с ТСП от нагрузочно-скоростных факторов, полученные при испытаниях в вакууме и в нормальных атмосферных условиях, следует отметить, что при менее напряженных режимах трения истираемость рассматриваемого фрикционного сопряжения в условиях вакуума выше, чем в нормальных атмосферных условиях, и, наоборот, при больших значениях  $P$  и  $V$  износостойкость данной пары трения выше на воздухе. Вероятно, такое поведение пар с ТСП связано как с температурным режимом трения, так и с

воздействием вакуума на работоспособность пары трения с ТСП. При малых значениях  $P$  и  $V$ , когда  $T_{тр.}$  в зоне контакта незначительна и не оказывает существенного влияния на ресурс фрикционного сопряжения, основную роль играет воздействие окружающей среды, а именно - наличие кислорода воздуха, приводящее к окислению смазочной поверхности пары трения. Особое значение последнее обстоятельство приобретает для ТСП на основе  $MoS_2$ , отличающихся повышенной окисляемостью поверхности трения. С увеличением скорости скольжения наибольшее влияние на ресурс рассматриваемой пары трения начинает оказывать контактная температура трения. Этот фактор приобретает особое значение в вакууме, когда вследствие разреженности окружающей среды, теплообмен практически отсутствует, и рассеивание тепловой энергии наряду с теплопередачей в основном осуществляется в виде лучистой энергии, значительно менее эффективной, чем теплообмен. В результате чего при одних и тех же режимах трения контактная температура в условиях вакуума выше, чем на воздухе. Поэтому ресурс рассматриваемых фрикционных сопряжений при напряженных режимах трения на воздухе выше, чем в вакууме.

На следующем этапе производилось исследование влияния нагрузочно - скоростных факторов на антифрикционные свойства пар трения с ТСП в условиях вакуума. Методика расчета математической модели по данным таблицы 5.2 была аналогичной использованной ранее (см. приложение).

После подстановки и проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид (адекватность модели (5.19) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 3; 4}(3,68) < F^{табл.}_{0,05; 3; 4}(6,59)$ ):

$$f_{тр.} = 0,1373 - 0,13145 \cdot V - 1,1113 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,16256 \cdot V^2 + 4,665 \cdot 10^{-8} \cdot N^2, \quad (5.19)$$

где  $V$  - [м/с],  $N$  - [Н].

Для перехода от значений абсолютной нагрузки к контактному давлению была использована ранее полученная зависимость вида  $N=f(P_{конт.}, V)$  (см.

уравнение (5.2)). После подстановки последнего выражения в уравнение (5.20) была получена следующая математическая модель:

$$f_{тр.} = 0,1564 - 0,153 \cdot V - 1,443 \cdot 10^{-3} \cdot P + 0,164 \cdot V^2 + 6,1 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 1,824 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V , \quad (5.20)$$

где  $V$ - [м/с],  $P$  - [МПа].

Графическая интерпретация полученного выражения представлена на рисунке 5.17, где для сравнения приведены также аналогичные результаты, полученные ранее при испытаниях в нормальных атмосферных условиях (см. п. 5.1.2). Анализ представленных данных показывает, что на всех режимах испытаний  $f_{тр.}$  в условиях вакуума значительно ниже (в 2 раза и более), чем в нормальных атмосферных условиях.

Такая зависимость  $f_{тр.}$  от нагрузочно-скоростных факторов удовлетворительно объясняется с позиций ранее принятых положений, а именно - причинами такого поведения  $f_{тр.}$  в условиях вакуума являются, во-первых, отсутствие воздушной среды, вызывающей окисление смазочных поверхностей трения, а, во-вторых, значительно более теплонапряженный режим трения вследствие отсутствия теплообмена с окружающей средой и как следствие последнего концентрации тепловой энергии в зоне трения,

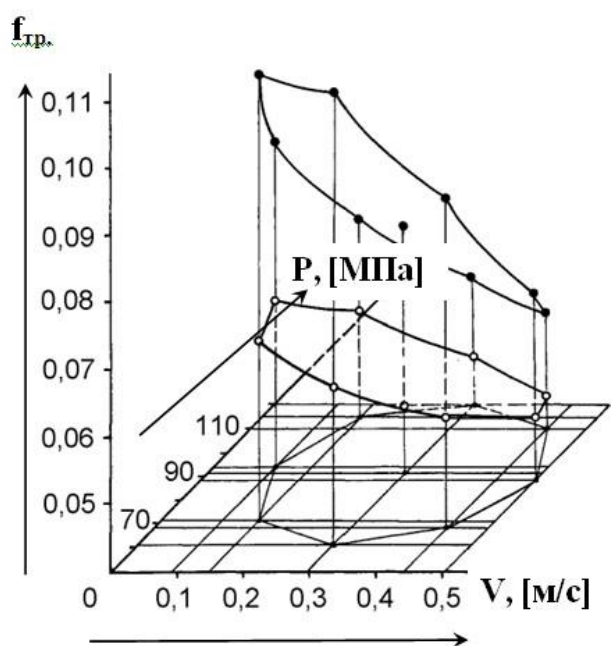


Рисунок 5.17 - Графическая интерпретация влияния нагрузочно - скоростных факторов на  $f_{тр.}$  пары с ТСП ВНИИ НП 212: —○— - в условиях вакуума ( $p \sim 4$  мПа);—●— - в нормальных атмосферных условиях

приводящей к размягчению связующих веществ и улучшению смазочных свойств ТСП.

Проверка корректности математической модели (5.18) типа  $\tau=f(P, V)$  для условий вакуума производилась с использованием экспериментальных данных, приведенных в работе [16] для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212. Эксперименты проводились на машине трения типа УТИ-1 по схеме "диск - палец". Наиболее близкими значениями нагрузки и скорости скольжения в указанном эксперименте к диапазонам изменения этих факторов, исследованным при получении проверяемой модели (5.18), были следующие:  $V = 0,4$  м/с и  $N = 50$  Н (учитывая также, что именно для этой абсолютной нагрузки в другой работе этих же авторов [17] приводится значение диаметра пятна контакта 1,5 мм, т.е.  $S = 1,767$  мм<sup>2</sup>), что соответствует контактному давлению  $P = 28,3$  МПа. После подстановки приведенных исходных данных в комплексную модель (5.18), полученную автором, расчетное значение ресурса составило 502 мин. при экспериментальном значении  $\tau = 315$  мин. (отклонение 37%), что можно признать удовлетворительным, принимая во внимание, что нагрузочный параметр существенно вышел за диапазон изменения этого фактора, исследуемый при получении математической модели (5.18). Согласно другим данным [61], полученным на этой же машине трения при исследовании аналогичной пары при близких к приведенным выше значениям условиях трения, ресурс фрикционного сопряжения с ТСП составил  $\tau = 400$  мин. (отклонение от расчетного значения  $\tau = 502$  мин. - 20,3%). По данным тех же авторов [61] диапазон изменения коэффициента трения в рассматриваемом эксперименте составил  $f_{тр.} = 0,02-0,06$ , что, учитывая некоторую разницу в уровнях нагрузочно-скоростных параметров, удовлетворительно согласуется с диапазоном изменения коэффициента трения, полученном в эксперименте, проведенном в настоящей работе  $f_{тр.} = 0,045-0,065$ .

По данным других авторов [127] для условий вакуума ( $p=10^{-4}$  мм рт. ст.) ресурс пары «вал-втулка» с ТСП ВНИИ НП 212 составил  $\tau = 143$  час. для

давления  $P=9,8$  МПа и скорости скольжения  $V=0,008$  м/с. Отклонение расчётного по формуле (5.18) значения ресурса  $\tau = 165$  час. составило 13,2 %.

Таким образом, проведенные проверки показали, что полученные математические модели позволяют с достаточной для практики точностью рассчитывать работоспособность не только исследованных в работе, но и других типов фрикционных сопряжений узлов трения с ТСП. Полученные выше модели универсальны, так как включают обобщенный фактор контактного давления, что дает возможность широкого их практического использования.

Полученные в ходе эксперимента данные об изменении антифрикционных режимов трения рассматриваемой пары с ТСП (см. таблица 5.2) в период приработки показывают, что значение коэффициента трения для неприработанных поверхностей превосходит свое установившееся значение в 1,5-2 раза. Учитывая, что в настоящее время большинство реальных узлов трения с ТСП не проходит специальной приработки, становится очевидной важность осуществления этого процесса в условиях производства для фрикционных сопряжений, функционирующих в условиях вакуума.

Эксперименты по исследованию влияния нагрузочно-скоростных факторов на контактную температуру трения пар с ТСП (проводились в соответствии с методикой, изложенной ранее (см. п. 2.1.2.2)). Матрица планирования и результаты испытаний пар трения с ТСП в условиях вакуума представлены в таблице 5.2. Методика расчета математической модели была аналогичной использованной ранее (см. приложение А).

После подстановки и проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид (адекватность модели (5.21) не отвергается при  $\alpha=0,05$ , т.к.  $F^{расч.}_{0,05; 5; 4} (1,58) < F^{табл.}_{0,05; 5; 4} (6,26)$ ):

$$T_{тр.} = 12,36 + 282,03 \cdot V + 0,0562 \cdot N - 282,19 \cdot V^2, \quad (5.21)$$

где  $T_{тр.}$  - [°C],  $V$ - [м/с],  $N$ - [Н].

Для перехода, от значений абсолютной нагрузки к контактному давлению была использована ранее полученная зависимость вида  $N = f(P, V)$  (5.2). После подстановки последнего выражения в уравнение (5.22) математическая модель приняла вид:

$$T_{тр.} = 3,31 + 291,64 \cdot V + 0,643 \cdot P - 282,19 \cdot V^2, \quad (5.22)$$

где  $T_{тр.}$  - [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $V$  - [ $\text{м/с}$ ],  $P$  - [ $\text{МПа}$ ].

Графическая интерпретация полученного выражения представлена на рисунке 5.18, где также приведена аналогичная зависимость для нормальных атмосферных условий, построенная с использованием ранее полученной математической модели (см. п. 5.1.2). Сравнение приведенных поверхностей показывает, что, как и предполагалось, контактная температура трения для пары с ТСП в условиях вакуума оказалась выше, чем в нормальных атмосферных условиях вследствие отсутствия теплообмена с окружающей средой в разреженной атмосфере. Причем полученные данные показывают, что эта разница значений  $T_{тр.}$  в основном определяется контактным давлением. Приведенные результаты удовлетворительно согласуются с ранее полученными зависимостями ресурса и коэффициента трения от эксплуатационных факторов для вакуумных и нормальных атмосферных условий (см. рисунки 5.18, 5.21).

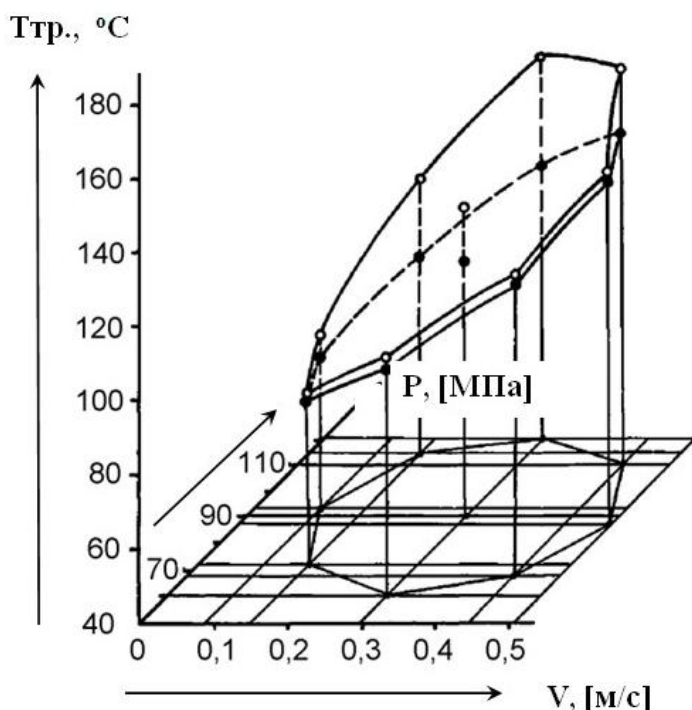


Рисунок 5.18 -  
Графическая интерпретация влияния нагрузочно - скоростных факторов на тепловой режим трения пары о ТСП ВНИИ НП 212: — о — - в условиях вакуума ( $p \cong 4$  мПа); —•— - в нормальных атмосферных условиях

С целью установления возможной корреляционной связи антифрикционных характеристик пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 ( $f_{тр.}$ ) и контактной температуры трения ( $T_{тр.}$ ) при использовании всех ранее полученных данных (для воздуха и вакуума для различных значений  $R_{конт.}$ ,  $V$  как при нагреве, так и без подвода тепла) были рассчитаны зависимости  $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ , адекватно описываемые уравнениями:

- для воздуха:  $f_{тр.} = 0,01197 + 8,8817 \cdot T_{тр.}^{-1}$ , (5.23)

- для вакуума:  $f_{тр.} = 0,381 \cdot T_{тр.}^{-0,41}$  (5.24)

Графическая интерпретация зависимостей представлена на рисунке 5.19. Полученные зависимости (5.23, 5.24) могут быть использованы для оценки  $T_{тр.}$  по значениям  $f_{тр.}$ , поскольку трудоемкость измерения коэффициента трения значительно меньше, чем температуры.

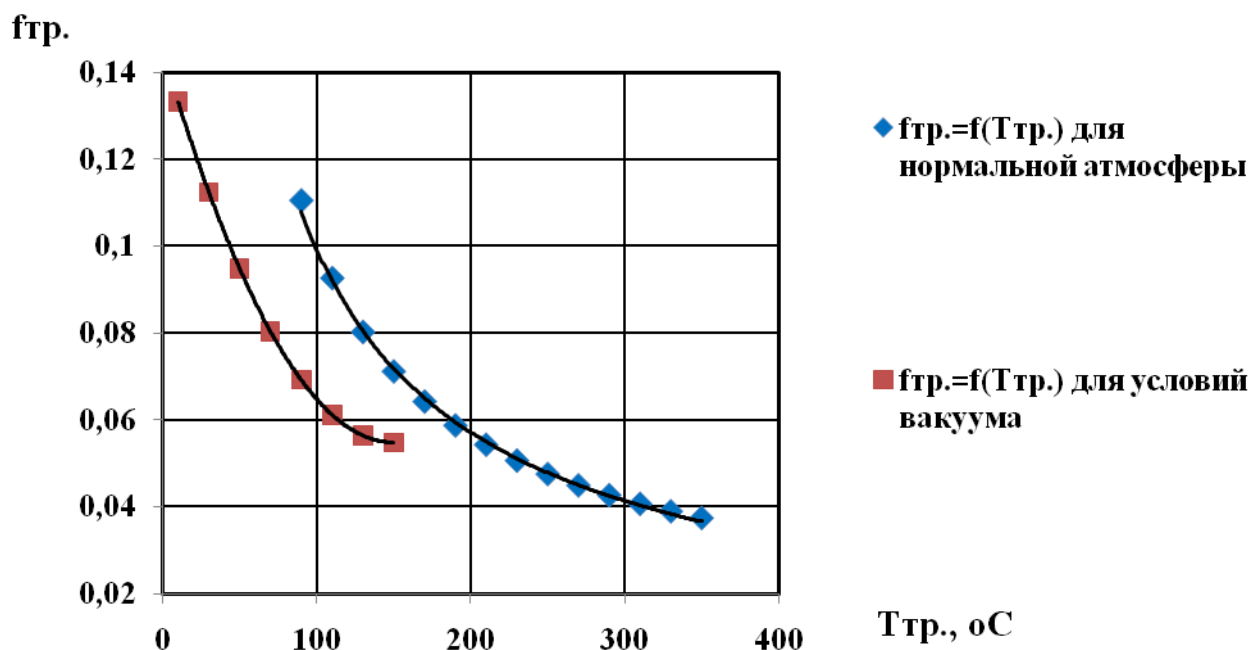


Рис.5.19. Зависимость  $f_{тр.}$  от  $T_{тр.}$  для условий вакуума и нормальной атмосферы для пары с ТСП ВНИИ НП 212

### 5.3.2 Сравнительная оценка триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов при трении

### 5.3.2.1 Исследование теплофрикционных характеристик самосмазывающихся материалов для различных материалов контртела

Эксперименты проводились в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.1.2.2.4. У всех испытанных СМ, а также пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 при форвакуумной откачке (механическим насосом, при  $p = 13,3 \cdot 1,33$  Па) резко снижался коэффициент трения, который затем в течение нескольких минут принимал своё установившееся значение. Вероятно, это связано с резким изменением состава окружающей среды в процессе откачки, так как преимущественно окислительный характер трения на воздухе в разряжённой атмосфере становится неэффективным.

Результаты исследования теплофрикционных характеристик (ТФХ) для СМ в зависимости от скорости скольжения при работе в условиях вакуума ( $p = 4$  мПа) приведены на рисунках 5.20, 5.21. Для СМ КВП-1 в паре со сталью I2XI8H9T (рисунок 5.20), как и ожидалось,  $T_{тр.}$  в рассмотренных диапазонах изменения скорости скольжения выше, чем на воздухе на 20-40°C. При этом значение  $f_{тр.}$  в условиях разряжённой атмосферы существенно ниже и остаётся практически на том же уровне, что и для пары с использованием в качестве контртела образца из легированной стали ХВГ, хотя в этом случае КВП-1 имеет удовлетворительную работоспособность в условиях разряжённой атмосферы.

