

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

Кирищиева Виктория Игоревна

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ
ФТОРОПЛАСТСОДЕРЖАЩИХ ПОДШИПНИКОВ

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
М. А. Мукутадзе

Ростов-на Дону

2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	12
1.1 Полимерные антифрикционные покрытия	12
1.2 Полимерные композиты в жидких смазочных средах	19
1.3 Жидкостное трение металлополимерных подшипников	29
1.4 Цель и задачи исследования	35
Глава 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ	37
2.1 Давление в маслоподдерживающей канавке	39
2.2 Подшипники со стандартной опорной поверхностью	43
2.3 Подшипники с нестандартной опорной поверхностью	58
2.4 Выводы по главе	87
Глава 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	88
3.1 Общая структура исследований	88
3.2 Оборудование и инструменты	93
3.3 Применяемые материалы и образцы	96
3.4 Экспериментальные планы и их статистическая обработка	102
Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	104
4.1 Смазывание фторопластсодержащих покрытий	104
4.2 Режимы работы подшипников	109
4.3 Лабораторные и промышленные испытания	120
4.4 Выводы по главе	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ	152

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

μ – коэффициент динамической вязкости;

p – гидравлическое давление в смазочном слое;

v – скорость вращения;

r_0 – радиус вала;

r_1 – радиус подшипниковой втулки;

L^* – длина подшипника по образующей;

P_{Π} – подъемная сила;

\tilde{h} – высота канавки;

e – эксцентриситет;

ε – относительный эксцентриситет.

p_g – давление на торцах интервала;

$\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр;

θ_1 и θ_2 – соответственно угловые координаты канавки;

$u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ – известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки;

μ_0 – характерная вязкость;

α' , β' – постоянная экспериментальная величина;

T' – температура;

v_{θ_i} , $v_{r_i'}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В современных машинах и агрегатах широко и успешно используются металлополимерные трибосистемы самых различных конструкций. Для тяжело нагруженных узлов трения транспортной и авиакосмической техники применяют антифрикционные композиционные покрытия, содержащие в качестве смазочного материала фторопласт.

Композиционная структура этих покрытий представляет собой полимерную матрицу и армирующий каркас из специальной ткани, включающей как прочные полимерные, так и антифрикционные фторопластовые нити. Матричное связующее дополнительно выполняет функции клея, фиксируя покрытие на поверхности трения.

Рассматриваемые антифрикционные покрытия предназначены для работы в режиме граничного трения при самосмазывании фторопластом и не нуждаются в текущем обслуживании. Они эксплуатируются при средних контактных напряжениях до 100 МПа и скорости 0,2–0,3 м/с. Низкие значения скорости обусловлены теплостойкостью полимеров и механизмом самосмазывания в режиме граничного трения.

В настоящее время, несмотря на достаточно количество теоретических и экспериментальных исследований, посвященных подшипникам скольжения с антифрикционными полимерными покрытиями, требуется дальнейшее расширение области их применения с учетом дополнительных факторов: некруглого опорного профиля подшипника, нестандартного жидкого смазочного материала с микрополярными свойствами, одновременного влияния давления и температуры в зоне трения, а также оптимизации параметров канавки.

Расширить область применения высокоэффективных покрытий можно путем перехода от режима граничного трения к жидкостному. Однако у всех полимерных материалов под контактным давлением развивается вязкоупругая деформация (ползучесть), величина которой зависит от времени нагружения. Неравномерное распределение контактного давления по контуру вала вызывает неравномерную

деформацию покрытия, копирующую его контур. Таким образом, на всей контактной поверхности образуется безззорное сопряжение, препятствующее реализации жидкостного трения.

В настоящее время проблема решена принципиально в виде образования на втулке конкретного радиально-упорного подшипника с покрытием осевых канавок. Необходимо развитие этих единичных исследований для подшипников других типов, требуется оптимизация параметров канавок на опорной поверхности и разработка расчетных моделей подобных подшипников для проектирования. Следовательно, работа в этой области, направленная на дальнейшие исследования, представляется важной и актуальной.

Степень разработанности проблемы. Степень разработанности. Значительный вклад в моделированию подшипников скольжения внесли многие отечественные и зарубежные исследователи: И. Г. Горячева, В. И. Колесников, А. К. Дячков, С. М. Захаров, В. Г. Караваев, Н. В. Коровчинский, В. А. Кохановский, Э. А. Камерова, В. Н. Прокопьев, Ю. В. Рождественский, Л. А. Савин, А. Ю. Албагачиев, И. А. Буяновский, К. С. Ахвердиев, В. М. Приходько, О. И. Рабецкая, В. И. Суркин, И. А. Тодер, Д. И. Федоров, В. К. Румб, И. В. Мухортов, Н. А. Хозенюк, Н. Н. Типей, T. W. Bates, J. F. Booker, P. K. Coenka, B. A. Gecim, S. D. Gulwadi, D. R. Chen, R. S. Paranjpe, H. K. Hirani и многие другие. Существующие сегодня методики расчета металлополимерных подшипников скольжения, реализованные в ряде инженерных программных комплексов, позволяют оценивать их основные гидродинамические характеристики и работоспособность с учетом влияния отдельных особенностей.

В настоящее время, несмотря на достаточное количество теоретических и экспериментальных исследований, посвященных подшипникам скольжения с антифрикционными полимерными покрытиями, требуется дальнейшее расширение области их применения с учетом дополнительных факторов подшипников скольжения и методологии прогнозирования их ресурса в условиях гидродинамического и граничного режима смазывания.

Маслосберегающими канавками исследователи занимаются как в нашей стране, так и за рубежом. Однако впервые антифрикционное полимерное покрытие

с канавкой на поверхности подшипниковой втулки для смены режима смазывания, а также для предотвращения износа при пусках, выбегах и аварийного недостатка смазочного материала было применено в исследованиях К. С. Ахвердиева, Э. А. Камеровой, В. А. Кохановского, В. М. Приходько с обоснованием возможной эффективности подобной конструкции.

Системные исследования в этом направлении полностью отсутствуют.

Целью настоящего исследования является повышение ресурса металлополимерных фторопластсодержащих радиальных подшипников скольжения на основе экспериментальных исследований и разработки комплекса математических моделей.

Поставленная цель требует решения следующих основных задач:

1 Разработать комплекс математических моделей и аналитических зависимостей для расчетной оценки технических решений и конструкций радиальных подшипников скольжения, имеющих на опорной поверхности полимерное фторопластсодержащее покрытие с осевой канавкой и адаптированным к условиям трения профилем с учетом ньютоновской и неньютоновской реологии смазочного материала в условиях ламинарного течения.

2 Установить закономерности влияния смазочного материала на работоспособность радиального подшипника с фторопластсодержащим полимерным покрытием и канавкой на опорной поверхности с учетом зависимости вязкости от давления и температуры и турбулентного характера его течения.

3 Доказать стабильность и возможность смены видов смазывания с граничного на гидродинамический в радиальном подшипнике с фторопластсодержащим покрытием и канавкой на опорной поверхности.

4 Выполнить экспериментальную оценку теоретических положений и промышленную апробацию разработанной конструкции радиального подшипника, установить области применения полученных расчетных моделей.

Объектом исследования являются процессы, происходящие в системе «вал – смазочный слой – подшипник» при гидродинамическом и граничном режимах смазывания.

Предмет исследования – взаимосвязи и закономерности изменения элементов и параметров в системе «вал – смазочный слой – подшипник» при гидродинамическом и граничном режимах смазывания радиальных подшипников скольжения с фторопластсодержащим покрытием.

Научная новизна результатов исследования включает следующее:

1 Впервые сформирован комплекс расчетных моделей, позволяющих рассчитать режим гидродинамического смазывания радиальных подшипников скольжения с полимерными фторопластсодержащими покрытиями, имеющими осевую канавку для автоматической смены режимов смазывания с граничного на гидродинамический.

2 На основе проведенных аналитических исследований установлено влияние геометрических параметров канавки (ширины и глубины) на величину вертикальной составляющей гидродинамического давления в ней, а также выполнена оптимизация ее ширины относительно диаметра подшипника по двум критериям – коэффициенту трения и температуре контакта.

3 Предложены расчетные модели металлополимерных подшипников скольжения с осевой канавкой, работающих на вязком и микрополярном жидких смазочных материалах при их ламинарном течении и зависимости вязкости от давления.

4 Получены расчетные модели радиальных подшипников скольжения, имеющих фторопластсодержащее композиционное покрытие с канавкой на опорной поверхности и нестандартный контур, адаптированный к условиям трения, при этом учтены зависимости реологических свойств истинно вязкого или микрополярного смазочного материала от давления при ламинарном режиме течения.

5 Определена зависимость вязкости смазочного материала одновременно от давления и температуры при турбулентном режиме течения истинно вязкой среды и показано ее влияние на несущую способность и силу трения радиальных подшипников скольжения, имеющих на опорной поверхности

фторопластсодержащее антифрикционное композиционное полимерное покрытие с канавкой.

Теоретическая и практическая значимость работы

Значимость теоретических исследований включает следующее:

1 Предложен новый подход к оценке влияния параметров осевой канавки на вертикальную составляющую гидродинамического давления и другие эксплуатационные параметры в радиальном подшипнике с композиционным фторопластсодержащим покрытием в условиях применения смазочных материалов с истинно вязкими и микрополярными реологическими характеристиками.

2 Получены расчетные модели радиальных подшипников скольжения с полимерным антифрикционным покрытием и осевыми канавками на опорной поверхности втулки с некруглым опорным профилем, адаптированным к условиям трения в условиях применения вязкого или микрополярного жидкого смазочного материала.

3 Для исследуемых условий трения с применением истинно вязкого смазочного материала получены расчетные модели, учитывающие, кроме осевых канавок, одновременное влияние на смазочный материал давления и температуры при турбулентном режиме его течения.

4 Существенное прикладное значение имеют результаты впервые выполненной оптимизации размерных параметров осевой масляной канавки в соответствии с минимизацией таких эксплуатационных факторов, как температура и коэффициент трения.

5 Значимость разработанных расчетных моделей исследуемых радиальных подшипников для инженерной практики определяется экспериментальным подтверждением эффективности теоретических расчетов и удовлетворительной оценкой результатов промышленных испытаний на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе (филиале АО «Желдорремаш»). Выполнена оптимизация ширины осевой канавки на опорной поверхности подшипниковой втулки на основе величины вертикальной составляющей гидродинамического давления и коэффициента трения.

Методы диссертационного исследования теоретического плана основаны на классических уравнениях Навье – Стокса и Рейнольдса, применяемых для ламинарного и турбулентного течения жидких смазочных материалов с истинно вязкими и микрополярными реологическими свойствами.

Выполнение экспериментальных исследований осуществлялось на современном модернизированном и поверенном оборудовании в соответствии с полнофакторными экспериментальными планами и завершалось статистической обработкой результатов и их визуализацией на графиках.

Положения, выносимые на защиту, включают:

1 Комплекс уточненных теоретических моделей радиальных металлополимерных подшипников скольжения с профилем, имеющим на опорной поверхности фторопластсодержащее композиционное полимерное покрытие с оптимальной величиной осевой канавки, обеспечивающей возможность перехода от граничного к гидродинамическому режиму смазывания под влиянием изменения нагрузочно-скоростных режимов.

2 Сформированный блок моделей фторопластсодержащих радиальных подшипников с осевой канавкой на рабочей поверхности полимерного антифрикционного покрытия подшипниковой втулки, эксплуатируемых при граничном или жидкостном режиме смазывания с учетом реологии истинно вязкого или микрополярного смазочного материала и зависимости их вязкостных свойств от давления.

3 Расчетные модели для проектирования конструкций радиальных подшипников с композиционным полимерным покрытием, осевой канавкой и некруговым контуром опорной поверхности, адаптированным к условиям трения при ламинарном режиме течения вязкого или микрополярного смазочного материала.

4 Одновременный учет в расчетной модели металлополимерного радиального подшипника скольжения, работающего на истинно вязком жидком смазочном материале, влияния на его вязкость давления и температуры при

переходе с граничного на жидкостный режим смазывания в условиях турбулентного характера течения.

5 Регрессионные модели, определяющие зависимость коэффициента трения от величины нагрузочно-скоростных режимов при смазывании радиального подшипника вязким или микрополярным смазочным материалом.

Степень достоверности результатов исследований обеспечивалась корректной постановкой их цели и обоснованной методикой ее достижения. Теоретические исследования выполнялись на базе классических законов течения жидкости. Выполнение экспериментальных исследований осуществлялось на современном высокоточном поверенном оборудовании, на основе двухуровневых полнофакторных планов при числе параллельных опытов, равном 3. После статистической обработки результатов получены адекватные регрессионные модели.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация выполнялась в соответствии с научной специальностью 2.5.3. Трение и износ в машинах в следующих областях исследований:

- пункт 4 «Смазочное действие: «гидро- и газодинамическая смазка...»;
- пункт 7 «Триботехнические свойства материалов, покрытий...»;
- пункт 8 «Триботехнические свойства смазочных материалов»;
- пункт 10 «Физическое и математическое моделирование...».

Следовательно, данная работа полностью соответствует паспорту заявленной специальности.

Апробация и реализация результатов исследований осуществлялась в виде выступлений на девяти всероссийских и международных конференциях и международных университетских форумах: V–VI Всероссийских научно-практических конференциях «Научный потенциал молодежи и технический прогресс» (Санкт-Петербург, 20 мая 2022 г., 19 мая 2023 г.); VI Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные основы механики» (Санкт-Петербург, 17 июня 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Вопросы образования и науки» (Тамбов, 30 октября 2021 г.), XV научно-

практической конференции «Наука и образование транспорту» (Самара, 10 ноября 2022 г.); Международном университетском форуме «Практико-ориентированная наука» (Дубай, ОАЭ, 6 мая 2022 г., 17 июня 2022 г.); Международной научной конференции «Science. Education. Practice» (Дели, Индия, 5 мая 2023 г.).

Реализация результатов работы. Промышленные испытания разработанных подшипников, проведенные на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе (филиал АО «Желдорремаш») на пружинно-вальценовивочном станке, показали, что ресурс работы узла увеличился на 12,3–15,1 %, и оцениваются удовлетворительно.

Публикации. По итогам диссертационных исследований опубликовано 30 работ, включая 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 статьи в изданиях, входящих в базу данных Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 194 наименований и приложения. Общий объем работы включает 151 страницу, 43 рисунка и 11 таблиц.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Все процессы, сопровождающие трение и изнашивание трибосистем, в том числе и металлополимерных, сосредоточены в зоне фрикционного контакта, т. е. в поверхностных слоях контактирующих тел. Учитывая это обстоятельство, особенности вязкоупругого поведения полимеров и более низкую их прочность по сравнению с большинством традиционных металлических материалов, рассматриваемые полимерные антифрикционные композиты исследуем как покрытия рабочих поверхностей деталей узлов трения.

1.1 Полимерные антифрикционные покрытия

В настоящее время для тяжело нагруженных относительно низкоскоростных трибосистем широко применяются антифрикционные полимерные композиционные покрытия, обеспечивающие работу металлополимерных трибосистем в режиме граничного трения [1, 2, 3, 73, 82, 95, 97, 105]. Использование этих материалов при высоких значениях контактного давления объясняется их низкой более чем на порядок жесткостью (мгновенный и равновесный модули) в сравнении с металлами. Деформируясь от контактного давления на подшипник, полимерный композит увеличивает фактическую площадь рабочего контакта, что резко снижает реальные нормальные напряжения [4, 5, 6, 97] и увеличивает его несущую способность. Относительно низкие скорости металлополимерных трибосистем ограничиваются термостойкостью полимерных материалов [7, 8, 9].

К достоинствам рассматриваемых антифрикционных композиционных покрытий, обеспечивающих их широкое применение, относятся следующие:

- несущая способность подшипников до 250 МПа в статике и 100 МПа при движении [3, 10, 98];
- рабочая термостойкость: длительная до 250 °С и кратковременная до 300 °С [9, 12, 13];
- демпфирование колебаний, возникающих при работе узла трения [14];

– самосмазывание, т. е. полное отсутствие в необходимости смазывания и обслуживания на протяжении ресурса [11];

– упрощение конструкций узлов трения, их облегчение и экономичность при значительном ресурсе.

Высокие эксплуатационные характеристики композиционных полимерных покрытий обеспечили их применение в авиакосмической технике как за рубежом, так и в нашей стране. Они используются в узлах трения вертолетов ОКБ М. Л. Миля и Н. И. Камова, а также многоразовом космическом корабле «Буран» [14]. В различных механизмах и системах самолета «Боинг 747» задействованы почти 1000 подобных подшипников [15].

Композиционные полимерные материалы широко используются в различных транспортных машинах [17, 106], особенно в автомобильной промышленности (шаровые опоры, поворотные шкворни, шарниры рулевых тяг) [14, 16], узлы трения автомобилей БелАЗ [14], направляющие металлорежущего и кузнечно-прессового оборудования [28]. Кроме того, самосмазывающиеся композиты используют там, где неприменимы смазочные материалы, – в текстильной и пищевой промышленности [18]. Наиболее широкое применение антифрикционные композиты нашли в виде покрытий на массовой продукции – подшипниках, включая шарнирные [21, 75, 107] (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Сферические подшипники (серия ШЛТ)

В нашей стране их серийно выпускает ОАО «Саратовский подшипниковый завод» (ГПЗ № 3). За рубежом имеется большое число фирм, работающих с подобными материалами, например HUNGER, LEAR SIEGLER, INA ELGES, ADR и много других [12, 16, 22, 23].

Функциональным антифрикционным компонентом композита является политетрафторэтилен (ПТФЭ), или фторопласт 4. Это наиболее инертный «скользящий» из всех известных полимеров [26, 27, 87, 103], так как практически не имеет адгезии как к конструкционным материалам, так и к техническим средам. Это свойство фторопласта, являясь основным его преимуществом как антифрикционного материала, одновременно составляет его недостаток как компонента композита, поскольку не позволяет зафиксировать его адгезионные связи с матричным связующим [29, 30, 31]. Кроме того, фторопласт обладает значительной хладотекучестью (ползучестью), вызываемой его вязкоупругими свойствами, при недостаточной ориентации в блоке макромолекул [26, 32, 33, 34, 35]. Следует отметить и низкую прочность фторопласта в сравнении с требуемой для работы в подшипнике при высоких значениях контактного давления [37].

Для уменьшения деформации ползучести и увеличения прочности фторопласта его используют в композите в виде нитей, скрученных из волокон. Фторопластовые нити выпускаются под торговой маркой «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81). Благодаря высокой ориентации макромолекул полимера вдоль волокон их прочность значительно повышается, а ползучесть снижается [38].

Общую прочность композита дополнительно повышают, вводя в него функциональный прочностной компонент – нити из полиимидного полимера «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80), которые обладают необходимой прочностью и высокими адгезионными свойствами [38, 99]. Из фторопластовых и полиимидных нитей ткнут специальные полуторослойные технические ткани, которые используются как армирующий и функциональный каркас композита [39]. У ткани с ткацким переплетением типа неправильный атлас основа и верхний уток фторопластовые, а нижний уток из полиимида. У ткани типа саржа 1/3 на рабочей

лицевой поверхности имеются полиимидные нити основы и утокобразующая сетка с шагом ≈ 5 мм (рисунок 1.2).

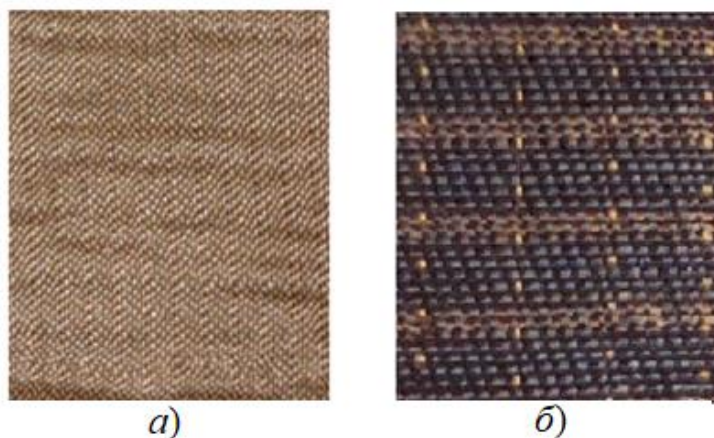


Рисунок 1.2 – Тканые каркасы композита:

a) шестиремизный неправильный атлас; *б)* полутораслойная саржа 1/3

Матричное связующее композиционного материала влияет практически на все характеристики его эксплуатационных параметров. Оно снижает влияние ткацких дефектов каркаса, увеличивает реальную прочность волокон, защищает каркас от влияния окружающей среды, перераспределяет напряжения между отдельными нитями каркаса и является адгезивом, закрепляющим покрытие на субстрате [40, 25].

С учетом термостойкости компонентов каркаса композита (температура плавления кристаллитов фторопласта – $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27, 42]; термостойкость волокон арамида Т – $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [41, 42]) разработано фенольное [104] связующее АФК-101 (ГИПК-114 по ТУ 6-05-251-65-77) с рабочей температурой $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кратковременной до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Компоненты композита имеют близкую термостойкость.

Таким образом, рассматриваемое композиционное покрытие состоит из трех типов полимеров разного химического состава и структуры [24]. Следовательно, композит следует относить к гибриднему типу [25, 74, 85].

Матрица антифрикционного композита одновременно является и связующим для фиксации покрытия на опорной поверхности втулки подшипника.

Матричное связующее представляет собой раствор в смеси ацетона и этилацетата (при соотношении 1:1) твердой фенолоформальдегидной смолы СФ 3021К (ГОСТ 18694-80), модифицированной термостойким каучуком ГЭН-150В (ОСТ 6-05-5101-78), и стабилизатора ортооксихинолина. Режимами отверждения композита являются следующие: давление 2–5 МПа, температура 200 °С и время выдержки в этих условиях 3 ч. Для наиболее технологичного нанесения покрытия используется препрег – армирующая ткань, пропитанная связующим и высушенная от растворителей, но не отвержденная.

Рассматриваемые антифрикционные покрытия успешно применяются в тяжело нагруженных трибосистемах в широком диапазоне нагрузочных и более узком – скоростных режимов (рисунок 1.3) [43].

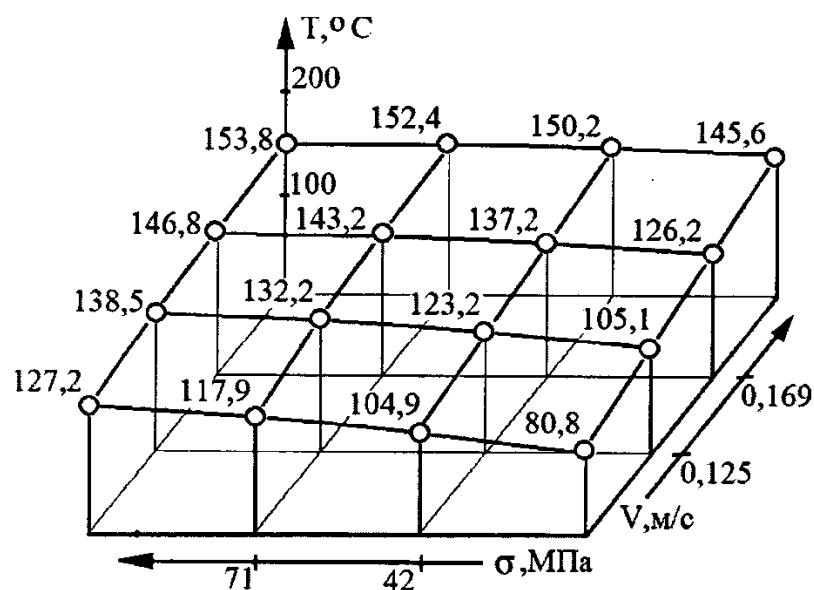


Рисунок 1.3 – Влияние режимов эксплуатации на коэффициент трения

Из литературных источников [44, 45, 83] известно, что процесс смазывания металла фторопластом обеспечивается его структурой, состоящей из кристаллических микроэлементов размером 10–40 нм. Кристаллические структуры разделены аморфными слоями толщиной до 1 нм. В процессе трения ориентированные частицы фторопласта проскальзывают по аморфным слоям [2, 46] и переносятся на металлическое контртело. По классификации В. А. Белого, в

парах «фторопласт – металл» происходит в основном адгезионный тип изнашивания, основу которого составляет фрикционный перенос [2, 47].

Последовательность процессов на контактной поверхности фторопластсодержащих покрытий выглядит следующим образом:

1 Удаление с рабочей поверхности покрытия следов связующего с последующим выносом частиц из трибоконтакта или обволакиванием фторопластом [45]. Далее происходит адгезионный перенос фторопласта на металлическое контртело [48].

2 Аморфизация деформированного ПТФЭ (снижение процента кристалличности) и уменьшение фактических напряжений, вызванное ростом контактной площади [2, 49].

3 Образование в направлении скольжения текстурирования фторопласта и дефектов в виде межфибрильных микротрещин, а также вытягивание и отделение чешуек износа [2, 50].

4 Когезионное разрушение фторопласта, формирование и отделение чешуек износа при частичном их переносе на контртело [51, 84].

5 Образование на металлическом контртеле фрагментальной пленки вследствие слабой адгезии фторопласта, удаляемой из трибоконтакта при ее критической толщине. Продукты деструкции и износа фторопласта представляют собой смазочный материал, обеспечивающий граничное трение [2, 48, 49].

Следовательно, процесс фторопластового смазывания выполняется при разрушении межмолекулярных связей, а его изнашивания – при разрушении молекулярных.

В результате термомеханической и окислительной деструкции фторопласта в нем возникают активные макрорадикалы [2], которые рекомбинируют и частично реагируют с металлической поверхностью, активированной трением [2, 34].

Деструкция фторопласта играет двоякую роль: макрорадикалы способствуют закреплению пленки переноса на металлическом контртеле, а низкомолекулярные фрагменты затрудняют этот процесс [2]. Следует отметить, что при переносе на

металл более устойчивой пленки матричного фенольного связующего поверх нее образуется тонкая пленка фторопласта.

Все полимерные материалы обладают вязкоупругими свойствами, которые проявляются при эксплуатационном нагружении подшипников в виде увеличивающейся во времени деформации ползучести. Необходимо отметить, что ползучесть композита, делая покрытие тоньше, увеличивает зазор трибосопряжения совместно с изнашиванием. Однако, уменьшая толщину покрытия, деформация не вызывает уменьшение объема фторопласта, т. е. смазочного материала, в покрытии, а следовательно, не влияет на ресурс трибосистемы.

Величина несущей способности подшипников с антифрикционными покрытиями из полимерных материалов лимитируется не разрушением покрытия, как в металлических парах, а кинетическим переходом полимера в высокоэластичностичное состояние (подобия резины) [52] (рисунок 1.4).

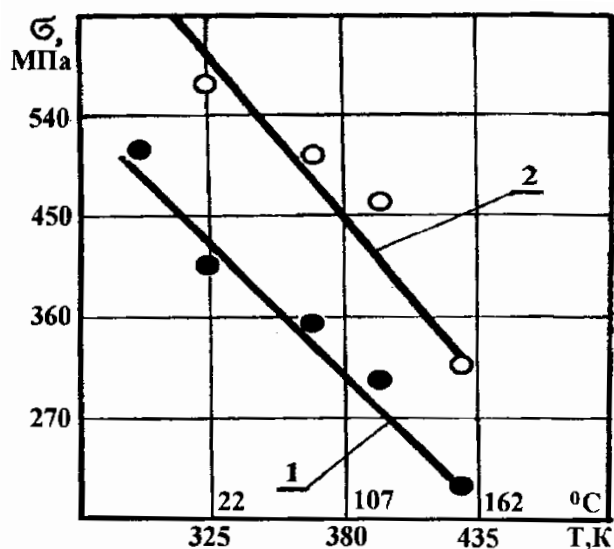


Рисунок 1.4 – Общее воздействие напряжений и температуры на кинетический переход матричного связующего в состояние вынужденной эластичности (1) и разрушение (2)

Этот переход наступает при относительно высокой температуре. Однако в условиях значительного силового нагружения температура перехода значительно

снижается и наступает вынужденная высокоэластичность. При этом изменяется характер всего процесса трения, резко падает несущая способность и износостойкость трибосистемы.

Термосиловые условия этого кинетического перехода описываются выражением

$$\sigma_{\text{вв}} = 1137,4 - 217,16T, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{\text{вв}}$ – предел вынужденной высокоэластичности, МПа;

T – температура полимерного покрытия, К.

Зависимость (1.1) объединяет в единый блок суммарное действие параметров, определяющих состояние вынужденной высокоэластичности. При этом резко падают прочностные параметры композита.

Следует отметить, что разность температур между состоянием вынужденной эластичности и разрушением полимерного покрытия с ростом температуры снижается. В исследованной температурно-силовой области нагружения эта величина равна примерно 50–30 °С. Данное обстоятельство позволяет заключить, что до момента отказа металлополимерного подшипника из-за разрушения существует некоторый промежуток времени, позволяющий предотвратить аварийный отказ.

Таким образом, исследуемые антифрикционные полимерные композиционные покрытия устойчиво работают в металлополимерных трибосистемах в режиме граничного трения при смазывании фторопластом. Однако эксплуатация этих материалов может осуществляться только в довольно узком скоростном диапазоне, что связано с уровнем их термостойкости. Расширить область их рационального применения можно путем перехода к жидкостному трению, устраняющему прямое контактирование «металл – полимер» и обеспечивающее охлаждение жидким смазочным материалом.

1.2 Полимерные композиты в жидких смазочных средах

Специфика поведения полимерных материалов в различных жидких средах исследована довольно широко [53, 54, 55, 56, 57]. Нетипичным для обычных

полимеров являются фторопластсодержащие композиты, которые не имеют адгезии к компонентам композита. Поэтому в области контакта «фторопластовые волокна ткани – фенольная матрица» образуются микроканалы и поры, позволяющие жидкости проникать в толщу композита. Кроме того, наличие кислотного числа в смазочных материалах (у МС-20 – 0,03, а у Тп22-С – 0,6) [109] может снизить адгезионную прочность из-за подслоной коррозии.

Механизм набухания рассматриваемых покрытий заключается в следующем [58]:

- капиллярное проникновение жидкости в поры композита на стыке «волокно ПТФЭ – фенольная матрица»;
- накопление и агрегирование жидкости в порах;
- диффузия жидкости в матричное связующее.

Следует отметить, что повышение температуры в процессе трения, снижая вязкость смазочных масел, способствует их капиллярному проникновению в поры и агрегированию. Тепло повышает скорость диффузионных процессов и снижает физико-механические свойства полимеров. Кроме того, присутствие в товарных маслах щелочи может вызвать подслоную коррозию и значительно снизить адгезионную прочность покрытий.

Типичная картина набухания (привеса) рассматриваемого фторопластсодержащего полимерного материала покрытия в жидких смазочных средах представлена на рисунке 1.5 [58].

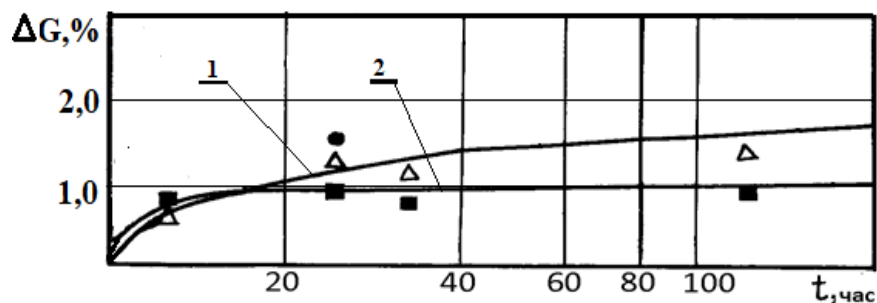


Рисунок 1.5 – Увеличение массы покрытия в маслах:

1 – МС-20; 2 – БЗ-В

Отмечено, что увеличение массы покрытия в связи с набуханием не приводит к увеличению его размеров и, как следствие этого, к заклиниванию вала.

Поскольку работоспособность композиционных покрытий в первую очередь определяется прочностью их фиксации на субстрате, рассмотрим данные о влиянии на этот параметр жидких смазочных материалов, изложенные в работе [59]. Здесь приведен вклад каждого фактора в снижение адгезионной прочности покрытий $K = (\sigma_{\text{возд.}} - \sigma_{\text{жид.}}) / \sigma_{\text{возд.}}$ в процентах.

Таблица 1.1 – Средние потери адгезионной прочности покрытий в зависимости от исследуемых факторов

№ п/п	Параметр	Диапазон изменений	Снижение адгезии, %
1	Субстрат	Сталь ... Латунь	4,0
2	Масло	МС-20 ... Тп22-С	4,4
3	Температура, °С	23 ... 60	11,6
4	Экспозиция, ч	24 ... 240	16,9

Адгезионная прочность исследуемого покрытия наиболее сильно зависит от температуры и времени выдержки в жидком смазочном материале. Потеря прочности адгезионного шва покрытия от этих параметров имеет большое значение [59, 100] (рисунок 1.6).

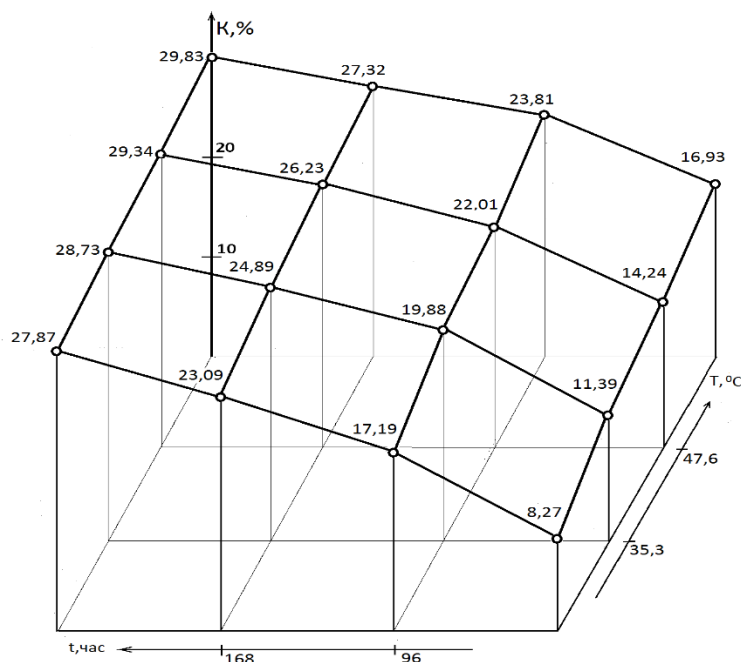


Рисунок 1.6 – Влияние на потери адгезионной прочности покрытия температуры и экспозиции в жидком смазочном материале

К сожалению, температурный диапазон, исследованный в работе [59], гораздо уже допустимого для фторопластсодержащих покрытий и требует расширения исследований.

Потеря адгезионной прочности покрытий достигает 30 % за 10-суточную экспозицию в жидкой среде. Это величина не является критической для работоспособности покрытия, но требует разработки мер, ограничивающих ее дальнейший рост. Предлагаемый авторами [67] радиально-упорный подшипник защищает поверхность покрытия только при вертикальном расположении вала.

Полимерные покрытия обладают вязкоупругими свойствами [86], которые, в результате проникновения в поры жидких сред, также претерпевают изменения. В этом случае параллельно протекают два процесса [60, 61]: деградация и разрушение композита в связи с ростом локальных напряжений вокруг абсорбированного жидкого агрегата и абсорбционное повышение жесткости покрытия [102].

Первый процесс протекает при относительно высоких значениях контактного давления ($> 12,5$ МПа), которые выжимают из пор покрытия абсорбированный смазочный материал, второй – при низких. В первом случае жесткость покрытий (E_0) падает до 10,8 %, а во втором – возрастает на 10,4 % в связи с несжимаемостью жидкости в порах. Это показывает, что при применении покрытий в режиме гидродинамического смазывания необходимо учитывать как повышение, так и снижение жесткости.

В работе [61] приводятся полученные экспериментально модели для расчета жесткости покрытий (мгновенного модуля) в среде масел с разной вязкостью и одна обобщенная модель (таблица 1.2). Модели имеют общую структуру

$$E_0 = at^b \sigma^{c-d \lg t},$$

где σ – напряжения;

t – время экспозиции;

a, b, c, d – параметры модели.

Таблица 1.2 – Параметры моделей жесткости

Каркас покрытия	Среда	Параметры моделей жесткости				Погрешность, %	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	Максим.	Средняя
1	2	3	4	5	6	7	8
Атлас	Тп22-С	7,349	0,145	1,0169	0,145	5	±1,5
	МС-20	8,628	0,199	1,0486	0,229		
	Общая	7,988	0,172	1,0327	0,187	13,5	±8,3

Проведенный анализ моделей показывает, что в исследованном факторном диапазоне жесткость покрытия в наибольшей степени зависит от контактных напряжений как самостоятельно, так и совместно со временем экспозиции (значимость коэффициента *d*).

Для расчета деформации ползучести вязкоупругие свойства полимерных композитов описываются выражением «типичного твердого тела» [4]

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E_\infty} - \frac{\sigma}{E_0} \right) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1.2)$$

где σ – контактные напряжения, МПа;

E_0 и E_∞ – мгновенный и равновесный модули, МПа;

t – время, мин;

τ – постоянная времени ползучести, мин.

Результаты экспериментального определения параметров выражения (1.2) для композиционного покрытия на основе атласной ткани в жидких смазочных материалах разной вязкости и воздушной среде сведены в таблицу 1.3 [61].

Сравнение влияния вязкости смазочного материала показало, что масло марки Тп22-С (100сСт) при 5 МПа уменьшает деформацию композита на 24 %, а при 70 МПа повышает ее на 11,1 %. Авиационное масло МС-20 (1244сСт), с меньшей вязкостью влияет на деформацию в меньшей степени. Таким образом, вязкость смазочного материала существенно влияет на его абсорбцию.

Аналогичное установление влияния на свойства покрытий контактного давления показывает, что при 5 МПа жесткость в среднем равна 25,4 %, а ее деструктивное влияние при 70 МПа после отжатия масла достигает 33,1 %.