Исследования СМ ГФ-5М показали (рисунке 5.21), что температурный режим трения при переходе от условий вакуума к нормальным атмосферным условиям изменяется незначительно ( $T_{тр.} = 5 \sim 15^\circ\text{C}$ ). В целом этот СМ также имеет удовлетворительную работоспособность в условиях вакуума.

Зависимость ТФХ от скорости скольжения для СМ АМС-5М приведена на рисунке 5.21. При испытании этого материала в паре со сталью I2XI8H9T при  $V = 0,3-0,4$  м/с отмечена нестабильность  $f_{тр.}$ , значение которого резко увеличивалось с ростом скорости скольжения до 0,5 м/с и выше. При этом в несколько раз повысилась контактная температура трения. Таким образом, установлено: при  $P = 13,3$  МПа для пары СМ АМС-5М х сталь I2XI8H9T



предельная скорость скольжения составляет 0,3 м/с, что соответствует  $T_{тр.} = 130^{\circ}\text{C}$ .

Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами испытаний, проведённых в нормальных атмосферных условиях. Отмечалось резкое снижение  $f_{тр.}$  при повышении скорости скольжения до 0,5 м/с ( $T_{тр.} = 100^{\circ}\text{C}$ ). Однако в условиях вакуума с увеличением скорости скольжения интенсивно повышалась  $T_{тр.}$ , которая и способствовала в дальнейшем выходу из строя фрикционного сопряжения. Механизм разрушения СМ АМС-5М может быть объяснён следующим образом.

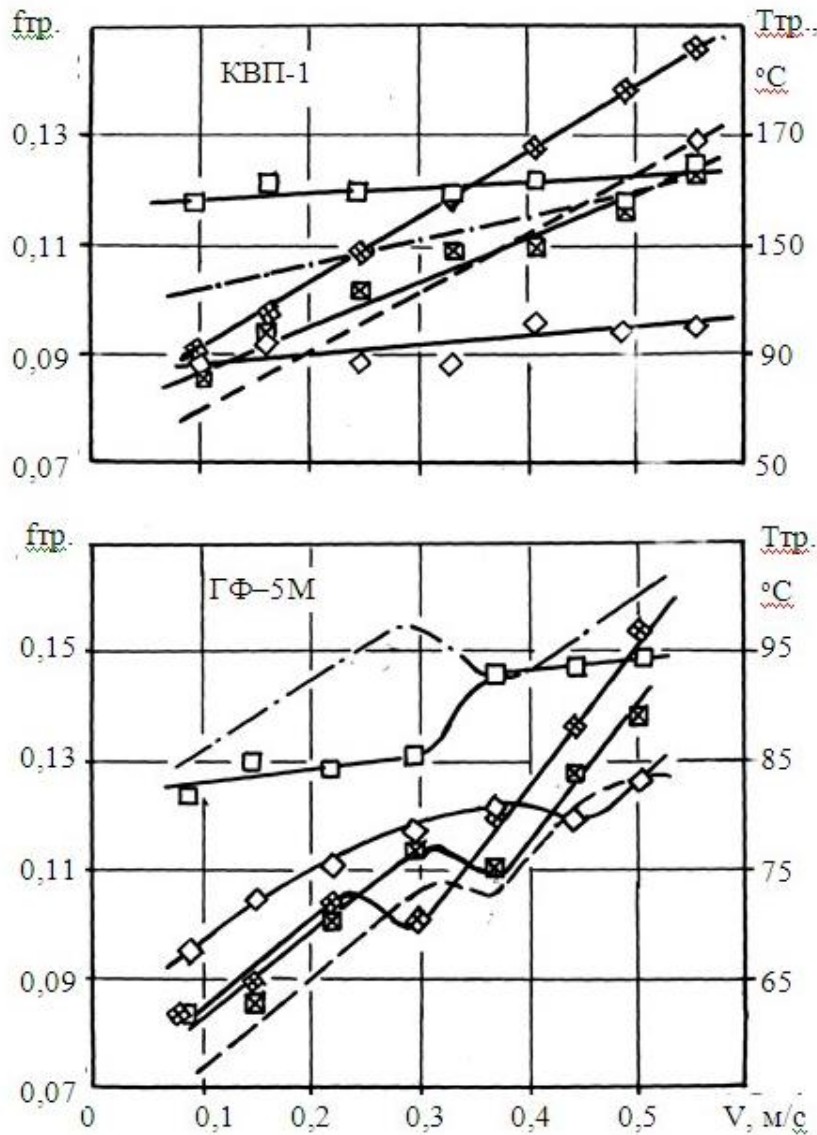


Рисунок 5.20 - Графики изменения теплофрикционных режимов трения СМ в условиях вакуума в зависимости от скорости скольжения:  
 ○ -  $f_{тр.}$  (контроль ШХ15);  
 □ -  $f_{тр.}$  (контроль ХВГ);  
 ◇ -  $f_{тр.}$  (контроль I2XI8H9T);  
 □⊗ -  $T_{тр.}$  (контроль ХВГ);  
 ◇⊗ -  $T_{тр.}$  (контроль I2XI8H9T);  
 а также на воздухе:  
 ----- -  $T_{тр.}$ ,  
 - · - · -  $f_{тр.}$  (контроль I2XI8H9T)

На предельных режимах трения при  $T_{тр.} > 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , учитывая высокую термостойкость углеродного наполнителя, вероятно, происходит деструкция связующего вещества и нарушается нормальный режим трения. При трении в паре с более твёрдым контртелом ХВГ в том же диапазоне изменения скорости скольжения температура трения повышалась не так существенно. При этом отмечено стабильное поведение коэффициента трения.

Таким образом, для пар трения с СМ АМС-5М, функционирующих в условиях вакуума, нагрузочно-скоростные режимы трения не должны превышать значений, приводящих к возрастанию  $T_{тр.} > 130\text{ }^{\circ}\text{C}$  (наблюдаемое, например, для контробразца из стали I2X18H9T при  $P = 13,3\text{ МПа}$  и  $V = 0,3\text{ м/с}$ ).

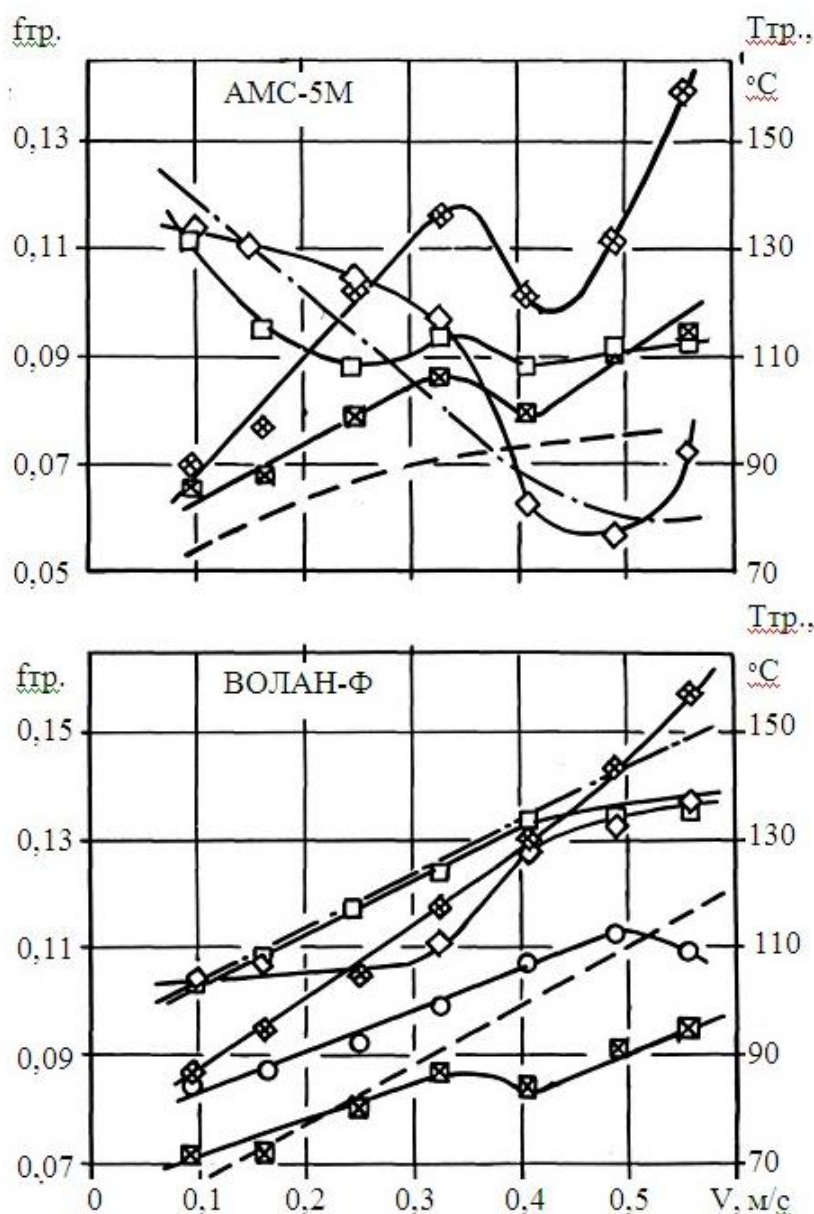


Рисунок 5.21 -  
Графики изменения  
теплофрикционных  
режимов трения СМ  
в условиях вакуума  
в зависимости от  
скорости сколь-  
жения: ○ -  $f_{тр.}$   
(контртело ШХ15);  
□ -  $f_{тр.}$ , ⊠ -  $T_{тр.}$   
(контртело ХВГ);  
◇ -  $f_{тр.}$ , ⊠ -  $T_{тр.}$   
(контртело  
I2X18H9T);  
 $T_{тр.}$ , - - - -  $f_{тр.}$   
(контртело  
I2X18H9T)

Лучшие антифрикционные характеристики в данных условиях достигаются при использовании в качестве контртела материалов с высокой твёрдостью.

Результаты испытаний СМ ВОЛАН-Ф приведены на рисунке 5.22. Сравнительный анализ изменения  $f_{тр.}$  и  $T_{тр.}$  в вакууме показал, что лучшими антифрикционными характеристиками в данных условиях обладает пара трения с использованием в качестве контробразца стали I2X18H9T, хотя  $T_{тр.}$  в этом случае более высокая, чем для контробразца из стали повышенной твёрдости (ХВГ, HRC > 60).

В результате проведённых экспериментов было установлено, что не все СМ обладают удовлетворительной работоспособностью в условиях разряжённой атмосферы. Так, например, при испытании пары трения АТГ-ХВГ нормальный режим трения, наблюдавшийся на воздухе, в условиях вакуума резко ухудшался. Изменение  $f_{тр.}$  приобрело скачкообразный характер. При изучении дорожек трения (рисунок 5.22) образцов из СМ АТГ после испытаний в нормальных атмосферных условиях и в вакууме выявлено, что смазочная плёнка, образующаяся за счёт окисления поверхности трения углеграфитового материала на воздухе, при трении в вакууме разрушается из-за отсутствия окислительной среды.

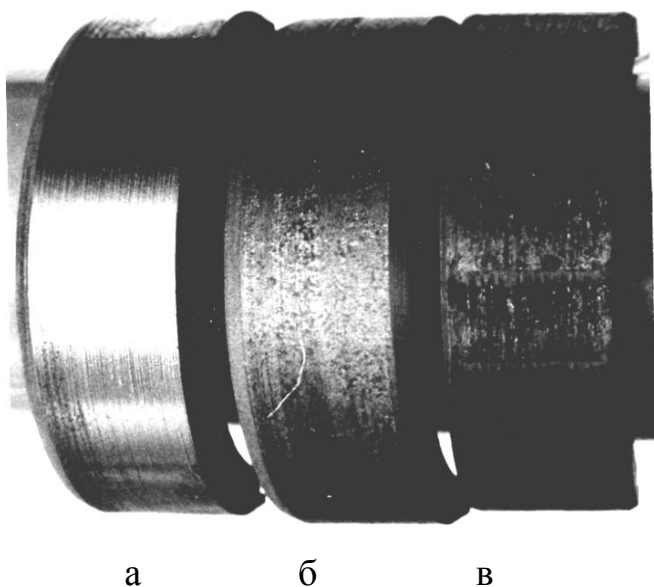


Рисунок 5.22 - Внешний вид дорожек трения СМ АТГ: а - после наработки на воздухе; б - после кратковременной наработки в вакууме; в - после длительной наработки в вакууме

### 5.3.2.2 Сравнительная оценка триботехнических показателей твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся материалов при трении

С целью сравнения антифрикционных характеристик СМ и ТСП были построены графики изменения  $f_{тр.} = f(V)$  для всех рассмотренных ранее работоспособных сочетаний пар трения СМ с контртелами обеих марок (рисунок 5.23).

Сравнение антифрикционных характеристик пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 и СМ показало, что в условиях вакуума ТСП на основе  $MoS_2$  с применением связующих веществ практически идентичен аналогичным характеристикам для СМ. Причём в данных условиях ( $P = 13,3$  МПа) при трении пары с контртелом из стали I2X18H9T (рисунок 5.23 а) СМ обладают

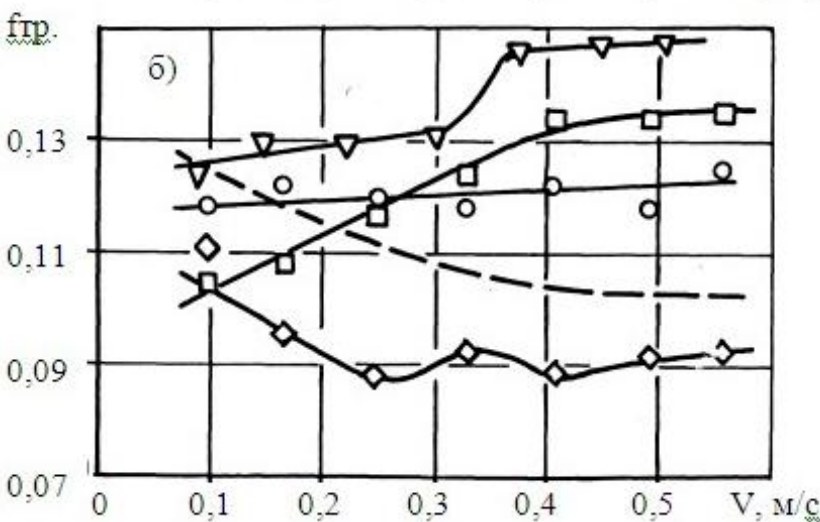
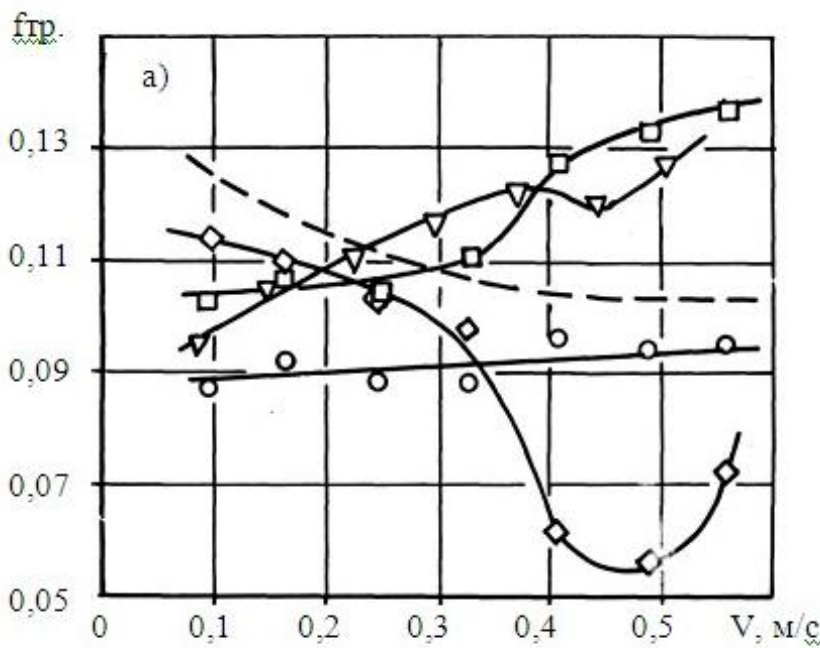


Рисунок 5.23 -  
Графики изменения  $f_{тр.}$  СМ и ТСП в вакууме в зависимости от скорости скольжения:  
а - контртело I2X18H9T, б - контртело ХВГ, HRC-60 - О - КВП-I; □ - ВОЛАН-Ф, ◇ - АМС-5М ( $P=12-13,3$  МПа), ▽ - ГФ-5М, ( $P = 11-17$  МПа); - - - - ТСП ВНИИ НП 212 (контртело ХВГ,  $P=13,3$  МПа)

более низким  $f_{тр.}$  при  $V < 0,2-0,3$  м/с. С повышением скорости скольжения близкими к антифрикционным характеристикам ТСП значениями  $f_{тр.}$  (при условии удовлетворительной работоспособности) обладает лишь СМ КВП-1, а при использовании контртела из стали повышенной твёрдости (ХВГ, рисунок 5.23 б) - более низкими значениями  $f_{тр.}$  по сравнению с ТСП - СМ АМС-5М. Однако учитывая ранее полученные данные, следует отметить, что при более напряжённых режимах трения несомненное преимущество будут иметь пары с ТСП, обладающие низким значением коэффициента трения и высокой долговечностью при значительно больших контактных давлениях и скоростях скольжения.

С целью оценки не только антифрикционных, но и тепловых параметров СМ и ТСП, были построены теплофрикционные зависимости типа  $f_{тр.} = f(T_{тр.})$ , представленные на рисунке 5.24.

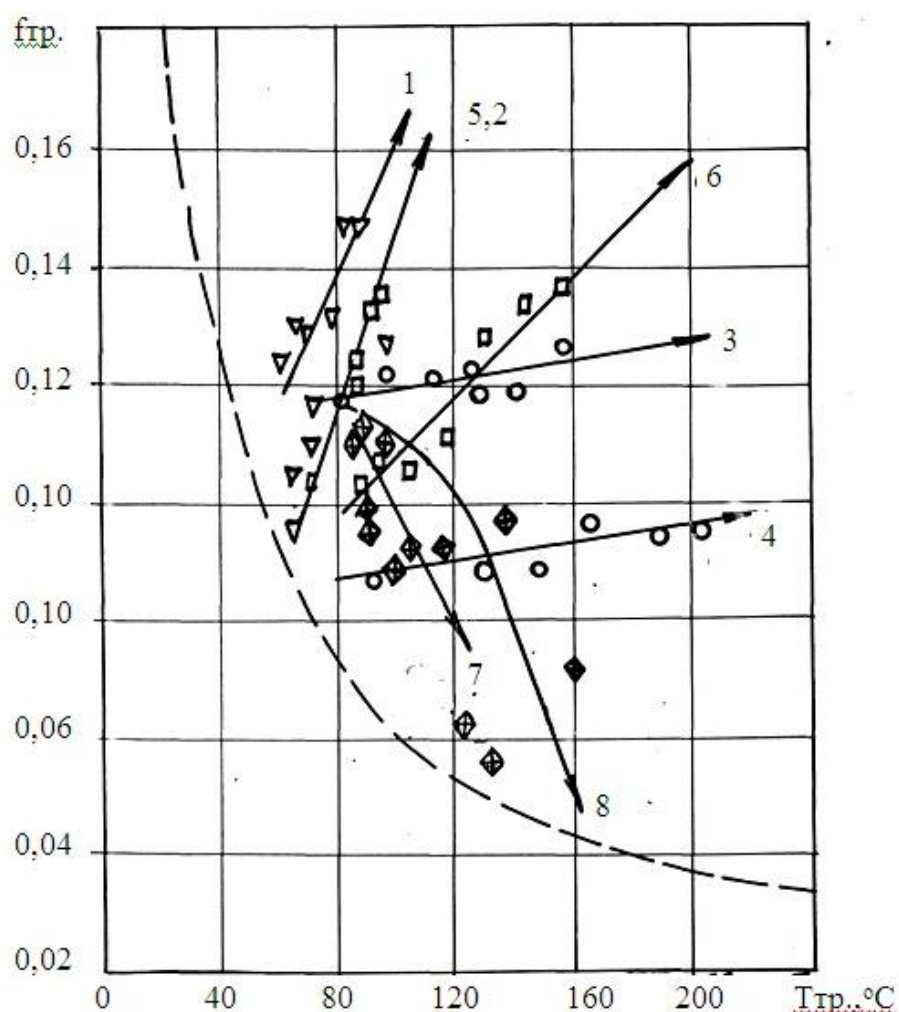


Рисунок 5.24 – Тепло фрикционные характеристики различных СМ и ТСП в условиях вакуума: 1,2 - ГФ-5М; 3,4 - КВП-1; 5,6 - ВОЛАН-Ф; 7,8 - АМС-5М; ----- ТСП ВНИИ НП 212; материал контртела: 1,3,5,7 - ХВГ, HRC>60; 2,4,6,8 - I2XI8H9T

Для построения указанных характеристик применительно к ТСП использовались результаты испытаний данного смазочного покрытия в условиях вакуума (таблица 5.2).

Анализ представленных зависимостей наглядно выявляет значительно менее напряжённые теплофрикционные характеристики (ТФХ) в парах трения с ТСП. Учитывая близкие антифрикционные свойства СМ и ТСП (см. рисунок 5.24), очевидно, что причиной такого явления является меньшая контактная температура трения для пары с ТСП ВНИИ НП 212 по сравнению с СМ рассмотренных типов. Данное обстоятельство подтверждает преимущество ТСП в сравнении с СМ при трении в вакууме.

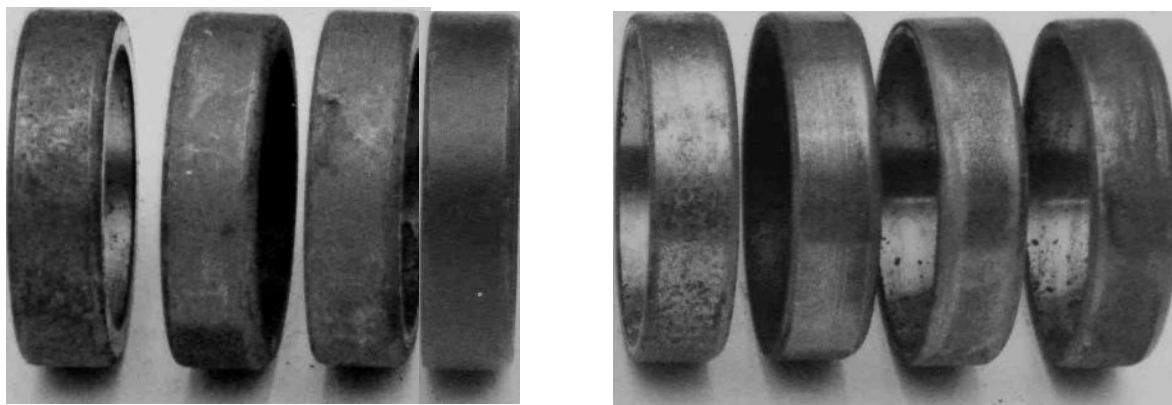
Таким образом, полученные ТФХ, учитывающие не только антифрикционные свойства, но и тепловые контактные характеристики, являются наиболее объективными показателями оценки качества смазочных материалов.

#### 5.4 Результаты исследования влияния атмосферы соляного тумана

В связи со спецификой эксплуатации ряда узлов трения с ТСП в условиях соляного тумана (с.т.) на следующем этапе работы проводилось экспериментальное исследование воздействия указанной атмосферы на работоспособность рассматриваемых фрикционных сопряжений. Методика испытаний изложена в разделе 2.1.4. Результаты экспериментов представлены на рисунках 5.25 и 5.26 и в таблицах 5.3, 5.4.

Визуальный осмотр образцов после выдержки в атмосфере соляного тумана показал, что неприработанные обоймы 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 указанной атмосфере (рисунок 5.25). С позиций топографической модели трения (см. глава 3, п.3.2) данный эффект объясняется как наличием более тонкой смазочной пленки на





ТСП ВНИИ НП:

212 213 230 212М 212 213 230 212М

Рисунок 5.25 - Внешний вид поверхности неприработанных (слева) и приработанных (справа) образцов с ТСП типа ВНИИ НП после выдержки в атмосфере с.т. в течение 2 суток

поверхности приработанного образца, так и выходом на поверхность трения последнего наиболее высоких вершин микронеровностей материала основы, от которых и происходит интенсивное коррозионное разъедание всей поверхности. В пользу последнего положения говорит также и тот факт, что в указанной атмосфере осаждение соли на неприработанные поверхности ТСП происходило не ровным слоем, а в виде отдельных пятен (см. рисунок 5.26).



Рисунок 5.26 - Поверхности неприработанного образца с ТСП ВНИИ НП 212 (слева) после выдержки в атмосфере соляного тумана в течение 5 суток (увел. х 6) и образца с ТСП ВНИИ НП 212М (справа) после выдержки в атмосфере соляного тумана в течение 5 суток (увел. х 6)

Характерным является также то обстоятельство, что образования соли, появившиеся на поверхности, после их механического удаления обнаруживали под собой внешне нетронутый слой ТСП и при осмотре также представлялись как "осажденные или нанесенные" на поверхность. Исключение составило ТСП ВНИИ НП 212М, на поверхности которого соляные образования с увеличением времени выдержки наблюдались в небольшом количестве и увеличивались весьма медленно (рисунок 5.26). Очевидно, что модифицированное ТСП ВНИИ НП 212М обладает пониженными адгезионными свойствами, в результате чего при одинаковом времени выдержки в атмосфере с.т. рост соляных образований на его поверхности происходит значительно менее интенсивно.

На следующем этапе проводились фрикционные испытания образцов на машине трения "РП".

Анализ результатов экспериментов, представленных в таблицах 5.3, 5.4, подтверждает приведенные выше положения. Если приработанные образцы оказались практически неработоспособными после воздействия атмосферы с.т., то неприработанные образцы сохраняли работоспособность в течение определенного срока в зависимости от времени выдержки в камере с.т.

Таблица 5.3 – Триботехнические свойства приработанных образцов с ТСП типа ВНИИ НП после выдержки в атмосфере соляного тумана (с.т.)

Тип ТСП	№ образца	Время выдержки в камере с.т.,сутки	Триботехнические свойства			
			$\tau_{\text{пр.}}$ мин.	$f_{\text{тр.}}$	$\tau$ , мин.	$I_h$



ВНИИ	507	I	-	-	-	-
НП 212	509	2	-	0,063-0,070	2	$3,4 \cdot 10^{-8}$
	510	3	-	0,081	I	$6,78 \cdot 10^{-8}$
	512	5	-	-	-	-
	511	7	-	-	-	-
	ВНИИ	617	I	8	0,060	19
НП 213	618	2	-	0,058	2	$3,39 \cdot 10^{-8}$
	619	3	-	-	-	-
	621	5	-	-	-	-
	620	7	-	-	-	-
	ВНИИ	600	I	3	0,054-0,057	63
НП 230	601	2	3	0,047-0,054	14	$4,84 \cdot 10^{-9}$
	602	3	-	-	-	-
	604	5	-	-	-	-
	603	7	-	-	-	-
	ВНИИ	6М	I	-	-	-
НП 212М	7М	2	-	-	-	-
	8М	3	-	-	-	-
	10М	5	-	-	-	-
	9М	7	-	-	-	-

Таблица 5.4 - Триботехнические показатели неприработанных образцов с ТСП типа ВНИИ НП после выдержки в атмосфере с.т.

Тип ТСП	№ образца	Время выдержки в камере с.т.,сутки	Фрикционные характеристики			
			$\tau_{\text{прир.}}$ мин.	$f_{\text{тр.}}$	$\tau$ , мин.	$I_h$

ВНИИ	502	I	5	0,052-0,059	67	$1.01 \cdot 10^{-9}$
НП 212	503	2	2,6	0,054-0,065	60	$1.13 \cdot 10^{-9}$
	504	3	1,5	0,042-0,059	42	$1.61 \cdot 10^{-9}$
	506	5	1,8	0,065	5	$1.36 \cdot 10^{-8}$
	505	7	-	-	-	-
	ВНИИ	612	I	1	0,054-0,063	3
НП 213	613	2	-	0,091	-	-
	614	3	-	0,118	-	-
	616	5	-	-	-	-
	615	7	-	-	-	-
	ВНИИ.	595	I	13,5	0,044-0,047	164
НП 230	596	2	12,5	0,044-0,050	158	$4.29 \cdot 10^{-10}$
	597	3	8	0,056-0,065	85	$7.97 \cdot 10^{-10}$
	599	5	6	0,082-0,094	16	$4.24 \cdot 10^{-9}$
	598	7	-	-	-	-
	ВНИИ	1М	I	8	0,051-0,081	72
НП 212М	2М	2	6,3	0,053-0,112	63	$1.08 \cdot 10^{-9}$
	3М	3	8	0,105	25	$2.71 \cdot 10^{-9}$
	5М	5	10	0,083-0,094	25	$2.71 \cdot 10^{-9}$
	4М	7	6,5	0,101	25	$2.71 \cdot 10^{-9}$

В период приработки, когда происходил абразивный износ верхнего слоя ТСП, подвергнутого коррозии,  $f_{тр.}$  возрастал до значений  $f_{тр.} = 0,12-0,15$ , затем  $f_{тр.}$  снижался и стабилизировался на установившемся уровне.

Для большинства исследованных типов ТСП неприработанные образцы сохраняли свою работоспособность в течение 1-2,5 часов непрерывного трения даже после пребывания в камере с.т. в течение 3 суток (кроме ТСП ВНИИ НП 213).

Лучшие триботехнические характеристики в целом обнаружило ТСП

ВНИИ НП 212М, сохранившее свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере с.т. в течение 7 суток ( $\tau = 25$  мин.,  $f_{тр.} = 0,1$  с учетом высокого контактного давления  $P = 80-100$  МПа при  $V = 0,5$  м/с) и ТСП ВНИИ НП 230, оказавшееся работоспособным ( $\tau = 16$  мин,  $f_{тр.} = 0,082-0,94$ ) после пребывания в указанных условиях в течение 5 суток. Необходимо подчеркнуть, что ТСП ВНИИ НП 212М обнаруживает при трении (особенно в условиях приработки) склонность к скачкообразному изменению  $f_{тр.}$  при его высоком значении (во время приработки  $f_{тр.} = 0,12-0,16$ ), в то время как остальные марки ТСП более быстро и плавно проходили этот режим при меньших значениях  $f_{тр.}$

### 5.5 Выводы к главе 5

В результате выполнения главы 5 были получены следующие выводы:

1. 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 ресурс, коэффициент трения при повышенной температуре, а также на интенсивность изнашивания, ресурс, коэффициент трения и контактную температуру рассматриваемых фрикционных сопряжений в вакууме. Корректность всех зависимостей проверена сравнением с экспериментальными данными других исследователей.

2. Впервые предложен и экспериментально опробован для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 оригинальный метод определения предельных и оптимальных (по долговечности, коэффициенту трения или другому параметру оптимизации) нагрузочно - скоростных режимов трения смазочных материалов, позволяющий получать в результате проведения одного планируемого эксперимента зависимость для оценки оптимальных режимов трения и путём крутого восхождения по поверхности отклика зависимость для предельных режимов трения.

3. Проведена сравнительная оценка теплофрикционных характеристик

пар трения с ТСП и самосмазывающихся материалов (СМ) для контртел различной твёрдости, функционирующих в условиях нормальной атмосферы и вакуума. 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.

4. В результате исследования влияния атмосферы соляного тумана на триботехнические характеристики 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 выдержки в камере. Лучшие триботехнические показатели в целом обнаружило ТСП ВНИИ НП 212М, сохранившее свои смазочные свойства даже после пребывания в атмосфере соляного тумана в течение 7 суток.

## ГЛАВА 6 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 6.1 Технологические рекомендации по повышению надежности качественного нанесения твёрдосмазочных покрытий

С целью повышения надежности качественного нанесения ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , в том числе и на поверхности деталей узлов трения, рекомендуется:

1. Производить напыление ТСП с использованием механизированных приспособлений типа представленного на рис. 2.8, позволяющих осуществлять механическую подачу распылителя вдоль обрабатываемой поверхности со скоростью 50 мм/с при угловой скорости вращения оправки (диаметром 50 мм)  $\approx 150$  об/мин; при этом оптимальная толщина покрытия обеспечивается для ТСП ВНИИ НП 212 за два прохода, для ВНИИ НП 213, 229, 230 - за 4-5 проходов при условии оптимальной настройки по мощности напыления.

2. При нанесении ТСП на партию однотипных образцов использовать многоместные оправки типа представленных на рисунок 2.9; проверку качества напыления производить при помощи трех контрольных образцов, расположенным по краям и в центре оправки, путем измерения толщины ТСП (например, по методу, описанному в главе 2, п.2.1.2) или путем проведения испытаний по ГОСТ 11613-65.

3. При нанесении ТСП на внутренние цилиндрические поверхности, предварительно подготовленные согласно рекомендациям инструкции [71], осуществлять его в следующей последовательности: закрепить деталь в патроне токарного станка, включить привод на максимальные обороты порядка 1500 об/мин, (для внутреннего диаметра 50 мм) и выше, вручную произвести нанесение суспензии, образующей ТСП, на внутреннюю поверхность детали (выравнивание слоя наносимого слоя происходит за счет центробежных сил), отвердить ТСП по установленному режиму [71] и произвести приработку поверхности покрытия или обработку при помощи алмазного выглаживания или другим методом поверхностно-пластического деформирования, в результате которой на внутренней поверхности деталей образуется

высокоэффективная тонкая смазочная плёнка ТСП, не требующая дополнительной поправки на величину зазора в сопряжении.

4. Для получения качественной: суспензии, образующей ТСП ВНИИ НП 213 и подобных ему, в бачке распылителя промежутки времени между окончанием размешивания и переливанием в бачок не должны превышать 30 секунд.

5. Для качественного нанесения ТСП методом напыления необходимо периодическое перемешивание состава суспензии не реже одного раза в 1-2 минуты.

## 6.2 Конструкторско-технологические рекомендации по обеспечению триботехнических показателей пар трения с твёрдосмазочными покрытиями и самосмазывающимися материалами

С целью обеспечения заданных триботехнических показателей узлов трения с ТСП типа ВНИИ НП 212, функционирующих в различных условиях, рекомендуется:

1. Использовать детали узлов трения, изготовленные из материалов с возможно более высокой твёрдостью, что приводит при условии обеспечения максимальной долговечности также и к сокращению периода приработки.