Таблица 1.3 – Параметры моделей ползучести

Каркас композита	Среда	Экспозиция, ч	Контактное давление, МПа	Параметры модели ползучести			Макс. деформация ε
				E_0 , МПа	E_∞ , МПа	τ , мин	
Двух- точный шестире- мизный полуто- раслой- ный атлас	Турбин- ное масло Тп22-С	24	5	43,40	38,77	10,10	0,131
			70	374,48	344,81	6,84	0,218
		240	5	48,01	44,27	6,11	0,114
			70	282,47	251,31	5,57	0,280
	Авиаци- онное масло МС-20	24	5	52,87	48,09	9,40	0,098
			70	366,00	329,91	10,10	0,187
		240	5	57,89	52,58	9,60	0,095
			70	219,24	210,22	7,16	0,219
	Воздух	—	5	39,30	35,70	12,5	0,139
			70	420,10	394,6	8,10	0,178

Известно [63, 64. 65], что нагружение на вал в подшипнике скольжения распределяется по дуге контакта неравномерно (рисунок 1.7), хотя в стандартных расчетах используется среднее давление на проекцию вала.

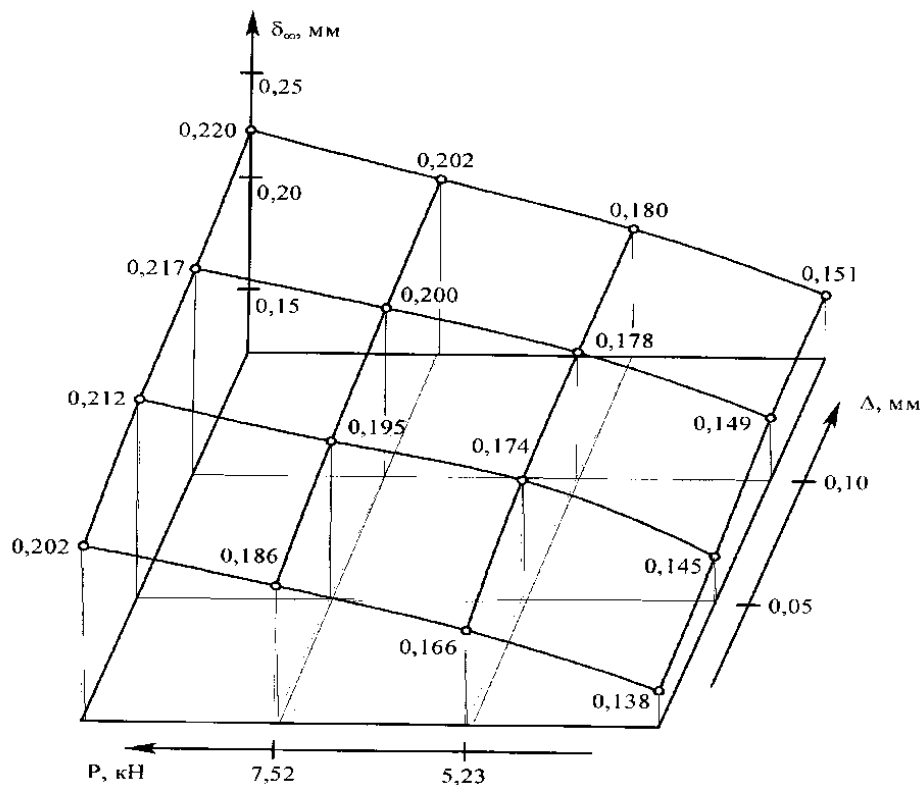


Рисунок 1.7 – Зависимость перемещения диаметрального сечения вала

от контактного давления и зазора в подшипнике

Необходимо отметить, что уменьшение жесткости покрытий, увеличивая вязкоупругую деформацию, не влияет на объем фторопласта т. е. на антифрикционные свойства и ресурс покрытия в режиме граничного трения.

Полимерное покрытие в подшипниковой втулке деформируется вдавливаемым в него валом. В работе [63] экспериментально определена величина перемещения вала при его вдавливании в антифрикционное фторопластсодержащее покрытие в диаметральном сечении подшипника. Эта деформация полностью изменяет форму металлополимерного контакта.

Рост зазора уменьшает контактную зону и увеличивает контактное давление и перемещение вала. Однако сопряжение «вал – втулка» выполняется по переходным посадкам, и влиянием зазора, равным примерно 0,005 мм, можно пренебречь.

В работе [66], благодаря близким теплофизическим свойствам применяемых жидких смазочных материалов, получена обобщенная зависимость температуры зоны трения рассматриваемого покрытия в жидкой смазочной среде (рисунок 1.8).

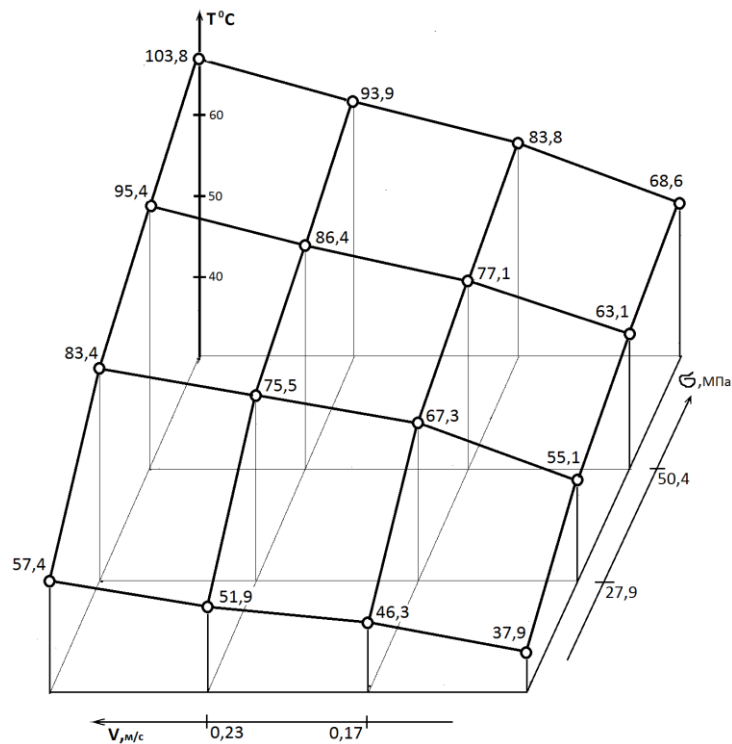


Рисунок 1.8 – Влияние нагрузочно-скоростных режимов на температуру в среде жидкого смазочного материала

Несмотря на то, что трибоиспытания проводились полностью в ванне со смазочной средой, температура снизилась всего на $\approx 16\%$, а коэффициент трения соответствовал граничному типу смазывания фторопластом.

Классической характеристикой уровня работы трибосистемы считается коэффициент трения. Зависимость последнего от режимов нагружения, особенно в условиях нивелирования температуры изменением режимов смазывания, достаточно сложная.

Напряжения уменьшают коэффициент трения: во-первых, в связи с отжатием абсорбированного масла, а во-вторых, из-за деструкции деформируемой контактной поверхности покрытия с низким модулем. Сохранение фторопластом смазочных свойств и режима граничного трения в смазочной среде подтверждается величиной коэффициента трения (рисунок 1.9).

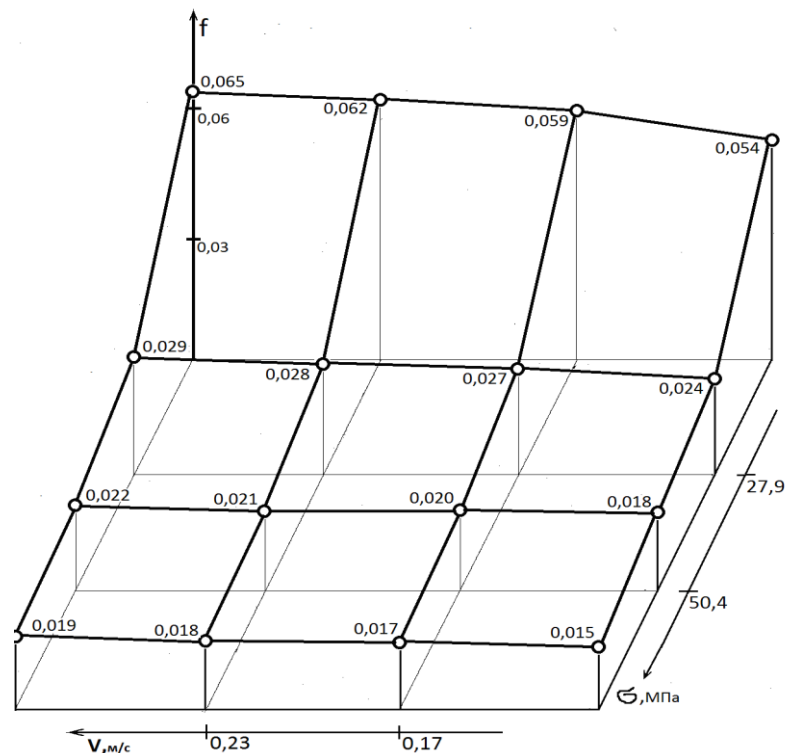


Рисунок 1.9 – Зависимость среднего коэффициента трения (в МС-20 и Тп22-с) от нагрузочно-скоростных режимов

Относительно малые значения контактного давления увеличивают жесткость композита, уменьшают его деформацию, что ограничивает рост контактной поверхности, и затрудняют перенос фторопласта на контртело, т. е. процесс смазывания. Нужно также отметить общее снижение температуры из-за охлаждения зоны трения смазочным материалом и возможного смывания переносимой пленки фторопласта. Это отражается на величине коэффициента трения, резко падающего с ростом контактного давления, что характерно для фторопласта.

Значения контактного давления выше критических, выжимая жидкий смазочный материал из пор композита, способствуют росту площади контакта и увеличивают эффективность смазывания фторопластом, что снижает коэффициент трения.

Важным показателем износостойкости трибосопряжения является зависимость интенсивности изнашивания от нагрузочно-скоростных режимов, приведенная в работе [58] (рисунок 1.10).

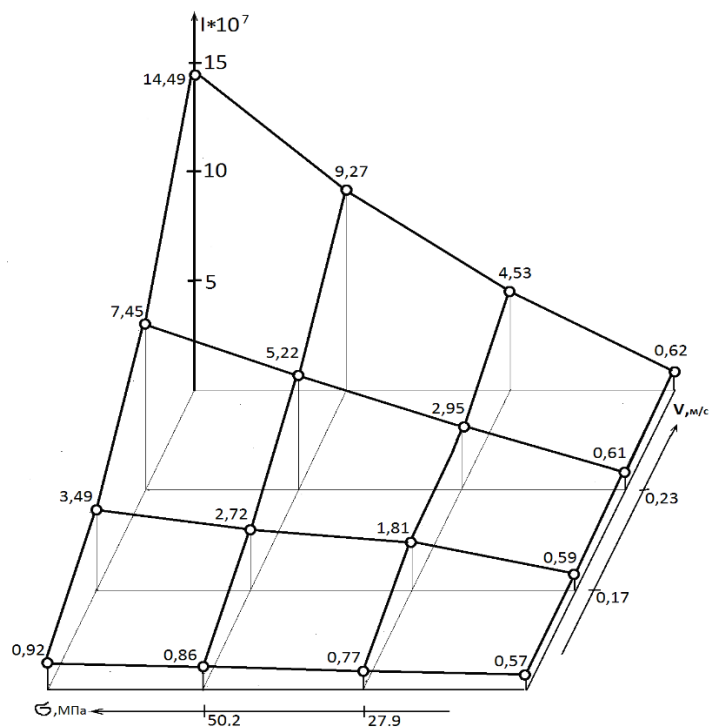


Рисунок 1.10 – Зависимость интенсивности изнашивания полимерного покрытия от режимов нагружения

Наличие определенной деградации покрытия в минеральном масле подтверждает график интенсивности изнашивания [101].

Это определяется процессом деструкции фенольно-каучукового матричного материала, отвечающего за целостность композита, перераспределение напряжений и защиту полиимидных волокон от влияния среды. Количество фторопласта как смазочного материала не уменьшается.

Несмотря на сохранение количества фторопласта в покрытии, деградирующее влияние жидкости на композит значительно снижает его ресурс (таблица 1.4) [58, 62] при значениях контактного давления меньше критических. Значения контактного давления выше критических, наоборот, могут увеличивать ресурс, обеспечивая дополнительное охлаждение композита при высоких значениях скорости.

Таблица 1.4 – Ресурс фторопластсодержащих покрытий в разных средах
($R \cdot 10^{-4}$ циклов)

Окружающая среда	Нагрузочно-скоростные режимы	
	$\sigma = 5,6$ МПа, $V = 0,1$ м/с	$\sigma = 72$ МПа, $V = 0,3$ м/с
Турбинное масло Тп22-С	20,05	3,45
Авиационное масло МС-20	21,97	0,75
Воздух	50,80	0,31

К сожалению, в работе [62] отсутствуют данные о длительности экспозиции рассматриваемых покрытий в жидких смазочных средах.

Следует отметить, что приведенные выше экспериментальные данные получены при работе конических радиально-упорных подшипников в режиме граничного трения, расположенных вертикально. В этом случае коническая цапфа блокирует всю рабочую поверхность покрытия, защищая ее от воздействия жидкой среды как при остановках в работе, так и во внерабочее время.

Представляет значительный интерес обеспечение защиты покрытий от деградирующего влияния жидкой среды в радиальных подшипниках и использование таких преимуществ жидкостного смазывания, как охлаждающее и

смазывающее действие в гидродинамическом режиме. Это можно выполнить, применяя дозированную периодическую подачу жидкого смазочного материала или обеспечив гидростатический режим смазывания.

Необходимо учитывать, что все изложенное относится к полимерным покрытиям, погруженным в масляную ванну. В нашем случае, при дозированной подаче смазочного материала непосредственно в зону трения, все абсорбционные процессы проявляются в гораздо меньшей степени.

1.3 Жидкостное трение металлополимерных подшипников

Высокая эффективность жидкостного трения в режиме гидродинамики обеспечивается как увеличением эксплуатационного ресурса, так и повышением несущей способности трибосистемы [68, 69, 70, 76, 77]. Этот режим смазывания обеспечивает полное разделение трущихся контактных поверхностей подшипников скольжения и минимизацию механических потерь. Жидкостный режим приводит к изнашиванию контактирующих поверхностей только в периоды пусков и выбегов, а также в кратковременные моменты случайных нарушений режима контактирования или смазывания.

Однако применение гидродинамического режима трения полимерных композиционных покрытий для металлополимерных трибосистем промышленных машин в настоящее время практически отсутствует. Это объясняется, во-первых, пробелами в исследовании таких чисто технических причин, как специфика свойств полимеров и металлополимерного трибоконтакта в целом, и, во-вторых, отсутствием в доступной литературе методики инженерных расчетов подобных трибосопряжений.

Значительная степень снижения адгезионной прочности полимерных покрытий в жидких средах требует изоляции их контактной поверхности от жидких сред. В публикациях [66, 67] это решено использованием покрытий в радиально-упорных подшипниках с вертикальной осью. В них коническое контртело защищает наибольшую рабочую поверхность композиционного

покрытия от контакта с жидким смазочным материалом, правда, только на вне рабочее время.

В радиальных подшипниках вал деформирует покрытие и перемещается в диаметральном сечении на величину вязкоупругой деформации ε . При этом увеличивается угол входа в клинообразную часть области контакта и нарушаются ее размеры по дуге, а также конфигурация, обеспечивающая автоматический переход подшипника в режим жидкостного смазывания.

Вал плотно прилегает к деформированному полимеру по всей дуге контакта, а вязкоупругие свойства материала покрытия, при вдавливании в него вала, изменяют условия контактирования (рисунок 1.11).

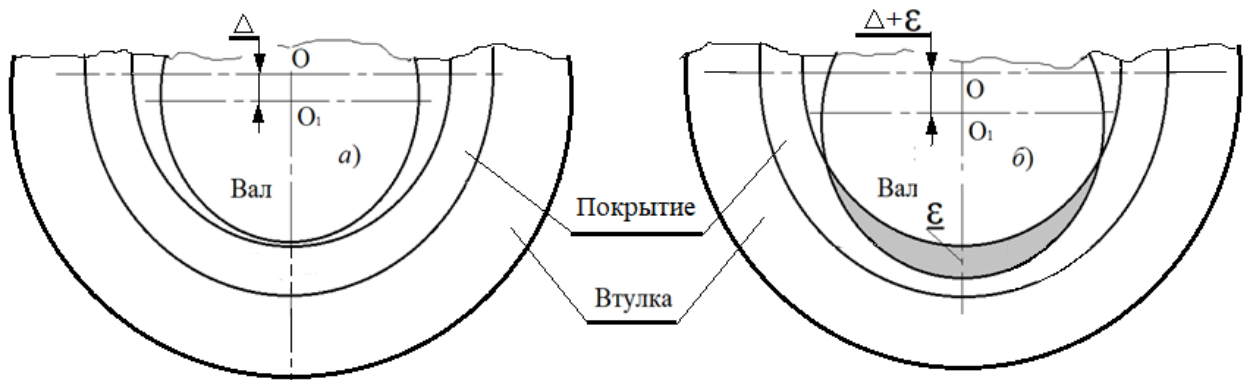


Рисунок 1.11 – Схема контактирования в радиальном подшипнике:

а) металл – металл; б) металл – полимер

Подобный подшипник не может после пуска самостоятельно выйти на гидродинамический режим смазывания и обеспечить стабильность процесса трения. Для этого необходимы специальные конструктивные изменения контактной поверхности.

В работе [71], для упрощения выхода радиального подшипника на режим жидкостного трения, предлагается конструкция металлического подшипника с минимальным зазором и продольными осевыми канавками, выполненными фрезерованием. Канавки обеспечивают гидродинамический режим смазывания в результате подъема вала и образования зазора вследствие циркуляционного течения смазочного материала в канавке.

Факт наличия подъемной силы при циркуляционном движении смазочного материала в канавках известен [79, 80] и был подтвержден теоретическими расчетами [62, 72]. Однако конкретные конструктивные размеры канавок и их количество при трибоиспытаниях радиально-упорных подшипников с покрытием устанавливались только экспериментально [66, 67].

Поскольку наличие канавок, снижая площадь контакта, увеличивает контактное давление на подшипник, были выполнены две оппозитно расположенные канавки с минимальной шириной, установленной для конкретных подшипников опытным путем. Глубина канавок в полимерном слое соответствовала толщине композиционного покрытия 0,54 мм, а ширина равнялась 3,2–3,5 мм [72] при среднем диаметре радиально-упорного подшипника 15,59 мм.

Подобная конструкция опорной поверхности подшипниковой втулки обеспечила выход подшипника на гидродинамический режим смазывания и стабильную устойчивую работу в этом режиме при более высоких значениях скорости, чем рекомендованные для полимерных композитов [66, 72].

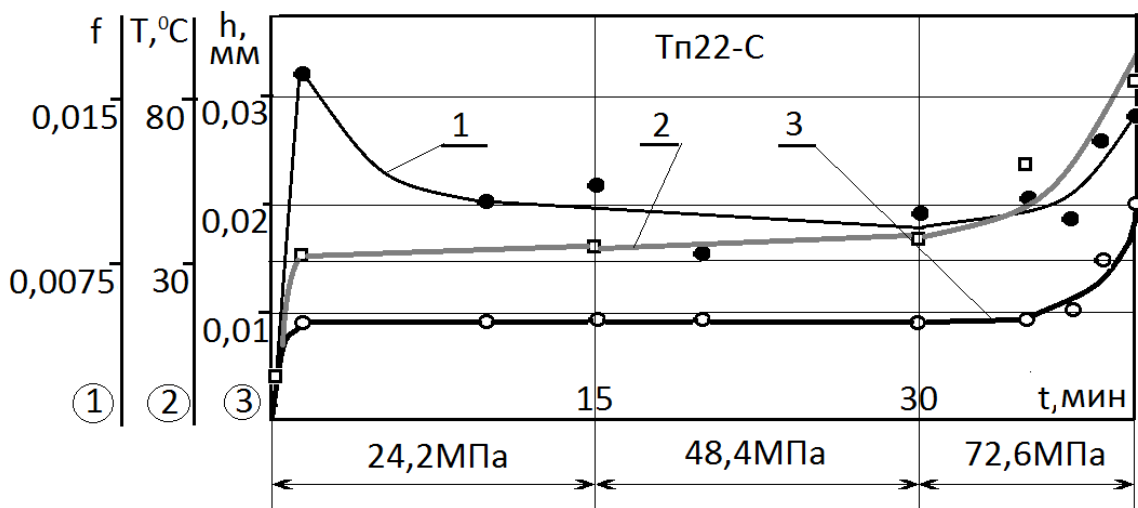


Рисунок 1.12 – Жидкостный режим смазывания металлополимерного радиально-упорного подшипника с фторопластсодержащим покрытием (сталь 45 – покрытие на базе атласной ткани, $V = 0,2–0,68$ м/с)

В результате был реализован устойчивый гидродинамический режим. Ступенчатое увеличение контактного давления до 72,6 МПа не сказалось

существенным образом на коэффициенте трения, который изменялся в пределах 0,007–0,012. Величина износа сохраняла стабильность и соответствовала $\approx 0,009$ мм. Смазочный материал – турбинное масло – нагревался до 30–40 °С. Испытания завершились после увеличения скорости до 0,68 м/с.

Таким образом, в настоящее время инженерная практика опережает теоретические разработки, что не способствует расширению области применения эффективных высокоресурсных подшипников в промышленности. Изложенное требует создания методики инженерных проектировочных расчетов для определения параметров маслоподдерживающих канавок, способствующих выходу на режим гидродинамического смазывания подшипников любых размеров, и, кроме того, для установления основных триботехнических характеристик подшипников с полимерным фторопластсодержащим покрытием, стабильно работающих в гидродинамическом режиме.

Рассматриваемые подшипники изнашиваются только в периоды пусков и выбегов, т. е. при возникновении прямого механического контакта «вал – втулка». Но в этот период в режиме граничного смазывания устойчиво работает фторопластсодержащее покрытие с коэффициентом трения близким по величине к гидродинамическому. Следовательно, металлополимерный подшипник, при подаче смазочного материала, является двухрежимным подшипником трения скольжения. Один режим, для низких скоростей, выполняется полимерным фторопластсодержащим покрытием в режиме самосмазывания при граничном трении, второй – при подаче смазочного материала и значительном повышении скорости автоматически переходит в гидродинамический режим.

Смена режимов может выполняться в любом порядке. Переключающим элементом от второго режима к первому является снижение скорости и отключение подачи жидкого смазочного материала. Обратные действия вызывают переключение граничного режима трения на гидродинамический. При неработающем подшипнике подача смазочного материала прекращается, что резко уменьшает деградационные явления в композите и его адгезионную прочность.

Следует отметить, что, не погружение в смазочную среду, а простое поверхностное смазывание полимерного композита жидким смазочным материалом охлаждает его рабочую зону и несколько увеличивает ресурс покрытия [61], не нарушая его целостности и адгезионной прочности. Кроме того, во время пусков и выбегов, даже при гидродинамическом режиме смазывания, будет работать композиционное покрытие. Это должно значительно повысить эксплуатационный ресурс подшипников.

Далее встает вопрос о критерии, подтверждающем переход к стабильному режиму жидкостного трения.

Известным, общепринятым критерием реализации гидродинамического режима является величина коэффициента трения. Для идеального жидкостного режима величина коэффициента трения составляет тысячные [70, 77, 81].

В реальных условиях случайные колебания качества исходных материалов, точности и микрогеометрии контактирующих поверхностей, пиков нагружения и др. вероятностные причины [91, 92, 93, 94, 108] нарушают идеальный режим, вызывая на отдельных участках кратковременный переход к граничному трению [76, 89].

Наступающий периодически смешанный режим смазывания несколько увеличивает средний коэффициент трения. Если его величина удовлетворяет условию $f \leq 0,05$, то рекомендуется считать, что в подобном режиме гидродинамическое смазывание является превалирующим [76].

Следует отметить, что величина коэффициента трения при граничном смазывании трибоконтакта фторопластом также удовлетворяет этому условию. Его значение по величине близко гидродинамике (см. рисунок 1.9).

Изложенное значительно усложняет оценивание перехода к гидродинамическому режиму смазывания и требует для этого или измерения толщины масляной пленки, или фиксирования отсутствия реакции на изменение контактного давления трибосистемы в пределах ее несущей способности.

В настоящее время для жидкостного трения применяется значительное количество смазочных материалов стандартных марок. Обычно это минеральные масла с комплексом функциональных присадок [109], имеющие реологию вязких

несжимаемых жидкостей. В работах [110, 111] доказано на реальном опыте эксплуатации автомобильных масел, что содержание в них до 8 % частиц износа (не более 8 мкм) не вызывает повышенного изнашивания и стабилизирует эксплуатационные свойства трибосистем. Объяснением этого факта является способность базовых масел аккумулировать твердые частицы. А при достижении определенного уровня частицы выпадают в осадок в результате коагуляции [111, 112] и не попадают в зону трибоконтакта.

Жидкие смазочные материалы с исходным содержанием небольшого количества твердых микрочастиц называются микрополярными. Эти жидкости представляют собой взвеси, в каждой точке которых скорость сдвига является функцией только сдвиговых напряжений.

Одним из главных триботехнических параметров микрополярных смазочных материалов является вязкость. Для описания вязкости двухфазных жидкостей с твердыми сферическими частицами [94] в модели микрополярной жидкости используют формулу Эйнштейна

$$\mu = \mu_0(1 + 2,54\varphi), \quad \varphi \leq 0,04, \quad (1.3)$$

где μ и μ_0 – текущее и исходное значения вязкости;

φ – концентрация дисперсной среды.

Поведение микрополярных смазочных жидкостей для классической гидродинамики нестандартно. Оно характеризуется при течении увеличением эффективной вязкости в зазоре, сопоставимом с размером частиц. А увеличение их концентрации повышает вязкость смазочного материала.

Вязкость микрополярной смазочной среды определяется тремя параметрами: μ , μ_1 и γ . Вязкость μ определяет сопротивление движению и имеет размерность динамической вязкости Па·с; μ_1 – коэффициент вихревой вязкости, учитывающий микровращения твердых частиц, имеет ту же размерность; γ используется для определения размера твердой частицы l в м и имеет размерность Па·с·м².

Движение жидких смазочных материалов с микрополярными свойствами рассматривалось в ряде работ (см., например, [114]). Однако их существенным

недостатком является отсутствие в расчетных моделях учета зависимости вязкостных параметров смазочного материала от температуры и давления.

Анализ материалов, посвященных рассматриваемым композиционным антифрикционным покрытиям, позволил установить наличие значительных пробелов в расширении применения этих высокоресурсных металлополимерных трибосистем в наиболее перспективных условиях жидкостного смазывания современными высокоэффективными смазочными материалами с обычной и неньютоновской реологией.

В данной работе проводятся исследования, позволяющие заполнить значительную часть этих пробелов, что делает ее актуальной и востребованной инженерной практикой.

1.4 Цель и задачи исследования

Современный этап развития технического прогресса требует всестороннего расширения применения исследуемых фторопластсодержащих композиционных покрытий. Высокая несущая способность и износостойкость, а также демпфирующие свойства и практическое отсутствие технического обслуживания делает применение полимерных фторопластсодержащих композитов востребованным во всех отраслях машиностроения.

Однако в настоящее время, в связи с низкой теплостойкостью полимеров, эти материалы применяются в ограниченном скоростном режиме. Выходом из положения представляется переход к жидкостному режиму, снижающему термонапряженность трибоконтакта. Данная работа посвящена решению этого вопроса.

Отсюда вытекает общая цель исследования: повышение ресурса металлополимерных фторопластсодержащих радиальных подшипников скольжения на основе экспериментальных исследований и разработки комплекса математических моделей.

Ниже приведены задачи, позволяющие достигнуть поставленной цели. В плане теоретических исследований это:

1 Разработать комплекс математических моделей и аналитических зависимостей для расчетной оценки технических решений и конструкций радиальных подшипников скольжения, имеющих на опорной поверхности полимерное фторопластсодержащее покрытие с осевой канавкой и адаптированным к условиям трения профилем с учетом ньютоновской и неньютоновской реологии смазочного материала в условиях ламинарного течения.

2 Установить закономерности влияния смазочного материала на работоспособность радиального подшипника с фторопластсодержащим полимерным покрытием и канавкой на опорной поверхности с учетом зависимости вязкости от давления и температуры и турбулентного характера его течения.

3 Доказать стабильность и возможность смены видов смазывания с граничного на гидродинамический в радиальном подшипнике с фторопластсодержащим покрытием и канавкой на опорной поверхности.

4 Выполнить экспериментальную оценку теоретических положений и промышленную апробацию разработанной конструкции радиального подшипника, установить области применения полученных расчетных моделей.

Глава 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ

В современных тяжело нагруженных узлах трения широко применяются металлополимерные подшипники с антифрикционными фторопластсодержащими покрытиями [1, 2, 3, 4], которые работают при смазывании фторопластом – политетрафторэтиленом (ПТФЭ) в условиях граничного трения [11]. Их эффективное применение обеспечивается вязкоупругой деформацией этих покрытий под рабочим контактным давлением, что, увеличивая площадь фактического контакта, снижает величину контактных напряжений. Однако относительно низкая термостойкость полимерных материалов [5, 6, 12] существенно снижает допустимую скорость подобных трибосистем.

Решение проблемы найдено в переходе от самосмазывания к гидродинамическому виду смазывания [7, 8]. Практически безззорные подшипники с полимерным покрытием, вязкоупруго деформирующиеся под контактным давлением, необходимо адаптировать к гидродинамике. Это потребовало конструктивных изменений опорной поверхности покрытия подшипниковой втулки в виде образования специальных маслоподдерживающих канавок, обеспечивающих зазор в трибосопряжении для создания несущего гидродинамического клина (рисунок 2.1).

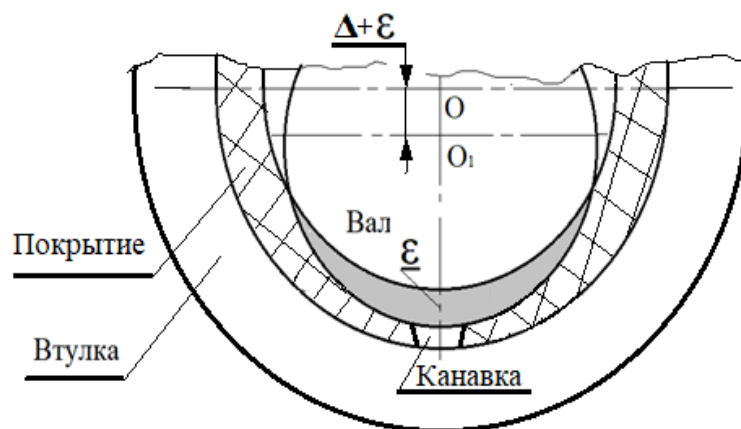


Рисунок 2.1 – Схема статического металлополимерного трибоконтакта:

Δ – диаметральный зазор; ϵ – вязкоупругая деформация

Канавки расположены в зоне нагружения вдоль оси подшипника. Их ширина несколько снижает реальную контактную площадь, поэтому ее необходимо минимизировать. В настоящее время параметры канавок определяются экспериментально [8].

Следует отметить, что жидкие смазочные материалы вызывают деградацию покрытия, уменьшая его адгезионную прочность [9] и вязкоупругую деформацию [10] полимерного покрытия (14–16 %). Эти изменения могут быть существенно снижены в радиально-упорных конических и радиальных подшипниках путем блокирования контртелом наибольшей абсорбирующей поверхности покрытия при отсутствии движения.

В результате получен подшипник, работающий при низких скоростях в режиме граничного смазывания фторопластом покрытия, а при повышении скорости вал из-за давления, вызванного циркуляционным движением смазочного материала в канавке, всплывает, образуя зазор и гидродинамический клин. Далее подшипник работает в жидкостном режиме смазывания. Причем возможна последовательная многократная смена скоростного режима его работы и характера смазывания.

Таким образом, в работе рассматриваемых подшипников можно выделить три этапа.

1 При отсутствии движения, но сохранении рабочего контактного давления деформация покрытия металлическим контртелом выбирает зазор и блокирует его поверхность, ограничивая абсорбцию смазочного материала.

2 При вращении вала с низкой скоростью, не обеспечивающей режим гидродинамики, подшипник работает при смазывании фторопластом в условиях граничного трения. Изменение скоростного режима вызывает возникновение давления внутри канавки в результате кругового течения смазочного материала и обеспечивает необходимый зазор для жидкостного смазывания.

3 Подшипник переходит в режим стационарного гидродинамического смазывания.

Однако в настоящее время применение рассматриваемого подшипника, обладающего очевидными преимуществами, сдерживается отсутствием методики его расчета. Это относится как к размерам канавок, так и к параметрам процесса трения, особенно в гидродинамическом режиме смазывания. Настоящая работа является попыткой решения этого вопроса путем разработки расчетной модели подшипника для гидродинамического этапа его работы.

Основные исследования этой главы опубликованы в работах [148–177].

2.1 Давление в маслоподдерживающей канавке

Поставленную задачу решаем в соответствии с рабочей схемой, представленной на рисунке 2.2.

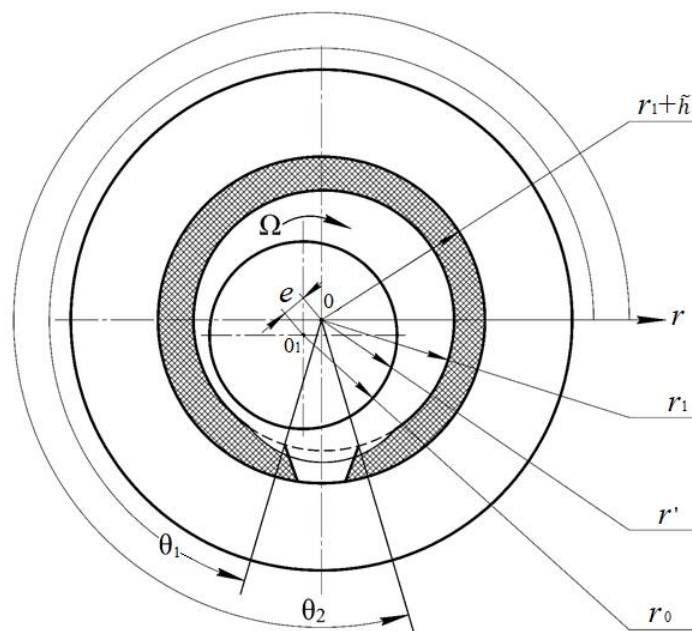


Рисунок 2.2 – Расчетная схема

Для описания стационарного течения жидкого смазочного материала в канавке и рабочем зазоре пары трения с антифрикционным покрытием применим уравнением течения несжимаемой жидкости в условиях «тонкого слоя».

$$\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{d\theta}. \quad (2.1)$$

В полярной системе координат (см. рисунок 2.2) уравнение контура вала, подшипниковой втулки с покрытием запишем в виде:

$$r' = r_0, \quad r' = r_1 \text{ и } r' = r_1 - \tilde{h}. \quad (2.2)$$

Граничные условия запишем в виде:

$$v = 0 \text{ при } r = r_1 \text{ (на поверхности подшипниковой втулки);}$$

$$v = -\Omega r_0 = v_{\text{вала}} \text{ при } r = r_0 \text{ (на поверхности вала).} \quad (2.3)$$

Для определения скорости потока смазочного материала уравнение (2.1) проинтегрируем по r и в результате получим:

$$v_{\pi} = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{d\theta} r^2 + c_1 r + c_2. \quad (2.4)$$

Из граничных условий (2.3) находим c_1 и c_2 . В результате для v_{π} получим выражение

$$v_{\pi} = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{d\theta} (r^2 - (r_0 + r_1)r + r_0 r_1) + \frac{v_{\text{вала}}}{r_0 - r_1} (r - r_1). \quad (2.5)$$

Из выражения (2.5) определим объем жидкого смазочного материала, протекающего в одну секунду через сечение осевой канавки:

$$Q = \int_{r_0}^{r_1} v_{\pi} L^* dr = \frac{L^*}{2\mu} \frac{dp}{d\theta} (r_1 - r_0)^3 + v_{\text{вала}} (r_1 - r_0). \quad (2.6)$$

Полагая, что величина расхода смазочного материала равна нулю, будем иметь:

$$\frac{dp}{d\theta} = -\frac{2v_{\text{вала}}\mu}{(r_1 - r_0)^2}. \quad (2.7)$$

Результатами экспериментальных исследований [72] доказано, что избыточное давление возникает только в части поперечного сечения канавки по направлению вращения вала между ее неподвижной стенкой и осью подшипника. Считая, что стенка канавки наклонена к абсциссе под углом 45° , уравнение этой стенки канавки имеет следующий вид:

$$r = r_{\text{max}} \frac{Q}{\tilde{h}}. \quad (2.8)$$

Подставив в уравнение (2.8) в выражение (2.7), получим

$$\frac{dp}{d\theta} = -\frac{2\nu_{\text{вала}}\mu}{\left(r_{\text{max}} \frac{\theta}{\tilde{h}}\right)^2}. \quad (2.9)$$

Выполним интегрирование уравнение (2.8) θ получим

$$p = \frac{2\nu_{\text{вала}}\mu h^2}{r_{\text{max}}^2 \theta} + c. \quad (2.10)$$

По граничным условиям найдем постоянную интегрирования:

$$\text{при } r = \frac{\tilde{h}}{2} \quad p = p_{\text{п}},$$

и тогда получим

$$c = p_{\text{п}} + \frac{2\nu_{\text{в}}\mu\tilde{h}}{r_{\text{max}}^2}. \quad (2.11)$$

Подставив выражение (2.11) в (2.10) и проведя необходимые преобразования, имеем:

$$p = p - p_{\text{п}} = \frac{2\mu\nu_{\text{в}}}{r_{\text{max}}^2} \left(\frac{\theta}{\tilde{h}} - 2 \right). \quad (2.12)$$

Известно, что минимальное значение масляной пленки у начала канавки равно 0,1 мкм.

Интегрируя уравнение (2.12) в пределах от $\theta_{\text{min}} = \tilde{h} \frac{r_{\text{min}}}{r_{\text{max}}}$ до $\theta_{\text{max}} = \frac{\theta}{2}$, получим:

$$p = \frac{2\mu\nu_{\text{в}}}{r_{\text{max}}^2} \int_{\tilde{h} \frac{r_{\text{min}}}{r_{\text{max}}}}^{\frac{\theta}{2}} \left(\frac{\theta}{\tilde{h}} - 2 \right) d\theta = \frac{2\mu\nu_{\text{в}}}{r_{\text{max}}^2} \left[\tilde{h} \ln \frac{\theta r_{\text{max}}}{2\tilde{h} r_{\text{min}}} - 2 \left(\frac{\theta}{2} - \frac{r_{\text{min}}}{r_{\text{max}}} \right) \right]. \quad (2.13)$$

Считая, что $\tilde{h} \frac{r_{\text{min}}}{r_{\text{max}}} \approx 0$, а $r_{\text{max}} = \tilde{h}$, для гидродинамического давления окончательно будем иметь:

$$p = \frac{2\mu\nu_{\text{в}}}{r_{\text{max}}^2} \left(\ln \frac{\theta}{2r_{\text{min}}} - \frac{\theta}{\tilde{h}} \right). \quad (2.14)$$

Численный анализ полученных результатов позволил наглядно представить влияние параметров маслоподдерживающей канавки (ширины b и глубины h) на

гидродинамическое давление, вызванное циркуляцией в ней жидкого смазочного материала, графиками на рисунке 2.3. Расчет выполнен для скоростей 0,2 и 1,0 м/с.

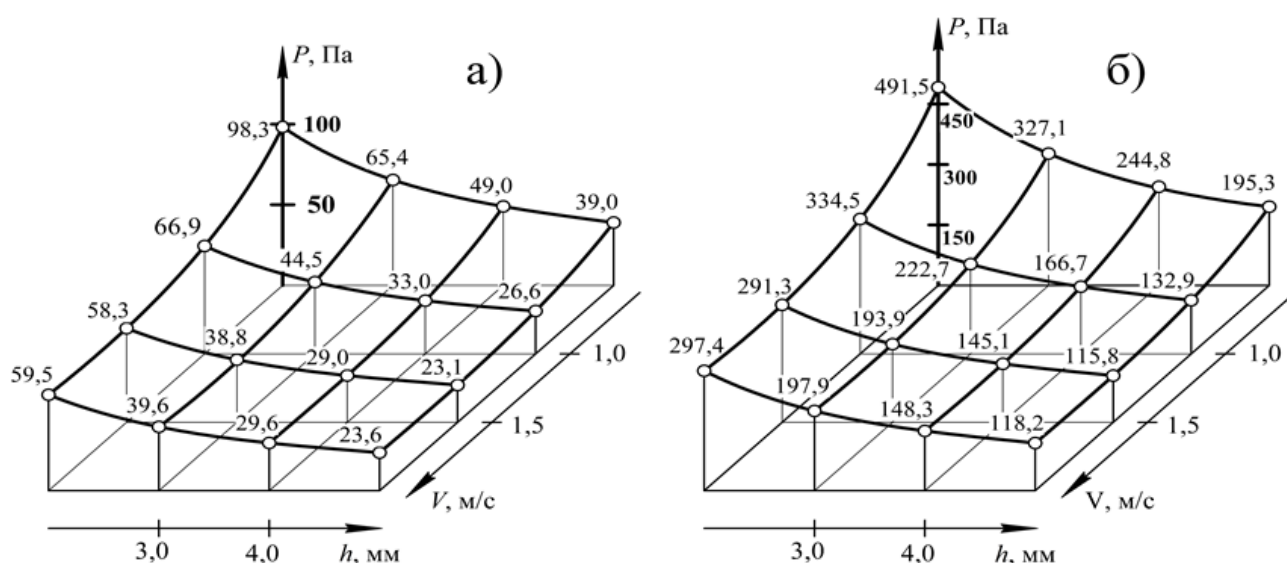


Рисунок 2.3 – Влияние параметров канавки на гидродинамическое давление:

а) для скорости 0,2 м/с; б) 1,0 м/с

Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее.

1 В исследованном нагрузочно-скоростном диапазоне режимов наблюдается увеличение гидродинамического давления в соответствии с ростом скорости, что свидетельствует о повышении вклада жидкостного смазывания в общий процесс трения.

2 Увеличение как ширины, так и длины канавок понижает уровень гидродинамического давления для всего исследованного диапазона скоростей.

3 Рост ширины канавки снижает величину давления смазочного материала во всем исследованном диапазоне ее ширины для скорости 0,2 м/с на $\approx(60-25)$ %, а для скорости 1,0 м/с на $\approx(60-48)$ %.

4 Увеличение глубины канавки до 1,5 мм снижает давление на (39–15) %, а при ее дальнейшем увеличении до 2,0 мм имеет место незначительный рост давления на ≈ 2 %.

Таким образом, появляется возможность в определенных пределах управлять гидродинамическим давлением в рабочем зазоре подшипника, оперируя не только скоростью, но и размерными параметрами канавки при постоянной скорости.

Следует отметить, что полученные результаты носят качественный характер и требуют дальнейшего уточнения при использовании смазочных материалов с различными реологическими свойствами.

2.2 Подшипники со стандартной опорной поверхностью

Постановка 2-й задачи на следующем этапе теоретических исследований включает рассмотрение установившегося движения вязкого несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника с полимерным покрытием, имеющим вдоль оси контактной поверхности маслоподдерживающую канавку.

- Задача выполняется при соблюдении ряда допущений.
- Антифрикционное полимерное композиционное фторопластсодержащее покрытие считаем изотропным вязкоупругим материалом.
- При расчетах не учитываются силы тяжести, инерции и капиллярные.
- Расчеты ведутся при условии бесконечной длины радиальных подшипников скольжения.
- Рабочий зазор подшипника между втулкой и валом, эксцентрично расположенным по отношению к ней, полностью заполнен несжимаемым вязким жидким смазочным материалом.
- Движение смазочного материала в зазоре между валом и втулкой подшипника является ламинарным.
- Расход смазочного материала в любом сечении постоянен.
- Гидродинамическое давление в окрестности канавки непрерывно:

$$p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2); \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1).$$

- Функции $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ определяются соотношениями

$$v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}.$$

Гидродинамическое давление влияет на вязкость смазочного материала в соответствии с выражением Баруса [13]:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha p'}. \quad (2.15)$$

Втулка подшипника с полимерным покрытием, имеющая осевую канавку, неподвижна, а вал вращается с угловой скоростью Ω . Жидкий смазочный материал в зазоре работающего подшипника находится в движении, которое описывается приближенным выражением для несжимаемой вязкой жидкости для «тонкого слоя» и уравнением неразрывности

$$\frac{\partial p_i}{\partial r'} = 0; \quad \mu' \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0. \quad (2.16)$$

В полярной системе координат (см. рисунок 2.2) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнение контура вала, подшипниковой втулки и поверхности подшипниковой втулки с полимерным покрытием запишем в виде

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}, \quad (2.17)$$

где $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$; $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$.

Граничные условия в рассматриваемом случае с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$ запишутся в виде

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1; \\ v_{\theta} &= v^*(\theta), \quad v_{r'} = u^*(\theta) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h}; \\ v_{\theta} &= r_0 \Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta; \\ p'(0) &= p'(\theta) = p_g. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned} r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i; \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u_i; \\ p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu_0 \mu; \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Учитывая выражение (2.19), из (2.16) и (2.18) получим систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}
v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta = h(\theta); \\
v &= 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
v &= v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при } r = \eta_2; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1; \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\
p(0) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}, \tag{2.21}
\end{aligned}$$

введем обозначения $z = e^{-\alpha r}$, тогда уравнение (2.20) после преобразования примет вид

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0 \tag{2.22}$$

с соответствующими граничными условиями

$$\begin{aligned}
v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = h(\theta); \\
v &= 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
v &= \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } r = \eta_2; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1; \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\
z(0) &= z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{P_g}{p^*}}. \tag{2.23}
\end{aligned}$$

Автомодельное решение задачи (2.22) с учетом граничных условий (2.23) ищем в виде

$$\begin{aligned}
v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\
\psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}(\xi_i); \quad \xi_i = \frac{r}{1 - \eta \cos \theta} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
V_i(r, \theta) &= \tilde{v}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\
\xi_i &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \tag{2.24}
\end{aligned}$$

Подставляя (2.24) в (2.22) с учетом граничных условий, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_i''' &= a_i; \quad \tilde{v}_i'' = b_i; \quad \tilde{u}'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}'_i(\xi_i) = 0; \\
\frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left[\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] \quad (i = 1, 3);
\end{aligned}$$

$$\frac{dz_2}{d\theta} = -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right). \quad (2.25)$$

Система уравнений (2.25) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_i(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}'_i(1) = 0, \quad \tilde{u}_i(1) = -\eta \sin \theta, \quad \tilde{v}_i(1) = 0, \\ \tilde{u}_i(0) = 0, \quad \tilde{v}_i(0) = 1; \quad \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i = 0. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Интегрируя уравнение (2.25) с учетом граничных условий (2.26), в результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(\xi_1) = a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_1}{2}, \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \left(1 - \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1, \quad u_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} \xi_1 \tilde{v}'_1(\xi_1) d\xi_1; \\ z_1 = -\alpha \left[b_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_2(\xi_2) = a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} + \left(1 - \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1, \quad u_2(\xi_2) = \int_0^{\xi_2} \xi_2 \tilde{v}'_2(\xi_2) d\xi_2; \\ z_2 = -\alpha \left[b_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} + a_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^3(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) = a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} + \left(1 - \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1, \quad u_3(\xi_3) = \int_0^{\xi_3} \xi_3 \tilde{v}'_3(\xi_3) d\xi_3; \\ z_3 = -\alpha \left[b_3 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_3 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Из уравнения $v_i(\xi_i) = b_i \frac{\xi_i^2}{2} + \left(1 - \frac{b_i}{2}\right) \xi_i + 1$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6. \quad (2.30)$$

Также из равенства $z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ имеем:

$$a_1 = -12(1 - \eta_2) \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2};$$

$$\begin{aligned}
a_2 &= -6 \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right); \\
a_3 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right).
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Зная значения a_1 , a_2 , a_3 , найдем выражения для гидродинамического давления:

$$\begin{aligned}
z_1 &= -\frac{6\alpha}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta + 3\tilde{\eta} \sin \theta) \right) + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\
z_2 &= -6\alpha(\theta - \theta_1) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\
z_3 &= \frac{-6\alpha(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}.
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Применив разложение функций $e^{-\alpha p}$ и $e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ в ряд Тейлора и выполнив преобразования, получим:

$$\begin{aligned}
p_1 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta + 3\tilde{\eta} \sin \theta) \right) \times \\
&\quad \times \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right); \\
p_2 &= \frac{p_g}{p^*} + 6(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \right. \\
&\quad \left. - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right];
\end{aligned}$$

$$p_3 = \frac{p_g}{p^*} + \frac{6(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right]. \quad (2.33)$$

Имея выражение гидродинамического давления и скорости, определим значения несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned} R_x &= p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \cos \theta d\theta \right] = \\ &= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\frac{1}{(1 - \eta_2)^2} \left[\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} \cos 2\theta_1 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{2} - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \left(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - \frac{3}{4} \tilde{\eta} \cos 2\theta_1 - \frac{1}{4} \right) + 1 - \cos \theta_2 - \frac{\tilde{\eta}}{2} (1 - \cos 2\theta_2) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2\tilde{\eta} \sin^2 \theta_1 - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \left(1 - \cos \theta_2 - \frac{3}{4} \tilde{\eta} (1 - \cos 2\theta_2) + 3\tilde{\eta} \sin^2 \theta_2 \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left((\theta_2 - \theta_1) \sin \theta_2 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \frac{1}{2} \eta (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2\eta \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left((\theta_2 - \theta_1) \sin \theta_2 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - \frac{3}{4} \eta (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) - 3\eta \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) \right] \right]. \\ R_y &= p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \sin \theta d\theta \right] = \\ &= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left\{ \frac{1}{(1 - \eta_2)^2} \left[-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 - \sin \theta_2 + \theta_2 - 2\pi + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \tilde{\eta} \left(2\pi + \theta_1 - \theta_2 + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) + 2 \sin \theta_2 (1 - \cos \theta_2) \right) - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \left(-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{3}{2} \tilde{\eta} \left(\theta_1 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) \right) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \left(-2\pi + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 + \theta_2 (1 - \cos \theta_2) + \right. \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3}{2} \tilde{\eta} \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin \theta_2 \right) + 3\tilde{\eta} \sin \theta_2 (1 - \cos \theta_2) \Bigg] + (\theta_2 - \theta_1) \cos \theta_2 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1 + \\
& + \eta \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + 2\eta \sin \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left((\theta_2 - \theta_1) \cos \theta_2 + \right. \\
& \left. + \sin \theta_2 - \sin \theta_1 + \frac{3}{2} \eta \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + 3\eta \sin \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) \Bigg] \Bigg\}. \\
L_{\text{тр}} = & \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(0)}{(h(0) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_1'(0)}{h(0) - \eta_2} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(0)}{h^2(0)} + \frac{\tilde{v}_2'(0)}{h(0)} \right) d\theta + \right. \\
& \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(0)}{(h(0) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_3'(0)}{h(0) - \eta_2} \right) d\theta \right] = \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \times \\
& \times \left[6 \frac{\frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta_1 + 2\tilde{\eta} \sin \theta_1) - 2\theta_1 - 2\tilde{\eta} \sin \theta_1 + 3 \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) (2\pi - \theta_2 - 2\tilde{\eta} \sin \theta_2) - 2(2\pi - \theta_2 - \tilde{\eta} \sin \theta_2)}{1 - \eta_2} + \right. \\
& \left. + 3 \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left(\theta_2 - \theta_1 + 2\tilde{\eta} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - 2(\theta_2 - \theta_1 + \tilde{\eta} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)) \right) \right]. \quad (2.34)
\end{aligned}$$

Результаты численного анализа полученных выражений, описывающих параметры радиального подшипника с полимерным покрытием, позволяют построить графики зависимости коэффициента трения и вертикальной составляющей давления от ширины маслоподдерживающей канавки. Расчеты выполнены при глубине канавки равной толщине композиционного полимерного покрытия 0,55 мм, скорости 1,0 м/с, значении контактного давления 14,1 МПа, температуре 40 °С и жидком смазочном материале марки Гп22-С.

Анализ полученных результатов показывает возможность полной реализации нагрузочно-скоростных режимов гидродинамического смазывания в исследованном диапазоне (все коэффициенты трения меньше 0,01). Следует отметить высокую чувствительность трибопараметров подшипника к рабочему контактному давлению. Так, ее повышение в 3 раза вызывает такое же снижение коэффициента трения при одновременном росте вертикальной составляющей поддерживающей силы в 9 раз (рисунки 2.4 и 2.5).

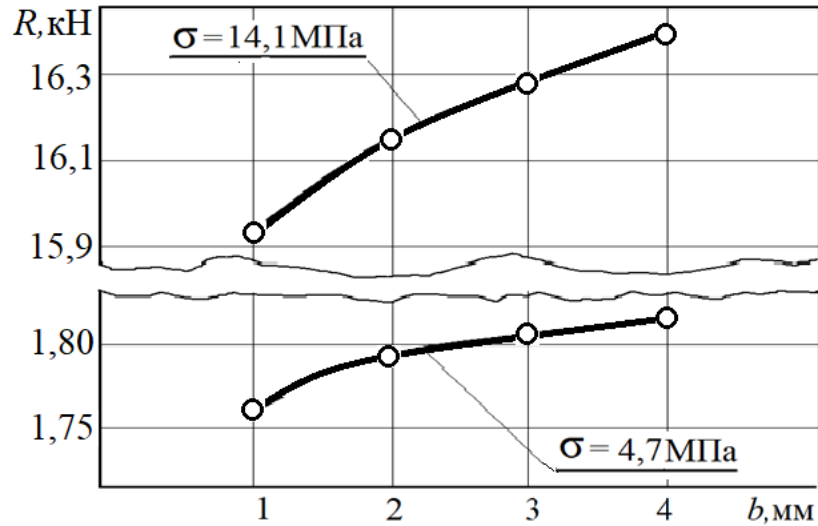


Рисунок 2.4 – Зависимость вертикальной составляющей давления в подшипнике с канавкой от ее ширины и рабочего контактного давления

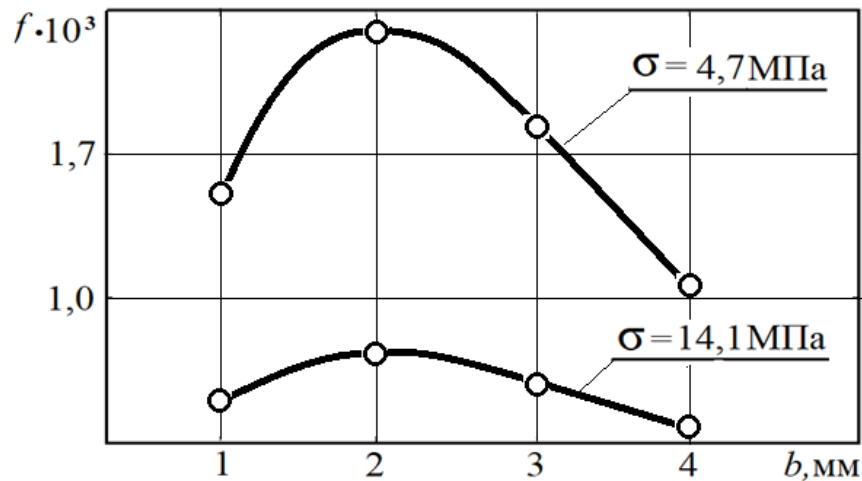


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента трения от ширины канавки и рабочего контактного давления подшипника

Поскольку при постоянном рабочем контактном давлении увеличение ширины канавки повышает нагруженность подшипника, необходимо минимизировать этот параметр. Исходя из полученных результатов считаем, что рациональной шириной маслоподдерживающей канавки является величина 3–4 мм. Достаточной для выполнения своих функций является глубина канавки равная толщине антифрикционного покрытия – 55 мкм.

Постановка 3-й задачи включает рассмотрение установившегося движения микрополярного несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения.

Как и в первой задаче, вал вращается с угловой скоростью Ω , а подшипниковая втулка неподвижна. Предполагается, что пространство между эксцентрично расположенным валом и подшипником полностью заполнено смазочным материалом, а на подшипниковую втулку нанесено полимерное покрытие.

В полярной системе координат (см. рисунок 2.2) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнение контура вала, втулки и ее поверхности с полимерным покрытием, имеющим осевую канавку, запишем в виде

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}. \quad (2.35)$$

Полагаем, что вязкостные характеристики смазочного материала зависят от давления по следующим законам:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha' p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha' p'}. \quad (2.36)$$

Исходными базовыми уравнениями являются уравнение движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» и уравнение неразрывности:

$$\begin{aligned} (2\mu' + \kappa') \left(\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'} \right) &= \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial' v_{r'_i}}{\partial r'}, \\ \gamma' \left(\frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) &= \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \quad \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Система уравнений (2.37) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1; \quad \theta_1 < \theta < \theta_2; \\ v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h}; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\ v_{\theta} &= r_0 \Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta; \\ p(0) &= p(\theta) = p_g. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам

$$\begin{aligned}
r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad r' = (r_1 - \tilde{h}) - \delta r, \\
\delta &= (r_1 - \tilde{h}) - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i, \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u, \\
p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega r_0^2}{2\delta^2}, \quad v' = v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma, \\
N^2 &= \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}; \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}.
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Учитывая выражения (2.39), из (2.37) и (2.38) получим систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} &= e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{v_i}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{du_i}{dr}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial \theta} + \frac{\partial v_i}{\partial r} = 0; \\
v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \quad \text{при } r = h(\theta); \\
v &= 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
v &= v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta), \quad v = 0 \quad \text{при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\
p(0) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}.
\end{aligned} \tag{2.40}$$

Учитывая малость зазора, осредняем второе уравнение системы (2.40) по толщине смазочного слоя:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0. \tag{2.42}$$

Введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$, и в результате ряда преобразований система уравнений (2.42) примет вид

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh) \tag{2.43}$$

с соответствующими граничными условиями

$$\begin{aligned}
v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = h(\theta); \\
v &= v^*(0), \quad u = u^*(0) \quad \text{при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\
v &= 0; \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
z(0) &= z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}.
\end{aligned} \tag{2.44}$$

Автомодельное решение задачи (2.43) с учетом граничных условий ищем в виде

$$\begin{aligned}
 v_i &= \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); & u_i &= -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\
 \Psi_i(r, \theta) &= \tilde{\Psi}(\xi_i); & V_i(r, \theta) &= \tilde{v}_i(\xi_i); & U_i(r, \theta) &= -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\
 \xi_2 &= \frac{r_i}{h(\theta)} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
 \xi_{1,3} &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi.
 \end{aligned} \tag{2.45}$$

Подставляя (2.45) в (2.43) с учетом граничных условий (2.44), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Psi}_i''' &= a_i; & \tilde{u}_i'' &= b_i - \frac{N^2}{2N_1}(2\xi_i - 1); & \tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) &= 0; \\
 \frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right) & i &= 1, 3; \\
 \frac{dz_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right).
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

Система уравнений (2.46) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned}
 v_i(0) &= 0; & \tilde{\Psi}_i'(0) &= 0, & \tilde{\Psi}_i'(1) &= 0, & \tilde{u}_i'(1) &= -\eta \sin \theta; & \tilde{v}_i'(1) &= 0; \\
 v_i(1) &= 0; & \tilde{u}_i(0) &= 0; & \tilde{v}_i(0) &= 1; & \int_0^1 \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0; \\
 \int_{\theta}^{\xi_i} \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0; & z(\theta) &= z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) &= e^{-\alpha \frac{P_g}{P}}.
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

Интегрируя уравнение (2.46) с учетом граничных условий (2.47), в результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Psi}_i'(\xi_i) &= a_1 \frac{\xi_i}{2} (\xi_1 - 1), & \tilde{u}_i(\xi_i) &= b_1 \frac{\xi_i^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_1^3}{3} - \frac{\xi_1^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_1; \\
 z_1 &= -\alpha \left[b_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{P_g}{P}};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1), \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \\ z_2 &= -\alpha \left[b_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} + a_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^3(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}}; \\ \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1), \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1; \\ z_3 &= -\alpha \left[b_3 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_3 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}}.\end{aligned}\quad (2.48)$$

Из уравнения $\tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}'_i(\xi_i) = 0$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6. \quad (2.49)$$

Из равенства $z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}}$ имеем:

$$\begin{aligned}a_1 &= -12(1 - \eta_2) \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2}; \\ a_2 &= -6 \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right); \\ a_3 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right).\end{aligned}\quad (2.50)$$

Зная значения a_1 , a_2 , a_3 , найдем выражения для гидродинамического давления:

$$\begin{aligned}z_1 &= \frac{-6\alpha}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta + 3\eta \sin \theta) \right) + e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}}; \\ z_2 &= -6\alpha(\theta - \theta_1) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}};\end{aligned}$$

$$z_3 = \frac{-6\alpha(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \quad (2.51)$$

Применив разложение ряда Тейлора для функции $e^{-\alpha p}$ и $e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ и сделав ряд преобразований, получим:

$$p_1 = \frac{p_g}{p^*} + \frac{6}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta + 3\eta \sin \theta) \right) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right); \\ p_2 = \frac{p_g}{p^*} + 6(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \right. \\ \left. - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right]; \\ p_3 = \frac{p_g}{p^*} + \frac{6(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \right. \\ \left. - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right]. \quad (2.52)$$

Зная значения гидродинамического давления и скорости, находим аналитические выражения для несущей способности и силы трения:

$$R_x = p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta \right] = \\ = \frac{6(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega r_0^3}{2\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\frac{1}{(1 - \eta_2)^2} [\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - \tilde{\eta} \cos 2\theta_1 - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \left(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - \frac{3}{4} \tilde{\eta} \cos 2\theta_1 - \frac{1}{4} \right) + 1 - \cos \theta_2 - \frac{\tilde{\eta}}{2} (1 - \cos 2\theta_2) + \right. \\ \left. + 2\tilde{\eta} \sin^2 \theta_1 - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \left(1 - \cos \theta_2 - \frac{3}{4} \tilde{\eta} (1 - \cos 2\theta_2) + 3\tilde{\eta} \sin^2 \theta_2 \right) \right] +$$

$$\begin{aligned}
& +(\theta_2 - \theta_1)\sin\theta_2 + \cos\theta_2 - \cos\theta_1 - \frac{1}{2}\eta(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1 - 2\eta\sin\theta_1(\sin\theta_2 - \\
& \quad - \sin\theta_1 - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1}\sin\theta_1\right)\left((\theta_2 - \theta_1)\sin\theta_2 + \cos\theta_2 - \cos\theta_1 - \right. \\
& \quad \left. - \frac{3}{4}\eta(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) - 3\eta\sin\theta_1(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\right)\left. \right]. \\
R_y & = p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*}\right) \sin\theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*}\right) \sin\theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*}\right) \sin\theta d\theta \right] = \\
& = \frac{6(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega r_0^3}{2\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right) \left[\frac{1}{(1-\eta_2)^2} [-\theta_1 \cos\theta_1 + \sin\theta_1 + \tilde{\eta} \left(\theta_1 - \theta_2 + \frac{1}{2}(\sin 2\theta_2 - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \sin 2\theta_1) + \theta_2(2\cos\theta_2 - 1) - \sin\theta_2\right) - 2\tilde{\eta}\sin\theta_2(1 - \cos 2\theta_2) - \right. \\
& \quad \left. - 2\frac{\sqrt{1-\tilde{\eta}^2}}{2+\tilde{\eta}^2} (-\theta_1 \cos\theta_1 + \sin\theta_1 + \frac{3}{2}\tilde{\eta} \left(\theta_1 - \frac{1}{2}\sin 2\theta_1\right)) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2}\sin\theta_2\right) (-2\pi + \theta_2 \cos\theta_2 - \right. \\
& \quad \left. - \sin\theta_2 - \theta_2(1 - \cos\theta_2) + \frac{3}{2}\tilde{\eta} \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2}\sin\theta_2\right) - 3\tilde{\eta}\sin\theta_2(1 - \cos\theta_2) \right] - \\
& \quad - (\theta_2 - \theta_1)\cos\theta_2 + \sin\theta_2 - \sin\theta_1 + \eta(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) + 2\eta\sin\theta_1 \times \\
& \quad \times \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2}\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1 - 2\eta\sin\theta_1(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1}\sin\theta_1\right) (-\theta_2 - \theta_1)\cos\theta_2 + \right. \\
& \quad \left. + \sin\theta_2 - \sin\theta_1 + \frac{3}{2}\eta \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)\right) - 3\eta\sin\theta_1(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \right]. \\
L_{\text{tp}} & = \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_1'(\theta)}{h(\theta) - \eta_2} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_2'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \right. \\
& \quad \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{u}_3'(\theta)}{h(\theta) - \eta_2} \right) d\theta \right] = \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2}\right) \times \\
& \quad \times \left[\frac{-6\frac{\sqrt{1-\tilde{\eta}^2}}{2+\tilde{\eta}^2} (\theta_1 + 2\tilde{\eta}\sin\theta_1) - 3\left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2}\sin\theta_2\right) (2\pi - \theta_2 - 2\tilde{\eta}\sin\theta_2) + \left(\frac{N^2}{12N_1} + 4\right) (\theta_2 - \theta_1 + \tilde{\eta}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) - 2\pi)}{1 - \eta_2} \right. \\
& \quad \left. - 3\left(1 - \frac{\eta}{\theta_1}\sin\theta_1\right) (\theta_2 - \theta_1 + 2\tilde{\eta}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)) + \theta_2 - \theta_1 + \eta(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \right]. \quad (2.53)
\end{aligned}$$

Проведенный численный анализ полученных расчетных моделей при скорости 1 м/с позволил построить графики вертикальной составляющей давления (рисунок 2.6) и коэффициента трения (рисунок 2.7) при использовании микрополярного смазочного материала.

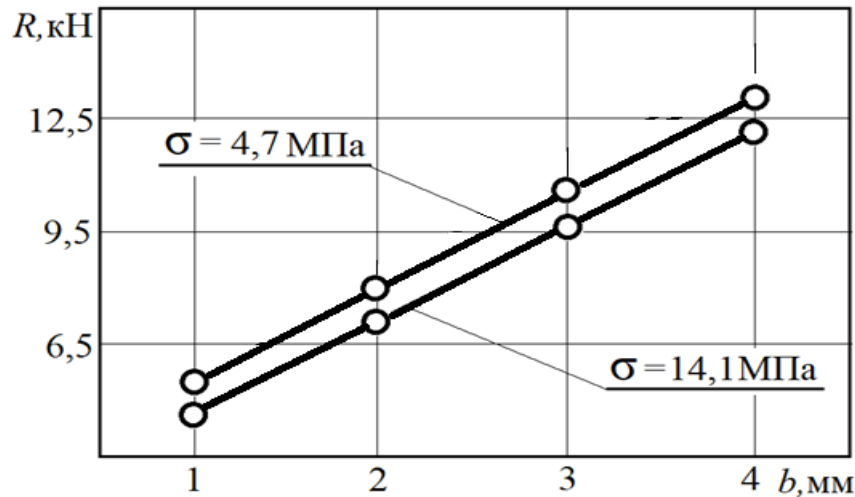


Рисунок 2.6 – Зависимость вертикальной составляющей давления в подшипнике с канавкой от ее ширины и рабочего контактного давления

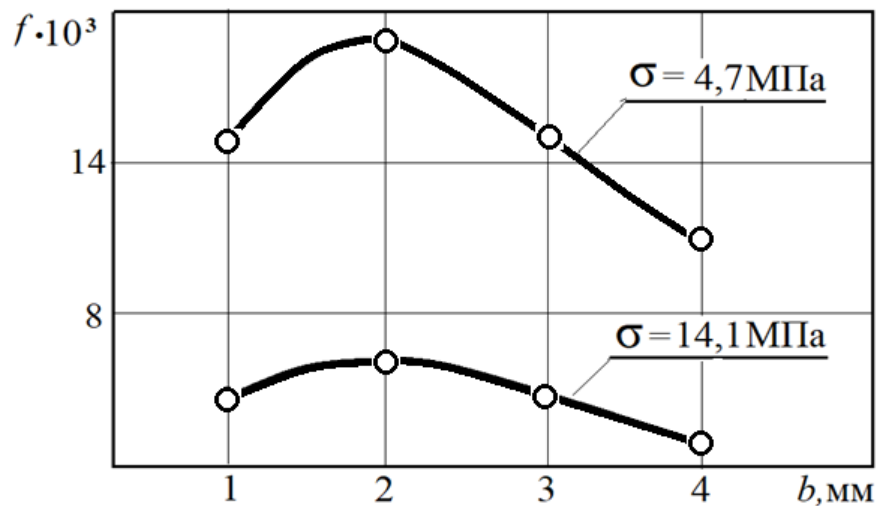


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента трения в подшипнике с канавкой от ее ширины и рабочего контактного давления

При смазывании подшипников скольжения микрополярными смазочными материалами обычно наблюдается снижение коэффициента трения [14]. Однако в данном случае, в сравнении со стандартным вязким смазочным материалом, потери на трение возрастают почти на порядок. В среднем рост в 8,4 раза сохраняется во

всей области исследований независимо от рабочего контактного давления. При этом не изменяются ни максимальная (2 мм), ни рациональная области ширины применяемой маслоподдерживающей канавки (3–4 мм). Неизменным остается и общий качественный характер зависимости коэффициента трения.

В исследованном диапазоне ширины канавки величина вертикальной составляющей давления увеличивается с ее ростом по линейному закону гораздо интенсивнее, чем при смазывании стандартным смазочным материалом. По-видимому, это связано с увеличением вязкостных характеристик микрополярных смазочных материалов. Характерной особенностью изменения вертикальной составляющей является ее небольшое (в среднем 7,5 %) системное снижение с ростом рабочего контактного давления, что, очевидно, связано с влиянием наполнителя микрополярного смазочного материала.

Таким образом, в результате анализа описанных в данном разделе исследований можно заключить, что применение рассматриваемых подшипников является эффективным при смазывании как стандартными, так и микрополярными неньютоновскими жидкими смазочными материалами.

2.3 Подшипники с нестандартной опорной поверхностью

В современном машиностроении довольно широко применяются подшипники с некруглой опорной поверхностью втулки [15]. Подобная конструкция обеспечивает сокращение контактной поверхности, ускорение выхода подшипника на рабочий режим и более стабильное течение процесса гидродинамического смазывания. Исследуем возможности применения рассматриваемых подшипников с адаптированным к условиям трения опорным профилем втулки.

При постановке 4-й задачи рассматривается модель установившегося движения вязкого несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника, у которого на опорную поверхность подшипниковой втулки нанесено полимерное покрытие, имеющее маслоподдерживающую канавку.

Вал вращается с угловой скоростью Ω , а подшипниковая втулка с полимерным покрытием, содержащим канавку, неподвижна. Предполагается, что пространство между эксцентрично расположенным валом и подшипником полностью заполнено смазочным материалом.

Зависимость вязкости смазочного материала от давления задается следующим выражением:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}. \quad (2.54)$$

Движение смазочного материала описывается уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении «для тонкого слоя» и уравнением неразрывности

$$\frac{\partial p_i}{\partial r'} = 0; \quad \mu' \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0. \quad (2.55)$$

В полярной системе координат (см. рисунок 2.2) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнение контура вала, металлической подшипниковой втулки с некруговым профилем опорной поверхности под покрытием и рабочей поверхности полимерного покрытия (с канавкой) запишем в виде

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1 - a' \sin \omega\theta, \quad r' = r_1 - \tilde{h} - a' \sin \omega\theta. \quad (2.56)$$

При этом нанесенное на металлическую подшипниковую втулку полимерное антифрикционное покрытие копирует некруговой профиль втулки.

Граничные условия в рассматриваемом случае с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$ запишутся в виде

$$\begin{aligned} v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 - a' \sin \omega\theta; \\ v_{\theta} = v^*(\theta), \quad v_{r'} = u^*(\theta) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h} - a' \sin \omega\theta; \\ v_{\theta} = r_0 \Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta; \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g.$$

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам

$$r' = r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i; \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u_i;$$

$$p' = p^* p, \quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu_0 \mu; \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}. \quad (2.58)$$

Учитывая выражение (2.58), из (2.55) и (2.57) получим систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \quad (2.59)$$

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta;$$

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = \eta_1 \sin \omega \theta; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при } r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega \theta; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1; \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \quad (2.60)$$

введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$, тогда уравнение (2.59) после преобразования примет вид

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0 \quad (2.61)$$

с соответствующими граничными условиями

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta;$$

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = \eta_1 \sin \omega \theta; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega \theta;$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_1; \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \quad (2.62)$$

Автомодельное решение задачи (2.61) с учетом граничных условий (2.62) ищем в виде

$$v_i = \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta);$$

$$\Psi_i(r, \theta) = \tilde{\Psi}(\xi_i); \quad \xi_2 = \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$V_i(r, \theta) = \tilde{v}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta);$$

$$\xi_{1,3} = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (2.63)$$

Подставляя (2.63) в (2.61) с учетом граничных условий, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_i''' &= a_i; \quad \tilde{v}_i'' = b_i; \quad \tilde{u}'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0; \\ \frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left[\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] \quad (i=1,3); \\ \frac{dz_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right). \end{aligned} \quad (2.64)$$

Система уравнений (2.64) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_i'(0) &= 0, \quad \tilde{\psi}_i'(1) = 0, \quad \tilde{u}_i(1) = -\eta \sin \theta, \quad \tilde{v}_i(1) = 0; \\ \tilde{u}_i(0) &= 0, \quad \tilde{v}_i(0) = 1; \quad \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i = 0. \end{aligned} \quad (2.65)$$

Интегрируя уравнение (2.64) с учетом граничных условий (2.65), в результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_1'(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_1}{2}, \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \left(1 - \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1, \quad u_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} \xi_1 \tilde{v}_1'(\xi_1) d\xi_1; \\ z_1 &= -\alpha \left[b_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_2'(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} + \left(1 - \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1, \quad u_2(\xi_2) = \int_0^{\xi_2} \xi_2 \tilde{v}_2'(\xi_2) d\xi_2; \\ z_2 &= -\alpha \left[b_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} + a_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^3(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_3'(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} + \left(1 - \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1, \quad u_3(\xi_3) = \int_0^{\xi_3} \xi_3 \tilde{v}_3'(\xi_3) d\xi_3; \\ z_3 &= -\alpha \left[b_3 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_3 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \end{aligned} \quad (2.68)$$

Из уравнения $v_i(\xi_i) = b_i \frac{\xi_i^2}{2} + \left(1 - \frac{b_i}{2}\right) \xi_i + 1$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6.$$

Также из равенства $z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ имеем:

$$\begin{aligned} a_1 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right); \\ a_2 &= -6 \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} \right); \\ a_3 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} \right). \end{aligned}$$

Зная значения a_1 , a_2 , a_3 , найдем выражения для гидродинамического давления:

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{-6\alpha}{(1 - \eta_2)^2} \left(-\tilde{\eta} \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) + \frac{\tilde{\eta}_1 \theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right) + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\ z_2 &= -6\alpha \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) - \eta (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\ z_3 &= \frac{-6\alpha}{(1 - \eta_2)^2} \left[\left((\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) - \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \quad (2.69) \end{aligned}$$

Применив разложение в ряд Тейлора для функции $e^{-\alpha p}$ и $e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ и сделав ряд преобразований, получим:

$$p_1 = \frac{p_g}{p^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left(-\tilde{\eta} \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) + \frac{\tilde{\eta}_1 \theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right);$$

$$\begin{aligned}
p_2 = \frac{p_g}{p^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) & \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) - \eta (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right]; \\
p_3 = \frac{p_g}{p^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) & \left((\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \right. \\
& \left. + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) - \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right). \quad (2.70)
\end{aligned}$$

Зная значения гидродинамического давления и скорости, определим значения несущей способности и силы трения.

$$\begin{aligned}
R_x = p^* r_0 & \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \cos \theta d\theta \right] = \\
& = \frac{6\mu_0\omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left\{ \left[\frac{\tilde{\eta}}{4} (\cos 2\theta_1 - 1) + \right. \right. \\
& + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{\omega \sin \omega\theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \omega\theta_1 - \sin \theta_1}{(\omega^2 - 1)} + \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) (\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) \right) \times \\
& \times \frac{1}{(1 - \eta_2)^2} + (\theta_2 \sin \theta_2 - \theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)) \times \\
& \times \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \\
& \times \left(\frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_2 - \sin(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_2 - \sin(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} + \cos \omega\theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) + \right. \\
& + \frac{\eta}{4} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \eta \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \left. \right) + \frac{1}{(1 - \eta)^2} [(-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) \times \\
& \times \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \times \\
& \times \left. \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{\sin 2\pi\omega - \sin(\omega+1)\theta_2}{\omega+1} - \frac{\sin 2\pi\omega + \sin(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} + \cos \omega\theta_2 \sin \theta_2 \right) + \frac{\tilde{\eta}_1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) - \tilde{\eta} \sin^2 \theta_2 \right) \right\}.
\end{aligned}$$

Вертикальную составляющую давления определяем выражением:

$$\begin{aligned}
R_y &= p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \sin \theta d\theta \right] = \\
&= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\frac{\tilde{\eta}}{2} \left(\frac{1}{2} \sin 2\theta_1 - \theta_1 \right) + \right. \\
&+ \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{1 - \cos(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_1 - 1}{2(\omega-1)} + \cos \theta_1 + 1 \right) + \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1)(-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1) \left. \right] \times \\
&\quad \times \frac{1}{(1-\eta_2)^2} + (-\theta_2 \cos \theta_2 + \theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 - \sin \theta_1 + \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)) \times \\
&\quad \times \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \\
&\times \left(\frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{-\cos(\omega+1)\theta_2 + \cos(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_2 - \cos(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} - \cos \omega\theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{\eta}{2} \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + \eta \sin \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) + \frac{1}{(1-\eta_2)^2} \times \\
&\times \left[(-2\pi + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 + \theta_2 (1 - \cos \theta_2)) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) \right] + \\
&\quad + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{-\cos 2\pi\omega + \cos(\omega+1)\theta_2}{2(\omega+1)} + \frac{\cos 2\pi - \cos(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} + \cos \omega\theta_2 (1 - \cos \theta_2) \right) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{\tilde{\eta}}{2} \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) - \tilde{\eta} \sin \theta_2 (1 - \cos \theta_2) \right) \left. \right] \Bigg].
\end{aligned}$$

а силу трения – выражением:

$$\begin{aligned}
L_{\text{тр}} &= \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(0)}{(h(0) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_1'(0)}{(h(0) - \eta_2)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(0)}{h^2(0)} + \frac{\tilde{v}_2'(0)}{h(0)} \right) d\theta + \right. \\
&\quad \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(0)}{(h(0) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_3'(0)}{(h(0) - \eta_2)} \right) d\theta \right] = \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \times \\
&\times \left\{ \frac{-3}{1-\eta_2} \left[\left(1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right) \left(\theta_1 + 2\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta_1 - 1) \right) + \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \times \right. \right. \right. \\
&\times \left. \left. \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) - \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(2\pi - \theta_2 - 2\tilde{\eta} \sin \theta_2 - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) \right) \right] - \right. \\
&\quad \left. - 3 \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \right\} \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left(\theta_2 - \theta_1 + 2\eta(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{2\eta_1}{\omega}(\cos \omega\theta_2 - \cos \omega\theta_1) \right) + \\ & + 2 \left(\frac{1}{1-\eta_2} \left[\theta_1 + 2\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega}(\cos \omega\theta_1 - 1) + 2\pi - \theta_2 - \tilde{\eta} \sin \theta_2 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega}(\cos \omega 2\pi - \cos \omega\theta_2) \right] + \right. \\ & \left. + \theta_2 - \theta_1 + \eta(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{\eta_1}{\omega}(\cos \omega\theta_2 - \cos \omega\theta_1) \right) \}. \quad (2.71) \end{aligned}$$

Численный анализ последнего выражения доказал, что величина коэффициента трения при всех значениях переменных факторов не превышает 0,01. Это свидетельствует о стабильном процессе жидкостного трения в режиме гидродинамического смазывания. Подобный эффект для адаптированного к конкретным условиям трения опорного профиля подшипниковой втулки подтверждается и другими исследованиями [16].