2. С целью существенного снижения резкого возрастания значения коэффициента трения при возобновлении скольжения после останова (явление "стоп-эффекта") производить изготовление контртела из материала с более выраженными пластическими свойствами (например, из нержавеющей стали 12Х18Н9Т), при этом с целью повышения износостойкости рассматриваемого фрикционного сопряжения рекомендуется одновременное снижение твёрдости до близких значений и у материала основы.

3. С целью повышения точности и эффективности определения времени окончания; приработки пары трения скольжения использовать следующий способ контроля времени приработки рассматриваемых фрикционных сопряжений: первое испытание серии деталей проводить с кратковременными

остановами сначала в установившемся режиме трения, зарегистрировать максимальный промежуток времени останова, характеризующийся стабилизацией  $f_{тр}$ . при возобновлении скольжения, затем все последующие испытания деталей в режиме приработки с момента понижения проводить с остановами на ранее определённый промежуток времени останова, характеризующийся стабилизацией  $f_{тр.}$ , и момент достижения по  $f_{тр.}$  считать за момент окончания приработки (а.с. 1059485).

4. С целью снижения интенсивности изнашивания пар трения с ТСП использовать покрытия с  $MoS_2$  - наполнителем, т.е. ТСП типа ВНИИ НП 212 и ВАП-2.

5. При использовании ТСП в парах трения, изготовленных из титановых сплавов, применять предварительное гальванохромирование и химическое никелирование.

6. С целью определения предельных и оптимальных (по интенсивности изнашивания, коэффициенту трения или другому параметру) нагрузочно-скоростных режимов трения использовать следующий способ: при помощи математических методов планирования построить матрицу, в которой варьируемыми факторами будут являться значения контактного давления  $P$  и скорости скольжения  $V$ , а параметром оптимизации  $T_{тр.}$ ; после приработки пары трения на основном уровне факторов в процессе одного испытания изменять факторы  $P$  и  $V$  по заданному в матрице эксперимента закону и непрерывно регистрировать соответствующую им температуру трения  $T_{тр.}$  на стационарном уровне; рассчитать после математической обработки полученных данных уравнение поверхности отклика типа  $T_{тр.} = f(P, V)$ , вводя в которое оптимальную температуру получить зависимость вида  $P_{опт.} = f(V_{опт.})$ ; для определения предельных режимов трения (зависимость  $P_{пред.} = f(V_{пред.})$ ) использовать алгоритм, представленный на рисунке 6.7. Указанные зависимости позволяют определить при каждой реальной узла трения предельную и оптимальную нагрузку или, наоборот, по известной нагрузке рассчитать предельную и оптимальную скорость скольжения.

7. Для определения контактного давления приработанных поверхностей рассматриваемых пар трения для схемы "ролик-ролик" с касанием по образующей и узлов трения подобного типа (зубчатых зацеплений, кулачков и других кинематических пар) при твёрдости материалов деталей пары трения  $HRC > 60$  использовать зависимость (5.2).

8. Для узлов трения, функционирующих в нормальных атмосферных условиях:

а) при температуре трения  $T_{тр.} < 80-100^{\circ}C$  использовать СМ типа КВП-1, ВОЛАН-Ф, ГФ-5М, АМС-5М при нагрузках, не превышающих предела прочности этих материалов (для первых трёх  $\sigma_b = 12-22,7$  МПа); при более высокой  $T_{тр.}$  или контактных нагрузках - использовать ТСП типа ВНИИ НП;

б) для оценки теплофрикционных характеристик перечисленных выше СМ при использовании контртел различной твёрдости использовать зависимости, представленные на рис.5.10-5.12;

в) проводить предварительную приработку поверхностей трения с ТСП;

г) использовать для оценки интенсивности изнашивания, коэффициента трения и контактной температуры соответственно комплексную зависимость (4.14) и корреляционные зависимости из табл.3.3; 3.4 и 3.2;

д) использовать для оценки предельных (по температуре, соответствующей фрикционному разрушения ТСП ВНИИ НП 212) и оптимальных (по температуре, соответствующей переходу абразивного трения в термоусталостное разрушение) нагрузочно-скоростных режимов трения соответственно зависимости (6.14) и (6.9), найденные по способу, описанному в п.5.1.2 главы 5.

9. Для узлов трения, функционирующих в условиях теплового нагрева:

а) производить предварительную приработку поверхностей трения с ТСП;

б) использовать для оценки интенсивности изнашивания и коэффициента трения соответственно зависимости (5.3) и (5.5).

10. Для узлов трения с ТСП, функционирующих в условиях вакуума:

а) производить предварительную приработку поверхностей трения;



б) использовать для оценки интенсивности изнашивания, коэффициента трения и контактной температуры зависимости (3.6), табл.3.6, (3.7) соответственно;

в) не использовать СМ АТГ;

г) для оценки теплофрикционных характеристик перечисленных выше СМ при использовании контртел различной твёрдости использовать зависимости, представленные на рис.5.26; 5.27;5.29; 5.30.

11. Для узлов трения с ТСП, функционирующих в условиях соляного тумана:

а) не производить предварительной приработки пар трения до воздействия заданной атмосферы;

б) использовать для фрикционных сопряжений с ТСП, эксплуатируемых в этих условиях, ТСП ВНИИ НП 2I2M, сохраняющее работоспособность после выдержки в атмосфере соляного тумана (согласно ГОСТ 9.054-75) в течение 7 суток.

Примечания:

1. в приведённых выше формулах приняты следующие единицы измерений:  $\tau$  - мин. ; P - МПа; V - м/с;  $T_{тр.}$ ,  $T_{об.}$ -°C; N - Н;  $\delta$ , Rz, Ra<sub>o</sub>, Ra<sub>к</sub> - мкм; HRC<sub>o</sub>, HRC<sub>к</sub> – ед. HRC;

2. при использовании формул необходимо учитывать принятые диапазоны варьирования факторов;

3. указанные зависимости получены для предварительно приработанных поверхностей трения.

6.3 Оценка эффективности внедрения результатов исследований, испытательного оборудования, технологической оснастки, методов испытаний и выбора пар трения

6.3.1 Внедрение результатов работы

В результате проведённой работы на ряде предприятий осуществлено

проектирование, изготовление и внедрение следующей технологической оснастки, испытательного оборудования, методов испытаний и 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», внедренной 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 (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. Способа контроля времени приработки (а.с.1059485), внедрённого на БЕЛАЗе, г. Жодино, Беларусь).

3. Механизированного приспособления для нанесения ТСП. Экспериментально отработанные режимы нанесения обеспечили качественное напыление указанных покрытий на поверхности узлов трения, в результате чего повышены качество и надёжность изделия (см. приложение Г).

4. 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 [116]), что позволило осуществить испытания имитаторов узлов трения с ТСП в широком диапазоне нагрузочно-скоростных и температурного факторов с бесступенчатым их варьированием, что обеспечило возможность проведения комплексных планируемых испытаний с достаточно высокой точностью; годовой экономический эффект от внедрения испытательного комплекса составил 25,2 тыс. руб. в ценах 1982 г. (см. приложение Д).

5. Методики выбора оптимального сочетания и технологической обработки пар трения с ТСП для реальных узлов трения изделия (см. приложение Е).

6. Разработанные рекомендации «Выбор оптимальных твёрдосмазочных покрытий (ТСП) для пар трения и расчёт их характеристик» используется в технологической практике при разработке технологических процессов нанесения твёрдосмазочных покрытий в узлах трения (см. приложение Ж).

6.3.2 Оценка ресурса работы реальных узлов трения с твёрдосмазочными покрытиями

**Оценка триботехнических свойств ТСП в узле трения ЛА типа направляющего штока с соединениями «палец-втулка», функционирующем в вакууме**

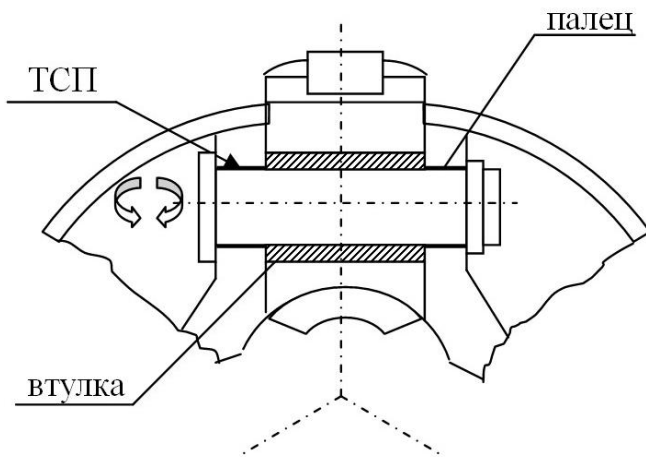


Рисунок 6.1 - Конструкция узла трения с ТСП типа направляющего штока с соединениями «палец-втулка», функционирующего в

Направляющий шток с соединениями «палец – втулка», имеющим на поверхности пальца ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с органическим связующим (рисунок 6.1), осуществляет перемещения узла, функционирующего в условиях вакуума (таблица 6.1).

Последовательность расчёта.

1. Скорость скольжения  $V = \frac{\pi dn}{1000 \cdot 60} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 200}{1000 \cdot 60} = 0,105 \text{ (м/с)}$ ;

Таблица 6.1 - Эксплуатационно-технические параметры узла трения с ТСП типа направляющего штока, функционирующего в условиях вакуума

Условия эксплуатации	Значения параметров	Качество поверхностей	Детали узла	
			палец	втулка

Среда	вакуум	Диаметр (посадка с зазором)	≈ Ø 10 мм с ТСП на основе MoS <sub>2</sub> с органическим связующим	≈ Ø 10 мм
Температура, Траб, [°С]	20			
Нагрузка, Н	500			
Частота вращения, об/мин	≈ 200	Материал	Сталь	Сталь
Ресурс	100 час.	Шероховатость поверхности	Ra=0,63 мкм (до нанесения ТСП)	Ra=0,63 мкм

Примечание - значение Р для данной пары трения выходит за границу диапазона изменения этого параметра, заданного при получении используемых формул.

2. Контактное давление [15]:  $P=N / L \cdot d = 500 / 0,035 \cdot 0,010 = 1,4$  (МПа);  
где N – нагрузка, Н; L, d – соответственно длина, диаметр контакта, м;

3. Температура трения по ф. (5.22) составит  $T_{тр.} = 31,7^{\circ}\text{C}$ .

4. Интенсивность изнашивания по ф. (3.22) составит  $I_h = 10^{-12} \cdot T_{тр.}^{1,0202} = 3,34 \cdot 10^{-11}$ .

5. Тогда из формуле  $I_h = \frac{\delta_{прир.}}{\pi \cdot d \cdot n \cdot \tau}$  значение ресурса составит  $\tau = \frac{\delta_{прир.}}{I_h \cdot \pi \cdot d \cdot n}$   
 $= \frac{0,002}{3,34 \cdot 10^{-11} \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 200} = 9535$  (мин.) = 158 (час.) (следовательно,  
заданный ресурс в 100 час. данный узел трения с ТСП обеспечит).

6. Так как рабочая температура, при которой функционирует узел, составляет 20°С, для расчёта коэффициента трения используем формулу табл. 3.14 для диапазона температур  $\Delta T=12-144(^{\circ}\text{C})$ :  $f_{тр.} = 0,381 \cdot T_{тр.}^{-0,41} = 0,0923$ .

**Оценка триботехнических свойств ТСП в узле трения типа  
«шлиц-шарнир», функционирующем в вакууме**

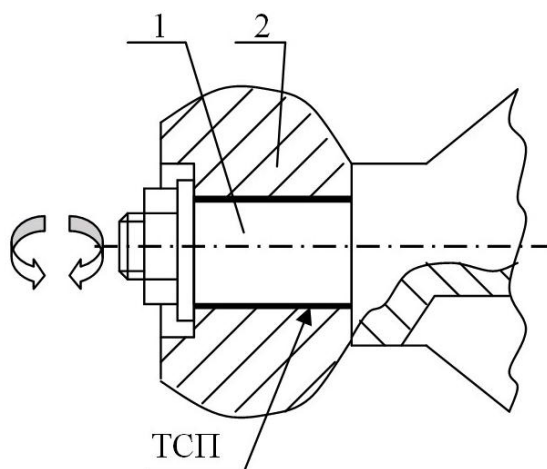


Рисунок 6.2 - Конструкция узла трения с ТСП типа «шлиц-шарнир»:  
1 – вал с ТСП;  
2 - втулка

В процессе функционирования узла «шлиц-шарнир» в условиях вакуума, втулка 2 совершает возвратно-вращательное перемещение относительно вала 1 (рисунок 6.2), имеющего на внешней цилиндрической поверхности покрытие типа ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с органическим связующим (таблица 6.2).

Последовательность расчёта.

1. Скорость скольжения  $V = \frac{\pi d n}{1000 \cdot 60} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 200}{1000 \cdot 60} = 0,105$  (м/с);

2. Контактное давление [15]:  $P = N / L \cdot d = 500 / (0,020 \cdot 0,010) = 2,5$  (МПа), где  $N$  – нагрузка, Н;  $L$ ,  $d$  – соответственно длина, диаметр контакта, м.

3. Температура трения по ф. (5.22) составит  $T_{\text{тр.}} = 32,4^\circ\text{C}$ .

4. Интенсивность изнашивания по ф. (3.22) составит  $I_h = 10^{-12} \cdot T_{\text{тр.}}^{1,0202} = 3,476 \cdot 10^{-11}$ .

5. Тогда из формуле  $I_h = \frac{\delta_{\text{прир.}}}{\pi \cdot d \cdot n \cdot \tau}$  значение ресурса составит  $\tau =$

$$\frac{\delta_{\text{прир.}}}{I_h \cdot \pi \cdot d \cdot n} = \frac{0,002}{3,476 \cdot 10^{-11} \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 200} = 9162 \text{ (мин.)} = 153 \text{ (час.)}$$

(следовательно, заданный ресурс в 100 час. данный узел трения с ТСП обеспечит).

6. Так как рабочая температура, при которой функционирует узел, составляет  $20^\circ\text{C}$ , для расчёта коэффициента трения используем формулу табл. 3.14 для диапазона температур  $\Delta T = 12-144(^\circ\text{C})$ :  $f_{\text{тр.}} = 0,381 \cdot T_{\text{тр.}}^{-0,41} = 0,0923$ ;

Примечание - значение  $P$  для данной пары трения выходит за границу диапазона изменения этого параметра, заданного при получении используемых формул.

Таблица 6.2 - Эксплуатационно-технические параметры узла трения с ТСП типа «шлиц-шарнир», функционирующего в условиях вакуума

Условия эксплуатации	Значения параметров	Качество поверхностей	Детали узла	
			вал	втулка
Среда	вакуум	Диаметр (посадка с зазором)	≈ Ø 10 мм с ТСП на основе MoS <sub>2</sub> с органическим связующим	≈ Ø 10 мм
Температура, Траб, [°C]	20			
Нагрузка, Н	500			
Частота вращения, об/мин	≈ 200	Материал	Сталь	Сталь
Ресурс, час.	100	Шероховатость поверхности	Ra=0,63 мкм (до нанесения ТСП)	Ra=0,63 мкм

***Оценка триботехнических свойств ТСП в узле трения типа «цилиндр - поршень», функционирующем в вакууме***

В данном узле происходит периодический перемещение поршня относительно цилиндра (см. рисунок 6.3). При этом происходит нагружение периферийных частей поршня 1, на поверхность которого нанесено ТСП на основе MoS<sub>2</sub> с органическим связующим, относительно цилиндра 2.

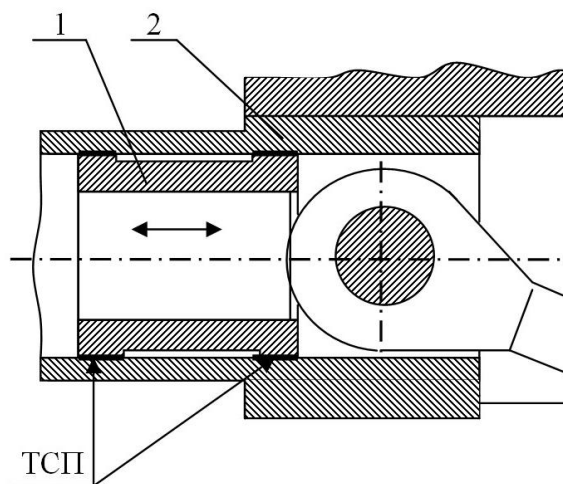


Рисунок 6.3 -  
Конструкция узла  
трения с ТСП типа  
«цилиндр-поршень»:  
1 – поршень с ТСП;  
2 - цилиндр

Эксплуатационно-технические параметры узла приведены в таблице 6.3.

Последовательность расчёта.

1. Скорость скольжения  $V$  (перемещение за 1с.) = 0,02 м/с.

2. Контактное давление [15]:  $P=N / L \cdot d = 500 / (0,020 \cdot 0,020) = 1,25$   
МПа,

где  $N$  – нагрузка, Н;  $L, d$  – соответственно длина, диаметр контакта, м;

3. Температура трения по ф. (5.22) составит  $T_{тр.} = 9,834^{\circ}\text{C}$ . Учитывая, что рабочая температура составляет  $20^{\circ}\text{C}$ , очевидно, что за счёт теплопередачи температура трения будет выравнена до объёмной и составит  $T_{тр.} = 20^{\circ}\text{C}$ .

4. Интенсивность изнашивания по ф. (3.22) составит  $I_h = 10^{-12} \cdot T_{тр.}^{1,0202}$   
 $= 1,03 \cdot 10^{-11}$ .