Численный анализ выражения для вертикальной составляющей гидродинамического давления позволил получить график его зависимости от переменных факторов (рисунок 2.8).

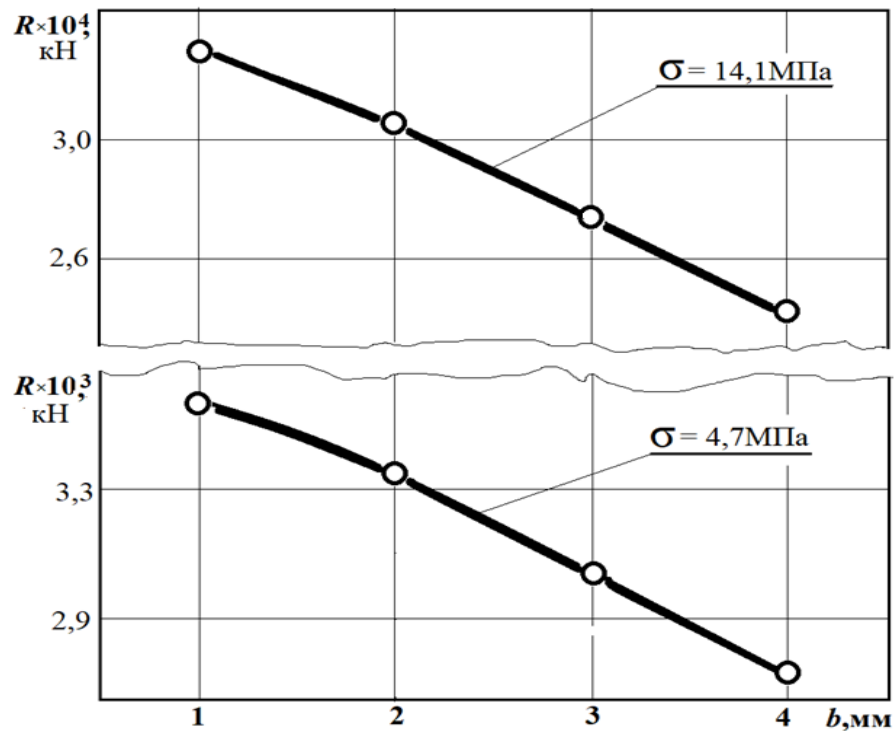


Рисунок 2.8 – Зависимость вертикальной составляющей давления в подшипнике с адаптированным профилем и канавкой от ее ширины и рабочего контактного давления

Как показывает график, зависимость от ширины канавки практически линейна. Особенностью влияния некруглого опорного профиля подшипниковой втулки при смазывании вязким смазочным материалом является уменьшение вертикальной составляющей давления с ростом ширины маслоподдерживающей канавки.

При постановке 5-й задачи рассматривается модель установившегося движения микрополярного несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения.

Вал вращается с угловой скоростью Ω , а подшипниковая втулка неподвижна. Предполагается, что пространство между эксцентрично расположенным валом и подшипником полностью заполнено смазочным материалом, а на подшипниковую втулку нанесено полимерное покрытие.

В принятом расположении полярной системы координат (см. рисунок 2.2) уравнение контура вала, подшипниковой втулки под покрытием с некруговым профилем опорной поверхности и полимерного покрытия, копирующего некруговой опорный профиль втулки, запишем в виде

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1 - a' \sin \omega\theta, \quad r' = r_1 - \tilde{h} - a' \sin \omega\theta. \quad (2.72)$$

Полагаем, что вязкостные характеристики зависят от давления по закону:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha p'}. \quad (2.73)$$

Исходными базовыми уравнениями являются уравнение движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» и уравнение неразрывности:

$$(2\mu' + \kappa') \left(\frac{\partial^2 v_{\theta i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta i}}{\partial r'} \right) = \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'},$$

$$\gamma' \left(\frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) = \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta i}}{\partial r'}, \quad \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v'_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta i}}{\partial \theta} = 0. \quad (2.74)$$

Система уравнений (2.74) решается при следующих граничных условиях:

$$v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 - a' \sin \omega\theta; \quad \theta_1 < \theta < \theta_2;$$

$$v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h} - a' \sin \omega\theta; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$v_{\theta} = r_0 \Omega, \quad v'_{r'} = -\Omega e \sin \theta \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta;$$

$$p(0) = p(\theta) = p_g. \quad (2.75)$$

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам

$$\begin{aligned} r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad r' = (r_1 - \tilde{h}) - \delta r, \\ \delta &= (r_1 - \tilde{h}) - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i; \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u_i; \\ p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega r_0^2}{2\delta^2}, \quad v' = v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma, \\ N^2 &= \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}; \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}. \end{aligned} \quad (2.76)$$

Учитывая выражения (2.76), из (2.74) и (2.75) получим систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{v_i}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{du_i}{dr}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial \theta} + \frac{\partial v_i}{\partial r} = 0; \quad (2.77)$$

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta;$$

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = \eta_1 \sin \omega \theta, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta), \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \quad (2.78)$$

Учитывая малость зазора, осредняем второе уравнение системы (2.77) по толщине смазочного слоя:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0. \quad (2.79)$$

Введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$ и в результате ряда преобразований система уравнений (2.79) примет вид

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \quad v_i = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh) \quad (2.80)$$

с соответствующими граничными условиями

$$\begin{aligned}
v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta; \\
v &= v^*(0), \quad u = u^*(0) \quad \text{при } r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\
v &= 0; \quad u = 0 \quad \text{при } r = \eta_1 \sin \omega \theta, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
z(0) &= z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}.
\end{aligned} \tag{2.81}$$

Автомодельное решение задачи (2.80) с учетом граничных условий ищем в виде

$$\begin{aligned}
v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\
\psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = \tilde{v}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\
\xi_2 &= \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
\xi_{1,3} &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi.
\end{aligned} \tag{2.82}$$

Подставляя (2.82) в (2.80), с учетом граничных условий (2.81) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_i''' &= a_i; \quad \tilde{u}_i'' = b_i - \frac{N^2}{2N_1}(2\xi_i - 1); \quad \tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0; \\
\frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right) \quad i = 1, 3; \\
\frac{dz_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right).
\end{aligned} \tag{2.83}$$

Система уравнений (2.83) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned}
v_i(0) &= 0; \quad \tilde{\psi}_i'(0) = 0, \quad \tilde{\psi}_i'(1) = 0, \quad \tilde{u}_i'(1) = -\eta \sin \theta; \quad \tilde{v}_i'(1) = 0; \\
v_i(1) &= 0; \quad \tilde{u}_i(0) = 0; \quad \tilde{v}_i(0) = 1; \quad \int_0^1 \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i = 0; \\
\int_0^{\xi_i} \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0; \quad z(\theta) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}.
\end{aligned} \tag{2.84}$$

Интегрируя уравнение (2.83) с учетом граничных условий (2.84), в результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\tilde{\Psi}'_i(\xi_i) &= a_1 \frac{\xi_i}{2}(\xi_i - 1), \quad \tilde{u}_i(\xi_i) = b_1 \frac{\xi_i^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_i^3}{3} - \frac{\xi_i^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_i; \\
z_1 &= -\alpha \left[b_1 \int_0^\theta \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_1 \int_0^\theta \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\
\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2}(\xi_2 - 1), \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \\
z_2 &= -\alpha \left[b_2 \int_{\theta_1}^\theta \frac{d\theta}{h^2(\theta)} + a_2 \int_{\theta_1}^\theta \frac{d\theta}{h^3(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\
\tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2}(\xi_3 - 1), \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1; \\
z_3 &= -\alpha \left[b_3 \int_{\theta_2}^\theta \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + a_3 \int_0^\theta \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \tag{2.84}
\end{aligned}$$

Из уравнения $\tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}'_i(\xi_i) = 0$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6. \tag{2.86}$$

Из равенства $z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ имеем:

$$\begin{aligned}
a_1 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right); \\
a_2 &= -6 \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} \right), \\
a_3 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} \right). \tag{2.87}
\end{aligned}$$

Зная значения a_1 , a_2 , a_3 , найдем выражения для гидродинамического давления:

$$\begin{aligned}
z_1 &= \frac{-6\alpha}{(1 - \eta_2)^2} \left(-\tilde{\eta} \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) - \frac{\tilde{\eta}_1 \theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right) + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\
z_2 &= -6\alpha \left[(\theta - \theta_1) \left(\left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) \right) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) \left(\frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) - \eta (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \Big] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}; \\
z_3 = & - \frac{6\alpha}{(1-\eta_2)^2} \left[(\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) \right] + \\
& + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) - \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \Big] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \quad (2.88)
\end{aligned}$$

Применив разложение ряда Тейлора для функции $e^{-\alpha p}$ и $e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$ и сделав ряд преобразований, получим:

$$\begin{aligned}
p_1 = & \frac{p_g}{p^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left(-\tilde{\eta} \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) + \frac{\tilde{\eta}_1 \theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right); \\
p_2 = & \frac{p_g}{p^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) \left(\frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) + \eta (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right]; \\
p_3 = & \frac{p_g}{p^*} + 6 \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[(\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) + \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right]. \quad (2.89)
\end{aligned}$$

Зная значения гидродинамического давления и скорости, находим аналитические выражения для несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned}
R_x = & p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \cos \theta d\theta \right] = \\
= & \frac{6(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega r_0^3}{2\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left\{ \left[\frac{\tilde{\eta}}{4} (\cos 2\theta_1 - 1) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{\omega \sin \omega\theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \omega\theta_1}{(\omega^2 - 1)} - \sin \theta_1 \right) + \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) (\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) \right] \right\} \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{1}{(1-\eta_2)^2} + (\theta_2 \sin \theta_2 - \theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)) \times \\
& \times \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) \times \\
& \times \left(\frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_2 - \sin(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_2 - \sin(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} + \cos \omega\theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\eta}{4} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \eta \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) + \frac{1}{(1-\eta)^2} [(-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) \times \\
& \times \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2}\right) \times \\
& \times \left. \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{\sin 2\pi\omega - \sin(\omega+1)\theta_2}{\omega+1} - \frac{\sin 2\pi\omega + \sin(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} + \cos \omega\theta_2 \sin \theta_2 \right) + \frac{\tilde{\eta}_1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) - \tilde{\eta} \sin^2 \theta_2 \right) \right] \Bigg\}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_y &= p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \sin \theta d\theta \right] = \\
&= \frac{6(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega(r_0 - \tilde{h})}{2\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\frac{\tilde{\eta}}{2} \left(\frac{1}{2} \sin 2\theta_1 - \theta_1 \right) + \right. \\
&+ \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{1 - \cos(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_1 - 1}{2(\omega-1)} + \cos \theta_1 + 1 \right) + \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) (-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1) \Bigg] \times \\
& \times \frac{1}{(1-\eta_2)^2} + (-\theta_2 \cos \theta_2 + \theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 - \sin \theta_1 + \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)) \times \\
& \times \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) \times \\
& \times \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{-\cos(\omega+1)\theta_2 + \cos(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_2 - \cos(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} + \cos \omega\theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) - \\
& - \frac{\eta}{2} \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + \eta \sin \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \frac{1}{(1-\eta_2)^2} \times \\
& \times \left[(-2\pi + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 + \theta_2 (1 - \cos \theta_2)) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{-\cos 2\pi\omega + \cos(\omega+1)\theta_2}{2(\omega+1)} + \frac{\cos 2\pi - \cos(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} \right) + \cos \omega\theta_2 (1 - \cos \theta_2) \right) - \\
& \quad \left. - \frac{\tilde{\eta}_1}{2} \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) - \tilde{\eta}_1 \sin \theta_2 (1 - \cos \theta_2) \right) \Bigg] \Bigg\}. \\
L_{\text{тр}} = & \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}_1'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{u}_2'(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \right. \\
& \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(\theta)}{h(\theta)^2} + \frac{\tilde{u}_3'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta \right] = \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \times \\
& \times \left\{ \frac{-3}{1 - \eta_2} \left[\left(1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right) \left(\theta_1 + 2\tilde{\eta}_1 \sin \theta_1 - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta_1 - 1) \right) + \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \times \right. \right. \right. \\
& \times \left. \left. \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi} \sin \theta_2 \right) - \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(2\pi - \theta_2 - 2\tilde{\eta}_1 \sin \theta_2 - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) \right) \right] - \\
& - 3 \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) + \frac{\eta_1}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \\
& \times \left(\theta_2 - \theta_1 + 2\eta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta_2 - \cos \omega\theta_1) \right) + \\
& + \left(\frac{N^2}{12N_1} + 4 \right) \left(\frac{1}{1 - \eta_2} \left[\theta_1 + 2\tilde{\eta}_1 \sin \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta_1 - 1) + 2\pi - \theta_2 - \tilde{\eta}_1 \sin \theta_2 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega 2\pi - \cos \omega\theta_2) \right] + \right. \\
& \left. + \theta_2 - \theta_1 + \eta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta_2 - \cos \omega\theta_1) \right) \Bigg\}. \quad (2.90)
\end{aligned}$$

Численный анализ выражения, определяющего величину коэффициента трения подшипника с адаптированным к условиям трения опорным профилем, смазываемым микрополярным смазочным материалом, показал соответствие работы подшипника условиям гидродинамического смазывания ($f < 0,1$).

Проведенный численный анализ выражения, определяющего величину вертикальной составляющей давления, позволил построить график влияния на этот параметр принятых переменных факторов (рисунок 2.9). Полученная зависимость аналогична предыдущим результатам для подшипника с адаптированным опорным профилем.

Таким образом, подшипники с полимерным фторопластсодержащим антифрикционным покрытием при наличии маслоподдерживающей канавки способны работать как при граничных, так и при жидкостных видах смазывания.

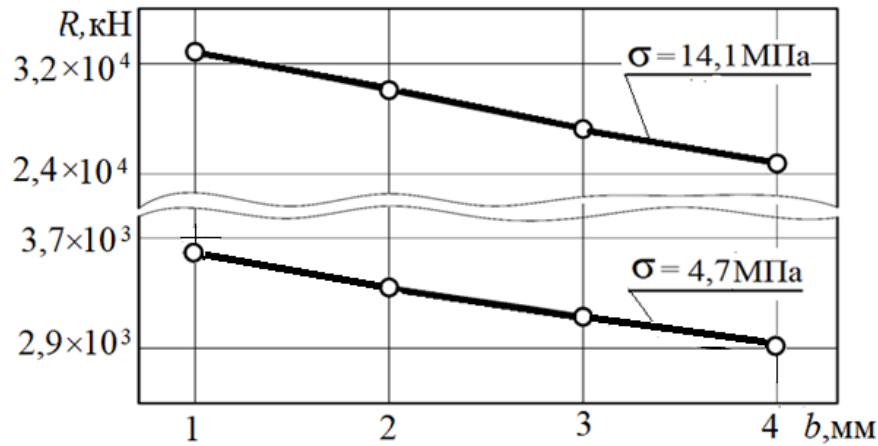


Рисунок 2.9 – Зависимость составляющей давления в подшипнике с адаптированным профилем и канавкой от ее ширины и рабочего контактного давления

При постановке 6-й задачи рассматривается модель турбулентного движения истинно вязкого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника, как и в задаче 2. При этом дополнительно учитывается влияние температуры на рабочие характеристики. Влияние турбулентности будем учитывать путем введения коэффициента j : $j = 0,0139 \text{ Re}^{0,657}$, $j > 1$, где $\text{Re} = \rho \Omega \delta^2 / \mu_0$.

Зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры задается следующим выражением:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'} \quad (2.91)$$

Движение смазочного материала описывается уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении для «тонкого слоя» и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r'} = 0; \quad j \mu' \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0. \quad (2.92)$$

В полярной системе координат (см. рисунок 2.2) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнения контура вала, подшипниковой втулки и поверхности подшипниковой втулки с полимерным покрытием запишем в виде

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}. \quad (2.93)$$

Граничные условия в рассматриваемом случае с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$ запишутся в виде

$$\begin{aligned} v_\theta &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1; \\ v_\theta &= v^*(\theta), \quad v_{r'} = u^*(\theta) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h}; \\ v_\theta &= r_0\Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta; \\ p'(0) &= p'(\theta) = p_g. \end{aligned} \quad (2.94)$$

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам

$$\begin{aligned} r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i; \quad v_{r'} = \Omega \delta u_i; \\ T' &= T^* \cdot T, \quad T^* = \frac{\mu_0 \Omega^2 r_0^2}{I \lambda}, \quad p' = p^* p, \quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2}, \\ \mu' &= \mu_0 \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}, \quad \beta = T^* \cdot \beta'. \end{aligned} \quad (2.95)$$

Учитывая выражение (2.95), из (2.92) и (2.94) получим систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0; \quad (2.96)$$

$$\begin{aligned} v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta = h(\theta); \\ v &= 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = 0; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ v &= v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при} \quad r = \eta_2; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1; \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \end{aligned}$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \quad (2.97)$$

автомодельное решение задачи (2.96) с учетом граничных условий (2.97) ищем в виде

$$\begin{aligned}
v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); & u_i &= -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\
\psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}(\xi_i); & \xi_i &= \frac{r}{1 - \eta \cos \theta} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
V_i(r, \theta) &= \tilde{v}_i(\xi_i); & U_i(r, \theta) &= -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\
\xi_i &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi.
\end{aligned} \tag{2.98}$$

Подставляя (2.98) в (2.96) с учетом граничных условий, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_i''' &= a_i; & \tilde{v}_i'' &= b_i; & \tilde{u}'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}'_i(\xi_i) &= 0; \\
\frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta} &= \left[\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right], & (i=1,3), & h(\theta) &= 1 - \eta \cos \theta; \\
\frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_2}{d\theta} &= \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right).
\end{aligned} \tag{2.99}$$

Система уравнений (2.99) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}'_i(0) &= 0, & \tilde{\psi}'_i(1) &= 0, & \tilde{u}_i(1) &= -\eta \sin \theta, & \tilde{v}_i(1) &= 0; \\
\tilde{u}_i(0) &= 0, & \tilde{v}_i(0) &= 1; & \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0.
\end{aligned} \tag{2.100}$$

Интегрируя уравнение (2.99) для поля скоростей с учетом граничных условий (2.100), получим:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}'_1(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_1}{2}, & \tilde{v}_1(\xi_1) &= b_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \left(1 - \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1, & u_1(\xi_1) &= \int_0^{\xi_1} \xi_1 \tilde{v}'_1(\xi_1) d\xi_1; \\
\tilde{\psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, & \tilde{v}_2(\xi_2) &= b_2 \frac{\xi_2^2}{2} + \left(1 - \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1, & u_2(\xi_2) &= \int_0^{\xi_2} \xi_2 \tilde{v}'_2(\xi_2) d\xi_2; \\
\tilde{\psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, & \tilde{v}_3(\xi_3) &= b_3 \frac{\xi_3^2}{2} + \left(1 - \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1, & u_3(\xi_3) &= \int_0^{\xi_3} \xi_3 \tilde{v}'_3(\xi_3) d\xi_3.
\end{aligned} \tag{2.101}$$

Из уравнения $v_i(\xi_i) = b_i \frac{\xi_i^2}{2} + \left(1 - \frac{b_i}{2}\right) \xi_i + 1$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6. \tag{2.102}$$

Также из равенства $p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P^*}$ имеем:

$$\begin{aligned} a_1 &= -12(1 - \eta_2) \frac{1 - \tilde{\eta}^2}{2 + \tilde{\eta}^2}; \\ a_2 &= -6 \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right); \\ a_3 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right), \end{aligned} \quad (2.103)$$

где $\tilde{\eta} = \frac{\eta}{\eta_2}$.

Безразмерное гидродинамическое давление в смазочном слое определим из уравнения

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3; \\ \frac{1}{j\mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)}. \end{aligned} \quad (2.104)$$

Для решения уравнения (2.104) сначала определим $\mu(\theta)$ как функцию, зависящую от θ .

При определении $\mu(\theta)$ используем выражение, отражающее закономерность изменения скорости диссипации энергии смазочной среды:

$$\frac{dH'}{d\theta} = \frac{2\mu_0\mu\Omega^2 r_0^2 h(\theta)}{\delta} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi)}{h^2(\theta)} \right)^2 d\xi. \quad (2.105)$$

Тогда повышение температуры определяется выражением:

$$\frac{dT'}{d\theta} = \frac{dH'}{d\theta} \cdot \frac{1}{C_p Q} = \frac{1}{C_p Q} \cdot \frac{2\mu_0\mu\Omega^2 r_0^2 h(\theta)}{\delta} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi)}{h^2(\theta)} \right)^2 d\xi, \quad (2.106)$$

где Q – расход смазочного материала в единицу времени; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; $h(\theta)$ – толщина масляной пленки.

$$Q_i = \Omega r_0 \delta \int_0^1 \tilde{\psi}'(\xi) d\xi = -\Omega r_0 \delta \frac{a_i}{12}. \quad (2.107)$$

Продифференцируем по θ выражение $\mu = e^{\alpha p - \beta T}$, получим

$$j \frac{d\mu}{d\theta} = \mu(\theta) \left(\alpha \frac{dp}{d\theta} - \beta \frac{dT}{d\theta} \right) = \mu(\theta) \alpha \frac{dp}{d\theta} + \frac{\mu^2(\theta) \beta 24 \mu_0 \Omega r_0 h(\theta)}{T^* C_p \delta^2 a_i} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi)}{h^2(\theta)} \right)^2 d\xi. \quad (2.108)$$

С учетом уравнения (2.104) для определения $\mu(\theta)$ приходим к следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\mu_i^2(\theta)} \frac{d\mu_i}{d\theta} &= \frac{\alpha b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\alpha a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} + \\ &+ \frac{24\mu_0 \beta \Omega r_0 (h(\theta) - \eta_2)}{T^* C_p \delta^2 a_i} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right)^2 d\xi, \quad i=1,3; \\ \frac{1}{j\mu_2^2(\theta)} \frac{d\mu_2}{d\theta} &= \frac{\alpha b_2}{h^2(\theta)} + \frac{\alpha a_i}{h^3(\theta)} + \frac{24\mu_0 \beta \Omega r_0 h(\theta)}{T^* C_p \delta^2 a_2} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi. \end{aligned} \quad (2.109)$$

Интегрируя эти уравнения, получим:

$$\begin{aligned} j\mu_i(\theta) &= \frac{1}{1 - \beta K_i [\Delta_1 I_3(\theta) + \Delta_2 I_2(\theta) + \Delta_3 I_1(\theta)] - \alpha [b_i I_2(\theta) + a_i I_3(\theta)]}, \quad i=1,3; \\ j\mu_2(\theta) &= \frac{1}{1 - \beta K_2 [\Delta_1 I_3(\theta) + \Delta_2 I_2(\theta) + \Delta_3 I_1(\theta)] - \alpha [b_1 I_2(\theta) + a_2 I_3(\theta)]}, \end{aligned} \quad (2.110)$$

где $K_i = \frac{24\mu_0 \Omega r_0}{T^* C_p \delta^2 a_i}$; $\Delta_1 = \int_0^1 (\tilde{\psi}''(\xi_i))^2 d\xi_i = \frac{a_i^2}{12}$;

$$\Delta_2 = 2 \int_0^1 (\tilde{\psi}''(\xi_i) \cdot \tilde{v}'(\xi_i)) d\xi_i = \frac{1}{6} b_i a_i = a_i;$$

$$\Delta_3 = \int_0^1 (\tilde{v}'(\xi_i))^2 d\xi_i = 4; \quad I_{K_i} = \int_0^\theta \frac{d\theta}{h_i^K(\theta)}.$$

Решая уравнение (2.110) относительно $\mu(\theta)$ с точностью $O(\eta^2)$, $O(\eta_1^2)$, $O(\eta_2^2)$, $O(\tilde{\eta}^2)$, $O(\eta\eta_1)$, $O(\eta\tilde{\eta})$, $O(\eta_2\eta)$, $O(\eta_2\tilde{\eta})$, $O(\tilde{\eta}\eta_2)$ включительно, получим следующие аналитические выражения:

$$\begin{aligned}
j\mu_1(\theta) &= 1 + \beta K_1 \left[4\theta + 28\eta \sin \theta - 24\tilde{\eta}^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) - 600\tilde{\eta}^2 - 200\eta_2 - 40\eta_2 \eta \sin \theta \right] - \\
&\quad - 3\alpha \left(6\theta + 10\eta \sin \theta - 11\tilde{\eta}^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + 12\eta_2 \theta + 40\eta_2 \eta \sin \theta - 70\eta_2^2 \theta + 12\tilde{\eta}^2 \theta \right). \\
j\mu_2(\theta) &= 1 + \beta K_2 \left[\theta + \eta \sin \theta - \frac{6\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \sin \theta - \frac{3}{2} \eta^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + \frac{3\eta^2 \theta}{\theta_1^2} \sin^2 \theta_1 \right] + \\
&\quad + 6\alpha \left[-\eta \sin \theta + \eta^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + \frac{\eta \theta \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{3\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \sin \theta \right]. \\
j\mu_3(\theta) &= 1 + \beta K_3 \left[\theta + \eta \sin \theta + \eta_2 \theta - 3\eta_2 \eta \sin \theta + \frac{3\tilde{\eta}^2 \theta}{\theta_2^2} \sin^2 \theta_2 - 6\eta_2^2 \theta - \frac{6\eta \tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \sin \theta - \right. \\
&\quad - 12 \frac{\tilde{\eta} \eta_2 \theta}{\theta_2} \sin \theta_2 - \frac{3}{2} \tilde{\eta} \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + 4\eta_2 \tilde{\eta} \sin \theta \left. \right] - 6\alpha \left[-\eta \sin \theta + \tilde{\eta}^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) - \right. \\
&\quad \left. - 4\eta_2 \eta \sin \theta + \frac{\tilde{\eta} \theta \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{3\eta \tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta \sin \theta_2 + \frac{2\eta \tilde{\eta} \theta}{\theta_2} \sin \theta_2 \right]. \quad (2.111)
\end{aligned}$$

С учетом (2.104) и (2.111) безразмерное гидродинамическое давление определяется выражением:

$$\begin{aligned}
p_i &= \mu_i(\theta) (b_i I_2(\theta) + a_i I_3(\theta)) + \frac{P_g}{P^*}. \\
p_1(\theta) &= -3j \left(\theta (6 - 11\tilde{\eta}^2 + 12\eta_2 - 70\eta_2^2 + 12\tilde{\eta}^2) + \sin \theta (10\eta + 40\eta_2 \eta) - \frac{11}{2} \tilde{\eta}^2 \sin 2\theta \right) - \\
&\quad - 3\beta K_1 \left[\theta^2 (24 - 72\eta_2 - 280\eta_2^2 - 600\tilde{\eta}^2) + \theta \sin \theta (208\eta + 56\eta_2 \eta) - \right. \\
&\quad \left. - 144\tilde{\eta}^2 \theta \sin 2\theta + 280\eta^2 \sin^2 \theta \right] + 9\alpha \left[\theta^2 (36 + 72\tilde{\eta}^2 - 696\eta_2^2 + 132\tilde{\eta}^2 + 144\eta_2) + \right. \\
&\quad \left. + \theta \sin \theta (720\eta_2 \eta + 120\eta) + 100\eta^2 \sin^2 \theta - 132\tilde{\eta}^2 \theta \sin 2\theta \right] + \frac{P_g}{P^*}; \\
p_2(\theta) &= j\theta \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \sin \theta \left(-6\eta + \frac{18\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) + 3\eta^2 \sin 2\theta + \\
&\quad + \beta K_2 \left[\theta^2 + \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \theta \sin \theta \left(-6\eta + \frac{18\eta \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +3\eta^2\theta\sin 2\theta - \sin^2\theta\left(6\eta^2 - \frac{18\eta^2}{\theta_1}\sin\theta_1\right)\Big] + 36\alpha\left[\sin^2\theta\left(\eta^2 + \frac{9\eta^2}{\theta_1^2}\sin^2\theta_1 - \frac{6\eta^2}{\theta_1}\sin\theta_1\right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\eta^2\theta^2\sin^2\theta_1}{\theta_1^2} - \theta\sin\theta\left(\frac{2\eta^2\sin\theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2\sin^2\theta_1}{\theta_1^2}\right)\right] + \frac{p_g}{p^*}; \\
p_3(\theta) & = 6j\sin\theta\left(\eta + 4\eta_2\eta - \frac{3\eta\tilde{\eta}}{\theta_2}\sin\theta_2\right) - 6\theta\left(\tilde{\eta}^2 + \frac{\tilde{\eta}\sin\theta_2}{\theta_2} + \frac{2\eta\tilde{\eta}\sin\theta_2}{\theta_2}\right) - \\
& - 3\tilde{\eta}^2\sin 2\theta - \beta K_3\left[\theta^2\left(6\tilde{\eta}^2 + \frac{6\tilde{\eta}\sin\theta_2}{\theta_2} + \frac{12\eta\tilde{\eta}\sin\theta_2}{\theta_2} + \frac{6\tilde{\eta}\eta_2\sin\theta_2}{\theta_2} - \frac{9\tilde{\eta}^2\sin\theta_2}{\theta_2}\right) - \right. \\
& \quad \left. - 6\eta\sin\theta - \theta\sin\theta\left(30\eta_2\eta - \frac{24\eta\tilde{\eta}}{\theta_2}\sin\theta_2 - 9\tilde{\eta}\eta\right) + \right. \\
& \quad \left. + \theta\sin 2\theta\left(3\tilde{\eta}^2 - \frac{9\tilde{\eta}^2\sin\theta_2}{2\theta_2}\right) - 6\eta^2\sin^2\theta + \frac{9}{2}\tilde{\eta}\eta\sin\theta\sin 2\theta\right] + \\
& \quad + 36\alpha\left[\eta^2\sin^2\theta + \frac{\tilde{\eta}^2\theta^2}{\theta_2^2}\sin^2\theta_2 - \frac{2\eta\tilde{\eta}\theta}{\theta_2}\sin\theta_2\sin 2\theta\right] + \frac{p_g}{p^*}. \tag{2.112}
\end{aligned}$$