5. Тогда по формуле  $I_h = \frac{\delta_{прир.}}{V \cdot \tau}$  значение ресурса составит  $\tau = \frac{\delta_{прир.}}{I_h \cdot V}$   
 $= \frac{0.002}{2.125 \cdot 10^{-11} \cdot 0.02 \cdot 10^3} = 4705800 \text{ (с.)} = 78432 \text{ (мин.)} = 1307 \text{ (час.)}$

(следовательно, заданный ресурс в 100 час. данный узел трения с ТСП обеспечит).

6. Согласно п.3  $T_{тр.} = 20^{\circ}\text{C}$ . Тогда по формуле табл. 3.14 коэффициент трения (для диапазона температур  $\Delta T = 12-144(^{\circ}\text{C})$ ) составит:  $f_{тр.} = 0,381 \cdot T_{тр.}^{-0,41} = 0,112$ .

Примечание - значения  $P, V$  для данной пары трения выходят за границы диапазонов изменения этих параметров при получении используемых формул.

Таблица 6.3 - Эксплуатационно-технические параметры узла трения с ТСП типа «цилиндр-поршень», функционирующего в условиях вакуума

Условия эксплуатации	Значения параметров	Качество поверхностей	Детали узла	
			поршень	цилиндр
Среда	Вакуум	Диаметр (посадка с зазором)	$\approx \varnothing 20$ мм	$\approx \varnothing 20$ мм с ТСП на основе $\text{MoS}_2$ с органическим связующим
Величина перемещения за 1 с. в [мм]	20			
Нагрузка, Н	500			
Скорость перемещения, м/с	0,02	Материал	Сталь	Сталь
Температура, Траб, [°C]	20	Шероховатость поверхности	Ra=0,63 мкм (до нанесения ТСП)	Ra=0,63 мкм
Ресурс, час.	100			

**Оценка триботехнических свойств ТСП в узле трения механизма управления ГТД**

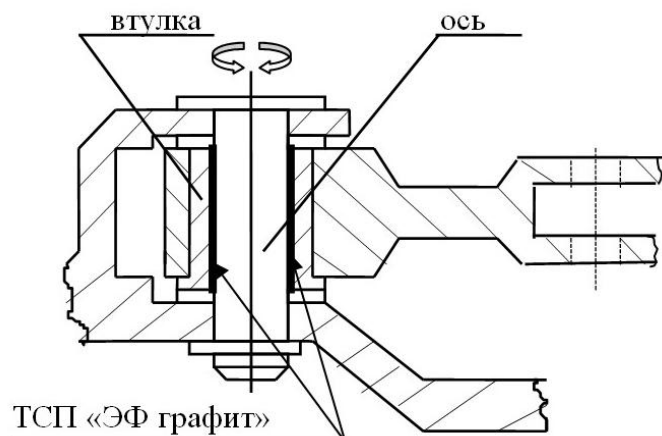


Рисунок 6.5 –  
Конструкция  
рычага механизма  
управления



В данном узле (рисунок 6.5) происходит периодический поворот рычага со втулкой относительно оси. В процессе эксплуатации при повышенной температуре в результате многократного срабатывания механизма управления происходит истирание металлической оси относительно стальной втулки с ТСП на основе специального покрытия графита (ТСП «СП графит»). Эксплуатационно-технические параметры узла приведены в таблице 6.9.

Последовательность расчёта.

1. Скорость скольжения  $V = \text{длина дуги поворота} / t = 0,0733/1 = 0,073$  м/с.
2. Контактное давление [15]  $P=N / (L \cdot d) = 1000 / 0,03 \cdot 0,014 = 2,38$  МПа , где  $N$  – нагрузка, Н;  $L, d$  – соответственно длина и диаметр контакта, м);
3. Т.к. ТСП «СП графит» наносится в связке с эмалью, то из числа исследованных ТСП (см. табл. 3.3) наиболее близкий состав ТСП – «графит + кремнийорганическая смола К-55», для которой рассчитана регрессионная зависимость  $I_h = f(T_{тр.})$ ;

3.1. рассчитываем температуру трения  $T_{тр.}$  по формуле табл. 3.10, полученной для диапазона нагрузок  $\Delta N=236-1364$  Н ( $N_{узла}=1000$  Н входит в диапазон) и скоростей скольжения  $\Delta V=0,096-1,224$  м/с ( $V_{узла}=0,073$  м/с близко к нижней границе диапазона):

$$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 4,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 = 36,49 + 132,23 \cdot 0,073 + 0,535 \cdot 2,4 + 0,234 \cdot 2,4 \cdot 0,073 - 47,94 \cdot (0,073)^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot (2,4)^2 = 47,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

для повышенной температуры ( $T_{раб.}=275^\circ\text{C}$ ) суммарная поверхностная температура составит:

$$T_{\Sigma} = T_{тр.} + T_{раб.} = 47,2 + 275 = 322 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

3.2. линейная интенсивность изнашивания узла трения с ТСП по формуле, приведённой в табл. 3.11 составит:

$$I_h = 10^{-10} \cdot e^{0,013 \cdot T_{тр.}} = 6,576 \cdot 10^{-9}.$$

тогда по формуле  $I_h = \frac{\delta_{прир.}}{V \cdot \tau}$  значение ресурса составит  $\tau = \frac{\delta_{прир.}}{I_h \cdot V} =$

$$\frac{0.002}{6.576 \cdot 10^{-9} \cdot 0.073 \cdot 10^3} = 4166 \text{ (с.)} = 69,4 \text{ (мин.)}.$$

Таблица 6.9 - Эксплуатационно-технические параметры пары «ось-штулка» рычага механизма управления ГТД

Условия эксплуатации	Значения параметров	Качество поверхностей	Детали узла	
			ось	штулка
Среда	Воздух	Посадка	Ø 14	Ø 14 + ТСП «СП графит»
Угол поворота за 1 с. [град.]	60	Материал	Металлический сплав	Жаропрочный сплав
Температура, Траб, [°C]	275 (средняя)	Химико-термическая обработка	Химико-термическая обработка	d <sub>отпеч.</sub> = 3,2-3,5
Нагрузка, Н	1000	Шероховатость поверхности	Ra=1,25мкм	Ra=1,25мкм (до нанесения ТСП)

4. Время непрерывной работы узла за ресурс 500час. при частоте срабатывания:

4.1. 1 раз в час (при длительности срабатывания 1с.) составит:

$$\tau_{узда} = 500 \text{ сраб.} \cdot 1\text{с.} = 500\text{с.} = 8,3 \text{ мин.}$$

4.2. 2 раза в час. -  $\tau_{узда} = 16,6 \text{ мин.};$

4.3. 3 раза в час -  $\tau_{узда} = 24,9 \text{ мин.}$

Таким образом, при частоте срабатывания 3 раза в час ресурс ТСП за 500час. не будет выработан.

5. Коэффициент трения в узле рассчитывался по ф. (3.12) для ТСП ЦВСП-3с, как наиболее близкой к рассматриваемому типу ТСП:

$$f_{\text{тр.}} = 0,0896 - 1,47 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{тр.}} + 3,464 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{тр.}}^2 = 0,078.$$

5.1. Сила трения в узле составит  $F_{\text{тр.}} = f_{\text{тр.}} \cdot N = 0,078 \cdot 1000 = 78$  (Н)

5.2. Момент трения составит  $M_{\text{тр.}} = F_{\text{тр.}} \cdot R = 78 \cdot 7 = 546$  (Н · мм)

### **Оценка триботехнических свойств ТСП в пневмоцилиндре противообледенительной системы (ПОС) ГТД**

В данном узле происходит периодический перемещение поршня относительно втулки (см. рисунок 6.6) при открытии подачи горячего воздуха из компрессора высокого давления (КВД). При этом происходит

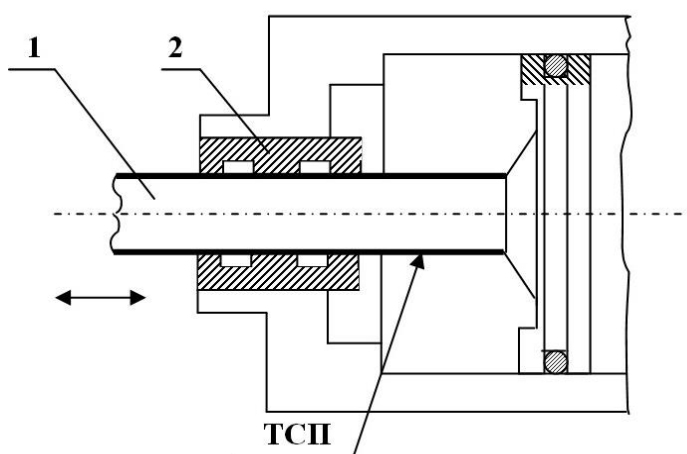


Рисунок 6.6 -  
Конструкция узла с  
ТСП в  
пневмоцилиндре ПОС  
ГТД:  
1 – поршень;

нагружение периферийных частей втулки 2 относительно поршня 1, на поверхность которого нанесено ТСП на основе графита со связующим компонентом. Эксплуатационно-технические параметры узла приведены в таблице 6.10.

Последовательность расчёта.

1. Скорость скольжения  $V = \text{перемещение за } 1\text{с.} = 0,02$  м/с.
2. Контактное давление [15]:  $P = N / L \cdot d = 1000 / (0,011 \cdot 0,008) = 3,62$  МПа,

где  $N$  – нагрузка, Н;  $L$ ,  $d$  – соответственно длина, диаметр контакта, м;

3. Т.к. ТСП «СП графит» на основе графита наносится в связке с кремнийорганическим связующим, то из числа исследованных ТСП (см. раздел.3.4, табл.3.3) наиболее близкий состав ТСП – «графит + кремнийорганическая смола К-55», для которой рассчитана регрессионная зависимость  $I_h = f(T_{тр.})$ ;

3.1. рассчитываем температуру трения  $T_{тр.}$  по формуле табл. 3.10, полученной для диапазона нагрузок  $\Delta N = 236-1364$  Н ( $N_{узла} = 1000$  Н входит в диапазон) и скоростей скольжения  $\Delta V = 0,096-1,224$  м/с ( $V_{узла} = 0,02$  м/с близко к нижней границе диапазона):

Таблица 6.10 - Эксплуатационно-технические параметры узла с ТСП в пневмоцилиндре ПОС ГТД

Условия эксплуатации	Значения параметров	Качество поверхностей	Детали узла	
			поршень	штулка
Среда	Воздух	Посадка	Ø 11 + ТСП «СП графит»	Ø 11,05
Величина перемещения за 1 с. в [мм]	20			
Нагрузка, Н	320			
Скорость перемещения, м/с	0,02	Материал	Жаропрочный сплав	Металлический сплав
Температура, Траб, [°C]	300	Шероховатость поверхности	Ra=0,63 мкм (до нанесения ТСП)	Ra=0,63 мкм
Частота срабатывания за 100 час.	210			

$$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 4,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 = 36,49 + 132,23 \cdot 0,02 + 0,535 \cdot 3,62 + 0,234 \cdot 3,62 \cdot 0,02 - 47,94 (0,02)^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot (3,62)^2 = 41 \text{ }^\circ\text{C}$$

Для повышенной температуры ( $T_{раб.}=300^\circ\text{C}$ ) суммарная поверхностная температура составит:

$$T_{\Sigma} = T_{тр.} + T_{раб.} = 41 + 300 = 341 \text{ }^\circ\text{C} ;$$

3.2. линейная интенсивность изнашивания узла трения с ТСП по формуле, приведённой в табл. 3.11 составит:

$$I_h = 10^{-10} \cdot e^{0,013 \cdot T_{тр.}} = 8,42 \cdot 10^{-9}.$$

тогда по формуле  $I_h = \frac{\delta_{прир.}}{V \cdot \tau}$  значение ресурса составит  $\tau = \frac{\delta_{прир.}}{I_h \cdot V} = \frac{0,002}{8,42 \cdot 10^{-9} \cdot 0,02 \cdot 10^3} = 11879 \text{ (с.)} = 198 \text{ (мин.)}$ .

4. Время непрерывной работы узла при частоте срабатывания 210 раз в 100 часов (при длительности срабатывания 1с.) :

4.1. за ресурс в 300час. составит:

$$\tau_{узла} = 210 \text{ сраб.} \cdot 1\text{с.} \cdot 3 = 630\text{с.} = 10,5 \text{ мин.};$$

за ресурс в 5500час. составит:  $\tau_{узла} = 11550\text{с.} = 193 \text{ мин.};$

Таким образом, при частоте срабатывания 210 раз в 100 часов ресурс ТСП будет выработан за 5500час.

5. Коэффициент трения в узле рассчитывался по ф. (3.12) для ТСП ЦВСП-3с, как наиболее близкой к рассматриваемому типу ТСП:

$$f_{тр.} = 0,0896 - 1,47 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 3,464 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2 = 0,08.$$

5.1. Сила трения в узле составит  $F_{тр.} = f_{тр.} \cdot N = 0,08 \cdot 1000 = 80 \text{ (Н)}$

## 6.4 Выводы к главе 6

В результате выполнения главы 6 были получены следующие выводы:

1. Разработаны технологические рекомендации по повышению надежности качественного нанесения твёрдосмазочных покрытий.

2. Разработаны конструкторско-технологические рекомендации по обеспечению триботехнических характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями и самосмазывающимися материалами.

3. Приведена оценка эффективности внедрения результатов исследований, испытательного оборудования, технологической оснастки, методов испытаний и выбора пар трения.

4. Выполнена оценка ресурса работы реальных узлов трения с твёрдосмазочными покрытиями.

## ВЫВОДЫ

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

10. В результате проведенной 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 рецензируемых научных журналах и 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 // Вестн. 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 твёрдосмазочными 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 твёрдосмазочными 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 твёрдосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе термокорреляционных зависимостей / П. Н. Хопин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017, №7, с. 317-320.
23. Хопин, П.Н. Оценка долговечности пар трения с твёрдосмазочными 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. МАТИ - 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. Saarbrucken: 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 термодинамических 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. Термодинамический 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. Термокорреляционный 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 твердосмазочными 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.

### **Патенты на изобретения**

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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П.Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В.Грановский. - М.: Наука,- 1976. - 280 с.
2. Айбиндер, С.Б. О площади контакта между трущимися телами / С.Б.Айбиндер // Изв. АН СССР. ОТН - Механика и машиностроение. – 1962. - №6. – С. 172-174.
3. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли – М.: Машиностроение, 1986. – 359с.
4. Бартенев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – М.: Химия, -1984. – 280с.
5. Боуден, Ф.П. Трение и смазка / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; пер с англ. М.: Машгиз, -1960. -152 с.
6. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; пер с англ. М.: Машиностроение, -1968.- 544 с.
7. Брейтуэйт, Е.Р. Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / Е.Р. Брейтуэйт. - пер. с англ. М.: Химия,1967.- 320 с.
8. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А.Семендяев. - М.: Наука, 1967. - 608с.
9. Брудный, А.И. Влияние температуры на окислительное и смазочное действие  $MoS_2$  / А.И. Брудный, Б.М.Сизов // Труды Челябинского политехн. ин-та. - Челябинск. –№ 59. - 1969. - С.23-31
10. Исследование влияния материала контртела на работоспособность дисульфидмолибденовых покрытий диффузионного типа / Буяло А.С., Лобашев Б.П., Макаров Ю.В. и др. // Твёрдые смазочные покрытия: сб. статей - М.: Наука. – 1977. - С.78-83.
11. Буяло, А.С. Методы и некоторые результаты исследования частиц износа дисульфида молибдена / А.С. Буяло // Смазочное действие молибденита при воздействии радиации и других факторов: сб. статей. - М.: Атомиздат, 1976, - С.66-77.

12. Вайнштейн, В.Э. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы / В.Э., Вайнштейн, Г.И. Трояновская. - М.: Машиностроение. - 1968. - 180 с.
13. Вайнштейн, В.Э. Способ нанесения твёрдого смазочного покрытия: а.с. № 150329 СССР/ / В.Э. Вайнштейн, И.В. Крагельский, Г.И. Трояновская и др.; опубл. 62, Бюл. № 18.
14. Вайнштейн, В.Э. Влияние условий трения на фрикционные характеристики дисульфида молибдена / В.Э. Вайнштейн, О.А. Сучкова, В.Л. Мемелов // Машиноведение. – 1965. - №4. - С .103-114.
15. Воронков, Б.Д. Подшипники сухого трения / Б.Д.Воронков. – Л.: Машиностроение, - 1979.- 223с.
16. Гамуля, Т.Д. Планирование эксперимента при оценке долговечности твёрдых смазочных покрытий / Т.Д. Гамуля, Т.П. Юхно, А.И, Яковлев и др. // Надёжность и контроль качества. - М.: - 1978. - № 8, С.44-50.
17. Гамуля, Т.Д. Об ориентировке частиц MoS<sub>2</sub> на поверхности трения твёрдосмазочного покрытия / Г.Д. Гамуля, Г.В. Добровольская, И.Л. Лебедева и др. // Машиноведение. - М. : 1978. - № 6. - С.70-75.
18. Гаркунов, Д.Н. Избирательный перенос в узлах трения [Текст] / Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский , А.А, Поляков. - М.: - Транспорт. – 1969. – 104 с.
19. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. - М.: Машиностроение. – 1985. - 426с.
20. Гафнер, С.Л. Повышение долговечности, подшипников скольжения сухого трения : инф. листок ГОСИНТИ. - № 674-72.
21. Гафнер, С.Л. О работоспособности тяжело нагруженных сухих подшипников скольжения / С.Л. Гафнер, Ю.Н. Дроздов // Износостойкость: сб. статей. - М.: - Наука. – 1975. - С.75-80.
22. Гуров, А.А. Полимерные самосмазывающиеся материалы /Цеев Н.А., Козёлкин В.В., Гуров А.А. // Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме. - Справочник. – Глава 4. – М. – Машиностроение, 1991. –С.63-136.

23. Горбунов, М.Н. Основы технологии производства самолётов / М.Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1976. – 260с.
24. Голего, Н.Л. Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах / Н. Л. Голего. — М. : Машгиз, 1961. — 193 с.
25. Гриб, В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В.В. Гриб, Г.Е.Лазарев. - М.: Наука, 1968, - 141с.
26. Де Ге, А.В. Механизм разрушения плёнки дисульфида молибдена при трении скольжения / А.В. Де Ге, Г. Саломон, Д.Х. Заат: - избр. доклады на междунар. конф. по смазочным материалам. – Вашингтон: 1964.- пер. с англ. М.: Химия. - 1967 - С.242-254.
27. Дёмкин, Н.Б. Контакт твёрдых тел при статическом нагружении и трении / Н.Б. Дёмкин: сб. статей.- М.: Наука. - 1965. С.26-29.
28. Дивайн, М.И. Применение твёрдых смазок / М.И. Дивайн, Е.Р. Ламсон, И.П., Церини и др.: сб. статей: Брейтуэйт Е.Р. /Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия.- М.: Химия. - 1967. С.283-303.
29. Дроздов, Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов – М.: ЭкоПресс,- 2010. 604 С.
30. Дрожжина, М.П. Смазочное действие дисульфида молибдена в высоком вакууме, при повышенной и высокой температурах: сб. статей. / Смазочное действие молибденита при воздействии радиации и других факторов. - М.: Атомиздат. - 1976. С.43-58.
31. Дунин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова.- М.: Машиностроение. 1978. - 232с.
32. Духовской Е.А.. Эффект аномально низкого трения в вакууме при бомбардировке полиэтилена потоками быстрых атомов и молекул некоторых элементов / Е.А. Духовской, В.С. Онищенко, А.Н. Пономарёв и др.// Доклад АН СССР.- М.: Наука. – 1969.- т.189.- № 6.- С.1211-1214.

33. Е.А. Духовской. Усиление смазочной способности дисульфида молибдена путём радиационного воздействия / Е.А. Духовской, В.С. Онищенко, А.Н. Пономарёв и др. : сб. статей / Смазочное действие молибденита при воздействии радиации и других факторов. - М.: Атомиздат. - 1976. С.59-65.
34. Дьячек, И.М. Нанесение твёрдой плёнки дисульфида молибдена на поверхность деталей подшипников качения при помощи ультразвука/ И.М. Дьячек, Н.К. Волобуев, А.С. Ермилов и др.: сб. статей / Пластичные смазки и твёрдые смазочные покрытия//Труды ВНИИ НП. - вып.ХІ.: М.- Химия. 1969. С.243-247.
35. Добычин М.Н., Сачек Б.Я. Метод прогнозирования ресурса подшипникового узла сухого трения с твёрдосмазочным покрытием. ж. Трение и износ. 2008, Т. 29, № , с. 246-250.
36. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. - М.: Наука, 1960. - 232с.
37. Егерев, В.К. Методика построения графиков функций / В.К. Егерев, Б.А. Радунский, Д.А. Тальский. - М.: Высшая школа, 1970. - 152с.
38. Ермаков, А.Т. Исследование работоспособности некоторых твёрдых смазочных покрытий при трении в вакууме м высоких температурах / Ермаков А.Т., Матвеевский Р.М. // Твёрдые смазочные покрытия : сб. статей – М. - Наука. – 1977. – стр. 70-74.
39. Журков, С.Н. Нарзуллаев, Б.Н. // Журнал технической физики. – 1953 (23). С. 1667-1689.
40. Иегер, Дж. К. Движущиеся источники тепла и температура трения / Дж. К. Иегер.: сб. статей // Прикладная механика и машиностроение. Изд. иностранной литературы.- М.: 1952.- №6. С.22-39.
41. Исследование пар трения, работающих в условиях вакуума при повышенных и пониженных температурах: отчёт о НИР / Хворостухин

- Л.А., Волков А.Ф., Хопин П.Н. и др. – М., МАТИ, п/я Р-660I, 1980. – 180с. - гос. рег. № У44786 М.
42. Карапетян, С.С. Смазочные свойства дисульфида молибдена в высоком и сверхвысоком вакууме при низкой температуре: сб. статей / Смазочное действие молибденита при воздействии радиации и других факторов. - М.: Атомиздат. - 1976. С.39-47.
  43. Карасик, И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения / И.И. Карасик. - М.: Наука, 1978 - 136с.
  44. Кармадонов, А.Ф. Исследование износа и долговечности дисульфидмолибденовой плёнки при граничном трении / А.Ф. Кармадонов, А.И. Брудный, А.М. Кирьянов : сб статей / Твёрдые смазочные покрытия. М.: Наука, 1977. - С.53-61.
  45. Карп, С.А. Влияние нагрузки на антифрикционные свойства дисульфида молибдена. избр. доклады на междунар. конф. по смазочным материалам. – Вашингтон: 1964.- пер. с англ. М.: Химия. - 1967 - С.255-274.
  46. Кирьянов, А.М. Исследование свойств и смазочной способности натёртых и нанесённых слоев дисульфида молибдена при трении скольжения: автореф. дис. канд. техн. наук /А.М.Кирьянов; Челябинский политехн. ин-т, 1976. - 15с.
  47. Комаров, В. А. Исследование истираемости и антифрикционных свойств твёрдосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена / В. А. Комаров, А. Ф. Волков, П. Н. Хопин ; Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э. Циолковского. М., 1979. Деп. в ГОСИНТИ 19.06.79, № 3679.
  48. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твёрдых тел на трение и износ / В.С. Комбалов. - М.: Наука, 1974. - 112с.
  49. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий.- Киев: Техника. – 1970. - 396с.
  50. Крагельский, И.В. Устройство для сухого смазывания трущейся поверхности подшипника скольжения: а.с. 174477 СССР / И.В.

- Крагельский, А.А, Силин, Г.Р. Овсеенко (СССР); опубл. 1965, Бюл. № 17.
51. Крагельский, И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов.- М.: Машиностроение, 1977. -528 с.
52. Криони Н.К. Высокотемпературные твёрдые смазочные покрытия в опорах скольжения / Вестник УГАТУ. 2009, т.12, №4(33), с.102-105.
53. Курилов, Г.В. Исследование работоспособности твёрдых смазочных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$  при трении в глубоком вакууме: автореф. дис. канд. техн. наук / Г.В. Курилов ; физ. - техн. ин-т низких температур. – Харьков, 1971. – 20с.
54. Курилов, Г.В. Методика исследования твёрдых смазочных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$  / Г.В. Курилов, В.Ф. Удовенко, Т.П. Юхно и др. // Заводская лаборатория.- 1973.- № I, С.48-50.
55. Кутьков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутьков. - М.: Машиностроение, 1976.- 152с.
56. Кэлхун, С.В. Твёрдые смазочные покрытия / С.В. Кэлхун, Ф.С. Мидэ, Г.П. Мурфи и др.: сб. статей: Брейтуэйт Е.Р. /Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия.- М.: Химия. - 1967. С.304-319.
57. Ланкастер, Д.К. Смазочное действие плёнок твёрдых смазок: - избр. доклады на междунар. конф. по смазочным материалам. – Вашингтон: 1964.- пер. с англ. М.: Химия. - 1967 - С.233-241.
58. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории и обработки наблюдений / Ю.В. Линник. - М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1962, - 352с.
59. Логинов, А.Р. Экспериментальная проверка фактора износа / А.Р. Логинов. - Экспериментальная проверка фактора износа / Теоретические и прикладные задачи трения износа и смазки: сб. статей - М.: Наука, 1982. - С.270-27.



60. Лобашев, Б.П. Фрикционные свойства самосмазывающегося материала М801 (димолит) в различных условиях трения и его применение / Лобашев Б.П., Макаров Ю.В. // Твёрдые смазочные покрытия: сб. статей – М. - Наука. – 1977. – стр. 75-77.
61. Любарский, И.М. Поведение твёрдых смазочных покрытий на основе дисульфида молибдена при трении в глубоком вакууме / И.М. Любарский, Л.Н. Сентюрихина, З.С. Рубцова и др. // Труды ВНИИ НП - М.: Химия, 1969, - № XI. - С.278-282.
62. Маленков, М.И. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов// Маленков, С.И. Каратушин, В.М. Тарасов/ Учебное пособие. - Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.: 2007.- 54с.
63. Марков, В.А. Применение смазок с дисульфидом молибдена в узлах трения / В.А. Марков, Е.М. Опарина, В.А. Листов, Л.Н.Сентюрихина // Производство смазочных материалов.: сб. статей - М.: 1963.– ЦНИИТЭнефтегаз.- С.26-33.
64. Матвеевский, Р.М. Исследование температурной стойкости граничных смазочных слоев и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов.: автореф.дис. докт. техн. наук / Ростислав Митрофанович Матвеевский ; Ин-т машиноведения АН СССР. – М.: 1970, - 45с.
65. Матвеевский, Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов / Р.М. Матвеевский.: монография. М.: Наука.- 1971.- 228с.
66. 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 сб. / ЛИАП. 1979. Вып. 1 (133). С. 135—140.
67. Методические указания по обработке профилограмм шероховатости поверхности № 176. - Изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР: 1960.

68. Михеев, В.А. Оценка долговечности твёрдых смазочных покрытий в условиях реверсивного колебательного движения / В.А. Михеев, К.А. Семёнов, В.В. Николаев и др.: Синтетические смазочные масла и твёрдые смазочные покрытия // Труды ВНИИ НП.: М.- Химия, 1976. - вып.ХУ11, С.124-128.
69. Михин, Н.М. Упругое восстановление дорожки трения / Н.М. Михин, С.В. Фролов, И.И. Денискин // Машиноведение. – 1981, №2.- С.78-82.
70. Мур, Д. Основы и применения трибоники / Д. Мур: пер. с англ. М.: Мир, -1978. - 488 с.
71. Нанесение твёрдых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена на поверхности трения / Л.Н. Сентюрихина, З.С.Рубцова: инструкция ВНИИ НП.- М.: Химия, 1967. - 12 с.
72. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении : раздел 1. Общие представления о планировании : учебное пособие / Ф.С. Новик; под ред. Новикова И.И. - М.: МИС и С, 1972, - 108с.
73. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении : сборник задач / Ф.С. Новик ; под ред. Новикова И.И. - М.: МИС и С, 1972, - 132с.
74. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении : Раздел 11. Планы 2-го порядка. Исследование области экстремума / Ф.С. Новик ; под ред. Новикова И.И. - М.: МИС и С, 1970, - 80с.
75. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении.: Раздел: выбор параметров оптимизации факторов. Ч. 2 / Ф.С. Новик; под ред. Новикова И.И. - М.: МИС и С, 1979, - 74с.
76. Ноженков, М.В. О низком трении твёрдых тел / М.В. Ноженков // Трение и износ. – 1987. т.8, № 3. - С. 459 - 466.
77. Ноженков М.В. Связь между структурой и триботехническими свойствами покрытий дисульфида молибдена, получаемых

- высокочастотным распылением./М.В. Ноженков, Н.А.Воронин, А.П.Семёнов, Ю.М. Товмисян.// Трение и износ. -1986. т.7, №1, с. 21-26.
78. Павлов, В.Г. Магнитный способ подачи сухой смазки в узлы трения / В.Г. Павлов, Ю.Н. Дроздов // Вестник машиностроения. -1974. - № 9. - С.44-46.
79. Пипко, А.И. Конструирование и расчёт вакуумных систем / А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Е.А. Пенчко. - М.: Энергия, 1979. - 504с.
80. Плешивцев, Н.В. Катодное распыление / Н.В. Плешивцев. - М.: Атомиздат, 1968.
81. Поздняков, В.В. Эффективные методы уменьшения трения (твёрдые смазки) / В.В. Поздняков, И.А. Буяновский. : обзор. М., 1977, 52с.
82. Попов, О.В. Методика экспериментального исследования теплового процесса трения на роликовой машине / О.В. Попов, П. Н. Хопин ; Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э. Циолковского. М., 1981. Деп. в ЦНТИ «Волна» 17.08.81, № 4609.
83. 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.
84. Попов, О.В. Исследование теплового режима трения пары с твёрдосмазочным покрытием / О.В. Попов, А.Ф. Волков, П.Н. Хопин; Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э. Циолковского. М., 1981. Деп. в ЦНТИ «Волна» 17.08.81, № 4609.
85. Пучков В.Н. Трение и несущая способность твёрдых смазочных покрытий применяемых в болтовых и заклёпочных соединениях./ В.Н. Пучков, Ю.Н. Дроздов, В.В. Дунаев и др.//Исследование смазочных материалов при трении. М. Наука,1981, с.119-125.
86. Ратнер, С.Б. Работоспособность пластмасс под нагрузкой и пути её прогнозирования и повышения / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев.: обзор информ. серия «Общепромышленные вопросы развития химической промышленности». М.: Химия, 1979. - С.1- 69.

87. Ребиндер, П.А. О значении граничных условий в физико-химической механике процессов обработки пластических материалов / П.А. Ребиндер: в сб. статей «Обработка пластмасс в машиностроении». - М.: Наука, 1968. - С.7-11.
88. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твёрдых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Б. Томашевский Э.Б. - М.: Химия, 1974. - 566с.
89. Рубцова, З.С. Твёрдые смазочные материалы на основе дисульфида молибдена / З.С. Рубцова, Л.Н. Сентюрихина // Химия и технология топлив и масел: М. - Химия, 1965. - № 11. - С.41-44.
90. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Фёдоров. - М.: Машиностроение. - 1979, 159с.
91. Сачек, Б.Я. Влияние эксплуатационно-технологических факторов на трение твёрдосмазочных покрытий / Б.Я. Сачек // Трение и износ: 1983. - т.4, №5. - С.935-941.
92. Сачек, Б.Я. К оценке температурных зависимостей параметров фрикционной усталости по результатам испытаний на изнашивание твёрдосмазочных покрытий / Б.Я. Сачек, Д.Г. Эфрос // Трение и износ. - 1986, т.7, №1. - С.75-84.
93. Семёнов, А.П. К вопросу о механизме смазочного действия твёрдых антифрикционных материалов / А.П. Семёнов, М.В. Ноженков // Трение и износ. - 1984, т.5, № 3. - С.408-416.
94. Сентюрихина, Л.Н. Твёрдые дисульфидмолибденовые смазки / Л.Н. Сентюрихина, Е.М. Опарина. - М.: Химия, 1966. - 152с.
95. Сентюрихина, Л.Н. Ассортимент твёрдых смазочных покрытий на основе дисульфида молибдена и область их применения / Л.Н. Сентюрихина, Е.М. Опарина, З.С. Рубцова и др. // Пластичные смазки и твёрдые смазочные покрытия: Труды ВНИИ НП, вып. XI, М.:Химия, 1969. - С.252-262.

96. Сентюрихина, Л.Н. Предварительная подготовка стальных поверхностей перед нанесением твёрдых смазочных покрытий / Л.Н. Сентюрихина, А.М. Петлюк, З.С. Рубцова, Л.Н. Петрова // Синтетические смазочные масла и твёрдые смазочные покрытия: Труды ВНИИ НП.- вып. ХУ11, М.: 1976. - С.93-103.
97. Сентюрихина, Л.Н. Твёрдые смазочные покрытия / Л.Н. Сентюрихина, З.С. Рубцова, Л.Н. Петрова: Труды ВНИИ НП. - вып. XI, М.: Химия, 1969. - С.201-225.
98. Сентюрихина, Л.Н. Износостойкость твёрдых смазочных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$  / Л.Н. Сентюрихина, З.С. Рубцова, В.А. Марков. : сб. статей // Производство смазочных материалов. М.: ЦНИИТЭнефтегаз, 1963. - С.34-48.
99. Сентюрихина, Л.Н. Теория смазочного действия и новые материалы / Л.Н. Сентюрихина, З.С. Рубцова, К.И. Климов. - М.,: Наука, 1965. - С. 131 - 134.
100. Силин, А.А. О роли адгезии в процессе ориентации молибденита при трении / А.А. Силин, В.И. Апарин // Машиноведение. - 1979. - С. 87-89.
101. 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.
102. Степнов, М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. - М.: Машиностроение. - 1972. - 232с.
103. Сутягин, О.В. Применение твердосмазочных покрытий в механизмах и технологических процессах/О.В. Сутягин//Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сборник науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. С. 42-50.
104. Тёмкин, И.В. Применение графита и дисульфида молибдена в качестве твёрдых смазок / И.В. Тёмкин. - М.: - 1966. - 28с.