Для определения несущей способности и силы трения используем формулу (2.112):

$$\begin{aligned}
R_x & = p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos\theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos\theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos\theta d\theta \right] = \\
& = \frac{j\mu_0\Omega r_0^3}{8^2} \left\{ -3\left[(\theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_1 - 1)(6 - 11\tilde{\eta}^2 + 12\eta_2 - 70\eta_2^2 + 12\tilde{\eta}^2) - \right. \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_1 - 1)(10\eta + 40\eta_2\eta) + \frac{11}{4}\tilde{\eta}^2\left(\frac{1}{3}(\cos 3\theta_1 - 1) + \cos\theta_1 - 1\right) \right] - 3\beta K_1\left[(\theta_1^2\sin\theta_1 + \right. \\
& \quad \left. + 2\theta_1\cos\theta_1 + 2\sin\theta_1)(24 - 72\eta_2 - 280\eta_2^2 - 600\tilde{\eta}^2) - \frac{1}{4}(208\eta + 56\eta_2\eta)(\theta_1\cos 2\theta_1 - \sin 2\theta_1) + \right. \\
& \quad \left. + 72\tilde{\eta}^2\left(\frac{\theta_1}{3}\cos 3\theta_1 - \frac{1}{9}\sin 3\theta_1 + \theta_1\cos\theta_1 - \sin\theta_1\right) + 140\eta^2\left(\theta_1 - \frac{1}{2}\sin 2\theta_1\right) \right] + 9\alpha\left[(\theta_1^2\sin\theta_1 + \right. \\
& \quad \left. + 2\theta_1\cos\theta_1 + 2\sin\theta_1)(36 + 72\tilde{\eta}^2 - 696\eta_2^2 + 144\eta_2 - 132\tilde{\eta}^2) - \right. \\
& \quad \left. - (180\eta_2\eta + 30\eta)(\theta_1\cos 2\theta_1 - \sin 2\theta_1) + 50\eta^2\left(\cos\theta_1 - 1 - \frac{1}{2}(\cos 3\theta_1 - 2 + \cos\theta_1)\right) \right] - \\
& \quad \left. - 116\tilde{\eta}^2\left(\frac{\theta_1}{3}\cos 3\theta_1 + \frac{1}{9}\sin 3\theta_1 - \theta_1\cos\theta_1 + \sin\theta_1\right) \right] + (\theta_2\sin\theta_2 - \theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_2 - \cos\theta_1)\left(6\eta^2 + \frac{6\eta\sin\theta_1}{\theta_1}\right) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) \left(-6\eta + \frac{18\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) + \frac{3}{2} \eta^2 \left(-\frac{1}{3}(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1) - \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \right) + \\
& + \beta K_2 \left[\left(\theta_2^2 \sin \theta_2 - \theta_1^2 \sin \theta_1 + 2\theta_2 \cos \theta_2 - 2\theta_1 \cos \theta_1 + 2(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{4}(\theta_2 \cos 2\theta_2 - \theta_1 \cos 2\theta_1 - \sin 2\theta_2 + \sin 2\theta_1) \left(6\eta - \frac{18\eta \sin \theta_1}{\theta_1} - \frac{6\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{3}{2} \eta^2 \left(-\frac{\theta_2}{3} \cos 3\theta_2 + \frac{\theta_1}{3} \cos 3\theta_1 + \frac{1}{9}(\sin 3\theta_2 - \sin 3\theta_1) - \theta_2 \cos \theta_2 + \theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \right) - \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{2} \left(\cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) \left(6\eta^2 - \frac{18\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] + \\
& + 36\alpha \left[\frac{1}{2} \left(\cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) \left(\eta^2 + \frac{9\eta^2}{\theta_1^2} \sin^2 \theta_1 - \frac{6\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\eta^2 \sin^2 \theta_1}{\theta_1^2} (\theta_2^2 \sin \theta_2 - \theta_1^2 \sin \theta_1 + 2(\theta_2 \cos \theta_2 - \theta_1 \cos \theta_1) + 2(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{4}(\theta_2 \cos 2\theta_2 - \theta_1 \cos 2\theta_1 - \sin 2\theta_2 + \sin 2\theta_1) \left(\frac{2\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2 \sin^2 \theta_1}{\theta_1^2} \right) \right] + \\
& \quad + \frac{3}{2}(1 - \cos 2\theta_2) \left(\eta + 4\eta_2 \eta - \frac{3\eta \tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) - (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) \times \\
& \quad \times \left(\tilde{\eta}^2 + \frac{\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{2\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} \right) - \frac{3}{2} \tilde{\eta}^2 \left(-\frac{8\pi}{3} - \frac{\theta_2}{3} \cos 3\theta_2 - \frac{1}{9} \sin 3\theta_2 + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 \right) - \\
& - \beta K_3 \left[(-\theta_2^2 \sin \theta_2 + 2\pi - 2\theta_2 \cos \theta_2 - 2\sin \theta_2) \left(6\tilde{\eta}^2 + \frac{6\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{12\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{6\eta \eta_2 \sin \theta_2}{\theta_2} - \frac{9\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{3}{2} \eta (1 - \cos 2\theta_2) + \frac{1}{4} (2\pi - \theta_2 \cos 2\theta_2 + \sin 2\theta_2) \left(30\eta_2 \eta - \frac{24\eta \tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 - 9\tilde{\eta} \eta \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{2} \left(-\frac{8\pi}{3} + \frac{\theta_2}{3} \cos 3\theta_2 - \frac{1}{9} \sin 3\theta_2 + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 \right) \left(3\tilde{\eta}^2 - \frac{9\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{2\theta_2} \right) - \right. \\
& \quad \left. - 3\eta^2 \left(-\sin \theta_2 + \frac{1}{6} \sin 3\theta_2 + \frac{1}{2} \sin \theta_2 \right) + \frac{9}{8} \tilde{\eta} \eta \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 8\theta_2 \right) \right] + \\
& + 36\alpha \left[\frac{\eta^2}{2} \left(-\sin \theta_2 + \frac{1}{6} \sin 3\theta_2 + \frac{1}{2} \sin \theta_2 \right) + \frac{\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2^2} (-\theta_2^2 \sin \theta_2 + 4\pi - 2\theta_2 \cos \theta_2 - 2\sin \theta_2) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{2\theta_2} (2\pi - 2\theta_2 \cos 2\theta_2 + \sin 2\theta_2) \right].
\end{aligned}$$

$$R_y = p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{j\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2} \left\{ -3 \left[(6 - 11\tilde{\eta}^2 + 12\eta_2 - 70\eta_2^2 + 12\tilde{\eta}^2) (-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1) + \left(\theta_1 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) \times \right. \right. \\
&\times (5\eta + 20\eta_2\eta) - \frac{11\tilde{\eta}^2}{4} \left(\sin \theta_1 - \frac{1}{3} \sin 3\theta_1 \right) \left. \right] - 3\beta K_1 \left[(-\theta_1^2 \cos \theta_1 + 2\theta_1 \sin \theta_1 + 2(\cos \theta_1 - 1)) \times \right. \\
&\times (24 - 72\eta_2 - 28\eta_2^2 - 600\tilde{\eta}^2) + (52\eta + 14\eta_2\eta) \left(\theta_1^2 - \theta_1 \sin 2\theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 2\theta_1 - 1) \right) - \\
&\quad - 72\tilde{\eta}^2 \left(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1 - \frac{1}{3} \theta_1 \sin 3\theta_1 - \frac{2}{9}(\cos 3\theta_1 - 1) \right) + \\
&+ 140\eta^2 \left(\frac{1}{6}(\cos 3\theta_1 - 1) + \frac{3}{2}(\cos \theta_1 - 1) \right) \left. \right] + 9\alpha \left[(-\theta_1^2 \cos \theta_1 + 2\theta_1 \sin \theta_1 + 2(\cos \theta_1 - 1)) \times \right. \\
&\times (36 + 72\tilde{\eta}^2 - 696\eta_2^2 - 132\tilde{\eta}^2 + 144\eta_2) + \left(\theta_1^2 - \theta_1 \sin 2\theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 2\theta_1 - 1) \right) \times \\
&\quad \times (90\eta_2\eta + 15\eta) + 50\eta^2 \left(\frac{1}{6}(\cos 3\theta_1 - 1) + \frac{3}{2}(\cos \theta_1 - 1) \right) - \\
&\quad - 66\tilde{\eta}^2 \left(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1 - \frac{1}{3} \theta_1 \sin 3\theta_1 - \frac{2}{9}(\cos 3\theta_1 - 1) \right) \left. \right] + \\
&\quad + \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) (\theta_2 \cos \theta_2 - \theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1) + \left(-3\eta + \frac{9\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \times \\
&\quad \times \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + \frac{3\eta^2}{2} \left(\sin \theta_2 - \sin \theta_1 - \frac{1}{3}(\sin 3\theta_2 - \sin 3\theta_1) \right) + \\
&+ \beta K_2 \left[(-\theta_2 \cos \theta_2 + \theta_1^2 \cos \theta_1 + 2\theta_2 \sin \theta_2 - 2\theta_1 \sin \theta_1 + 2(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)) \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \right. \\
&+ \frac{1}{4} \left(\theta_2^2 - \theta_1^2 - \theta_2 \sin 2\theta_2 + \theta_1 \sin 2\theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) \right) \left(-6\eta + \frac{18\eta \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + \\
&+ \frac{3}{2} \eta^2 \left(\theta_2 \sin \theta_2 - \theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \frac{1}{3}(\theta_2 \sin 3\theta_2 - \theta_1 \sin 3\theta_1) - \frac{2}{9}(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1) \right) - \\
&\quad - \frac{1}{2} \left(\cos \theta_2 - \cos \theta_1 + \frac{1}{6}(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1) + \frac{1}{2}(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) \left(6\eta^2 - \frac{18\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \left. \right] + \\
&\quad + 36\alpha \left[\frac{1}{2} \left(\cos \theta_2 - \cos \theta_1 + \frac{1}{6}(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1) + \frac{1}{2}(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) \times \right. \\
&\times \left(\eta^2 + \frac{9\eta^2}{\theta_1^2} \sin^2 \theta_1 - \frac{6\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) + \frac{\eta^2 \sin^2 \theta_1}{\theta_1^2} (-\theta_2^2 \cos \theta_2 + \theta_1^2 \cos \theta_1 + 2(\theta_2 \sin \theta_2 - \theta_1 \sin \theta_1) + \\
&\quad + 2(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)) - \frac{1}{4} \left(\theta_2^2 - \theta_1^2 - \theta_2 \sin 2\theta_2 + \theta_1 \sin 2\theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) \right) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{2\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2 \sin^2 \theta_1}{\theta_1^2} \right) \Bigg] + 3 \left(\eta + 4\eta_2 \eta - \frac{3\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} \right) \left(2\pi - \theta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) + \\
& + 6(2\pi - \theta_2 \cos \theta_2 + \sin \theta_2) \left(\tilde{\eta}^2 + \frac{\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{2\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} \right) - \frac{3\tilde{\eta}^2}{2} \left(-\sin \theta_2 + \frac{1}{3} \sin 2\theta_2 \right) - \\
& - \beta K_3 \left[\left(-4\pi^2 + \theta_2^2 \cos \theta_2 - 2\theta_2 \sin \theta_2 + 2 - 2\cos \theta_2 \right) \left(6\tilde{\eta}^2 + \frac{6\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{12\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{6\tilde{\eta} \eta_2 \sin \theta_2}{\theta_2} - \frac{9\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2} \right) - 3\eta \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) - \frac{1}{4} \left(4\pi^2 - \theta_2^2 + \theta_2 \sin 2\theta_2 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} (1 + \cos 2\theta_2) \right) \left(30\eta_2 \eta - \frac{24\eta \tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 - 9\tilde{\eta} \eta \right) + \frac{1}{2} \left(-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2 + \frac{1}{3} \theta_2 \sin 3\theta_2 - \frac{2}{9} (1 - \cos 3\theta_2) \right) \right] \times \\
& \times \left(3\tilde{\eta}^2 - \frac{9\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{2\theta_2} \right) - 3\eta^2 \left(\frac{1}{6} (1 - \cos 3\theta_2) + \frac{3}{2} (1 - \cos \theta_2) \right) - \frac{9}{8} \tilde{\eta} \eta (1 - \cos 2\theta_2 - \\
& - \frac{1}{4} (1 - \cos 8\theta_2)) \Bigg] + 36\alpha \left[\frac{\eta^2}{2} \left(\frac{1}{6} (1 - \cos 3\theta_2) + \frac{3}{2} (1 - \cos \theta_2) \right) + \frac{\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2^2} \times \right. \\
& \left. \times \left(-4\pi^2 + \theta_2^2 \cos \theta_2 - 2\theta_2 \sin \theta_2 + 2(1 - \cos \theta_2) \right) - \frac{\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{2\theta_2} \left(4\pi^2 - \theta_2^2 + \theta_2 \sin 2\theta_2 - \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta_2) \right) \right] \Bigg\}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{\text{тп}} &= j\mu \left[\int_0^{\theta_1} \mu_1(\theta) \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_1'(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \mu_2(\theta) \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_2'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \right. \\
& \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \mu_3(\theta) \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{v}_3'(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right) d\theta \right] = j\mu_0 \Omega r_0^3 \left(1 + (\alpha p - \beta T) - \frac{(\alpha p - \beta T)^2}{2} \right) \times \\
& \times \left\{ \frac{6(1 - \tilde{\eta}^2)}{(1 - \eta_2)(2 + \tilde{\eta})} \left[\theta_1 + 2\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}^2}{2} \left(\theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) + \beta K_1 \left[2\theta_1^2 + 8\tilde{\eta}(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) - \right. \right. \right. \\
& \left. \left. - \tilde{\eta}^2 \left(\theta_1^2 - \theta_1 \sin 2\theta_1 - \frac{1}{2} (\cos 2\theta_1 - 1) \right) - 28\eta (\cos \theta_1 - 1) - 14\eta \tilde{\eta} (\cos 2\theta_1 - 1) - \right. \right. \\
& \left. \left. - 24\eta^2 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4} (\cos 2\theta_1 - 1) \right) - 30\tilde{\eta}^2 \theta_1^2 - 10\eta_2 \theta_1^2 - 40\eta_2 \tilde{\eta} (\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) + 40\eta_2 \eta (\cos \theta_1 - 1) \right] - \right. \\
& \left. - 3\alpha \left[3\theta_1^2 + 12\tilde{\eta} (\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) - \frac{3}{2} \tilde{\eta}^2 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \theta_1 \sin 2\theta_1 - \frac{1}{2} (\cos 2\theta_1 - 1) \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - 10\eta (\cos \theta_1 - 1) - 5\tilde{\eta} \eta (\cos 2\theta_1 - 1) - 11\eta^2 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4} (\cos 2\theta_1 - 1) \right) + 6\eta_2 \theta_1^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + 24\tilde{\eta} \eta_2 (\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) - 40\eta_2 \eta (\cos \theta_1 - 1) - 35\eta_2^2 \theta_1^2 + 6\tilde{\eta}^2 \theta_1^2 \right] \right\} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{2}{1-\eta_2}[\theta_1 + \tilde{\eta}\sin\theta_1 + \beta K_1[2\theta_1^2 + 4\tilde{\eta}(\theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_1 - 1) - 28\eta(\cos\theta_1 - 1) - \\
& \quad - 7\eta\tilde{\eta}(\cos 2\theta_1 - 1) - 24\eta^2\left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_1 - 1)\right) - 30\tilde{\eta}^2\theta_1^2 - 10\eta_2\theta_1^2 - \\
& - 20\eta_2\tilde{\eta}(\theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_1 - 1) + 40\eta_2\eta(\cos\theta_1 - 1)] - 3\alpha[3\theta_1^2 + 6\tilde{\eta}(\theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_1 - 1) - \\
& \quad - 10\eta(\cos\theta_1 - 1) - \frac{5}{2}\eta\tilde{\eta}(\cos\theta_1 - 1) - 11\eta^2\left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_1 - 1)\right) + \\
& \quad + 6\eta_2\theta_1^2 + 12\eta_2\tilde{\eta}(\theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_1 - 1) - 40\eta_2\eta(\cos\theta_1 - 1) - 35\eta_2^2\theta_1^2 + 6\tilde{\eta}^2\theta_1^2] + \\
& + 3\left(1 - \frac{\eta}{\theta_1}\sin\theta_1\right)\left[\theta_2 - \theta_1 + 2\eta(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) - \frac{\eta^2}{2}\left(\theta_2 - \theta_1 + \frac{1}{2}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)\right) + \right. \\
& \quad \left. + \beta K_2\left[\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} + 2\eta(\theta_2\sin\theta_2 - \theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{\eta^2}{4}\left(\theta_2^2 - \theta_1^2 - \theta_2\sin 2\theta_2 + \theta_1\sin 2\theta_1 - \frac{1}{2}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)\right) - \eta(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{\eta}{2}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \frac{6\eta^2\sin\theta_1}{\theta_1}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \frac{3}{2}\eta^2\left(\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)\right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{3\eta^2\sin^2\theta_1}{\theta_1^2}(\theta_2^2 - \theta_1^2)\right] + 6\alpha\left[\eta(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) + \frac{\eta^2}{2}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \eta^2\left(\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)\right) + \frac{\eta\sin\theta_1}{2\theta_1}(\theta_2^2 - \theta_1^2) + \frac{2\eta^2\sin\theta_1}{\theta_1}(\theta_2\sin\theta_2 - \theta_1\sin\theta_1 + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \frac{3\eta\sin\theta_1}{\theta_1}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \frac{3}{2}\frac{\eta^2\sin\theta_1}{\theta_1}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)\right] \right] - \\
& - 2\left[\theta_2 - \theta_1 + \eta(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) + \beta K_2\left[\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} + \eta(\theta_2\sin\theta_2 - \theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_2 - \cos\theta_1) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \eta(-\theta_2\cos\theta_2 + \theta_1\cos\theta_1 + \sin\theta_2 - \sin\theta_1) - \frac{\eta^2}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{6\eta^2\sin\theta_1}{\theta_1}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \frac{3}{2}\eta^2\left(\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)\right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{3\eta^2\sin^2\theta_1}{2\theta_1^2}(\theta_2^2 - \theta_1^2)\right] + 6\alpha\left[\eta(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \frac{\eta^2}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \eta^2\left(\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{1}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1)\right) + \frac{\eta\sin\theta_1}{2\theta_1}(\theta_2^2 - \theta_1^2) + \frac{\eta^2\sin\theta_1}{\theta_1}(\theta_2\sin\theta_2 - \theta_1\sin\theta_1 + \cos\theta_2 - \cos\theta_1) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3\eta \sin \theta_1}{\theta_1} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - \frac{3\tilde{\eta}^2 \sin \theta_1}{2\theta_1} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) \Big] + \\
& + \frac{3}{1-\eta_2} \left(1 - \frac{\eta}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \left[2\pi - \theta_2 - 2\tilde{\eta} \sin \theta_2 - \frac{\tilde{\eta}^2}{2} \left(2\pi - \theta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) \right] + \\
& + \beta K_3 \left[2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} + 2\tilde{\eta} (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) - \frac{\tilde{\eta}^2}{2} \left(2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_2}{2} \sin 2\theta_2 - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) \right) \right] - \\
& - \eta (1 - \cos \theta_2) - \frac{\tilde{\eta} \eta}{2} (1 - \cos 2\theta_2) + \frac{\eta_2}{2} (4\pi^2 - \theta_2^2) + 2\eta \tilde{\eta} (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) + \\
& + 3\eta_2 \eta (1 - \cos \theta_2) + \frac{3\tilde{\eta}^2}{2\theta_2^2} \sin^2 \theta_2 (4\pi^2 - \theta_2^2) - 3\eta_2^2 (4\pi^2 - \theta_2^2) + \frac{6\eta \tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 (1 - \cos \theta_2) \\
& - \frac{6\tilde{\eta} \eta_2 \sin \theta_2}{\theta_2} (4\pi^2 - \theta_2^2) - \frac{3}{2} \tilde{\eta} \left(2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) \right) - 4\eta_2 \tilde{\eta} (1 - \cos \theta_2) \Big] - \\
& - 6\alpha \left[\eta (1 - \cos \theta_2) + \frac{\tilde{\eta} \eta}{2} (1 - \cos 2\theta_2) + \tilde{\eta}^2 \left(2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) \right) + 4\eta_2 \eta (1 - \cos \theta_2) + \frac{\tilde{\eta} \sin \theta_2}{2\theta_2} \times \right. \\
& \times \left. \left(4\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} \right) + \frac{2\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2} (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) - \frac{3\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} (1 - \cos \theta_2) + \frac{\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} (4\pi^2 - \theta_2^2) \right] - \\
& - \frac{2}{1-\eta_2} \left[2\pi - \theta_2 - \eta \sin \theta_2 + \beta K_3 \left[2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} + \tilde{\eta} (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) - \right. \right. \\
& - \eta (1 - \cos \theta_2) - \frac{1}{4} \eta \tilde{\eta} (1 - \cos 2\theta_2) + \frac{\eta_2}{2} (4\pi^2 - \theta_2^2) + \eta_2 \eta (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) + \\
& + 3\eta_2 \eta (1 - \cos \theta_2) + \frac{3}{2} \frac{\eta^2 \sin^2 \theta_2}{\theta_2^2} (4\pi^2 - \theta_2^2) - 3\eta_2^2 (4\pi^2 - \theta_2^2) + \frac{6\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} (1 - \cos \theta_2) - \\
& - \frac{6\tilde{\eta} \eta_2 \sin \theta_2}{\theta_2} (4\pi^2 - \theta_2^2) - \frac{3}{2} \tilde{\eta} \left(2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) - \frac{3}{2} \tilde{\eta}^2 (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) + \right. \\
& + \frac{1}{4} (-\sin 3\theta_2 - \sin \theta_2) \left. \right) - 4\eta_2 \tilde{\eta} (1 - \cos 2\theta_2) \Big] - 6\alpha \left[\eta (1 - \cos \theta_2) - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) + \right. \\
& + \tilde{\eta}^2 \left(2\pi^2 - \frac{\theta_2^2}{2} - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_2) \right) + 4\eta_2 \eta (1 - \cos \theta_2) + \frac{\tilde{\eta} \sin \theta_2}{2\theta_2} (4\pi^2 - \theta_2^2) + \\
& + \frac{\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2} (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2) - \frac{3\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} (1 - \cos \theta_2) + \frac{\eta \tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} (4\pi^2 - \theta_2^2) \Big] \Big] \Big\}. \quad (2.113)
\end{aligned}$$

Приведенная на графике (рисунок 2.10) зависимость представляется более функциональной. Ее анализ подтверждает слабое влияние осевой канавки на гидродинамический режим работы радиальных подшипников. Вместе с тем

наличие канавки в расчетной модели с учетом влияния температуры на реологические свойства смазочного материала обеспечивает формирование радиальной составляющей давления, компенсирующей увеличение контактной площади в результате вязкоупругой деформации полимерного покрытия.

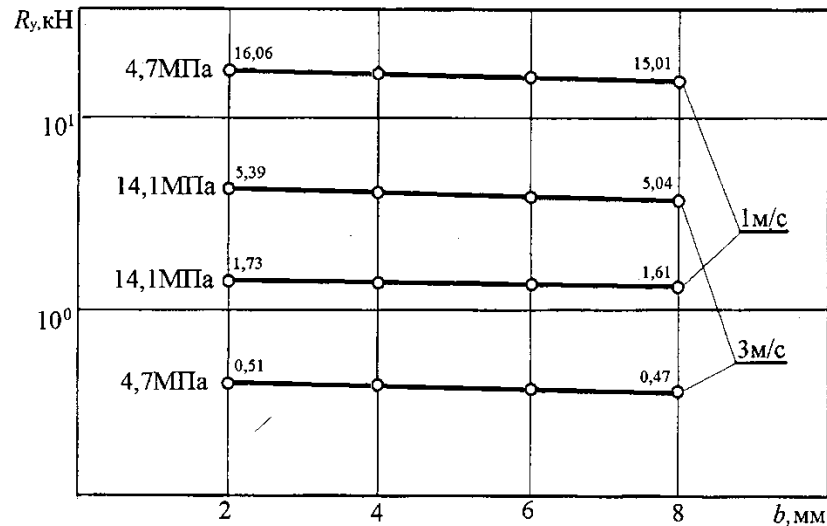


Рисунок 2.10 – Изменение радиальной составляющей поддерживающей силы в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов и ширины канавки

Значительная зависимость свойств полимерных материалов от температуры требует оценки ее влияния на работу металлополимерной трибосистемы.

Численный анализ полученных теоретических результатов позволил рассчитать величину коэффициента трения для исследованного диапазона нагрузочного режима с учетом влияния температуры для маслоподдерживающей канавки различной ширины, а также величину радиальной составляющей поддерживающей силы.

Результаты расчета коэффициента трения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость коэффициента трения от условий нагружения

Коэффициент трения	Контактное давление σ , МПа	Ширина маслоподдерживающей канавки b , мм				
		1	2	3	4	5
	0,2	0,01402	0,01395	0,01388	0,01381	0,01375

f	4,7	0,000596	0,000594	0,000891	0,000488	0,00585
	14,1	0,0001987	0,0001979	0,0001969	0,0001959	0,000195

Необходимо отметить, что наличие ряда упрощений при расчетах дает не количественные величины, а общую качественную картину функционирования трибосистемы. Полученные данные доказывают существенную зависимость коэффициента трения от рабочего контактного давления в исследованном диапазоне, однако величина коэффициента трения находится стабильно в границах гидродинамического режима. При этом наблюдается практически полное отсутствие зависимости величины коэффициента трения от ширины канавки.

По результатам численного анализа полученных зависимостей построены графики, приведенные на рисунке 2.11.

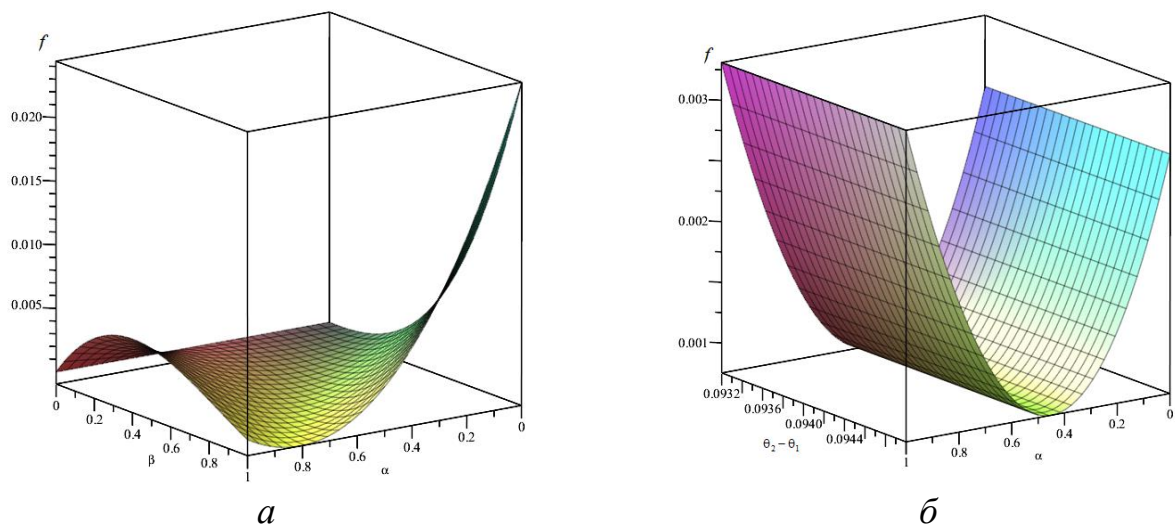


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента трения от параметров:

- а* – вязкости смазочного материала в зависимости от давления и температуры;
б – характеризующих зависимость ширины канавки и вязкости от температуры

В итоге получены уточненные многофакторные расчетные модели для проверочных и проектных расчетов радиальных подшипников скольжения с антифрикционными полимерными покрытиями, работающими в гидродинамическом режиме смазывания.

2.4 Выводы по главе

1 Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать давление в маслоподдерживающих канавках металлополимерных трибосистем, обеспечивающее компенсацию воздействия вязкоупругой деформации полимера на автопереход подшипника от граничного к жидкостному режиму смазывания.

2 Установлены основные закономерности влияния параметров маслоподдерживающих канавок на величину поддерживающей силы при непрерывной подаче вязкого или микрополярного жидкого смазочного материала.

3 Обоснована перспектива использования в рассматриваемой конструкции металлополимерных подшипников с осевыми канавками специального, некруглого, адаптированного к конкретным условиям трения, опорного профиля подшипниковой втулки.

4 Для всего исследованного комплекса металлополимерных подшипников с фторопластсодержащими антифрикционными покрытиями и конструктивными вариантами их контактной поверхности в виде некруглого опорного профиля с канавками получены расчетные модели для определения величины коэффициента трения.

5 Впервые разработаны расчетные модели гидродинамического смазывания радиальных металлополимерных фторопластсодержащих подшипников с учетом вклада маслоподдерживающих канавок.

6 В результате выполнения аналитической оценки работы радиального металлополимерного подшипника скольжения с маслоподдерживающей канавкой в условиях зависимости свойств смазочного материала одновременно от давления и температуры, а также применения нестандартного опорного профиля доказана эффективность конструкции и перспективность расширения ее применения в технике.

Глава 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Жидкие смазочные материалы, применяемые в узлах трения, предназначены для разделения контактирующих в трибосистемах металлических поверхностей, что обеспечивает повышение их износостойкости. В исследуемых «сухих» полимерных покрытиях эти функции выполняются фторопластом. Однако наиболее эффективным режимом смазывания подшипников скольжения является жидкостное трение. Ниже описана методика исследований, позволяющих объединить в одной трибосистеме два эффективных режима смазывания.

3.1 Общая структура исследований

Значительное количество промышленных машин или их агрегатов выполняют свое функциональное назначение в условиях применения различных смазочных материалов. В настоящее время широкое распространение получили жидкие смазочные материалы, без которых невозможна нормальная работа современной техники. Эти материалы работают в подшипниках, обеспечивая наиболее эффективное жидкостное трение в гидродинамическом режиме.

Антифрикционные полимерные композиционные фторопластсодержащие покрытия работают, используя в качестве смазочного материала фторопласт, обеспечивающий режим только граничного трения. Переход металлополимерных трибосистем с рассматриваемыми покрытиями к более перспективному жидкостному трению требует подачи в зазор подшипника жидких смазочных материалов.

Однако фторопласт имеет ряд специфических особенностей, связанных с практическим отсутствием у него адгезионных свойств и наличием вязкоупругих. Следствием этого является образование пор в антифрикционном композите на границе «фторопласт – матрица». Это приводит к определенной деградации основных эксплуатационных триботехнических свойств покрытий. Кроме того, шейка вала, под действием рабочих нагрузок и благодаря вязкоупругой деформации полимерного покрытия подшипниковой втулки, вдавливаются в него

(см. рисунок 1.11), заполняя рабочий зазор и лишая подшипник возможности автоматического перехода к жидкостному смазыванию.

На сегодняшний день найдено принципиальное решение задачи для радиально-упорного подшипника в виде образования на контактной поверхности специальной маслоподдерживающей канавки на опорной поверхности. Параметры сечения канавки подобраны экспериментально только для работы конкретного подшипника в масляной ванне.

Для решения вопросов, связанных с широким применением гидродинамического режима смазывания в радиальных металлополимерных подшипниках различного размера, необходимо выполнить значительный комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Структура этих исследований приведена на схеме (рисунок 3.1).

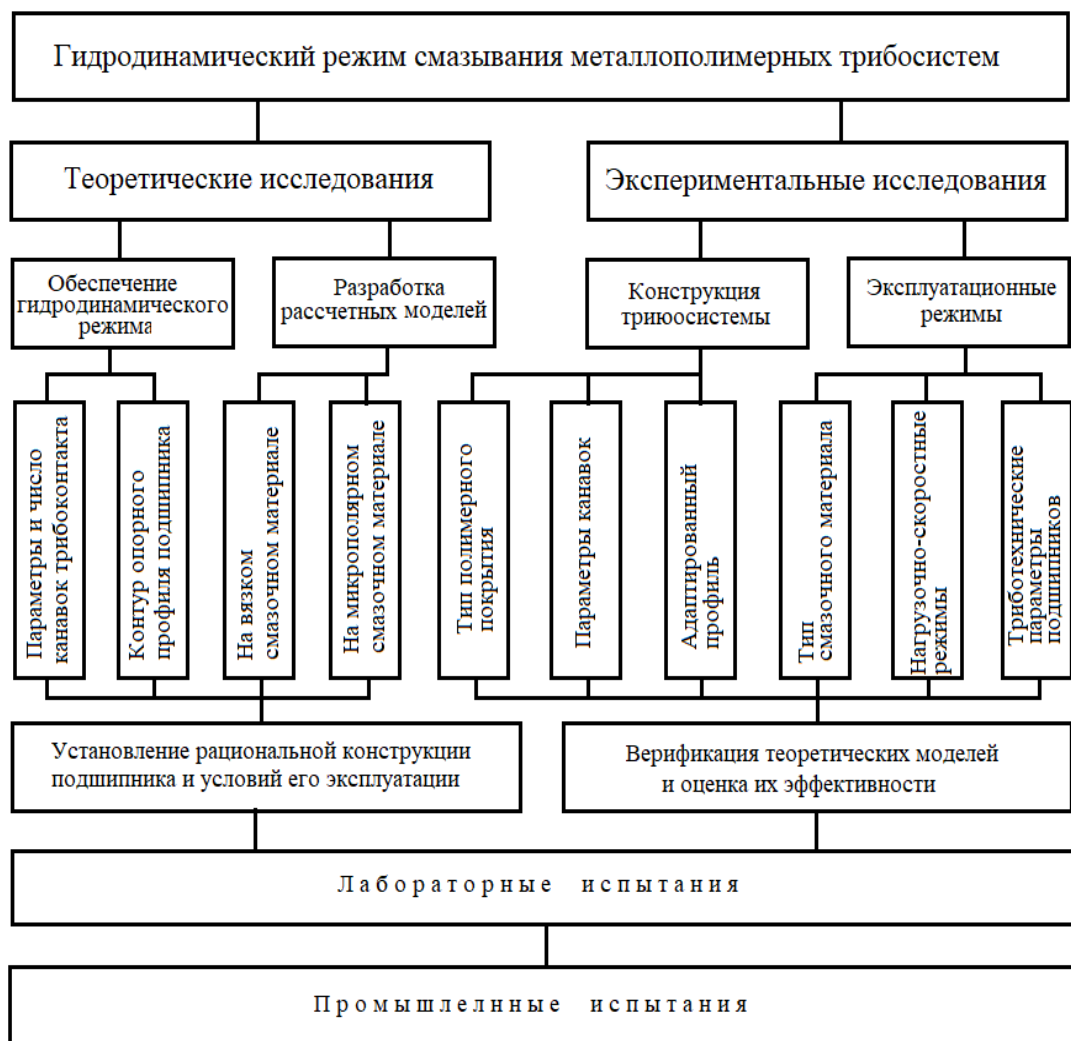


Рисунок 3.1 – Общая структурная схема исследований

Исследования теоретического плана включают два этапа. На первом этапе устанавливается сечение осевых маслоподдерживающих канавок и их количество, обеспечивающее переход металлополимерного подшипника с режима граничного трения на режим гидродинамического смазывания при заданном значении контактного давления.

Расчеты выполняются для разных полимерных фторопластсодержащих композиционных покрытий, имеющих разную толщину. Технологически проще формировать канавки требуемого сечения глубиной, соответствующей толщине композиционного фторопластсодержащего покрытия. В этом случае вопрос стоит в установлении только ширины канавок. Но при этом для относительно тонких покрытий (с каркасом из однослойной саржи) может не хватить глубины канавки для обеспечения гидродинамического режима трения или возникнут ограничения для несущей способности подшипника.

Следует отметить также, что чем больше опорная поверхность подшипниковой втулки занята канавками, тем меньше ее площадь и больше величина средних контактных напряжений. Таким образом, оптимальной является наименьшая из возможных ширина маслоподдерживающих канавок.

На втором этапе формируются расчетные модели, определяющие работу металлополимерных подшипников, смазываемых двумя типами смазочных материалов: истинно вязкими и микрополярными. При этом учитывается влияние гидродинамического давления на вязкость смазочных материалов. Разработанные расчетные модели позволяют выявить уровень основных эксплуатационных характеристик (коэффициент трения и нагрузочную способность) в широком диапазоне нагрузочно-скоростных режимов.

Разработанные модели необходимы для выполнения проекторочных инженерных расчетов при промышленном применении исследуемых подшипников.

Последующий численный анализ полученных моделей позволяет визуализировать установленные аналитические зависимости, наглядно представив их в виде графиков. Графики иллюстрируют степень влияния на триботехнические

характеристик подшипников скольжения с различными покрытиями как параметров маслоподдерживающих канавок в условиях гидродинамического смазывания, так и нагрузочно-скоростных режимов. Изучение последних позволяет определить область рационального применения результатов исследований в условиях эксплуатации.

Экспериментальные исследования также состоят из двух отдельных блоков. Первый блок направлен на верификацию теоретических разработок моделей металлополимерных подшипников с оптимальным сечением маслоподдерживающих канавок для применяемых режимов, а также на установление величины погрешности, полученной в расчетах, выполненных по этим моделям.

Второй блок состоит из комплекса экспериментальных исследований металлополимерных подшипников с новой конструкцией опорной поверхности втулки. Это поверхность имеет на фторопластсодержащем полимерном композиционном покрытии маслоподдерживающие канавки, а ее профиль адаптирован к конкретным условиям трения. Проведенные исследования обеспечивают высокий уровень эксплуатации подшипников во всех областях их применения.

Основные блоки экспериментальных исследований приведены в таблице 3.1.

В них установлена цель отдельных экспериментальных блоков с указанием переменных факторов и выходных параметров. Дополнительно приведены диапазон их варьирования, модель используемой в экспериментах машины трения и достижимая точность измерений при экспериментальных исследованиях.

Сравнение композитов с полуторослойными каркасами, при разнице глубины канавки в 0,03–0,04 мм, показало практическую идентичность результатов, что позволило выполнять дальнейшие исследования на шестиремизном атласе.

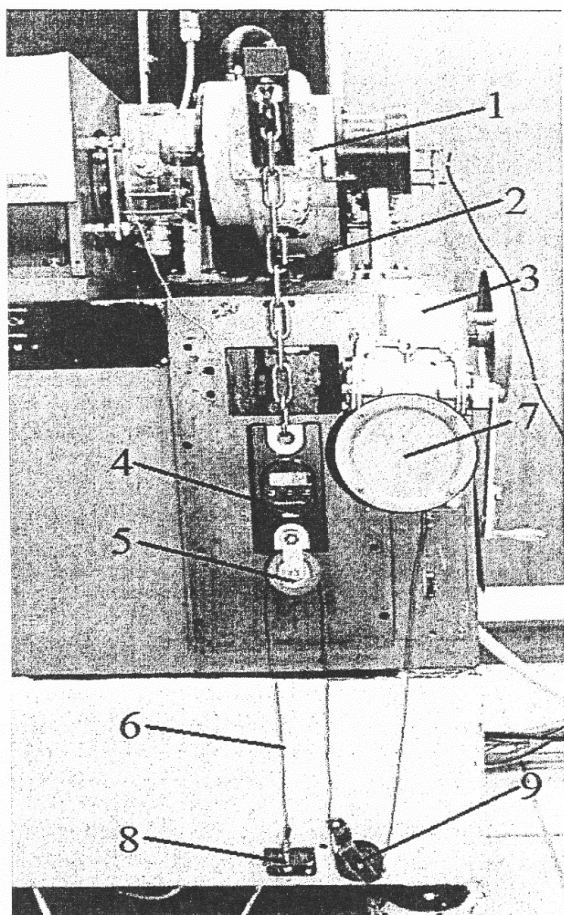
Таблица 3.1 – Основные блоки экспериментальных исследований

№ п/п	Блок	Цель	Выход	Переменные факторы	Диапазон варьирования	Оборудование	Погрешность, %
1	Конструкция опорной поверхности	Обеспечение автоперехода на режим жидкостного трения	Параметры канавок	Ширина канавки	1,0–6,0 мм	Машина трения модели ИИ 5018 (модернизированная)	± 10 %
			Смазочный материал	Тип смазочного материала	Вязкий, микрополярный		
			Опорный профиль	Контактное давление, скорость	$\sigma = 4,7–14,1$ МПа $V = 0,2–1,0$ м/с		
2	Эксплуатационные характеристики подшипников	Верификация теоретических моделей	Коэффициент трения f	Параметры канавок	Ширина, глубина, $B = 1–5$		
			Несущая способность σ , МПа	Тип смазочного материала	Вязкий, микрополярный		
			Температура, °С	Марка смазочного материала	Тп22-С... Тп22-С + 5 % Cu		
		Определение трибо-параметров	Коэффициент трения f	Нагрузочно-скоростные режимы	$\sigma = 4,7–14,1$ МПа $V = 0,2–1,0$ м/с		
			Вертикальная составляющая давления	Ширина канавки	1,0–6,0 мм		

Средние нормальные напряжения в трибоконтакте определялись по проекции вала подшипника. Ожидаемая погрешность в экспериментах устанавливалась на основе паспортных характеристик оборудования и литературных данных [177–180].

3.2 Оборудование и инструменты

Все экспериментальные исследования рассматриваемых металлополимерных подшипников скольжения выполнялись на модернизированной стандартной машине трения модели ИИ 5018 [181], для определения эксплуатационных триботехнических параметров. Модернизация



машины включала изменение конструкции системы нагружения, значительно повышающее стабильность работы механизма (рисунок 3.2).

Рисунок 3.2 – Механизм нагружения:

- 1 – каретка; 2 – цепь; 3 – корпус;
- 4 – динамометр; 5 – ролик; 6 – трос;
- 7 – червячный редуктор; 8 – кронштейн;
- 9 – кронштейн с роликом

Кроме этого, новый колодкодержатель обеспечивает самоустановку частичного вкладыша (колодки) с исследуемым покрытием,

введена система охлаждения опор валов машины и циркуляционная подача жидкого смазочного материала, а также выполнено уравнивание каретки и компенсация изменения длины плеча при его наклоне.

Одним из наиболее важных элементов модернизации машины трения является блок установки частичного вкладыша (рисунок 3.3).

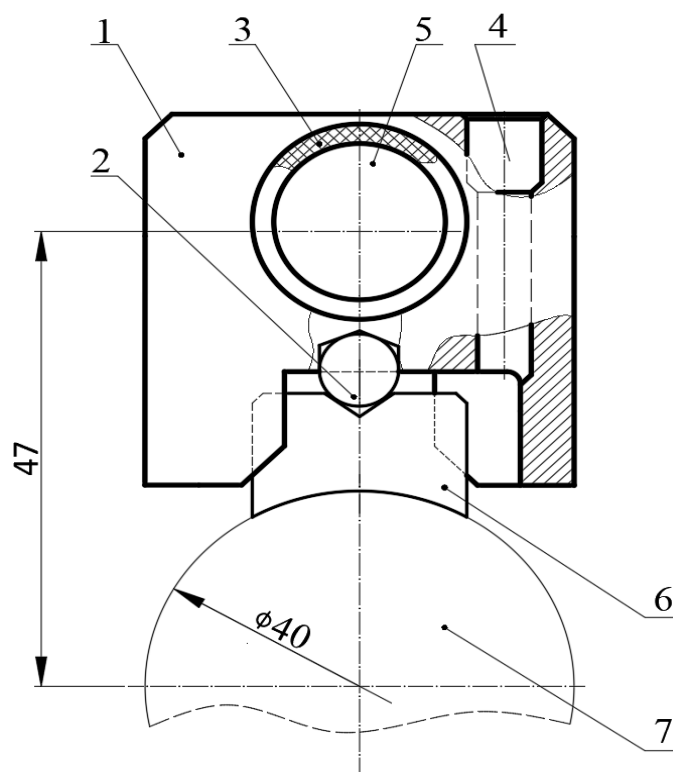


Рисунок 3.3 – Схема базирования и установки колодки [5М]:

1 – корпус колождоержателя; 2 – опорный шарик; 3 – изолирующая втулка;
4 – канал для подачи жидкого смазочного материала; 5 – отверстие под вал
каретки машины трения; 6 – колодка; 7 – ролик

Показанный на схеме корпус держателя 1 имеет паз для установки образца – колодки (частичного вкладыша) 6. Дно паза засверлено под шарик 2, являющийся опорой устанавливаемой колодки, также имеющей соответствующее коническое углубление. Корпус имеет отверстие 5 для установки на вал машины трения и отверстие 4 для циркуляционной подачи в зону трения жидкого смазочного материала. Шарик 2 ориентирует колодку по оси ролика 7. Конструкция держателя обеспечивает колодке три степени свободы (вращение вокруг трех осей), что позволяет образцу самоустанавливаться по поверхности ролика, имитирующего вал.

Полимерное изолирующее кольцо 3 позволяет измерять электросопротивление цепи «колодка – ролик».

Измерительные средства для измерений, проводимых в процессе исследований, прошли обязательную своевременную госповерку. Метрологические параметры задействованных в исследовании приборов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Метрологические характеристики применяемых приборов

№ п/п	Наименование	ГОСТ	Тип	Пределы измерений	Цена делений	Класс точности	Погрешность
1	Штангенциркуль	166-89	ШЦ-1	0–125 мм	0,1мм	2	$\pm 0,05$ мм
2	Микрометр	МТ	6507-90	0–25 мм	0,01 мм	2	$\pm 0,004$ мм
3	Головка измерительная рычажно-зубчатая	18833-73	ИГ	0–1 мм	0,001 мм	2	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$ мм
4	Профилограф	New View 600S WLI STA F3		-	0,001 мм	1	$\pm 3,0$ %
5	Тахометр	ИО-30	21339-82	0–30 000 об/мин	–	2	± 2
6	Весы аналитические	8520-84	ВЛА 200	0–200 г	0,0001 г	2	$\pm 10^{-5}$ г
7	Динамометр растяжения	ДПУ 0,5-2	13837-79	0–5 кН	0,05кН	2	$\pm 2,0$ %
8	Термоизмеритель	ТМ-902С		–50... +130	1 °С		

Носители экспериментальной информации передавали электрические сигналы через усилитель и 8-канальный АЦП на компьютер, где обрабатывались специальной программой ZET Lab.

В итоге сформирована структура и обоснована организация комплекса экспериментальных исследований, включающая два основных блока, выбрано оборудование и нужный уровень метрологических характеристик средств измерения, а также установлена методика и последовательность выполнения экспериментальных исследований для полного решения поставленных задач.

3.3 Применяемые материалы и образцы

Рассматриваемые полимерные покрытия являются гибридным композиционным материалом, включающим три различных полимера. Это каркас на основе специальной ткани из фторопластовых нитей торговой марки «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81) и полиимидных нитей марки «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80). Ткань пропитана полимерным матричным связующим из фенольной смолы, модифицированной термостойким каучуком.

Фторопластовые нити имеют высокоориентированную структуру и выполняют функцию смазочного материала. Полиимидные нити – обеспечивают прочность, а аморфная фенольная смола объединяет компоненты в единый композит, перераспределяет контактное давление, защищает композит от воздействия окружающей среды и служит адгезивом для приклеивания покрытия к металлическому субстрату (подложке).

Фторопласт (политетрафторэтилен) является самым скользким из известных в настоящее время материалов. Цепь углеродных атомов экранируется атомами фтора, и фторопласт имеет очень низкие межплоскостные связи.

Низкая адгезия фторопласта практически ко всем материалам, являясь положительной с позиции трения, существенно затрудняет его использование в качестве покрытия. Поскольку фторопласт не имеет адгезии к матричному связующему, его волокна связаны с композитом чисто механически ткацкими переплетениями. При этом на рабочую трущуюся поверхность ткани выводится до

100 % фторопластовых нитей, а на изнанку, закрепляемую адгезивом на субстрате, по возможности наибольшее количество полиимидных нитей.

Соотношение антифрикционных фторопластовых нитей и прочных из полиимида поддерживается примерно одинаковым во всех применяемых для изготовления антифрикционных покрытий технических тканях (полифен : полиимид = 82,1:17,9 %).

Применяются полутораслойные технические ткани типа саржи и атласа, в которых рабочая поверхность состоит в основном из фторопласта, а изнанка – из аримида.

Кроме того, используются и однослойные ткани саржевого плетения. Однослойная саржа 1/1 имеет одну основу и один уток. В связи с этим ввести фторопласт в каркас композита только ткацким переплетением невозможно. В этом случае предварительно скручивают нити фторопласта с нитями аримида (200 круток/м), а затем из крученых нитей, одинаковых для основы и утка, изготавливают ткань. Однослойная саржа представляет собой полотно, которое не имеет лица и изнанки и может приклеиваться или работать в подшипнике любой стороной. При этом направление нитей основы или утка должно совпадать с вектором скорости в трибосистеме.

Параметры применяемых тканых каркасов антифрикционных композитов приведены в таблице 3.3.

Рабочая лицевая сторона тканых каркасов композита представлена на рисунке 3.4.

Таблица 3.3 – Ткани для антифрикционных покрытий

№ п/п	Тип ткани	Толщина, мм	Артикул	Технические условия
1	Полутораслойный шестиремизный атлас	0,534±0,004	5387/2 – 79	268-80
2	Полутораслойная саржа 1/3	0,455±0,003	5384/3 – 80	278-81

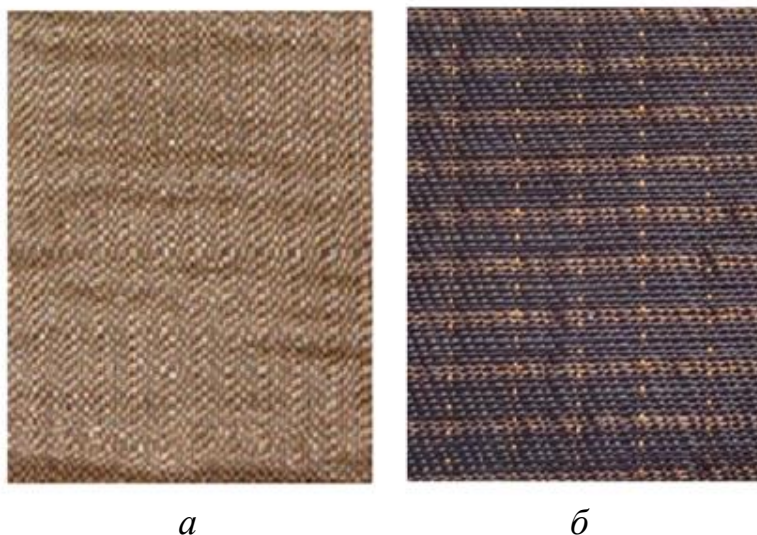


Рисунок 3.4 – Полутораслойные ткани:

a – шестиремизный неправильный атлас; *б* – саржа 1/3

Покрyтия из применяемых тканей имеют близкую толщину, поскольку поверхностные полиимидные нити саржи хорошо смачиваются связующим.

В качестве матричного связующего и одновременно клея для закрепления покрытия на металле используется адгезив марки АФК-101 по ТУ 1-505-11-906-2006, состоящий из раствора модифицированной фенольной смолы в смеси ацетона и этилацетата (1:1). Стабилизатором термоокислительной деструкции является оксихинолин орто (ГОСТ 5847-62).

В качестве технологического полуфабриката композита используется препрег – каркас из ткани с неотвержденным связующим. Ткань пропитывается окунанием с последующим нормированным отжимом и сушкой при температуре 80 °С, что удаляет растворители, но не отверждает полимерную смолу. Сушка в вакууме должна продолжаться 2 часа или в обычном сушильном шкафу – 24 часа.

Готовый препрег кроится по форме покрываемой поверхности так, чтобы расположение прочных нитей арамида совпадало с вектором скорости при работе трибосистемы.

Параллельно подготавливается под покрытие поверхность субстрата. Она очищается от загрязнений, обрабатывается наждачной бумагой Ф14А-25НМ, обезжиривается нефрасом (ТУ 38.401-67-108-92) и ацетоном (ГОСТ 2603-79),

сушится на воздухе ($\approx 22\text{--}24\text{ }^\circ\text{C}$) и грунтуется тонким слоем адгезива, который выдерживается на воздухе 24 часа.

Для нанесения покрытия формируется технологический пакет, состоящий из загрунтованного связующим субстрата, препрега, уложенного изнанкой (нитьями арамида Т) на субстрат, слоя антиадгезива поверх рабочей поверхности препрега в виде фторопластовой пленки (ГОСТ 24288-80) и контактирующей с покрытием детали трибосистемы или приспособления, обеспечивающего требуемое контактное давление отверждения. Фторопластовая пленка препятствует склеиванию рабочей поверхности препрега с контактирующей деталью, обеспечивающей силовое замыкание технологического пакета.

Приспособление для нанесения покрытия приведено на рисунке 3.5.

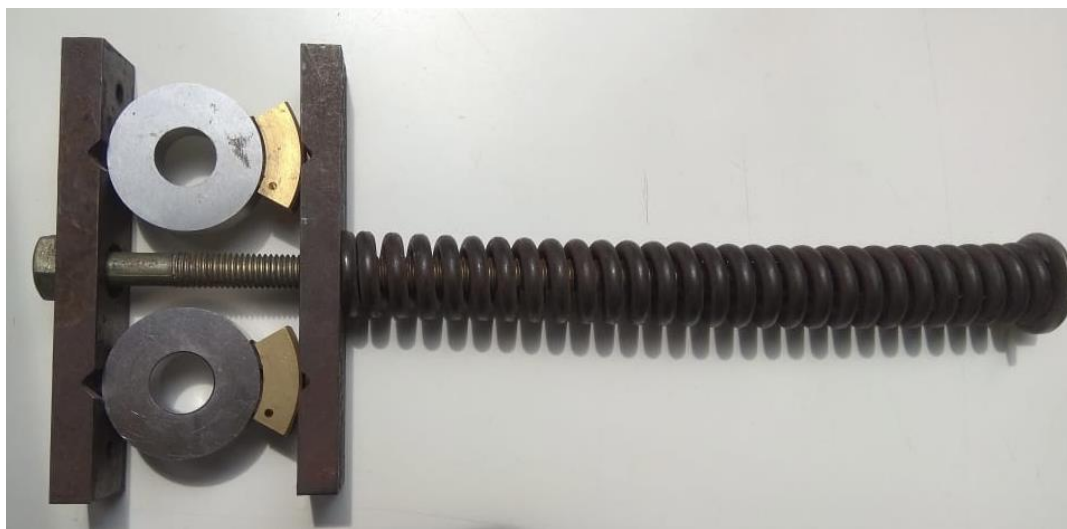


Рисунок 3.5 – Устройство для нанесения антифрикционного покрытия на экспериментальные образцы

В качестве силового элемента, создающего давление отверждения, используются витые пружины с мягкой характеристикой. Это позволяет обеспечить требуемое давление отверждения, несмотря на вязкоупругую деформацию препрега (ползучесть) в процессе поликонденсации, уменьшающую сжатие пружин. При использовании пружин с мягкой характеристикой давление снижается незначительно.

Режимами отверждения полимерного покрытия являются следующие:

- температура – 200 ± 5 °С;
- давление – 1–3 МПа;
- время выдержки – 3 ч.

Отверждение при одновременном нанесении покрытия на деталь трибосистемы выполняется в термошкафу модели СНОЛ-3,5 под контактным давлением, обеспечиваемым приспособлением.

Образцы, на которые наносится антифрикционное покрытие, и контактирующие с ними ролики изготавливаются из конструкционной стали 45 (ГОСТ 1050-74). Поверхность роликов обрабатывается до 8–9-го класса шероховатости, образцов – до 6-го.

Колодка изготавливается из части кольцевой заготовки, соответствующей углу α равному 60 градусов. Полимерное покрытие наклеивается на рабочую поверхность образца. Затем в нем вырезаются канавки необходимой ширины, по оси подшипника.

Конструктивные размеры образцов (колодок) и контртел (роликов) контролировались штангенциркулем, точность посадочных поверхностей проверялась микрометром.

Величина износа покрытия определялась рычажно-зубчатой измерительной головкой с точностью до 1 мкм. Шероховатость поверхности у образцов под нанесение покрытия, а у контртел – поверхности рабочего контакта проверялась на профилографе. Температура полимерных образцов, генерируемая при трении, измерялась хромель-копелевой термопарой, встроенной в адгезионную зону образца под полимерным покрытием специальным измерительным блоком.

В связи с ползучестью покрытия для перехода от граничного смазывания фторопластом к гидродинамическому на контактной поверхности подшипников изготавливают одну или несколько осевых канавок, выполненных на глубину покрытия. Кроме того, колодки имеют дополнительные отверстия для термопары (рисунок 3.6).

Для реализации гидродинамического режима смазывания применялся стандартный истинно вязкий смазочный материал (таблица 3.4).

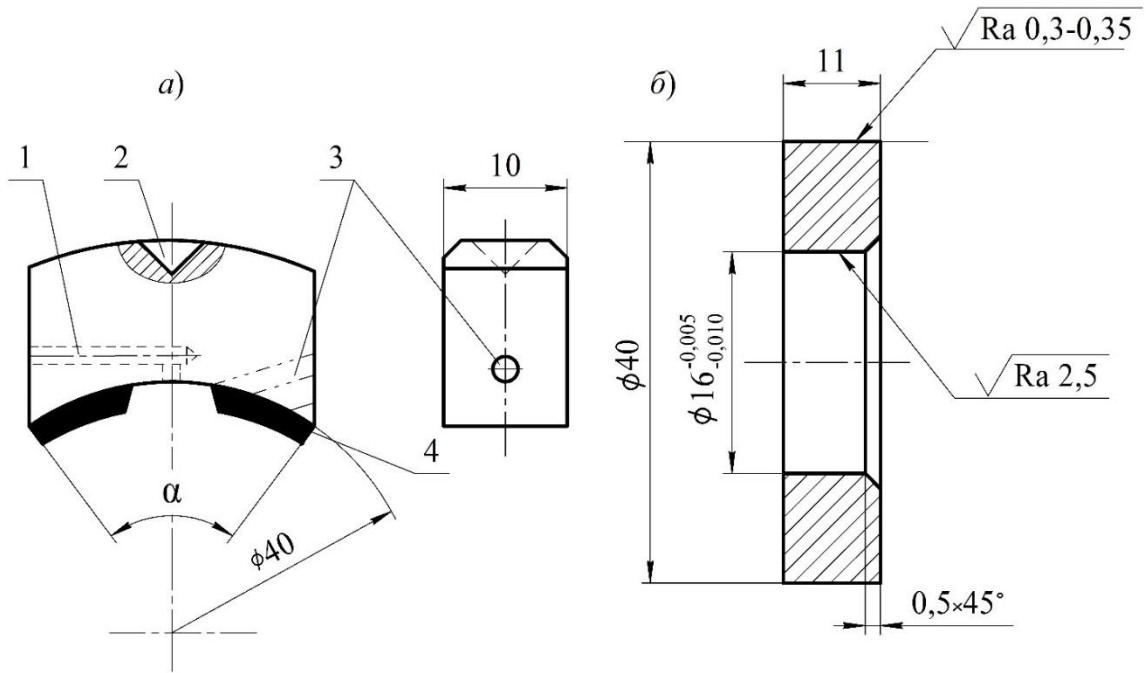


Рисунок 3.6 – Экспериментальная пара трения:

а) образец: 1 – отверстие для подачи смазочного материала; 2 – коническое углубление; 3 – отверстие для термопары; 4 – антифрикционное покрытие;

б) ролик

Таблица 3.4 – Параметры применяемых жидких смазочных материалов

Наименование	Марка	ГОСТ, ТУ	Вязкость при температуре, сСт		Температура, °С		Плотность, кг/м ³
			20 °С	50 °С	Застывания	Вспышки	
Турбинное масло	Тп22-С	101821-2001	100	22–23	–15	186	900

Наряду со стандартным смазочным материалом в работе применялся и современный микрополярный. Для придания стандартным смазочным материалам неньютоновских микрополярных свойств в их состав вводилось 5 % медного порошка марки МП-1 (ГОСТ 4960-75).

Применяемое экспериментальное оборудование дало возможность решить поставленную задачу, то есть получить требуемую информацию о поведении композиционных полимерных покрытий исследуемых трибосистем, работающих при гидродинамическом смазывании в широком диапазоне нагрузочно-скоростных режимов.

3.4 Экспериментальные планы и их статистическая обработка

Финишный этап любых экспериментальных исследований в прикладных дисциплинах – это идентификация технических систем, т. е. построение моделей по результатам экспериментов. Полученные модели позволяют установить погрешность теоретических расчетов и область пространства переменных факторов с учетом минимизации этой погрешности. Кроме того, дополнительная цель экспериментальных моделей – это обеспечение интерполяционных расчетов и в ряде случаев даже прогнозирование, хотя при этом увеличивается дисперсия предсказаний [190].

В настоящее время там, где это возможно, стараются скомпоновать экспериментальные блоки в многоуровневые многофакторные планы [182, 183].

Одним из наиболее эффективных и распространенных многофакторных экспериментальных планов являются полнофакторные двухуровневые планы типа ПФЭ 2^k [184, 185]. Планирование и реализация подобных планов при рандомизации отдельных опытов позволяет получать после статистической обработки адекватные регрессионные модели и установить область оптимального сочетания переменных факторов.

При значительном случайном разбросе экспериментальных результатов, что характерно для триботехники [186, 187], статистическая однородность выборок может обеспечиваться логарифмированием выходных данных. Здесь используется факт меньшего различия логарифмов, чем логарифмируемых величин. Структура таких моделей мультипликативна, Она включает сомножители показательного или степенного вида. Мультипликативные модели могут развиваться и включать добавочные факторы, полученные в дополнительных экспериментах. Существенным преимуществом подобных планов является их полное соответствие всем критериям оптимальности [188].

Необходимо отметить, что для повышения точности экспериментов и обеспечения адекватности регрессионных моделей число параллельных опытов соответствовало 3–5.

Опишем последовательность статистической обработки результатов реализации многофакторных экспериментальных планов, включающих нижеследующие этапы [185]:

- расчет построчных и суммарной дисперсии воспроизводимости как в натуральных переменных, так и в их логарифмах;
- выполнение оценки однородности полученных результатов по критерию Кохрена;
- вычисление значений коэффициентов регрессионной модели в кодовых переменных;
- оценивание по критерию Стьюдента значимости коэффициентов уравнения регрессии;
- переход от кодовых к натуральным переменным в модели;
- проверка по критерию Фишера адекватности модели.

Достоверность применяемых критериев соответствовала 95 % [184, 189].

Графическая интерпретация поверхности отклика для полнофакторных планов выполнялась в трехкоординатных графиках или методом двумерных сечений [122].

Для результатов исследований по однофакторным экспериментальным планам использовался метод наименьших квадратов [122, 125] и рассчитывались стандартные статистики [126].

В соответствии с поставленной целью обоснована общая методика экспериментальных исследований как по классическим однофакторным, так и по полнофакторным планам. При этом налаживалось оборудование, подбирались измерительные средства, а также велась технологическая подготовка экспериментальных образцов.

Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Имеющиеся в литературе сведения об эффективности канавок на контактной поверхности металлополимерных трибосистем относятся к радиально-упорным подшипникам, работающим в картерной масляной ванне [191]. В нашем случае рассматриваются радиальные подшипники, а жидкий смазочный материал подается в зону трения смазочной системой.

Кроме того, известно [192], что фторопласт имеет нулевую адгезию и не смачивается жидкостями, т. е. смазочный материал адсорбируется только на контртеле.

Наконец, коэффициент трения фторопластсодержащих покрытий в режиме граничного трения близок к его значению при гидродинамике, что затрудняет установление действующего режима смазывания.

Это обстоятельство делает обязательной полную экспериментальную проверку результатов теоретических исследований разработанной конструкции опорной поверхности радиального подшипника.

4.1 Смазывание фторопластсодержащих покрытий

Исследуемые антифрикционные полимерные фторопластсодержащие композиционные покрытия подшипников разрабатывались для применения в условиях высоких нагрузок и низких скоростей. Ограничение скорости, вносящей наибольший вклад в генерацию теплоты в режиме самосмазывания фторопластом, связано с низкими теплофизическими свойствами полимерных материалов. Повышение допустимой скорости скольжения может быть обеспечено следующими факторами:

- снижением генерации тепла при трении;
- дополнительным отбором тепла.

Оба этих фактора реализуются при переходе трибосистемы от самосмазывания фторопластом в режиме граничного трения к смазыванию жидким смазочным материалом в режиме жидкостного гидродинамического трения.

Следовательно, разрабатываемый подшипник с канавкой на опорной поверхности должен работать на двух указанных режимах смазывания при их различном сочетании. На первом этапе исследований проводилось сравнение основных усредненных триботехнических параметров подшипников при скорости 0,2 м/с, характерной для исследуемых покрытий при самосмазывании. Результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры трибосистем при разных типах смазывания

Параметры		Граничное смазывание фторопластом			Разовое смазывание			Жидкостная смазка		
b , мм	σ , МПа	T , °C	f	h , мкм	T , °C	f	h , мкм	T , °C	f	h , мкм
–	4,7	37	0,0279	11	36	0,0273	9	35	0,009	7
	14,1	53	0,0254	16	51	0,0133	14	39	0,011	10
3	4,7	34	0,0171	5	33	0,0211	5	31	0,005	5
	14,1	40	0,0127	8	36	0,0182	7	32	0,007	7
Средние		41	0,0208	10	39	0,0199	8,7	34	0,008	7,2

Графическое сравнение основных характеристик металлополимерной трибосистемы представлено на диаграммах (рисунок 4.1, а и б).

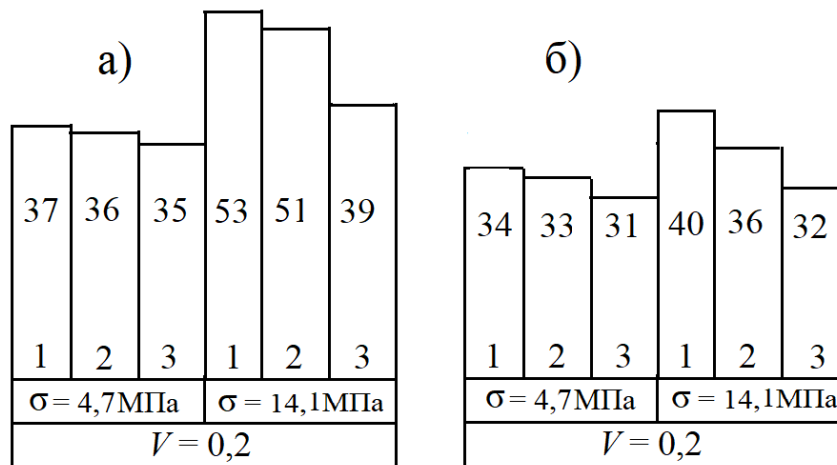


Рисунок 4.1 – Влияние типа смазывания на температуру (°C) в зоне трения:

а) – при отсутствии канавок; б) – с канавкой шириной 3,5 мм;

1 – без дополнительного смазывания; 2 – с разовым смазыванием;

3 – с подачей жидкого смазочного материала

Вначале рассматриваются изменения температуры, как основного фактора, влияющего на все физико-механические свойства полимерного покрытия. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает наличие незначительного, но общего системного снижения температуры при любом дополнительном применении смазочного материала. Причем эффект его применения наблюдается даже без канавок и при его начальном разовом смазывании. Очевидно, этот эффект объясняется преимуществом жидкого смазочного материала в сравнении с фторопластом в приработочный период при наибольшей генерации тепла.

Следует отметить также, что подача смазочного материала дает положительный эффект и без канавки, но из-за вязкоупругой деформации полимерного покрытия автоматический переход к разным режимам смазывания в рассматриваемых подшипниках невозможен (см. главу 1).

Количественный эффект снижения температуры от применения разового смазывания в исследованном диапазоне составляет в среднем всего 3,3 %. Наличие маслоподдерживающих канавок увеличивает его до 6,7 %.

Жидкостное трение, обеспеченное наличием канавки, снижает среднюю температурную нагрузку на 14,9 %. Причем при больших значениях контактного давления эффект возрастает с 8,8 до 20 %.

Следует отметить также, что наличие канавок даже без жидкостного смазывания, а только на граничном трении с фторопластом оказывает положительное влияние, понижая тепловую нагрузку. Это может быть объяснено накоплением в канавке продуктов износа фторопласта, обеспечивающих дополнительное смазывание.

Далее рассмотрим изменение коэффициента трения. Его снижение связано не только с режимом жидкостного трения, но и с влиянием температуры на фторопласт (рисунок 4.2).

Системные изменения коэффициента трения полностью повторяют температурные. Следует отметить, что значения коэффициента трения при работе покрытия без жидкого смазочного материала и в режиме гидродинамического

трения очень близки. Это позволяет считать режим смазывания гидродинамическим только при одновременном уменьшении и коэффициента трения, и температуры, что имеет место на диаграммах (см. рисунок 4.2, а, б).

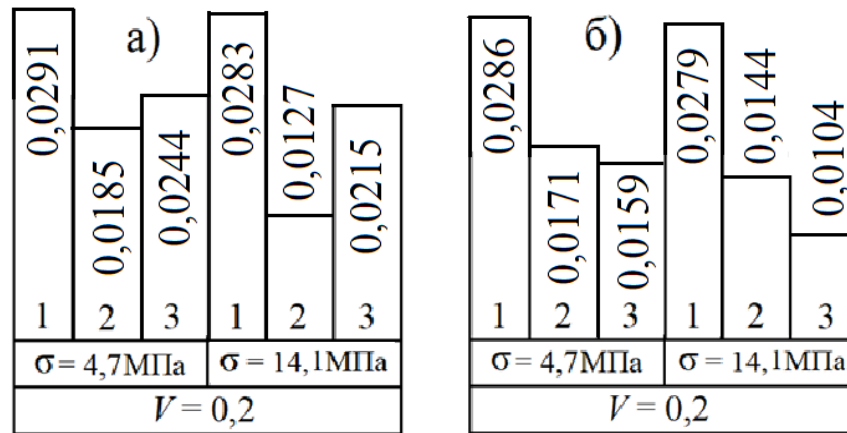


Рисунок 4.2 – Влияние типа смазывания на коэффициент трения (f) в зоне контакта:

а) – при отсутствии канавок, б) – с канавкой шириной 3,5 мм;

1 – без дополнительного смазывания; 2 – с разовым смазыванием;

3 – с подачей жидкого смазочного материала

Дальнейшие исследования проводились по той же схеме, но при скорости 1 м/с. Результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры трибосистем при разных типах смазывания

Параметры		Граничное трение		Жидкостное трение	
b , мм	σ , МПа	T , °C	f	T , °C	f
–	4,7	86	0,0291	39	0,0244
	14,1	130	0,0283	93	0,0215
3,5	4,7	82	0,0286	35	0,0159
	14,1	109	0,0279	70	0,0104
6	4,7	86	0,0289	38	0,0207
	14,1	110	0,0280	82	0,0122
Средние		100,5	0,0285	59,5	0,0175

Приведенное в таблице 4.2 сравнение триботехнических параметров подшипников с различной конструкцией опорной поверхности втулки позволило установить безусловную эффективность применения канавок на опорной поверхности. Это наглядно показано на рисунке 4.3.

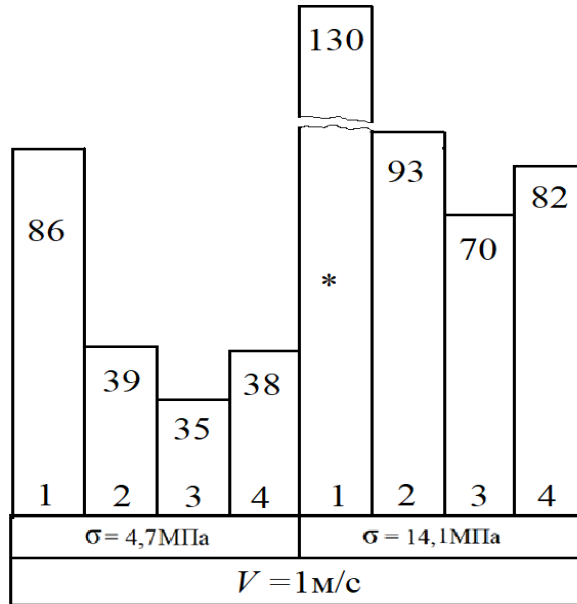


Рисунок 4.3 – Влияние типа смазывания на температуру (°C) в зоне трения:

при отсутствии канавок: 1 – без дополнительного смазывания;

2 – с разовым смазыванием;

с подачей жидкого смазочного материала: 3 – с канавкой шириной 3,5 мм

и 4 – с канавкой 4,5 мм

Следует отметить, что при скорости 1 м/с и контактном давлении 14,1 МПа без дополнительного смазочного материала покрытие без канавки разрушилось через 5 мин работы (см. * на рисунке 4.3), а с канавкой в 6 мм – через 10,5 мин.

Таким образом, только образование канавок на опорной поверхности в комплексе со смазыванием обеспечивает устойчивую работу подшипника как на скорости, характерной для самосмазывания фторопластом, так на скорости, характерной для жидкостного трения в режиме гидродинамики.

На этом же рисунке (см. рисунок 4.3) представлено влияние ширины маслоподдерживающих канавок на температуру зоны трения. Результаты анализа

этого параметра показывают, что даже при подаче жидкого смазочного материала в стандартный подшипник с полимерным покрытием температура контакта снижается в среднем на 41,5 %, а при канавке шириной 3 мм – на 52,7 %.

В исследованном диапазоне нагружения при меньших значениях контактного давления (4,7 МПа) температура снижается более интенсивно, чем при большей, – в среднем на 34,5 %. Следует отметить, что увеличение ширины канавки до 6 мм также снижает температуру, но на 12,8 % меньше, чем 3,5-миллиметровая канавка. Следовательно, для данных режимов эксплуатации рациональной является ширина канавки равная 3,5–4,5 мм, однако, поскольку основной вклад в генерацию тепла вносит скорость, это должно быть уточнено.

Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований показал, что прерывистая опорная поверхность радиальных подшипников с антифрикционным полимерным фторопластсодержащим композиционным покрытием обеспечивает их эффективную работу как в режиме граничного трения при смазывании фторопластом, так и в условиях жидкостного трения при гидродинамическом режиме.

4.2 Режимы работы подшипников

Выполненная на опорной поверхности втулки маслоподдерживающая канавка обеспечивает при росте скорости автопереход подшипника на работу в режиме жидкостного смазывания, но она не препятствует и граничному трению при смазывании фторопластом.

Следовательно, подобный подшипник может работать в двух разных режимах или в любой последовательности изменять режим работы в соответствии с изменением нагрузочно-скоростных условий эксплуатации. Граничное трение имеет место при контактном давлении до 100 МПа и скорости до 0,2–0,25 м/с, а жидкостное в гидродинамическом режиме – при гораздо меньшем контактном давлении – 5–14 МПа и значительно большей скорости – 1 м/с и более. Возможно и смешанное трение. Данные сравнительные исследования выполнялись при одинаковых условиях.

Результаты последовательной смены режима работы подшипника с канавкой размером 3,5 мм при постоянном контактном давлении 14,1 МПа и изменении скорости от 0,2 до 1,0 м/с представлены на осциллограмме (рисунок 4.4). На ней условия трения обозначены следующим образом: 1 – включение без контактного давления; 2 – нагружение; 3 – работа без смазывания; 4 – подача смазочного материала; 5 – работа со смазочным материалом; 6 – увеличение скорости; 7 – снижение скорости; 8 – удаление смазочного материала; 9 – работа на самосмазывании остатками смазочного материала и фторопластом покрытия; 10 – увеличение скорости.

Текущее изменение температуры, снижающей вязкость смазочного материала и коэффициент трения фторопласта, описано кривой (см. рисунок 4.4).

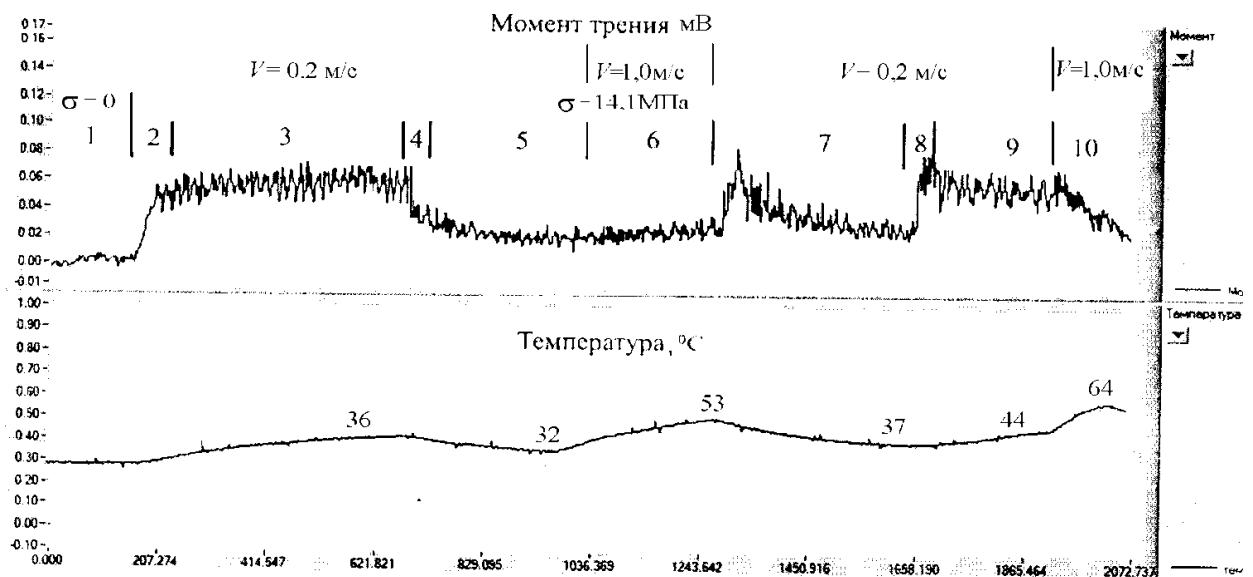


Рисунок 4.4 – Осциллограмма последовательной смены скорости подшипника с маслоподдерживающей канавкой

На осциллограмме записана величина коэффициента трения при постоянной контактной давлении и изменениях скорости. Причем скорость изменялась трижды: как в сторону увеличения, так и в сторону снижения. На основе выполненных экспериментальных исследований установлено, что рассматриваемый подшипник бесперебойно работал при изменении величины скорости в 5 раз (от 0,2 до 1,0 м/с), последовательно переходя к разным режимам смазывания.

Более четкое представление о величине коэффициента трения при изменении режима смазывания приведено на графиках испытания трибосистем с различной конструкцией опорной поверхности втулки (рисунок 4.5), построенных на основе осциллограмм, подобных представленной выше.

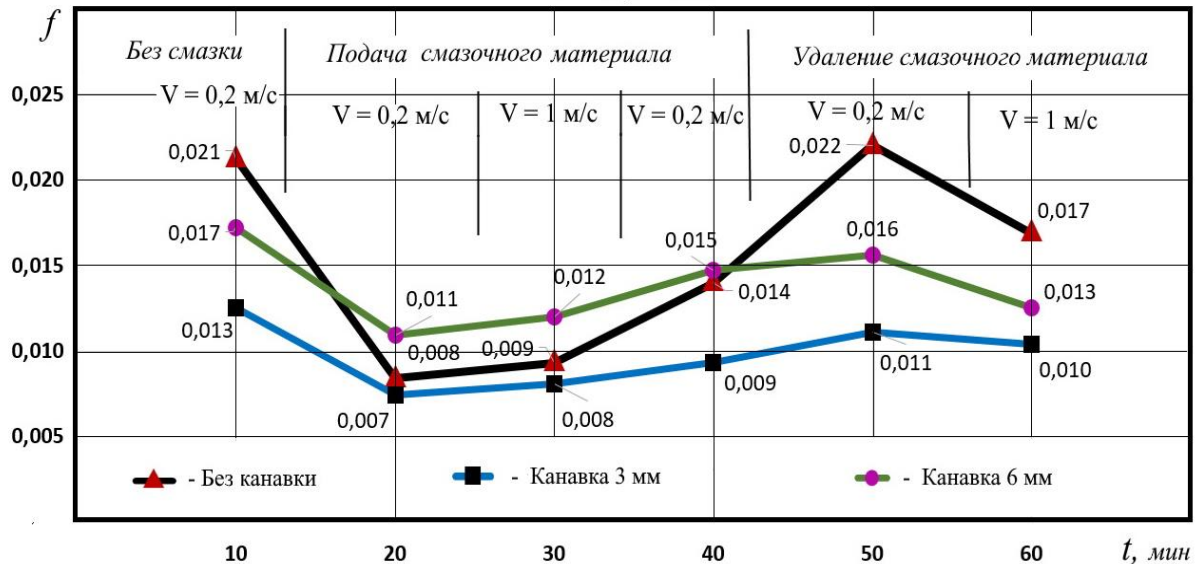


Рисунок 4.5 – Зависимость типа смазывания подшипника от рабочей скорости (контактное давление $\sigma = 14,7$ МПа)

Сравнительный анализ приведенных экспериментальных результатов позволяет заключить, что смазывание фторопластсодержащими материалами эффективно, несмотря на нулевую адгезию и несмачиваемость фторопласта.