105. Трение, изнашивание и смазка: справочник / И.В.Крагельский, В.В. Алисин и др.; под ред. И.В.Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978. - т.1. - С.288-290.
106. Трение и износ в вакууме / И.В.Крагельский, И.М. Любарский, А.А. Гусяков и др.- М.: Машиностроение, 1973. - 216с.
107. 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.
108. 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.
109. 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.
110. Уотерхауз, Р.Б. Фреттинг – коррозия / Р.Б.Уотерхауз .: пер. с англ.. - Л.: Машиностроение, 1972. - 272с.
111. Усов, Л.Н. Применение плазмы для получения высокотемпературных покрытий / Л.Н. Усов, А.Н.Борисенко. - М.: Наука. - 1965.
112. Характеристики микрогеометрии, определяющие контактное взаимодействие шероховатых поверхностей : методика определения.- М.: ИМАШ, 1973. - 32с.
113. Хопин, П. Н. Методика и результаты оценки эксплуатационных характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями для различных условий функционирования / П. Н. Хопин//Трение и износ.2012. Т. 33, № 1. С.23—31.
114. Хопин, П. Н. Практические рекомендации по обеспечению качественного нанесения твёрдосмазочных покрытий методом напыления / П. Н. Хопин;

- Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э. Циолковского. М., 1982. Деп. в ЦНТИ «Волна» 25.05.82, № 4923.
115. Хопин, П. Н. Конструкции образцов и методические вопросы их применения при проведении многоцелевых фрикционных испытаний на роликовой машине трения / П. Н. Хопин; Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э. Циолковского. М., 1985. Деп. в ЦНТИ «Волна», № 6479.
116. Хопин, П. Н. Разработка на основе математического эксперимента расчётного метода комплексной оценки работоспособности пар трения с твёрдосмазочным покрытием / П. Н. Хопин // Триботехника — машиностроению : тез. / Четвертая Моск. науч. - техн. конф. ; АН СССР [и др.]. 1989. С. 24—25.
117. 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.
118. 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.
119. 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.
120. Хопин, П. Н. Устройство для исследования процессов трения и износа на роликовых образцах / П. Н. Хопин, А. Ф. Волков, Е. Н. Чернышев ; Моск. авиац. технолог. ин-т им. К. Э. Циолковского. М., 1986. Деп. в ВИМИ 15.04.86, № 6799.
121. 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.

122. 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.
123. Цеев, Н.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме / Цеев Н.А., Козёлкин В.В., Гуров А.А. // *Справочник*. – М. - Машиностроение. – 1991 – 188с.
124. Цеев, Н.А. Долговечность подшипников скольжения с твёрдосмазочным покрытием СТС-312 в вакууме / Н.А. Цеев, В.В. Козёлкин, Ю.Н. Дроздов // *Вестник машиностроения*. - 1976, №5. - С.27-29.
125. Шпинёв, В.Н. О взаимодействии дисульфида молибдена с поверхностью трения / В.Н. Шпинёв, И.И. Маликов // *Триботехника и антифрикционное материаловедение : тезисы докл. всес. научно-техн. конференции*. - Новочеркасск, 1980. - С.132-133.
126. Щедров, В.С. Температура на скользящем контакте / В.С. Щедров. - *Трение и износ в машинах : сб. статей*. - М.: АН СССР, 1955. - 336с.
127. Ярош, В.М. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны / В.М. Ярош, А.А. Моишеев, М.А. Броновец // *Трение и износ*. – 2003. - т.24. №6, С.626-635
128. ASTM: Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. ASTM E490 (2006).
129. ASTM: Standard tables for reference solar spectral irradiances: Direct normal and hemispherical on 37\_ tilted surface. ASTM G173 - 03e1.
130. Ballou, E.Y. Adsorption of benzene and Water vapor by MoS<sub>2</sub> / E.Y. Ballou, S. Ross // *The Journal of Physical chemistry*. – 1953. - v.57, 653.
131. Bessiere, P. Groupement avancement mecan. Und. // *Journal etudes lubrif. organis.* - Paris, 1963.
132. Bowden, F.P. Friction and lubrication of solids / F.P. Bowden, D.Tabor . - Oxford (a.o.). : University Press. - 1950, P. 90-121.



133. Bowden, F.P. The friction and lubrication of solids/ F.P. Bowden, D.Tabor . - Oxford (a.o.): University Press, 1954. - P.146-149.
134. Boyd, I. The Friction Properties of Various Lubricants at High Pressures / I. Boyd // ASMS Trans. - 1945, P.67,51.
135. Bragg, M.L. Introduction to Crystal Analysis / M.L. Bragg. - Bell a. Sons, 1948.
136. Braithwaite, E.R. Solid Lubricants and Surfaces / E.R. Braithwaite. - Pergamon Press. - Oxford-London-New York-Paris, 1964.
137. Braithwaite, E.R. Colloidal disulfide of molybdenum / E.R. Braithwaite // Research applied in industry. - 1961, v.14, N 1.- P.24.
138. Brandon A. Krick. W. Gregory Sawyer. Space Tribometers: Design for Exposed Experiments on Orbit. Tribol Lett (2011) 41:303–311. DOI 10.1007/s11249-010-9689-y.
139. Brayant, P.J. A study of mechanisms of graphite friction and Wear / P.J. Brayant, P.Z. Gutshall, L.H.Taylor // Wear. – 1964. v.7, N 1, P.118-128.
140. Buckley, D.H. Influence of crystal structure on friction characteristics of rare earth and related Metals in vacuum to  $10^{-10}$  mm of mercury / D.H. Buckley, R.L. Johnson. - Preprint, presented at the ASLE/ASME Lubrication Conference. - Washington D.C.. - Oct. 13-16, 1964.
141. Buckley, D.H. Friction, wear and evaporation rates of various materials in vacuum to  $10^{-7}$  mm Hg / D.H. Buckley, M. Swirkert, R.L. Johnson // ASLE Transact. - 1962, v.5. - P.8-23.
142. Buckley D.H. Friction, Wear and Lubrication in Vacuum. / D.H. Buckley. -NASA SP-277/Scientific and Technical Information Office NASA. Washington D.C., 1971.185 p.],
143. Campbell, W.E. Solid lubricants / W.E. Campbell // Lubrication Engineering. - 1953, 9, N 4. - P.195-200.
144. Conley P.L., editor. Space vehicle mechanisms. New York: Wiley; 1998. p. 100.

145. Dever J.A.: Low earth orbital atomic oxygen and ultraviolet radiation effects on polymers. E-5943; NAS 1.15:103711; NASA-TM-103711 (1991).
146. Downing Corning. URL: <http://atf.ru/>. Руководство по выбору антифрикционных покрытий Molykote. 2008. Корпорация Downing Corning. Форма 71-02508-22.
147. Downing Corning. URL: <http://atf.ru/>. Технические описания АФП (ТСП) от 03.10.2016 (для ТСП MOLYKOTE® D-7409) от 04.03.2014 (для остальных ТСП).
148. Everlube Products. URL:<http://www.everlubeproducts.com>.
149. Haidou Wang, Binshi Xu, Jiajun Liu. Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication. Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. 304 S.
150. H. Donald. Friction, Wear and Lubrification en Vacuum / H. Donald, D.H. Buckley. – Washington. - NASA Levis Research Center, 1971, 277 p.
151. Haltner, A.J. An evaluation of the role of vapor lubrication mecanisme in MoS<sub>2</sub> / A.J. Haltner // Wear. – 1964. v.7, N 1, P.102-117.
152. Jost, H.P. Pure molybdenum disulphide, it's properties and uses in the sheet metal industry / H.P. Jost . - Sheet Metal Ind. - 1956, 33, 679.
153. Miyoshi, K.: Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces. NASA Glenn Research Center. Cleveland. Ohio. MARCEL DEKKER, INC. NEW YORK I BASEL. 2001. 400 S.
154. L'apple, W. Smierwirksame Oberflächen Schichten - eine neue Technologie / W. L'apple // Industrie Anzeige. - Essen. 1980, 109, N 68, S.27-28.
155. NASA TECHNICAL MEMORANDUM. NASA TM-78914. NASA —TM-78914. SPUTTERING TECHNOLOGY IN SOLID FILM LUBRICATION (NASA) . T. Spalvins. Lewis Research Center Cleveland, Ohio 44135, 1978. - 18p.
156. Petronio, M. Military uses of dry film lubricants / M. Petronio. - Proc. Internat. Conf. on Solid Lubrication. Denver. - ASLE, 1971, P. 27-31.

157. Friction measurements on a low Earth satellite / J.B . Rittenhouse, L.D. Jaffe , R.G. Nagler, H.E. Martens // ASLE Transact. – 1963. - v.6, N 3. - P.161-177.
158. Robbins, E.J. Dry lubrication / E.J. Robbins // Tribology. - 1970, v. 3, N 2, S.84-88.
159. Salomon, G. Mechano-chemical factors in MoS<sub>2</sub> - film lubrication / G. Salomon, A.W. De Gee, I.H. Zaat // Wear . -1964, v.7, N 1. - P. 87-101.
160. Savage, R.H. Graphite lubrication / R.H. Savage // I.Appl. Phys. - 1948, v.19, N 1.
161. Sandstrom Products Company. URL:<http://www.sandstromproducts.com>.
162. Sonntag, A. The Properties and Uses of Pure Molybdenum Dysulfide as a Lubricant / A. Sonntag // ASLE. - March., 1953.
163. Voevodin A.A., Bultman J.E., Zabinski J.S. Investigation into a 3-dimensional processing of tribological coatings. Surf Coat Technol 1998;107:12–9.].
164. Voevodin A.A., O'Neill JP, Prasad S.V., Zabinski J.S. Nanocrystalline WC and WC/a-C composite coatings produced from intersected plasma fluxes at low deposition temperature. J. Vac. Sci. Technol. A 1999; 17: 986–92.
165. Voevodin A.A., O'Neill J.P., Zabinski JS. Tribological performance and tribochemistry of nanocrystalline WC/amorphous diamondlike carbon composites. Thin Solid Films 1999;342:194–200.
166. Voevodin A.A., O'Neill JP, Zabinski JS. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications. Surf. Coat. Technol. 1999; 116–119:36–45.
167. Voevodin A.A., Phelps A.W., Donley M.S., Zabinski J.S. Friction induced phase transformation of pulsed laser deposited diamondlike carbon. Diam. Relat. Mater. 1996; 5: 1264–9.
168. Voevodin A.A., Prasad S.V., Zabinski J.S. Nanocrystalline carbide/amorphous carbon composites. J. Appl. Phys. 1997; 82: 855–8.
169. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Load-adaptive crystalline/amorphous nanocomposites. J. Mater. Sci. 1998; 33: 319–27.

170. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science and Technology*. 65 (2005),S. 741–748.
171. Voevodin AA, Zabinski JS. Supertough wear resistant coatings with “chameleon” surface adaptation. *Thin Solid Films* 2000;370:223–31.
172. Yang J.C., De Groh K.K.: Materials issues in the space environment. *Mrs. Bull.* 35, 12–16 (2010).
173. Zechel, R.; Lonsky, P.; Trautmann H. et al. Molykote, Dow Corning GmbH, 1991.
174. Zheng Y.H., Li J S, Wang M L. Friction characteristic of FM-510 bonded solid film [J]. *Tribology*, 1998, 18(4): 373–376.
175. Ye Y.P., Chen J.M., Zhou H.D. A study on the corrosion-resisting properties of resin bonded MoS<sub>2</sub> solid lubrication films [J]. *China Surface Engineering*, 2001, (2): 26–28.















## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б 1 - Матрица планирования математического многофакторного эксперимента с использованием центрального композиционного ротатабельного равномер-плана 2-го порядка для 5-ти факторов

№ опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	X <sub>4</sub> <sup>2</sup>	X <sub>5</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> X <sub>1</sub> X <sub>5</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>5</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub> X <sub>5</sub> X <sub>4</sub> X <sub>5</sub>	↖	
	1.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2.	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	1339
3.	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	628
4.	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	1357
5.	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1248
6.	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	2694
7.	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	1262
8.	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	2729
9.	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	601

10.	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	1296
												-1	-1	-1	-1	-1	
												+1	+1	+1	-1	-1	608
11.	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	
												+1	+1	+1	-1	-1	
12.	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	1313
												-1	-1	+1	-1	-1	
13.	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1208
												-1	+1	-1	+1	-1	
14.	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	2607
												+1	-1	-1	+1	-1	
15.	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	1223
												-1	+1	+1	+1	-1	
16.	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	2641
												+1	-1	+1	+1	-1	
17.	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	402
												+1	-1	+1	+1	-1	
18.	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	868
												-1	+1	+1	+1	-1	
19.	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	407
												+1	-1	-1	+1	-1	
20.	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	879
												-1	+1	-1	+1	-1	

21.	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	809
														-1	-1	+1	-1	-1
22.	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
														+1	+1	+1	-1	-1
23.	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
														-1	-1	-1	-1	-1
24.	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
														+1	+1	-1	-1	-1
25.	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
														+1	-1	-1	-1	+1
26.	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1
														-1	+1	-1	-1	+1
27.	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
														+1	-1	+1	-1	+1
28.	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
														-1	+1	+1	-1	+1
29.	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
														-1	-1	-1	+1	+1
30.	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
														+1	+1	-1	+1	+1
31.	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
														-1	-1	+1	+1	+1

32.	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1711
33.	+1	+2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	715
34.	+1	-2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2378
35.	+1	0	+2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	0	0	603
36.	+1	0	-2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	0	0	266
37.	+1	0	0	+2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	0	471
38.	+1	0	0	-2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	0	2683
39.	+1	0	0	0	+2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	1043
40.	+1	0	0	0	-2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	0	509
41.	+1	0	0	0	0	+2,378	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	0	2034
42.	+1	0	0	0	0	-2,378	0	0	0	0	0	+5,655	0	0	0	0	0	657

43.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1182
												0	0	0	0	0	0	0	
44.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1453
												0	0	0	0	0	0	0	
45.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1269
												0	0	0	0	0	0	0	
46.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1206
												0	0	0	0	0	0	0	
47.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1585
												0	0	0	0	0	0	0	
48.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1491
												0	0	0	0	0	0	0	
49.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1467
												0	0	0	0	0	0	0	
50.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1219
												0	0	0	0	0	0	0	
51.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1467
												0	0	0	0	0	0	0	
52.	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1219
												0	0	0	0	0	0	0	

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обработка результатов математического эксперимента, проведенного по методу центрального – композиционного ротатабельного униформ-планирования 2-го порядка

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице (см. приложение Б). Расчет коэффициентов уравнения регрессии и дисперсионный анализ полученных результатов производился на ЭВМ.

Обработка результатов эксперимента производилась в соответствии с методикой, рекомендованной в работах [36, 73, 74, 75].

Согласно проведенных расчетов были получены следующие регрессионные коэффициенты:

$$b_0 = 1358,5;$$

$$b_{25} = 14,7;$$

$$b_1 = -405,5;$$

$$b_{34} = 9,7;$$

$$b_2 = 0,87;$$

$$b_{35} = -102,6;$$

$$b_3 = -408,1;$$

$$b_{45} = 20,6;$$

$$b_4 = 31,7;$$

$$b_5 = 261,3;$$

$$b_1^2 = 36,9;$$

$$b_2^2 = -159,7;$$

$$b_3^2 = 42,34;$$

$$b_4^2 = -99,3;$$

$$b_5^2 = 1,39;$$

$$b_{12} = 19,4;$$

$$b_{13} = 132,0;$$

$$b_{14} = 8,9;$$

$$b_{15} = -110,8;$$

$$b_{23} = 18,8;$$

$$b_{24} = -16,4;$$



Затем проводилась проверка статистической значимости коэффициентов регрессии, их абсолютные величины сравнивались с доверительными интервалами, рассчитанными по формуле:

$$\Delta B = \pm t_{\alpha, N} \cdot S\{b_i\} \quad (B.1)$$

где  $t_{\alpha, N}$  - критерий Стьюдента в зависимости от уровня значимости  $\alpha$  и числа опытов в матрице планирования  $N$  ;

$S\{b_i\}$  - среднеквадратическая ошибка в определении коэффициентов регрессии.

Для определения величин  $S\{b_i\}$  были рассчитаны дисперсии в определении соответствующих коэффициентов регрессии по формулам:

$$S^2\{b_0\} = a_1 \cdot S^2\{y\}; \quad (B.2)$$

$$S^2\{b_i\} = a_3 \cdot S^2\{y\}; \quad (B.3)$$

$$S^2\{b_{ij}\} = a_4 \cdot S^2\{y\}; \quad (B.4)$$

$$S^2\{b_{ii}\} = a_7 \cdot S^2\{y\}; \quad (B.5)$$

где  $a_1, \dots, a_7$  - значения коэффициентов, используемых при обработке результатов ротатабельного планирования эксперимента (см. приложение 4 в работе [74], [36]).

Дисперсия опыта  $S^2\{y\}$  была подсчитана по результатам 10 опытов (№№ 43-52) на основном уровне (см. таблицу в приложении Б):

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{i=43}^{52} \Delta y^2}{f_1} = 225,11$$

где  $f_1 = 9$  - число степеней свободы.

Таким образом, дисперсия опыта оказалась равной  $S^2\{y\} = 22511$  при числе степеней свободы  $f_1 = 9$ .