Наименьшую величину коэффициента трения при подаче смазочного материала обеспечивает канавка шириной ≈ 3 мм. При увеличении ширины канавки до 6 мм коэффициент трения становится выше даже стандартной опоры без канавки. Усредненное по всему диапазону исследований снижение коэффициента трения канавкой в ≈ 3 мм составляет 35,3 и 30,7 % соответственно к отсутствию канавки и ее ширине в 6 мм.

Необходимо отметить, что наличие канавки снижает коэффициент трения рассматриваемой металлополимерной трибосистемы даже без подачи смазочного материала. И здесь наибольший эффект обеспечивает канавка шириной ≈ 3 мм.

Следует отметить, что ширина канавки определяется приближенно, т. к. края композита незначительно разрыхляются при работе.

Рассмотрим аналогичную предыдущей осциллограмму экспериментальных триботехнических исследований при изменении контактного давления и постоянной скорости (рисунок 4.6). Условия трения на осциллограмме обозначены аналогично предыдущей: 1 – включение без контактного давления и смазывания; 2 – нагружение; 3 – еще нагружение; 4 – максимальное контактное давление; 5 – разгрузка; 6 – подача смазочного материала; 7 – повышение контактного давления; 8 и 9 – дальнейшее ступенчатое повышение контактного давления; 10 – разгрузка и выключение.

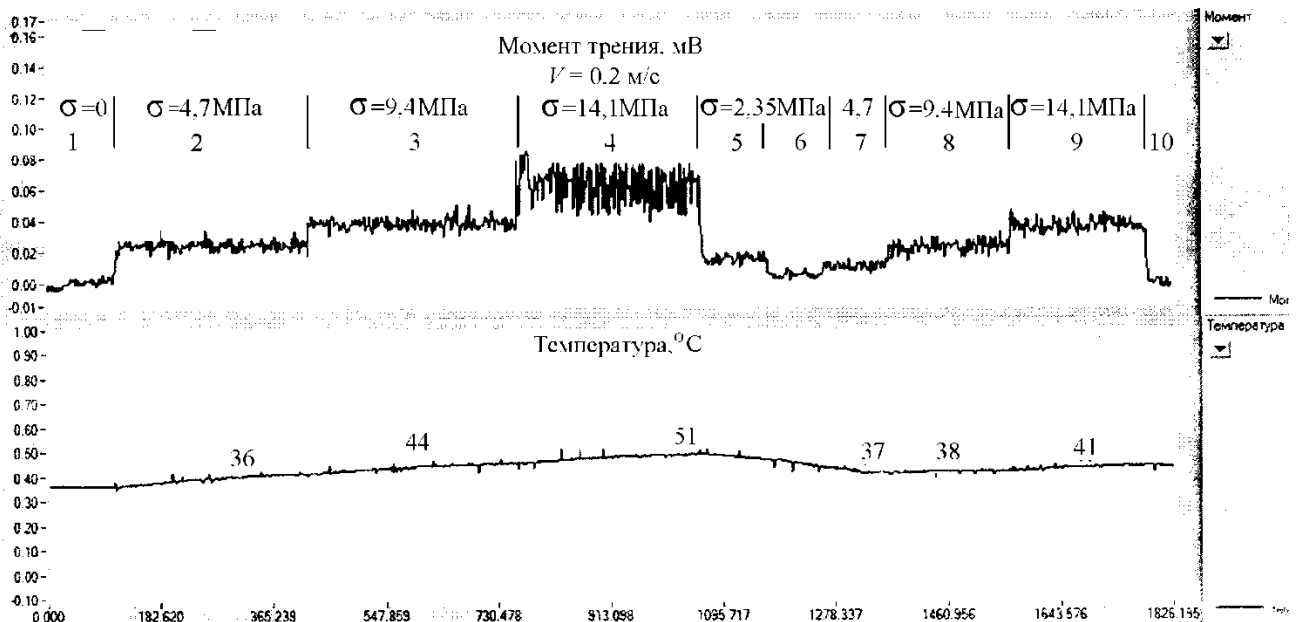


Рисунок 4.6 – Осциллограмма последовательной смены контактного давления подшипника с маслоподдерживающей канавкой ($b \approx 3 \text{ мм}$)

Результаты экспериментальных исследований доказывают, что металлополимерный подшипник устойчиво работает как в граничном, так и в жидкостном режиме смазывания при изменении величины контактного давления в 3 раза (от 4,7 до 14,1 МПа). Кроме того, рассматриваемый подшипник благодаря наличию маслоподдерживающей канавки при повышении скорости автоматически переходит от граничного смазывания фторопластом к гидродинамическому

смазыванию стандартным жидким смазочным материалом. Без сбоев выполняется и обратный переход.

Следует отметить, что для установления факта превалирования гидродинамического режима смазывания при работе подшипника с фторопластсодержащим антифрикционным покрытием недостаточно определить величину коэффициента трения. При температуре около 100 °С фторопласт обеспечивает его уровень, близкий к гидродинамическому режиму. В связи с этим окончательное решение о превалировании гидродинамики принимается в случае постоянства или незначительного изменения величины коэффициента трения с ростом контактного давления, поскольку гидродинамическое давление в рабочем зазоре подшипника значительно превышает рабочее контактное давление [143].

Устойчивый переход к гидродинамическому режиму смазывания прослеживается на графике (рисунок 4.7), построенном на основе осциллограмм типа рисунка 4.6.

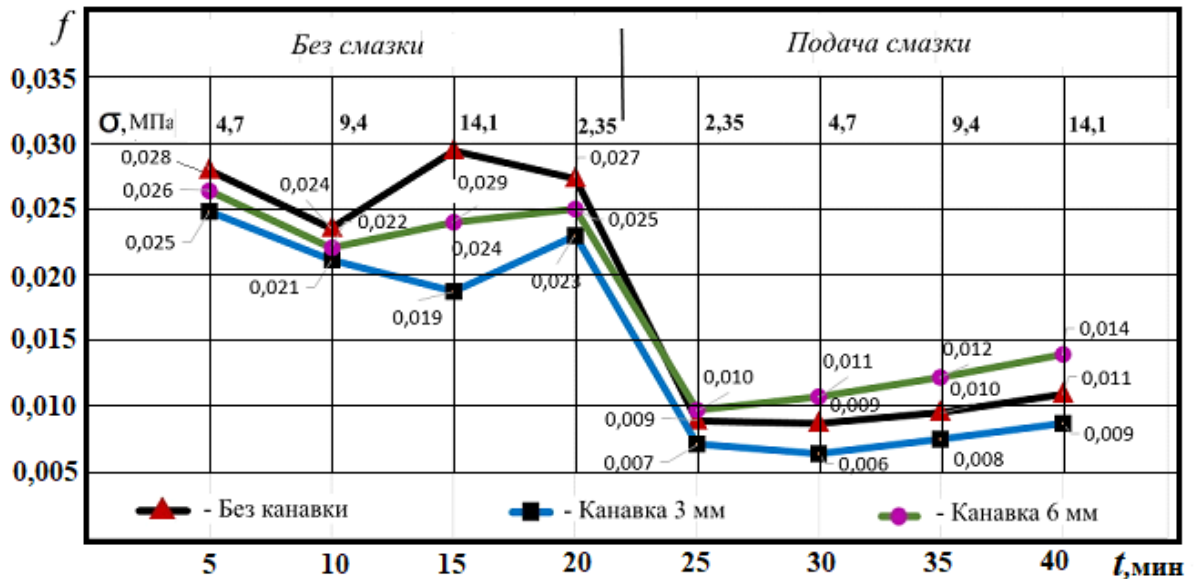


Рисунок 4.7 – Зависимость типа смазывания подшипника от контактного давления (скорость $V = 0,2$ м/с)

Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее: трибосистема устойчиво работает при ступенчатом изменении контактного

давления в исследованном диапазоне как без смазочного материала, так и при его наличии.

Как и в предыдущем случае, канавка шириной $\approx 3-4$ мм обеспечивает наименьший коэффициент трения. Его усредненная величина на 36,2 % меньше, чем канавка в 6 мм, и на 25 % меньше гладкой опорной поверхности. Возможно, при слишком большой ширине канавка не полностью заполняется смазочным материалом. Незначительное системное увеличение коэффициента трения с ростом контактного давления свидетельствует о некотором вкладе граничного трения, т. е. имеет место смешанное трение при значительном превалировании гидродинамики.

Ориентируясь на минимум коэффициента трения при ширине маслоподдерживающей канавки в пределах 3,5–4,5 мм, мы выполнили комплекс экспериментальных исследований для всего диапазона скоростных эксплуатационных режимов и ширины канавки.

Наличие экстремума (минимума) коэффициента трения потребовало применения при линейном планировании полнофакторного эксперимента метода перевала по переменному фактору « b ».

Для достижения статистической однородности выходных параметров использовано их логарифмическое преобразование. Статистическая обработка результатов позволила получить регрессионные модели следующего вида:

– для диапазона $b = 1-4$ мм

$$f \cdot 10^3 = 24,616 \cdot b^{-0.568} V^{0.023+0.199 \lg b}; \quad (4.1)$$

– для диапазона $b = 4-6$ мм

$$f \cdot 10^3 = 8362 \cdot b^{0,211} V^{0,292-0,248 \lg b}, \quad (4.2)$$

где b – ширина канавки, мм;

V – скорость, м/с.

Полученные модели адекватны и при выполнении интерполяционных расчетов обеспечивают результаты со средней погрешностью, не превышающей 7,5 %. Графики приведенных моделей совмещены по общей координате, соответствующей экстремальному минимуму « b » (рисунок 4.8).

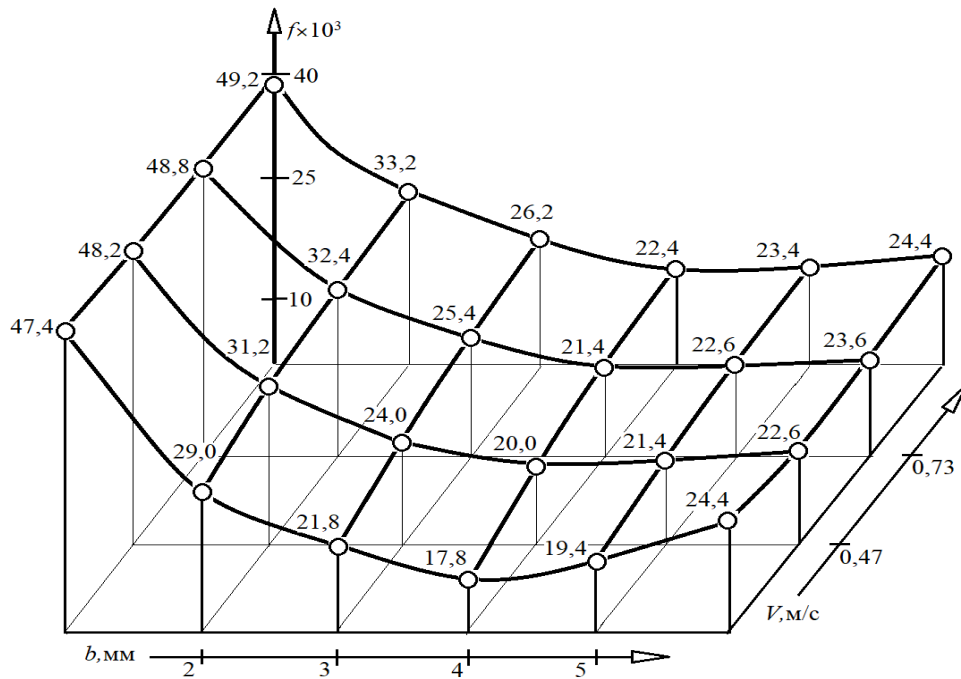


Рисунок 4.8 – Зависимость коэффициента трения металлополимерной трибосистемы от скорости и ширины маслоподдерживающей канавки

Полученные результаты наглядно доказывают эффективность маслоподдерживающей канавки любой ширины в сравнении со стандартной сплошной опорной поверхностью. Вместе с тем подтверждается сделанное ранее, в теоретической части работы, заключение об ограничении оптимальных размеров ширины канавки, равной 3,5–4,5 мм.

Рост скорости до 1 м/с несколько повышает уровень коэффициента трения ($\approx 20\%$), но не изменяет экстремальной зависимости и оптимальной величины ширины канавки.

Для полимерных материалов более значимую роль играет температура, генерируемая при трении, хотя смазочный материал снижает ее уровень. В связи с этим одновременно с коэффициентом трения при экспериментальных исследованиях определялась и температура на обратной стороне полимерного покрытия. Выбор именно этой зоны для установки термодпары был использован в связи с тем, что рассматриваемая трибосистема в режиме жидкостного трения сохраняет работоспособность до момента отслаивания покрытия, закрепленного на субстрате матричным адгезивом. Кроме того, повышение температуры снижает

вязкость применяемого жидкого смазочного материала, сужая область его реализации.

Принимая во внимание характер полученной экспериментально экстремальной зависимости температуры от ширины канавки, при планировании экспериментов мы, как и для коэффициента трения, использовали метод перевала.

Регрессионные модели после статистической обработки результатов имеют следующий вид:

– для диапазона ширины канавки 1–4 мм

$$T = 117b^{-0.295}V^{0.522}; \quad (4.3)$$

– для диапазона ширины канавки 4–6 мм

$$T = 69b^{-0.097}V^{0.529}. \quad (4.4)$$

Несмотря на незначимость смешанных взаимодействий, полученные модели адекватны. Расчеты, выполненные на их основе, обеспечивают погрешность не более 3 %. График моделей в общей системе координат приведен на рисунке 4.9.

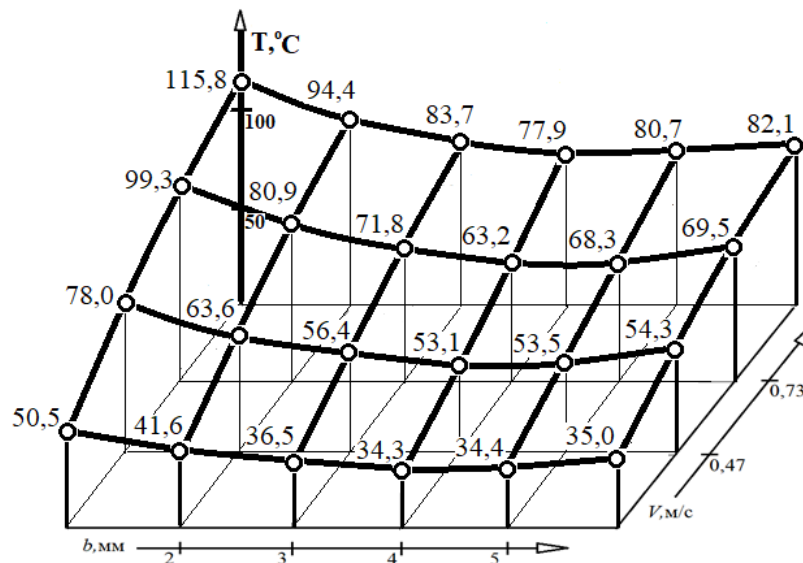


Рисунок 4.9 – Влияние на температуру металлополимерной трибосистемы от скорости и ширины маслоподдерживающей канавки при смазывании турбинным маслом Тп22-С

Далее выполнялись исследования по установлению влияния на эффективность канавки в опорной поверхности втулки радиального подшипника

всего комплекса эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов. Ширина канавки соответствовала оптимальной равной 3,5–4,5 мм, глубина – толщине антифрикционного покрытия 0,55 мм.

Статистическая обработка экспериментальных результатов позволила получить модель вида:

$$f = 0,0289 \cdot \sigma^{-0.386} V^{1.451-1.071 \lg \sigma}, \quad (4.5)$$

где σ – средние нормальные контактные напряжения, рассчитанные по проекции вала, МПа.

Модель включает смешанные взаимодействия, что характерно для влияния нагрузочно-скоростных режимов на металлополимерные подшипники. Она адекватна и обеспечивает наибольшую погрешность расчетов в пределах 3 %. График модели приведен на рисунке 4.10.

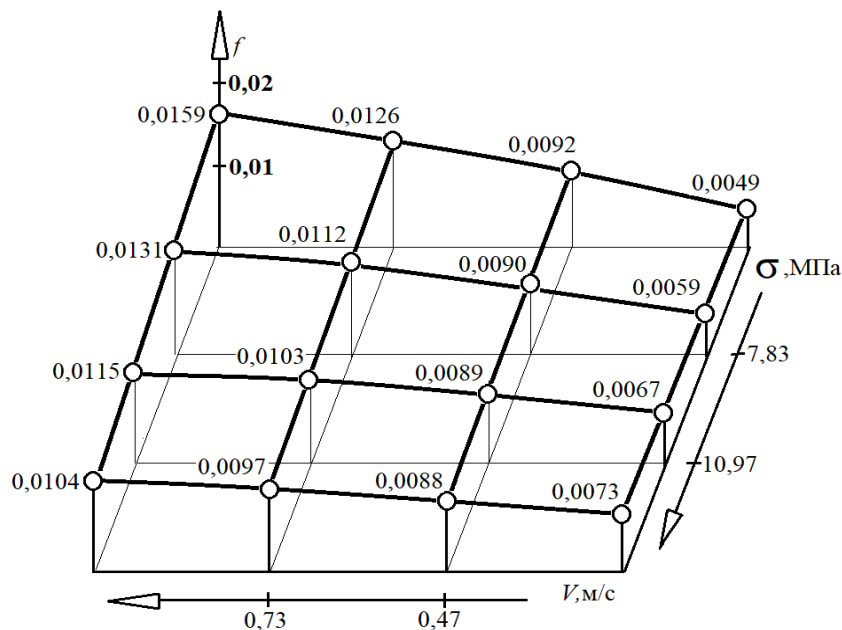


Рисунок 4.10 – Зависимость коэффициента трения от нагрузочно-скоростных режимов (смазывание стандартным смазочным материалом)

Анализ полученных экспериментальных значений коэффициента трения доказывает устойчивую реализацию гидродинамического режима смазывания рассматриваемого радиального подшипника практически во всем исследованном диапазоне эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов.

Таким образом, наличие маслоподдерживающей канавки способствует снижению потерь на трение и расширению диапазона допустимых скоростных режимов. Все это существенно расширяет область применения высокоэффективных металлополимерных трибосистем, обеспечивая их большую универсальность.

Описанные результаты экспериментальных исследований получены в условиях смазывания стандартным вязким жидким смазочным материалом с ньютоновскими реологическими свойствами.

Далее экспериментальные исследования выполнялись с применением микрополярного смазочного материала со специфической неньютоновской реологией. Для возможности сравнения результатов эксперименты выполнялись по тому же полнофакторному экспериментальному плану.

Статистическая обработка результатов позволила получить адекватную регрессионную модель процесса трения следующего вида:

$$f = 0,0286 \cdot \sigma^{-0,205} V^{1,356-1,386} \lg \sigma. \quad (4.6)$$

Погрешность модели не превышает 3,7 %; график приведен на рисунке 4.11.

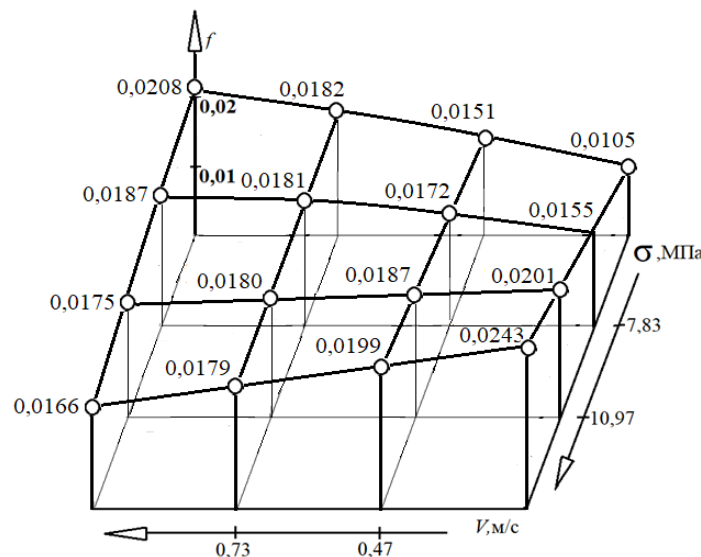


Рисунок 4.11 – Зависимость коэффициента трения от режимов нагружения (смазывание микрополярным смазочным материалом)

Полученная величина коэффициента трения свидетельствует о стабильном превалировании режима гидродинамического смазывания.

Анализ экспериментальных результатов доказывает наличие специфики влияния микрополярного смазочного материала на работу металлополимерной фторопластсодержащей трибосистемы. Применение стандартного вязкого смазочного материала приводит к росту коэффициента трения при повышении скорости во всем диапазоне исследованных режимов, а микрополярного – только до средних значений контактного давления. При дальнейшем ее увеличении отмечается обратная зависимость – снижение коэффициента трения.

Аналогичная зависимость для микрополярного материала характерна и для контактного давления. Рост значений контактного давления увеличивает коэффициент трения только до средних величин скорости, а затем трение снижается. Последнее обстоятельство имеет место и для вязкого смазочного материала, но в меньшей степени. В этом случае контактное давление увеличивает коэффициент трения только до средних величин скорости.

Математическое описание отмеченного эффекта представлено в моделях коэффициентом смешанных взаимодействий. Физическая причина, по нашему мнению, заключается во влиянии как на смазочный материал, так и на полимерную поверхность температуры, зависящей не только от величин режимных параметров, но и от их сочетания. Кроме того, при значениях контактного давления менее 12 МПа отмечается повышение жесткости покрытий, вызванное абсорбцией жидкого смазочного материала [195].

На последнем этапе экспериментальных исследований была доказана эффективность применения осевых канавок при наличии у подшипника некруглого опорного профиля, адаптированного к конкретным условиям трения. Эксперименты выполнялись в том же диапазоне эксплуатационных режимов. Полученная регрессионная модель процесса трения имеет следующий вид:

$$f = 0,0193 \cdot \sigma^{-0,276} V^{1,05-0,744 \lg \sigma} . \quad (4.7)$$

Модель адекватна и обеспечивает при интерполяционных расчетах погрешность не более 3,0 %.

В полученной модели взаимное влияние параметров контактного давления и скорости гораздо меньше, чем в предыдущих случаях, но значим коэффициент смешанных взаимодействий. График полученной модели показан на рисунке 4.12.

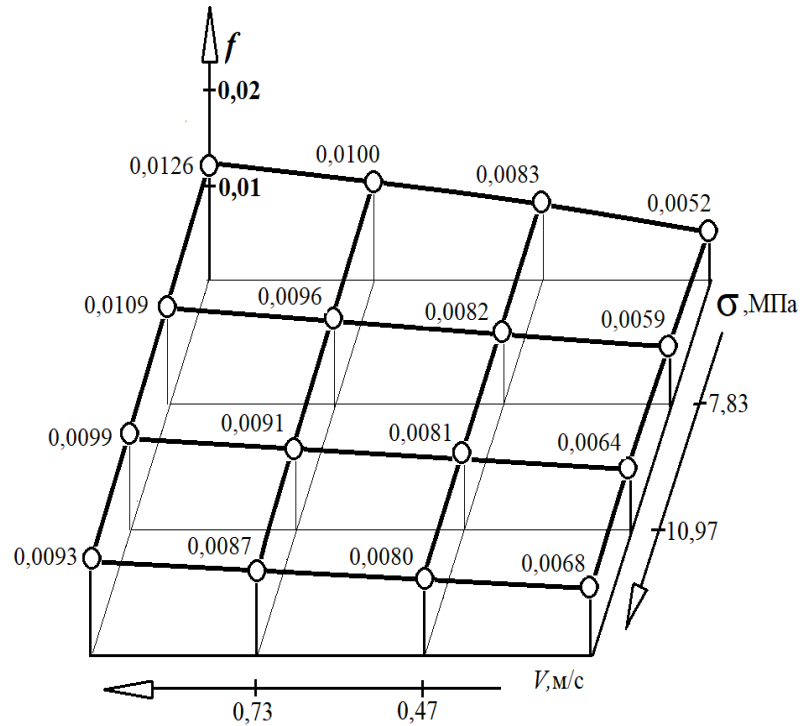


Рисунок 4.12 – Зависимость коэффициента трения от величины эксплуатационных режимов радиального подшипника с некруглым профилем

Адаптированный к условиям трения профиль характеризуется меньшим контактным углом и лучшими условиями для образования гидродинамического клина. Это облегчает выход трибосистемы на режим жидкостного смазывания и обеспечивает снижение коэффициента трения до 20,7 %.

Следовательно, результаты выполненных экспериментальных исследований подтвердили значимость теоретических разработок и применимость исследуемых металлополимерных трибосистем в условиях гидродинамического смазывания стандартными вязкими и микрополярными смазочными материалами.

4.3 Лабораторные и промышленные испытания

Значительный объем упрощающих допущений при постановке и решении теоретических задач дает возможность произвести в основном качественную

оценку зависимости характеристик подшипника от нагрузочно-скоростных режимов. Однако это позволило доказать эффективность конструкции опорной поверхности подшипника с полимерным покрытием и маслоподдерживающей канавкой, обеспечивающей стабильную реализацию режима гидродинамического смазывания, что подтверждено экспериментальными исследованиями. Кроме того, достоверно установлена оптимальная ширина осевой канавки, минимизирующая величину коэффициента трения и, что более важно для полимерных покрытий, минимизирующая температуру.

Одновременно определена величина вертикальной составляющей давления в канавке, обеспечивающая при росте скорости автопереход от граничного смазывания фторопластом к гидродинамическому режиму трения и показывающая предельную несущую способность подшипника при этом переходе.

Результаты теоретических расчетов полностью подтверждены экспериментально. Следует упомянуть, что подшипники с рассматриваемым полимерным покрытием, но без канавки при скорости 1 м/с имеют ресурс, равный 5–10 минутам.

Таким образом, доказано, что выдвинутая теоретическая рабочая гипотеза о роли маслоподдерживающей канавки в выходе подшипников с вязкоупруго деформированным антифрикционным покрытием на гидродинамический режим смазывания является непротиворечивой.

Полученные результаты исследований позволяют значительно увеличить универсальность и область эффективного применения металлополимерных подшипников с антифрикционным фторопластсодержащим покрытием.

Испытания в промышленных условиях разработанной конструкции металлополимерных радиальных подшипников с антифрикционным покрытием и маслоподдерживающими канавками проводились на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе филиале АО «Желдорремаш». Подшипники устанавливались на пружинно-вальценовальный станок (инвентарный номер 4Б – 0020). Общий вид станка приведен на рисунке 4.13.

Узел, на котором установлены разработанные подшипники, представлен на рисунке 4.14.



Рисунок 4.13 – Пружинно-вальценовивочный станок



Рисунок 4.14 – Рабочий узел станка

Испытываемые радиальные подшипники скольжения представляют собой металлические втулки с антифрикционным композиционным полимерным фторопластсодержащим покрытием, нанесенным на их внутреннюю рабочую поверхность. Опорная поверхность покрытия имеет маслоподдерживающую канавку глубиной 0,55 мм и шириной 4 мм, ориентированную по оси подшипника.

Подшипники рабочего узла станка функционируют в двух совершенно разных режимах: один при протяжке листов, другой – при навивке пружин. В первом случае при протяжке листов скорость составляет 0,15 м/с, а во втором – при навивке пружин – 1,13 м/с.

Первый режим соответствует граничному трению. В этом режиме работы фторопласт выполняет функции смазочного материала, обеспечивая самосмазывание в результате адгезионного переноса на поверхность контртела. Наличие жидкого смазочного материала, снижая температуру контактной зоны, способствует уменьшению расхода фторопласта в покрытии.

При переходе ко второму режиму и резкому повышению скорости (почти в 8 раз) в результате циркуляционного движения смазочного материала в маслоподдерживающей канавке возникают условия для образования масляного клина и перехода подшипника к режиму жидкостного трения. Таким образом, при увеличении скорости переход подшипника от граничного трения к гидродинамическому выполняется автоматически.

Кроме того, повышается несущая способность узла, увеличивается его демпфирующая способность, и в результате ресурс подшипников повышается на 10–15 %. Следовательно, результаты промышленных испытаний оцениваются как удовлетворительные, и в настоящий момент испытания модифицированных подшипников продолжаются.

4.4 Выводы по главе

1 Установлено влияние маслоподдерживающей канавки на основные параметры (температуру и коэффициент трения) работы радиального подшипника скольжения с антифрикционным полимерным фторопластсодержащим покрытием.

2 Подтверждены экспериментально теоретические выводы о возможности автоперехода металлополимерного радиального подшипника скольжения с осевой маслоподдерживающей канавкой от граничного трения к гидродинамическому.

3 Для металлополимерных подшипников в исследованном диапазоне скоростей оптимизирована ширина маслоподдерживающей канавки, обеспечивающая минимум величины коэффициента трения и контактной температуры.

4 Получены регрессионные модели, позволяющие оценить влияние вязкого, а также микрополярного смазочного материала на работу радиальных подшипников скольжения с маслоподдерживающей канавкой и стандартной опорной поверхностью, а также поверхностью, адаптированной к конкретным условиям трения.

5 Промышленные испытания разработанных подшипников, проведенные на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе (филиал АО «Желдорремаш») на пружинно-вальценовочном станке, показали, что ресурс работы подшипников увеличился на 12,3–15,1 %, и оцениваются удовлетворительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Исследуемые антифрикционные полимерные покрытия, обладающие вязкоупругими свойствами, находясь под рабочим контактным давлением, подвержены ползучести. При этом шейка вала вдавливаются в покрытие и образуется плотный безззорный контакт, препятствующий образованию гидродинамического клина. При вращении вала в канавке вдоль оси подшипника возникает движение жидкого смазочного материала, и гидродинамическое давление поднимает вал, образуя зазор для смазочного материала.

Обобщенные итоги исследований дают возможность сделать следующие выводы:

1 Впервые разработан и подтвержден экспериментально комплекс расчетных моделей для радиальных подшипников скольжения с полимерным покрытием и осевой канавкой, позволяющих выполнять смену видов смазывания с граничного на гидродинамическое.

2 Расчетные модели радиальных подшипников со стандартным опорным профилем с осевой канавкой и полимерным покрытием основаны на учете трибологических параметров в условиях смазывания микрополярным смазочным материалом с неньютоновскими реологическими свойствами или вязким смазочным материалом при одновременном учете давления и температуры, а также турбулентного характера течения.

3 Установлены зависимости, позволяющие определить эксплуатационные характеристики радиальных металлополимерных подшипников с покрытием и нестандартным специальным некруговым профилем опорной поверхности, адаптированным к конкретным условиям трения, смазываемым вязким или микрополярным жидким смазочным материалом.

4 На основе общего подхода к моделированию подшипников скольжения различной конструкции разработан комплекс расчетных моделей, позволяющий выполнять инженерные проектировочные расчеты радиальных металлополимерных подшипников с осевой канавкой, при которых происходит

смена режимов смазывания с граничного, устойчиво работающего при высоких значениях контактного давления и низких скоростях ($\sigma \approx 150$ МПа и $V \leq 0,25$ м/с), при смазывании фторопластом на гидродинамический – при снижении нагрузок и повышении скорости ($\sigma \approx 14$ МПа и $V \geq 1$ м/с).

5 Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили значимость полученных теоретически расчетных моделей и эффективность характеристик разработанных радиальных металлополимерных подшипников с осевыми канавками оптимальной ширины, позволяющих обеспечить их устойчивую работу в гидродинамическом режиме смазывания при увеличении скоростного режима их эксплуатации.

6 Промышленные испытания разработанных подшипников, проведенные на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе (филиал АО «Желдорремаш») на пружинно-вальценовивочном станке, показали, что ресурс работы подшипников увеличился на 12,3–15,1 %, и оцениваются удовлетворительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Билик, Ш. М. Пары трения металл-пластмасса в машинах и механизмах / Ш. М. Билик. – Москва : Машиностроение, 1965. – 311 с.

2 Ахвердиев, К. С. Основы совершенствования тяжело нагруженных узлов трения транспортных систем : монография / К. С. Ахвердиев, В. И. Колесников, В. М. Приходько. – Москва : Маршрут, 2005. – 336 с. – ISBN 5-89035-158-3 (в пер.).

3 Кохановский, В. А. Несущая способность полимерных композиционных покрытий / В. А. Кохановский // Инструментообеспечение и современные технологии в технике и медицине : сборник научных трудов / под редакцией В. Г. Солоненко. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 1997. – С. 105–108. – ISBN 5-7890-0042-8.

4 Research of physically modified antifriction-wear-resistant composite polymer materials and coatings on their basis for machine-building purpose / S. Negmatov, Nadira Abed, Surayyo Negmatova, T. Halimjonov, M. Sadikova, M. Matsharipova, T. Ulmasov, Sh. Bozorboev, O. Abdullaev, Z. Mahamajanov // *Plasticheskie massy*. – 2021. – Vol. 1–2. – P. 28–32. – DOI 10.35164/0554-2901-2021-1-2-28-32.

5 The development of methods to improve the durability of a radial bearing with a non-standard support profile and polymer coating on the shaft surface taking into account the rheological properties of the lubricant / G. A. Badakhov, V. N. Bagrova, A. V. Morozova, M. A. Mukutadze // *International Research Journal*. – 2022. – Vol. 12(126). – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.54>.

6 Кохановский, В. А. Модуль упругости покрытий на основе самосмазывающихся волокнитов / В. А. Кохановский // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. – 1986. – № 2. – С. 80–83.

7 Иванов, С. И. Исследование ползучести антифрикционных полимерных покрытий / С. И. Иванов, Н. Г. Снежина, Н. А. Хомич // Вестник Донского государственного технического университета. – Ростов-на-Дону, 2011. – № 2(53). – С. 157–162.

8 Кохановский, В. А. Температура в узлах трения с антифрикционными самосмазывающимися волокнитами / В. А. Кохановский, В. А. Салион, И. Я. Пинус // Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении / ответственный редактор В. В. Рубанов. – Ростов-на-Дону : Изд-во РИСХМа, 1991. – 107 с. – С. 73–77. – ISBN 5-230-08619-X : 0.70 р.

9 Кохановский, В. А. Теплофизические свойства полимерных антифрикционных покрытий и режимы их нанесения / В. А. Кохановский, М. А. Мукутадзе // Пластические массы. – 2002. – № 12. – С. 44–45. – ISSN 0554-2901.

10 Кужаров, А. С. Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена / А. С. Кужаров, В. Г. Рядченко // Безызносность : межвузовский сборник научных трудов. Вып. 2. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1992. – С. 149–147.

11 Кохановский, В. А. Покрытия из самосмазывающихся волокнитов для подшипников скольжения / В. А. Кохановский, В. А. Кузичев, В. А. Салион // Вестник машиностроения. – 1986. – № 10. – С. 40–43. – ISSN 0042-4633.

12 Die wartungsfrein Gelenklager mit den zwei roten Schutzringen / Katalog HUNGER DFE. – Sciten, 1981. – November. – 46 s.

13 Kokhanovskiy, V. A. Properties of polymeric antifriction coatings in acid aquatic media / V. A. Kokhanovskiy, V. V. Rubanov, I. B. Vlasenko // Vestnik of Don State Technical University. – 2011. – Vol. 11(10). – P. 1803–1807. (In Russ.)

14 Дроздов, Ю. Н. Трибологические свойства и применение антифрикционных самосмазывающихся покрытий в шарнирах и подшипниках скольжения – демпферах колебаний авиационных конструкций / Ю. Н. Дроздов, В. Н. Пучков, А. Г. Пономаренко // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения. – Москва : Наука, 2016. – 511 с. – С. 461–472. – ISBN 978-5-9908169-6-1 : 600 экз.

15 Serkova, E. A. Polymer materials for antifriction coatings / E. A. Serkova, V.V. Khmel'nitskiy, O.B. Zastrogina // Proceedings of VIAM. – 2021. – Vol. 5. – P. 56–63. – DOI 10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63.

16 Рогов, В. Е. Повышение эксплуатационных характеристик фторопластовых уплотнительных манжет путем создания на рабочих поверхностях полимер-полимерных покрытий / В. Е. Рогов, А. М. Гурьев // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 122–133. – ISSN 2072-8921.

17 Welz, H. U. Eigenschaften von PTFE-Kompositionen und deren Anwendungsmöglichkeiten beim Verschleißschutz / H. U. Welz // Schmierungstechnik. – 1982. – Bd. 13. – № 6. – S. 179–182.

18 Влияние температуры термообработки углеродных волокон на формирование фторполимерного покрытия и свойства фторопластовых композитов / В. А. Шелестова, П. Н. Гракович, И. С. Шилько [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 4. – С. 80–85. – DOI 10.32864/polymmattech-2020-6-4-80-85.

19 Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 т. / под редакцией И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – Москва : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 400 с. ; Т. 2. – 358 с.

20 Артамонов, В. Н. Трибологические характеристики сферических шарнирных подшипников скольжения с самосмазывающимся покрытием на основе ткани / В. Н. Артамонов, Ю. Н. Дроздов // Вестник машиностроения. – 1987. – № 4. – С. 10–14. – ISSN 0042-4633.

21 Дроздов, Ю. Н. Расчет сферических шарнирных подшипников / Ю. Н. Дроздов, В. Н. Артамонов // Вестник машиностроения. – 1985. – № 2. – С. 17–20.

22 Пророкова, Н. П. Комплексные текстильные полипропиленовые нити с устойчивым фторопластовым покрытием / Н. П. Пророкова, С. Ю. Вавилова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 3(405). – С. 234–242. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_3_234.

23 Пророкова, Н. П. Механические характеристики полученной по новой технологии полипропиленовой нити с покрытием на основе политетрафторэтилена / Н. П. Пророкова, С. Ю. Вавилова, В. М. Бузник // Химическая технология. – 2020. – № 21. – С. 409–417. – DOI 10.31044/1684-5811-2020-21-9-409-417.

24 А. с. № 611437 СССР, МКИ СО8 L 27/18 79/08 61/14. Антифрикционная полимерная композиция / Г. П. Барчан, В. Г. Рядченко, В. А. Кохановский [и др.]. – № 2406984/23-05 ; заявл. 30.09.76 ; зарег. 21.02.78.

25 Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.

26 Аскадский, А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А. А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. – Москва : Химия, 1983. – 248 с.