Доверительные интервалы для коэффициентов регрессии при  $\alpha = 0,05$  составили:

$$t_{0,052; 52} = 1,96 - \text{коэффициент Стьюдента [74];}$$

$$S^2\{b_0\} = 0,0988 \cdot 22511 = 2224,1; S\{b_0\} = 47,16;$$

$$\Delta b_0 = \pm 1,96 \cdot 47,16 \approx \pm 92,4;$$

$$S^2 \{b_{i,j}\} = 0,0231 \cdot 22511 = 520,0; S \{b_{i,j}\} = 22,8;$$

$$\Delta b_i = \pm 1,96 \cdot 22,8 \approx \pm 44,7;$$

$$S^2 \{b_{i,j}\} = 0,0312 \cdot 22511 = 702,3; S \{b_{i,j}\} = 26,5;$$

$$\Delta b_{i,j} = \pm 1,96 \cdot 26,5 \approx \pm 51,9;$$

$$S^2 \{b_{i,i}\} = 0,0172 \cdot 22511 = 387,2; S \{b_{i,i}\} = 19,7;$$

$$\Delta b_{i,i} = \pm 1,96 \cdot 19,7 \approx \pm 38,6.$$

Таблица В.1 - Вспомогательная таблица для расчета дисперсии опыта в математическом эксперименте 2-го порядка

№ опытов	$y_i$	$\Delta y =  y_i - \bar{y} $	$\Delta y^2$
43	1182	173,8	30206,4
44	1453	97,2	9447,8
45	1269	86,8	7534,2
46	1206	149,8	22440,0
47	1585	229,2	52532,6
48	1491	135,2	18279,0
49	1467	111,2	12365,4
50	1219	136,8	18714,2
51	1467	111,2	12365,4
52	1219	136,8	18714,2
	$\bar{y} = 1355,8$		$\Sigma \Delta y^2 = 202599,2$

При 95%-ной доверительной вероятности ( $\alpha = 0,05$ ) статистически незначимыми были признаны коэффициенты:  $b_2, b_4, b_1^2, b_{12}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{25}, b_{34}, b_{45}$ .

Таким образом, математическая модель приняла вид:

$$Y = 1358,5 - 405,5 \cdot X_1 - 408,1 \cdot X_3 + 261,3 \cdot X_5 - 159,7 \cdot X_2^2 + 42,3 \cdot X_3^2 - 99,3 \cdot X_4^2 + 132,0 \cdot X_1 X_3 - 110,8 \cdot X_1 \cdot X_5 - 102,6 \cdot X_3 \cdot X_5 \quad (B.6)$$

Проверка адекватности полученной модели производилась с помощью F-критерия:

$$F_{f_1, f_2}^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад.}}^2}{S^2\{y\}}, \quad (\text{B.7})$$

$$\text{где } S_{\text{неад.}}^2 = \frac{SS_{\text{ост.}} - SS_{\bar{y}}}{f_2}. \quad (\text{B.8})$$

В последнем выражении  $SS_{\bar{y}}$  (сумма квадратов, использованная при определении дисперсии опыта) была определена ранее (см. табл. В.1,  $\Sigma \Delta y^2 = SS_{\bar{y}} = 202599,2$ ). Остаточная дисперсия (сумма квадратов отклонений расчетных значений опытов от экспериментальных) составила  $SS_{\text{ост.}} = 846890,7$ . Число степеней свободы при определении  $S_{\text{неад.}}^2$  составило:

$$f_2 = N - k^1 - f_1 = 52 - 10 - 9 = 33,$$

где  $k^1$  - число статистически значимых коэффициентов полученной модели (В.6).

Таким образом, дисперсия неадекватности составила:

$$S_{\text{неад.}}^2 = \frac{846890,7 - 202599,2}{33} = 19524.$$

Следовательно:

$$F_{33,9}^{\text{расч.}} = \frac{19524}{2251} = 0,867$$

Табличное значение F-критерия при 5% уровне значимости ( $\alpha = 0,05$ ) составило:

$$F_{0,05;33;9}^{\text{табл.}} = 2,86.$$

Т.к.  $F^{\text{расч.}} < F^{\text{табл.}}$ , то при  $\alpha = 0,05$  гипотеза об адекватности уравнения (В.6) не отвергается.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Г

„УТВЕРЖДАЮ“  
 Главный инженер предприятия  
 от \_\_\_\_\_ 1972 г.



26.04.82.

## ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

\_\_\_\_\_ 197 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия п/я Р-6601: нач. отд. 223-г. Деревлёв К.П., нач. отд. 415-г. Алёхин Э.Г., нач. сек. г. Марченко В.Г., нач. сек. г. Комаров В.А., ст. инж. г. Губанова Т.Ф.; МАТИ им. К.Э. Циолковского: зав. каф. ПЦДЛА составили настоящий акт в том, что мероприятие г. Попов О.В., доц. Волков А.Ф., асп. г. Хоппин П.Н. разработка и внедрение механизированной установки для нанесения твёрдых смазочных покрытий (ТСП)

из плана НИР С-1007/1 и плана улучшения качества (новой техники, оргтехмероприятий, НИР) и внедрено 15 января 1982г. в производство сид. 223  
 (число, месяц, год)

предприятия п/я Р-6601 (цех, НИЛ, НИО)

### Перечень внедренных работ

№ п. п.	Содержание работы	Достигнутая эффективность		Доля участия предприятия (%)
		техническая	годовой экономический эффект (тыс. руб.)	
1	Разработана и изготовлена механизированная установка для нанесения ТСП	Повышены качество и надёжность изделия		50
2	Отработаны режимы механизированного нанесения ТСП и уточнён технологический процесс			
3	Проведены сравнительные испытания на истираемость ТСП, нанесённых при помощи механизированного приспособления, с покрытиями, полученными при нанесении вручную	( без права проведения финансовых расчётов )		
4	Получены положительные результаты			

Руб. \_\_\_\_\_ (сумма прописью)


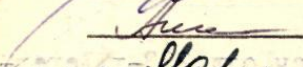
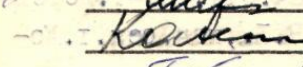
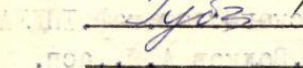
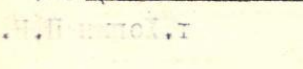
Итого \_\_\_\_\_



Примечание. Расчеты годового экономического эффекта, произведенные в соответствии с отраслевыми методиками ИП-24 от 16.1.70 г. и ДП-10 от 15.1.70 г., утвержденными министерством, прилагаются к данному техническому акту.


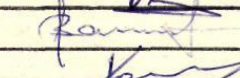
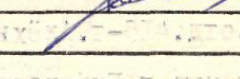
Представители предприятия

ц/я Р-6601:

 /Дерезнев К.П./  
 /Алехин Э.Г./  
 /Марченко В.Т./  
 /Комаров В.А./  
 /Губанова Т.Ф./

Представители предприятия

МАТИ им. К.Э. Циолковского:

 /Попов О.В./  
 /Волков А.Ф./  
 /Копин П.Н./

ВЕРСИЯ 1.0  
1970

1970

1  
2  
3  
4

Технический акт  
на выполнение работ  
по проекту № Р-6601  
от 15.1.70 г.

УТВЕРЖДАЮ  
 Главный инженер предприятия  
 от " 30.03 1972 г.



## ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

197 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия ц/я Р-660I: нач. комплекса  
Г. Максимов В.М., нач.отд. 4I5 г. Алёхин Э.Г., нач.сек. 4I5-3 г. Комаров В.А.

(должность, фамилия, инициалы).

нач. гр. г. Ходаков В.Н., инж. г. Фомин А.А. МАТИ: асп. каф. ИЦЛАТ. Хопин П.Н.

составили настоящий акт в том, что мероприятие внедрение модернизированной  
установки для проведения испытаний на трение и износ "роликовый  
прибор" ( РП )

из плана НОВОЙ ТЕХНИКИ, пункт 01.26.00.230  
 (новой техники, оргтехмероприятий, НИР)

и внедрено 15 марта 1982 г. в производство отд. 4I5  
 (число, месяц, год)

(цех, НИЛ, НИО)

предприятия ц/я Р-660I

### Перечень внедренных работ

№ п. п.	Содержание работы	Достигнутая эффективность		Доля участия предприятия (%)
		техническая	годовой экономический эффект (тыс. руб.)	
1	Разработана методика и изготовлена модернизированная установка для проведения испытаний на трение и износ "роликовый прибор" ( РП )	повышена производительность и снижены грузозатраты при проведении испытаний	25,2	
2	На установке проведены комплексные испытания имитаторов пар трения изделия	дании испытаний агрегатов изделия		

Руб. \_\_\_\_\_  
 (сумма прописью)

Итого \_\_\_\_\_

◆ 115-4



Примечание. Расчеты годового экономического эффекта, произведенные в соответствии с отраслевыми методиками ИП-24 от 16.1.70 г. и ДП-10 от 15.1.70 г., утвержденными министерством, прилагаются к данному техническому акту.

Представители предприятия

Ц/я Р-6601

*В.М. Максимов* /Максимов В.М./  
*Э.Г. Алехин* /Алехин Э.Г./  
*В.А. Комаров* /Комаров В.А./  
*В.Н. Ходаков* /Ходаков В.Н./  
*А.А. Фомин* /Фомин А.А./

Представители предприятия

МАИИ

*П.Н. Хопин* /Хопин П.Н./  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Белорусский

Утверждена приказом ЦСУ СССР от 18.08.76 № 681

автозавод

предприятие, организация

Код по ОКУД

0306003 7

### Акт об использовании предложения

«30» декабря 1986 г.

Регистрационный номер рационализаторского предложения (авторско-го свидетельства) а.с. № I059485

Название предложения

"Способ определения времени приработки"

использовано с «25» декабря 1986 г.

место использования

Центральная заводская лаборатория

в соответствии с описанием рационализаторского предложения или с формулой изобретения.

Руководитель предприятия, организации (начальник цеха)

П.Л. Мариев

подпись и, о., фамилия

Члены комиссии:

Начальник отдела по изобретательству и рационализации (начальник патентного отдела или уполномоченный по изобретательству и рационализации)

Б.И. Розов

подпись и, о., фамилия

\_\_\_\_\_ должность

\_\_\_\_\_ подпись

\_\_\_\_\_ и, о., фамилия

\_\_\_\_\_ должность

\_\_\_\_\_ подпись

\_\_\_\_\_ и, о., фамилия

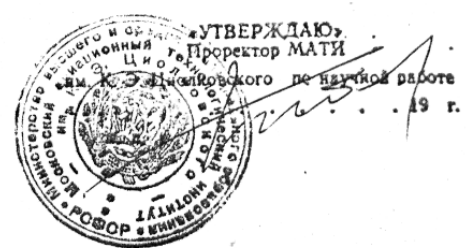
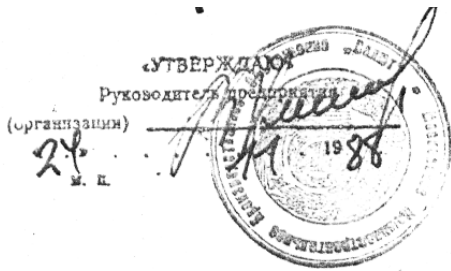
С началом использования предложения ознакомлен(ы)

\_\_\_\_\_ подпись авторов (соавторов)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 19 \_\_\_\_\_ г.

З. 72. Т. 2000.





**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

... НОЯБРЬ . . . 19 г. гор. Москва

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия (организации) ММПО "Салют"

с одной стороны, и Московского авиационного технологического института им. К. Э. Циолковского, с другой стороны, составили настоящий акт в том, что разработанные мероприятия по теме (договору) № 1578 "Технологическое обеспечение работоспособности деталей с использованием гидких автоматизированных систем", выполненная с 01.01.86 по 31.12.87 г.

внедрены на предприятии ММПО "Салют"

**ПЕРЕЧЕНЬ**

внедренных мероприятий, техническая и экономическая эффективность

№/п.	Наименование мероприятий (при наличии изобретения указывается № авторского свидетельства)	Сумма затрат на НИР (тыс. руб.)	Достиженная эффективность	
			техническая (см. примеч.)	Фактический Годовой экономический эффект (т. р.) (доля МАТИ)
1.	Повышение работоспособности деталей ГТД с защитными покрытиями технологическими методами	40	Повышение надежности детали и за-вехрителя	80
2.	Технологическое обеспечение работоспособности пар трения при применении покрытий и методов ППД	40	Повышение долговечности цилиндров, сферических подшипников и осей	80,6
3.	Разработка автоматизированных систем автоматизации токарной обработки на ГПМ и проектирования приспособлений.	40	Сокращение длительности производственного цикла	65,2
	Разработка ремонтных технологий по патрубкам стравливания и крышкам лабиринта		Повышение ресурса за счет восстановления изношенных деталей.	46,2
<b>Итого</b>		<b>120</b>	<b>Итого:</b>	<b>272 тыс.руб.</b>

**ПРИМЕЧАНИЯ:**

1. В графе «Техническая эффективность» указывается:
  - повышение технических и эксплуатационных параметров (ресурсов надежных и, точности, долговечности и др.);
  - уменьшение веса, габаритов, брака;
  - экономия сырья, материалов;
  - увеличение выпуска продукции;
  - новое решение задачи;
  - рост производительности труда (в % %, сокращение числа занятых);
  - улучшение условий труда, техники безопасности и т. д.
2. Расчеты экономической эффективности производятся в соответствии с действующими методиками и инструкциями и прилагаются к данному акту.
3. Экономический эффект от использования результатов исследования рассчитан по полной программе года.

В случае невозможности окончательного определения годового экономического эффекта на день подписания акта необходимо в примечании указать срок, к которому этот эффект будет определен.

4. Предложенный расчет экономического эффекта произведен по методике, утвержденной ГКНТ СССР от 14 февраля 1977 г. № 48/16/13/3.
5. Составление отчетности по ФР-10 ЦСУ для МПО "Салют" не предусмотрено (основание: приказ по отрасли № 387 от 11.09.82 г.)
6. Премия за внедрение результатов НИР включена в фонд экономического стимулирования, который получен МАТИ по окончании работы.

Представители предприятия  
(организации):

Зам. главного инженера  
(должность, фамилия, и. о.)  
Елисеев Ю.С.  
подпись)  
Начальник ЦСО

Штабнов А.В.  
Главный бухгалтер

32. 24.11.88  
наименование  
за № 1  
Великий Новгород

Представители МАТИ им. К. Э. Циолковского:

Начальник НИС  
Харин А.А.  
Зав. кафедрой  
Хворостухин Л.А.  
Руководитель работы  
Хворостухин Л.А.  
Начальник патентного отдела  
Бескина М.Г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ



МОСКОВСКОЕ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ

105118, Москва, пр-кт Буденного, 16

Телефон: 369-80-01  
Факс: 365-40-06

12.04.09 № 66/69В

На № \_\_\_\_\_

### О Т З Ы В

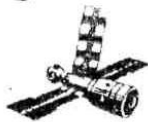
Работа доцента кафедры ТПДИА МАТИ Хопина П.Н. « Выбор оптимальных твердосмазочных покрытий (ТСП) для пар трения и расчет их характеристик» используется в качестве справочного материала при разработке технологических процессов нанесения твердосмазочных покрытий в узлах трения.

Зам. главного металлурга

М.С.Кирюшин

12.04.09

Исп.Юрченко Э.К.  
Тел.369-81-56



Федеральное космическое агентство

Федеральное государственное унитарное предприятие  
"ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР имени М.В. ХРУНИЧЕВА"

КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО "САЛЮТ"

Новозаводская ул., д. 18, г. Москва, 121087, тел. 8-499-749-5030, факс (495) 797-3394,  
e-mail: salut@khrunichev.com, http://www.khrunichev.ru  
ОКПО 17664075, ОГРН 1027739198090, ИНН/КПП 7730052050/773001001

13.06.12. № 622/2012

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Первому проректору  
проректору по научной работе  
«МАТИ-Российского государственного  
технологического университета имени  
К.Э. Циолковского  
(МАТИ)»  
Ставровскому М.Е.

МАТИ
№ 79.06 20.12
Входящ. № 661
КАНЦЕЛЯРИЯ

Рассмотрев материалы по «Методике и оценке работоспособности узлов трения с применением твердосмазочных покрытий, функционирующих в вакууме», разработанных профессором кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» к.т.н. Хопиным П.Н. на базе проведенных исследований совместно с нашим предприятием, сообщаем следующее.

Работа представляет интерес для космической промышленности и, в частности, для нашего предприятия, создающего агрегаты с использованием твердых смазок и предназначенных для работы, в том числе, в условиях вакуума. Предложенная методика позволяет с достаточной достоверностью и приемлемой трудоемкостью проводить оценку работоспособности узлов трения с твердосмазочными покрытиями с помощью разработанных автором зависимостей от ряда определяющих факторов. На основании изложенного КБ «Салют» считает целесообразным использовать предложенную Хопиным П.Н. «Методику...» при разработке агрегатов РКН и КА.

Первый заместитель Генерального  
конструктора ФГУП «КНЦ им.  
М.В. Хруничева, начальник КБ  
«Салют»



*Ю.О. Бахвалов*  
Ю.О. Бахвалов  
09.06.12

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора  
ФГУП «Центральный аэрогидродинамический  
институт имени проф. Н.Е. Жуковского»,  
проф., д.т.н.



И.Е. Ковалев

2012 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что «Методика оценки работоспособности узлов трения с применением твёрдосмазочных покрытий для условий нормальной атмосферы и вакуума», разработанная профессором к.т.н. кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского» Хопиным П.Н., внедрена в качестве оказания технической помощи на предприятии ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» в конструкторской практике для оценки долговечности и теплофрикционных характеристик узлов трения с твёрдосмазочными покрытиями (ТСП).

Настоящий акт не является основанием для возникновения финансовых претензий между ФГУП «ЦАГИ» и ФГБОУ ВПО «МАТИ - РГТУ имени К.Э. Циолковского».

Начальник Научно-производственного комплекса,  
Заслуженный машиностроитель РФ, к.т.н.

Л.Л. Чернышев