27 Металлофторопластовые материалы для энергетического машиностроения: специфические особенности, разработка, производство, применение, тренд развития / В. Е. Рогов, А. М. Гурьев, С. О. Никифоров, Е. А. Кошелева // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 134–140. – ISSN 2072-8921.

28 Старостипецкий, Ю. А. Самосмазывающиеся покрытия опор скольжения / Ю. А. Старостипецкий, С. В. Степанович // Станки и инструмент. – 1986. – № 8. – С. 16. – ISSN 0869-7566.

29 Кардашов, Д. А. Конструкционные клеи / Д. А. Кардашов. – Москва : Химия, 1980. – 288 с.

30 Ковачич, Л. Склеивание материалов и пластмасс / Л. Ковачич. – Москва : Химия, 1985. – 239 с.

31 Композиционные порошковые покрытия специального назначения / В. Н. Гадалов, Е. А. Филатов, И. А. Макарова [и др.] // Главный механик. – 2020. – № 7. – С. 32–36. – ISSN 2074-7470.

32 Study of Structure Formation in Polytetrafluoroethylene Filled with Aluminum after Explosive Pressing / Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, Д. В. Савин, Г. В. Агафонова // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. – Vol. 13, Iss. 1 (February). – P. 68–74. – URL : <https://doi.org/10.1134/S2075113322010026>.

33 Казуров, А. В. Structure of the Aluminum-Fluoroplastic Framed Composites Produced by Explosive Pressing / А. В. Казуров, Н. А. Адаменко, Д. В. Савин // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. – Vol. 13, Iss. 4. – P. 1070–1076. – URL : <https://doi.org/10.1134/S2075113322040189>.

34 Structure Formation in Nickel-Polytetrafluorethylene Composite Materials upon Explosive Pressing of Powders / Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, Г. В. Агафонова, Д. В. Савин // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2020. – Vol. 11, Iss. 4. – P. 982–990. – DOI 10.1134/S2075113320040036.

35 Features of forming the metal–fluoropolymer composites by method of explosive pressing / L. N. Ignatieva, G. A. Zverev, Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, А. Yu. Ustinov // *Journal of Fluorine Chemistry* (Нидерланды). – 2019. – Vol. 217 (January). – P. 58–62. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2018.11.008>.

36 Вакула, В. Л. Физическая химия адгезии полимеров / В. Л. Вакула, Л. М. Притыкин. – Москва : Химия, 1984. – 222 с.

37 Фторопласты : каталог / составители : Г. М. Ярышева, Н. Н. Логинова, А. И. Андреева [и др.] ; Охтинское научно-производственное объединение «Пластполимер». – Черкассы : Изд-во НИИТЭХИМ, 1983. – 210 с.

38 Адаменко, Н. А. Effect of Explosive Processing on the Structure and Properties of Polyarylate / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова, А. В. Казуров // *Materials Science and Metallurgical Technology : Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 946. – P. 14–19. – URL : <https://www.scientific.net/MSF.946.14>.

39 Кохановский, В. А. Армирующий каркас антифрикционных композитов / В. А. Кохановский, С. И. Иванов, А. А. Петренко // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2016. – № 11(196). – С. 20–23.

40 Справочник по композиционным материалам. В 2 кн. Кн. 2 / под редакцией Дж. Любина. – Москва : Машиностроение, 1988. – 584 с.

41 Казуров, А. В. Thermal and Electrical Conductivity of Copper-Fluoroplast Composites Produced by Explosive Pressing / А. В. Казуров, Н. А. Адаменко, С. П. Писарев // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2018. – Vol. 9, No. 4. – P. 584–587. – DOI 10.1134/S2075113318040160.

42 Peculiarities of the structure of copper- and nickel-fluoropolymer composites fabricated by explosive pressing / Л. Н. Игнатьева, Г. А. Зверев, Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, И. В. Сергеев, А. Ю. Устинов, И. А. Ткаченко, V. M. Bouznik // *Journal of*

Fluorine Chemistry. – 2015. – Vol. 172. – P. 68–73. – DOI 10.1016/j.jfluchem.2015.02.002.

43 Рябченко, С. К. Влияние режимов на параметры антифрикционных покрытий / С. К. Рябченко, Л. В. Красниченко, А. В. Лысенко // Трибология – производству : сборник. – Таганрог, 1991. – С. 147–148.

44 Исследование кинетики образования пленки фрикционного перенос антифрикционного самосмазывающегося композита на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) методом рентгеноэлектронной спектроскопии / В. Н. Кравченко, А. Т. Казаков, В. И. Колесников [и др.] // Динамика и прочность подвижного состава. – Ростов-на-Дону : РИИЖТ, 1986. – № 185. – С. 75–80.

45 Effect of explosive processing on the structure and properties of ultrafine polytetrafluoroethylene / Л. Н. Игнатьева, Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, В. Г. Курявый, Г. А. Зверев, Е. Б. Меркулов, А. Б. Слободюк, В. М. Бузник // Inorganic Materials: Applied Research. – 2013. – Vol. 4, No. 5. – P. 468–474. – DOI 10.1134/S2075113313050067.

46 Кохановский, В. А. Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов / В. А. Кохановский, Ю. А. Петров // Вестник Донского государственного технического университета. – 2008. – Т. 9, № 1(40). – С. 30–35.

47 Щеголев, В. А. О молекулярной подвижности цепей политетрафторэтилена / В. А. Щеголев, И. Д. Дерлугян, П. Д. Дерлугян // Высокомолекулярные соединения. – 1985. – Т. 27, № 6. – С. 403–405.

48 Lancaster, J. K. Third body formation and the wear of the PTFE fibrebased dry bearing. / J. K. Lancaster. P. Play, M. Godet // Trans. ASME, J. Lubric. Technol. – 1980. – Vol. 102, No. 2. – P. 236–246.

49 Особенности наноструктурирования в металлофторопластовых композициях при взрывном воздействии / Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, Г. В. Агафонова, И. В. Сергеев // Материалы. Технологии. Инструменты (Беларусь). – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 65–71.

50 Preparation of polymer nanocomposites by explosive processing / Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, А. В. Фетисов, Г. В. Агафонова // *Nanotechnologies in Russia*. – 2009. – Vol. 4, No. 1-2. – P. 85–92. – In Eng.

51 Lancaster, J. K. On the initial stages of wear of dry-bearing composites / J. K. Lancaster // *Running in Progress in Tribology: 8th Leed Lyon Symposium*, 8–11 September, 1981. – Paper 11, 1982. – P. 33–46.

52 Кохановский, В. А. Работа металлополимерных трибосистем на критических режимах / В. А. Кохановский. // *Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Т. 4 : Технические и естественные науки*. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 191–197.

53 Адаменко, Н. А. Thermomechanical properties of fluoroplastic-copper composites / Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, А. Х. Фам // *International Polymer Science and Technology*. – 2007. – Vol. 34, No. 12. – P. 27–31. – In Eng.

54 Патент 2632501 РФ, МПК В23К20/08, В23К101/04, В32В15/00. Способ получения композиционных изделий с внутренней полостью сваркой взрывом / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, Д. В. Проничев, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, В. П. Кулевич ; ВолгГТУ. – № 2016124068 ; заявл. 16.06.2016; опубл. : 05.10.2017, Бюл. № 28. – 20 с.

55 Водостойкость антифрикционных полимерных композитов / В. А. Кохановский, Ю. М. Ворожеин, Ю. Н. Пономарев [и др.] // *Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 4-й Международной научно-технической конференции, Ялта – Киев, 25–27 мая, 2004 г.* – Киев : АТМ Украины, 2004. – 238 с. – С. 125–127.

56 Бузник, В. М. Применение фторполимерных материалов в трибологии: состояние и перспективы / В. М. Бузник, Г. Ю. Юрков // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 4 (72). – С. 133–138. – ISSN 1994-6716.

57 Рубин, М. Б. Подшипники судовой техники : справочник / М. Б. Рубин, В. Е. Бахарева. – Ленинград : Судостроение, 1987. – 342 с.

58 Кохановский, В. А. Антифрикционные полимерные композиты в жидких средах / В. А. Кохановский, С. И. Иванов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 8. – С. 22–26. – ISSN 1819-2092.

59 Кохановский, В. А. Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах / В. А. Кохановский, Э. А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 1. – С. 34–37. – ISSN 1819-2092.

60 Кохановский, В. А. Вязкоупругие свойства антифрикционных покрытий в водных средах / В. А. Кохановский, И. Б. Власенко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 12. – С. 34–38. – ISSN 1819-2092.

61 Кохановский, В. А. Вязкоупругие свойства полимерных покрытий в жидких смазочных средах / В. А. Кохановский, Э. А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 2. – С. 44–48. – ISSN 1819-2092.

62 Камерова, Э. А. Идентификация триботехнических характеристик металлополимерных трибосистем в жидких смазочных средах : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.04 / Камерова Эльвира Атласовна. – Ростов-на-Дону, 2016. – 22 с.

63 Кохановский, В. А. Контактные давления в металлополимерной обратной паре / В. А. Кохановский, С. И. Босый // Вестник Донского государственного технического университета. – 2002. – Т. 2, № 2(12). – С. 178–183.

64 Полимеры в узлах трения машин и приборов : справочник / А. В. Чичинадзе, А. Л. Левин, М. М. Бородулин, Е. В. Зиновьев. – Москва : Машиностроение, 1988. – 328 с.

65 Айнбиндер, С. Б. Введение в теорию трения полимеров / С. Б. Айнбиндер, Э. Л. Тюнина. – Рига : Зинатне, 1978. – 224 с.

66 Кохановский, В. А. Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах / В. А. Кохановский, Э. А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 4. – С. 17–20. – ISSN 1819-2092.

67 Patent EP 0984182B1. Sliding bearing for internal combustion engine / Kanayama Hiroshi (Jp), Kawakami Shinya (Jp), Tomikawa Takashi (Jp), Kamiya Soji (Jp) ; Assignee ТАЙНО КОГЬО СО LTD (JP) ; filed 22.02.99; publ. 08.03.00.

68 Современная трибология: Итоги и перспективы / Э. Д. Браун [и др.] ; ответственный редактор К. В. Фролов ; Российская акад. наук, Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова. – Москва : ЛКИ, 2008. – 480 с. – ISBN 978-5-382-00518-8 (В пер.).

69 Кудашев, С. В. Fluorine-Containing Polyamide Composites with Reduced Combustibility / С. В. Кудашев, В. Н. Арисова // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2018. – Vol. 54, No. 6. – P. 1165–1168.

70 Патент 2444439 РФ, МПК В 32 В 15/08, В 22 F 7/02. Двухслойный листовый материал и способ его изготовления / Н. А. Адаменко, Э. В. Седов, А. В. Казуров, Г. В. Агафонова, А. В. Фетисов ; ВолГТУ. – № 2010129730/05 ; заявл 2010-07-15 ; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7. – 9 с.

71 Allaire, P. E. Design of Journal Bearings for Rotating Machinery / P. E. Allaire, R. D. Flack // *Proc. of the 10th Turbomachinery Simposiu.* – Texas : A & M University, 1980. – P. 25–45.

72 Wear of a Composite Based on Polyurethane, Polyfluorinated Alcohol, Montmorillonite, and Polytetrafluoroethylene / С. В. Кудашев, А. А. Терехов, В. А. Бабкин, А. В. Нистратов, В. Ф. Желтобрюхов, Д. С. Андреев, А. В. Игнатов, В. Н. Арисова, А. И. Богданов, Н. Вик. Кузнецова // *Journal of Friction and Wear*. – 2023. – Vol. 44, Iss. 2. – P. 86–90. – URL : <https://doi.org/10.3103/S1068366623020046>.

73 Briscoe, B. J. Interfacial friction of polymer composites. General fundamental principle / B. J. Briscoe // *Composite Materials Series. Vol. 1 : Friction and wear of polymer composites* / edited by K. Friedrich. – Amsterdam : Elsevier, 1986. – P. 25–59. – DOI 10.1016/B978-0-444-42524-9.50006-5.

74 Tanaka, K. Effects of various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites / K. Tanaka // *Composite Materials Series, Vol. 1 : Friction and wear of polymer composites* / edited by K. Friedrich. – Amsterdam : Elsevier, 1986. – P. 137–174.

75 Lancaster, J. K. Composites for aerospace dry bearing applications / J. K. Lancaster // *Composite Materials Series, Vol. 1 : Friction and wear of polymer composites* / edited by K. Friedrich. – Amsterdam : Elsevier, 1986. – P. 363–396.

76 Ящерицын, П. И. Работоспособность узлов трения машин / П. И. Ящерицын, Ю. В. Скорынин. – Минск : Наука и техника, 1984. – 288 с.

77 Formation of the structure and properties of polyvinylidene fluoride and composites based on it, prepared by explosive pressing / Н. А. Адаменко, Л. Н. Игнатьева, Г. А. Зверев, Г. В. Агафонова, В. А. Машенко // Journal of Fluorine Chemistry. – 2021. – Vol. 249 (September). – Article 109852. – DOI 10.1016/j.jfluchem.2021.109852.

78 Nghien cuu anh huong cua cong nghe ep no len cau truc va co tinh vat lieu polyme va compozit / Н. А. Адаменко, Н. Х. Нгуен, Г. В. Агафонова, А. Х. Фам // Tap chi Hoa Hoc = Journal of Chemistry. – 2008. – Vol. 46, No. 6. – P. 728–732. – Вьет.

79 Адаменко, Н. А. Effect of explosive treatment on the structure and thermomechanical properties of filled polytetrafluoroethylene / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова // Journal: International Polymer Science and Technology. – 2018. – Vol. 45, No. 2. – P. 39–42. – DOI 10.1177/0307174X1804500202.

80 Адаменко, Н. А. Explosive Pressing of Heat Resistant Polymers and Their Composites with PTFE-4 / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52, No. 7-8. – P. 567–572. – DOI 10.1007/s10556-016-0234-1

81 Адаменко, Н. А. Explosive Pressing of Fluoroplastic Industrial Waste / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова, А. Э. Герасимук // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 50, No. 11-12. – P. 819–824.

82 Бутенко В. И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем / В. И. Бутенко. – Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.

83 Крагельский, И. В. О природе трения полимеров / И. В. Крагельский // Механика полимеров. – 1972. – № 5. – С. 797–808.

84 Патент 2781390 РФ, МПК В22F 7/02, В32В 15/08. Способ изготовления трехслойного листового металлополимерного материала / Н. А. Адаменко, С. П. Писарев, А. В. Казуров, Г. В. Агафонова, Д. В. Савин ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 2022108133 ; заявл. 28.03.2022 ; опубл. 11.10.2022. Бюл. № 29. – 12 с.

85 Разработка гибридных наполнителей для антифрикционных композиционных материалов / В. И. Колесников, Ю. Ф. Мигаль, И. В. Колесников, Н. А. Мясникова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 4. – С. 14–19. – ISSN 0201-727X.

86 Больших, И. В. Вязкоупругие свойства фторопластсодержащих композитов / И. В. Больших, Д. В. Глазунов // Транспорт-2015 : труды Международной научно-практической конференции. Ч. 4. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. – С. 23–25.

87 Кацнельсон, М. Ю. Полимерные материалы : справочник / М. Ю. Кацнельсон, Г. А. Балаев. – Ленинград : Химия, 1982. – 317 с.

88 Промышленные полимерные композиционные материалы / М. Ричардсон, Д. Филипс, В. Харрис [и др.] ; под редакцией М. Ричардсона. – Москва : Химия, 1980. – 472 с.

89 Буше, Н. А. Трение, износ и усталость в машинах / Н. А. Буше. – Москва : Транспорт, 1987. – 223 с.

90 Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2001. – 668 с.

91 Потапов, А. И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов / А. И. Потапов. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 261 с.

92 Production and Properties of Fluorine-Containingpolyester Composite Monofilaments / С. В. Кудашев, В. В. Родаев, В. М. Васюков, В. Н. Арисова, А. И. Богданов, Т. И. Даниленко, В. Ф. Желтобрюхов // Fibre Chemistry. – 2018. – Vol. 49, No. 5 (January 2018). – P. 327–329. – DOI 10.1007/s10692-018-9891-5

93 Черский, И. Н. Прогнозирование долговечности и оптимизация подшипников и уплотнений из полимерных и композитных материалов / И. Н. Черский, В. А. Мороз // Механика полимеров. – 1980. – № 6. – С. 1094–1102. – ISSN 0025-8865.

94 Износ композита на основе полиуретана, полифторированного спирта, монтмориллонита и политетрафторэтилена / С. В. Кудашев, А. А. Терехов, В. А.

Бабкин, А. В. Нистратов, В. Ф. Желтобрюхов, Д. С. Андреев, А. В. Игнатов, В. Н. Арисова, А. И. Богданов, Н. Вик. Кузнецова // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 2. – С. 135–141. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-2-135-141.

95 Дудкина, Н. Г. Surface Layer of 40Kh Grade Steel after Electromechanical Treatment under Dynamic Force Impact / Н. Г. Дудкина, В. Н. Арисова // Steel in Translation. – 2021. – Vol. 51, Iss. 4 (April). – P. 235–240. – URL: <https://doi.org/10.3103/S0967091221040021>.

96 Study of Structural and Mechanical Heterogeneity through Steel 15Kh5M Carburized Pipe Wall Thickness / И. А. Тришкина, Е. И. Сторожева, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 56, Iss. 1-2 (May). – P. 66–73/ – DOI 10.1007/s10556-020-00739-2.

97 Бартнев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартнев. – Москва : Химия, 1984. – 279 с.

98 Патент 2560897 РФ, МПК В23К20/08, В32В15/01. Способ получения композиционного материала медь-титан / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, В. Ф. Казак, О. В. Слаутин, А. А. Чешева ; ВолГТУ. – № 2014124775/02 ; заявл. 17.06.2014 ; опубл. 20.08.2015, Бюл № 23. – 16 с.

99 Гуняев, Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов / Г. М. Гуняев. – Москва : Химия, 1981. – 320 с.

100 Structure and Phase Composition of Diffusion Zone in Copper M1 + Alloy MA2-1 Composite / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. В. Проничев, В. П. Кулевич // Metallurgist. – 2020. – Vol. 63, Iss. 9-10. – P. 1124–1131. – DOI 10.1007/s11015-020-00930-z.

101 Reducing the Combustibility of Polycapraamide Using a Mixture of Polyelemental Flame Retardants / С. В. Кудашев, В. М. Шаповалов, А. М. Валенков, В. Н. Арисова, А. И. Богданов, В. Ф. Желтобрюхов // Fibre Chemistry. – 2020. – Vol. 51, Iss. 5. – P. 346–349. – DOI 10.1007/s10692-020-10109-6.

102 Structure formation in the zones of joints obtained by explosion welding with subsequent rolling of a five-layer titanium-steel composite / В. Н. Арисова, Л. М.

Гуревич, А. Ф. Трудов, А. Г. Серов, В. О. Харламов // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, No. 1-2 (April). – P. 96–104. – DOI 10.1007/s11015-019-00798-8.

103 Истомина, Н. П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров / Н. П. Истомина, А. П. Семенов. – Москва : Наука, 1984. – 147 с.

104 Кноп, А. Фенольные смолы и материалы на их основе / А. Кноп, В. Шейб. – Москва : Химия, 1983. – 280 с.

105 Патент 2526385 РФ, МПК C08J7/12, C08G63/183, C08G63/91. Способ модификации поверхности пленки полиэтилентерефталата / С. В. Кудашев, В. Ф. Желтобрюхов, Т. И. Даниленко, В. Н. Арисова, В. М. Дронова, К. Р. Шевченко ; ВолгГТУ. – № 2013113084/05 ; заявл. 22.03.2013 ; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. – 7 с.

106 Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнических характеристик / В. И. Колесников, А. П. Сычев, В. Н. Кравченко [и др.] // Физика, механика, техника : сборник трудов Южного научного центра РАН. Т. II. – Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. – С. 9–35.

107 Рядченко, В. Г. Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена / В. Г. Рядченко, А. С. Кужаров // Безызносность : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1992. – Вып. 2. – С. 139–147.

108 Патент 2486999 РФ, МПК B23K20/08, C23C26/00. Способ получения покрытия / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова, В. Ф. Казак, А. И. Богданов, О. С. Киселев; ВолгГТУ. – № 2012118293/02 ; заявл. 03.05.2012 ; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19. – 13 с.

109 Патент 2463139 РФ , МПК В 23 К 20/08, В 32 В 7/04, В 32 В 15/01. Способ получения композиционного материала титан-сталь / Ю. П. Трыков, С. П. Писарев, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, В. Н. Арисова, В. Ф. Казак, О. С. Киселев; ВолгГТУ. – № 2011114484/02 ; заявл. 13.04.2011 ; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. – 15 с.

110 Гаевик, Д. Т. Подшипниковые опоры современных машин / Д. Т. Гаевик. – Москва : Машиностроение, 1985. – 248 с.

111 Хонсари, М. М. Термогидродинамический анализ радиальных подшипников скольжения со смазкой, содержащей твёрдые частицы / М. М. Хонсари, В. Эсфанхьян // Современное машиностроение. Серия А. – 1989. – № 3. – С. 137–144.

112 Чичинадзе, А. В. Развитие научных и технических исследований в области трибологии и триботехники / А. В. Чичинадзе, А. Ю. Албагачиев, В. Д. Кожемякина // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 4. – С. 423–426. – ISSN 0202-4977.

113 Ходаков, Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и её экспериментальное обоснование / Г. С. Ходаков // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2003. – Т. XLVII, № 2. – С. 33–44.

114 Раскутин, А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов / А. Е. Раскутин // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 344–348. – DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S344-348.

115 Кузнецов, А. А. Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения / А. А. Кузнецов, Г. К. Семенова, Е. А. Свидченко // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1 (57). – С. 116–126.

116 Growth kinetics of the diffusion zone at the interface of the explosion-welded nickel–aluminium composite / В. Г. Шморгун, А. И. Богданов, В. Н. Арисова, Ю. П. Трыков // Welding International. – 2016. – Vol. 30, No. 8. – P. 625–629. – DOI 10.1080/09507116.2016.1140417.

117 Formation of Ti-Cu-Based Intermetallic Coatings on the Surface of Copper During Contact Melting / В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59, Iss. 9-10 (January 2016). – P. 974–979. – DOI 10.1007/s11015-016-0203-0.

118 Артамонов, В. Н. Исследование трибологических характеристик сферических шарнирных подшипников / В. Н. Артамонов, Ю. Н. Дроздов // *Машиноведение*. – 1987. – № 2. – С. 31–36. – ISSN 1694-7657.

119 Effect of Heat Treatment on the Structure and Properties of Explosion Welded Bimetal Kh20N80 + AD1 / В. Г. Шморгун, В. Н. Арисова, О. В. Слаутин, А. Ол. Таубе, В. М. Бакунцева // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2017. – Vol. 59, No. 1-2. – P. 106–109. – DOI 10.1007/s11041-017-0112-2.

120 Relationship between the Morphology and Combustibility of Fluorinated Polyamide Composites / С. В. Кудашев, А. М. Валенков, В. Шаповалов, В. Н. Арисова, А. И. Богданов, В. Ф. Желтобрюхов // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2017. – Vol. 90, No. 8. – P. 1318–1323. – DOI 10.1134/S1070427217080262.

121 Structural and Chemical Modification of Polycaprolactam with a Composite Based on a Polyfluorinated Telomeric Alcohol / С. В. Кудашев, С. А. Сафронов, В. Н. Арисова, Т. И. Даниленко, В. Ф. Желтобрюхов // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2017. – Vol. 90, No. 5. – P. 775–779. – DOI 10.1134/S1070427217050184.

122 Special Features of Structure Formation in an Explosion-Welded Magnesium-Aluminum Composite Under Deformation and Subsequent Heat Treatment / Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова, Ю. П. Трыков, И. А. Пономарева, А. Ф. Трудов // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – Vol. 58, No. 3-4. – P. 214–218. – DOI 10.1007/s11041-016-9991-x.

123 Патент 2554182 РФ, МПК C08J 5/16, C08J 5/06, C08L 27/18, C08K 13/04, F16C 33/20. Антифрикционный композитный материал для подшипников скольжения судовых валопроводов и гребных валов / А. А. Андриенко, Я. В. Ершов, О. Е. Федорова. – № 2013156732/05 ; заявл. 19.12.2013 ; опубл. 27.06.2015, Бюл. № 18. – 8 с.

124 Patent CN 108219667A. A kind of environment protection type multifunctional carbon fiber wear-reduced coating and preparation method thereof ; filed 26.02.18; publ. 29.06.18.

125 Кохановский, В. А. Структура и свойства антифрикционных волокнитов / В. А. Кохановский // Безыносность : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1992. – Вып. 2. – С. 132–137.

126 Патент 2542307 РФ, МПК D01F11/14, C08J7/12, C08G63/91. Способ модификации поверхности нити полиэтилентерефталата / С. В. Кудашев, В. Ф. Желтобрюхов, Т. И. Даниленко, В. Н. Арисова ; ВолгГТУ. – № 2014143505/05 ; заявл. 29.10.2014 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 6 с.

127 Патент 154491 РФ, МПК B32B15/01, B32B15/20, B23K101/04, B23K20/08. Композиционный теплозащитный экран с внутренней полостью / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев, В. Ф. Казак, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, М. Д. Трунов, Р. Е. Новиков ; ВолгГТУ. – № 2015113786/05 ; заявл. 14.04.2015 ; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 8 с.

128 Аналитический метод прогнозирования значений критериев микрополярной смазки, обеспечивающих устойчивый режим работы радиального подшипника скольжения / К. С. Ахвердиев, А. Ю. Вовк, М. А. Мукутадзе, М. А. Савенкова // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 2. – С. 184–191. – ISSN 0202-4977.

129 Torlon® PAI // Solvay : официальный сайт. – URL: <https://www.solvay.com/en/brands/torlon-pai> (дата обращения: 30.03.2023).

130 Мукутадзе, М. А. Гидродинамический расчет упорного подшипника с адаптированным профилем опорной поверхности, работающего на сжимаемой вязкоупругой смазке / М. А. Мукутадзе // Трение и смазка в машинах и механизмах. – Москва : Машиностроение, 2012. – № 5. – С. 19–23. – ISSN 1819-2092.

131 Бахарева, В. Е. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения / В. Е. Бахарева, Г. И. Николаев, А. В. Анисимов // Российский химический журнал. – 2009. – Т. LIII, № 4. – С. 4–18. – ISSN 1024-6215.

132 Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами / С. В. Кондрашов, К. А. Шашкеев, Г. Н. Петрова, И. В. Мекалина // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 405–419. – DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S405-419.

133 Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего / Е. Н. Каблов, Г. С. Кулагина, Г. Ф. Железина, С. Л. Лонский, Е. В. Куршев // Авиационные материалы и технологии. – 2020. – № 4(61). – С. 19–26. – DOI 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.

134 Патент 2068423 РФ, МПК C08J 5/16, B32B 7/02, B32B 27/28, F16C 33/20, F16J 9/28. Антифрикционное изделие / С. С. Комаров, Б. А. Беляев, В. П. Байбулатов, В. Х. Набиуллин ; НПО «Автоматика». – № 5043678/04 ; заявл. 12.03.1992; опубл. 27.10.1996. – 6 с.

135 Новая методика исследования трибологических свойств смазываемых пар трения по методу «колодка – ролик» / В. Н. Поляков, И. М. Елманов, Г. В. Даровской [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 8. – С. 40–42. – ISSN 1819-2092.

136 Патент 2526357 РФ, МПК B23K20/08, B23K101/04. Способ получения композиционных изделий с внутренними полостями сваркой взрывом / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев, В. Н. Арисова, В. Ф. Казак, А. И. Богданов ; ВолгГТУ. – № 2013121875/02 ; заявл. 13.05.2013 ; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. – 17 с.

137 Рузинов, Л. П. Планирование эксперимента в химии и в химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчиков. – Москва : Химия, 1980. – 280 с.

138 Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1985. – 149 с.

139 Кохановский, В. А. Планирование экспериментальных исследований / В. А. Кохановский, М. Х. Сергеева. – Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2014. – 256 с.

140 Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1982. – 191 с.

141 Фторполимерные материалы : монография / Н. А. Адаменко, Е. Н. Больбасов, В. М. Бузник [и др.] ; ответственный редактор В. М. Бузник ; Ин-т химии

растворов им. Г. А. Крестова РАН, Национальный исследовательский Томский гос. ун-т, ФГУП «Всероссийский НИИ авиационных материалов», Консорциум «Фторполимерные материалы и нанотехнологии». – Томск : Изд-во научнотехнической литературы (ООО «Издательство НТЛ»), 2017. – 596 с. – ISBN 978-5-89503-596-2 : 500 экз.

142 Влияние адгезионного сцепления на границе раздела компонент на фрикционные характеристики полимерных композитов / В. И. Колесников, Н. А. Мясникова, Ю. Ф. Мигаль [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 9–13. – ISSN 0201-727X.

143 Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – Москва, 1983. – 416 с.

144 Кохановский, В. А. Системная трибология : монография / В. А. Кохановский ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 196 с.

145 Kokhanovskii, V. A. Supporting Surface of Slipping Frictional Systems / V. A. Kokhanovskii, V. N. Polyakov // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, No. 3. – P. 510–514. – DOI 10.3103/S1068798X21060101

146 Properties of explosion-treated polymer composites / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова, Н. Х. Нгуен, Ю. А. Калмыкова // International Polymer Science and Technology. – 2008. – Vol. 35, № 6. – P. 33–36. – In Eng.

147 Влияние абсорбции влаги на контактную жесткость полимерного антифрикционного покрытия / И. Б. Власенко, С. Н. Шевцов, Н. Г. Снежина [и др.] // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте : труды V Международного симпозиума «Трибология и надежность». – Санкт-Петербург : ИТМО, 2013. – С. 193–197.

148 Расчетная модель радиального подшипника с нестандартным опорным профилем / В. Н. Багрова, В. В. Василенко, В. И. Кирищичева, М.А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 17–24. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_17.

149 Задорожная, Н. С. Расчетная модель микрополярного смазочного материала в подшипнике с плавким покрытием при неполном заполнении рабочего

зазора / Н. С. Задорожная, М. А. Мукутадзе, В. И. Кирищиева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(84). – С. 8–17. – DOI 10.46973/0201–727X_2021_4_8.

150 Кирищиева, В. И. Моделирование методики повышения износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием / В. И. Кирищиева // Инженерный вестник Дона. Электронный научный журнал. – 2022. – № 10. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7954 (дата обращения 10.11.2022).

151 Кирищиева, В. И. Повышение износостойкости радиального подшипника с некруговым опорным профилем и фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием / В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 11 (11). – URL: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-11-10-17>.

152 Кирищиева, В. И. Повышение износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале / В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе // Омский научный вестник. – 2022. – № 4(184). – С. 41–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45.

153 Кирищиева, В. И. Повышение износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием / В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 5(355). – С. 3–8. – DOI 10.33979/2073-7408-2022-355-5-3-8.

154 Кирищиева, В. И. Повышение износостойкости путем формирования автомодельных методов расчета некругового радиального подшипника с полимерным покрытием / В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2022. – № 11. – С. 506–510. – DOI 10.36652/0202-3350-2022-23-11-506-510.

155 Задорожная, Н. С. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием поверхности вала / Н. С. Задорожная, В. И. Кирищиева, М. А. Мукутадзе // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2022. – № 4(63). – С. 90–96. – ISSN 2073-8072.

156 Повышение износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющим канавку / В. В. Василенко, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // *Advanced Engineering Research* (Вестник Донского государственного технического университета). – 2022. – Т. 22, № 4(22). – С. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372

157 Повышение износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале / О. Б. Андреева, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2022. – № 3. – С. 23–31. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-3-23-31.

158 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием / В. И. Кирищикова, И. А. Колобов, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 3(87). – С. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.

159 Кирищикова, В. И. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала / В. И. Кирищикова, Е. О. Лагунова, М. А. Мукутадзе // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2022. – № 2 (100). – С. 15–23. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.

160 Mathematical model of micropolar lubricant considering viscosity-pressure dependence / A. V. Morozova, N. S. Zadorozhnaya, M. A. Mukutadze, V. I. Kirishchieva // *Journal of Physics Conference Series, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021) 7–8 October 2021, Vladivostok, Russia*. – Vol. 2096. – P. 012104. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012104.

161 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления / Х. Н. Абдулрахман, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // *Frontier Materials & Technologies*. – 2022. – № 4. – С. 9–17. – DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.

162 Кирищиева, В. И. Расчетная модель микрополярного смазочного материала радиального подшипника скольжения при неполном заполнении рабочего зазора / В. И. Кирищиева // Научный альманах. – 2021. – № 10-2(84). – С. 61–66.

163 Кирищиева, В. И. Математическая модель течения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с некруговым профилем опорной поверхности / В. И. Кирищиева // Вестник научных конференций. – 2021. – № 10-1(74). – С. 48–54.

164 Кирищиева, В. И. Математическая модель течения смазочного материала и расплава покрытия в рабочем зазоре радиального подшипника / В. И. Кирищиева, А. М. Мукутадзе, М. А. Мукутадзе // Научный потенциал молодежи и технический прогресс : материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 19–23.

165 Kirishchieva, V. I. Calculation model of a micropolar lubricant / V. I. Kirishchieva, A. M. Mukutadze, M. A. Mukutadze // Practice Oriented Science. UAE – RUSSIA – INDIA. Proceed-ings of the International University Scientific Forum. Part 1. Dubai, 2022. – P. 130–139.

166 Mukutadze, M. A. Calculation model of a micropolar lubricant, taking into account the dependence of viscosity on pressure / M. A. Mukutadze, A. V. Morozova, V. I. Kirishchieva // Practice Oriented Science. UAE – RUSSIA – INDIA. Proceedings of the International University Scientific Forum. Part 1. Dubai, 2022. – P. 194–202. – DOI 10.34660/INF.2022.34.47.044.

167 Кирищиева, В. И. Расчетная модель радиального подшипника в условиях наличия расплава на поверхности вала / В. И. Кирищиева, А. М. Мукутадзе, М. А. Мукутадзе // Современные проблемы теории машин. – 2022. – № 13. – С. 6–11. – DOI 10.26160/2307-342X-2022-13-6-11.

168 Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения с некруговым профилем опорной поверхности при наличии покрытия на поверхности вала / Х. Н. Абдулрахман, М. А. Мукутадзе, В. И. Кирищиева, В. Е.

Шведова // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2022. – № 30. – С. 11–19. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-30-11-19.

169 Расчетная модель микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре клиновидной опоры скольжения / М. А. Мукутадзе, А. М. Мукутадзе, В. И. Кирищикова, В. Е. Шведова // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2022. – № 30. – С. 29–37. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-30-29-37.

170 Математическая расчетная модель течения смазочного материала в рабочем зазоре модифицированного радиального подшипника / Х. Н. Абдулрахман, М. А. Мукутадзе, В. И. Кирищикова, В. Е. Шведова // *Фундаментальные основы механики*. – 2022. – № 9. – С. 17–23. – DOI 10.26160/2542-0127-2022-9-17-23.

171 Моделирование течения смазочного материала в рабочем зазоре клиновидной опоры скольжения / Х. Н. Абдулрахман, М. А. Мукутадзе, В. И. Кирищикова, Н. С. Задорожная // *Журнал передовых исследований в области естествознания*. – 2022. – № 16. – С. 15–23. – <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-16-15-23>.

172 Кирищикова, В. И. Исследование износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием / В. И. Кирищикова, Е. О. Лагунова, Г. А. Бадахов // *Наука и образование транспорту : XV научно-практическая конференция, 10–11 ноября 2022, г. Самара*. – 2022. – № 2. – С. 91–95. – EDN XNTCPN.

173 Мукутадзе, М. А. Исследование износостойкости в подшипнике с металлическим покрытием при учете зависимости вязкости от давления / М. А. Мукутадзе, В. И. Кирищикова, Г. А. Бадахов [и др.] // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2023. – № 35. – С. 30–38. – DOI 10.26160/2474-5901-2023-35-30-38.

174 Mukutadze, M. A. Study of wear resistance in a bearing with a metal coating when the working gap is not fully filled / M. A. Mukutadze, V. I. Kirishchieva, G. A. Badakhov [et al.] // *Science. Education. Practice : international science conference*. – Delhi, India, 2023. – P. 178–184. – DOI 10.34660/INF.2023.57.29.138.

175 Бадахов, Г. А. Микрополярные смазочные материалы в подшипнике с металлическим покрытием опорного профиля ползуна / Г. А. Бадахов, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе [и др.] // Научный потенциал молодежи и технический прогресс : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 29–34. – EDN TGDEGK.

176 Кирищикова, В. И. Исследование повышения износостойкости радиального подшипника, имеющего на нестандартной опорной поверхности полимерное покрытие с осевой канавкой / В. И. Кирищикова // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – № 36. – С. 15–25. – DOI 10.26160/2474-5901-2023-36-15-25.

177 Кирищикова, В. И. Исследование на износостойкость радиального подшипника с антифрикционным покрытием и осевой канавкой / В. И. Кирищикова // Вестник научных конференций. – 2023. – № 8-1 (96). – С. 52–59. – ISSN 2412-8988.

178 Investigation of Supramolecular Structure of Fluorine-Containing Polyethyleneterephthalate Monofibers / С. В. Кудашев, Т. Е. Суханова, П. Н. Якушев, В. В. Родаев, В. М. Васюков, В. Н. Арисова, А. И. Богданов // Fibre Chemistry. – 2018. – Vol. 50, No. 1 (May). – P. 19–23. – DOI 10.1007/s10692-018-9920-4/

179 Патент 2685311 РФ, МПК В22F7/02, В22F3/08. Способ получения слоистого металлополимерного наноконпозиционного материала путем взрывного прессования / Н. А. Адаменко, Э. В. Седов, А. В. Казуров, Г. В. Агафонова, Д. В. Савин ; ВолГТУ. – № 2018108701 ; заявл. 12.03.2018 ; опубл. 17.04.2019, Бюл. № 11. – 14 с.

180 Патент 2585910 РФ, МПК С23С24/08, В22F7/04, В22F3/08. Способ получения покрытия из порошкообразного фторопласта-4 на поверхности цилиндрического стального изделия / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова, А. В. Казуров, С. М. Рыжова, А. Э. Герасимук, Д. В. Савин ; ВолГТУ. – № 014147415/02; заявл. 25.11.2014 ; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. – 11 с.

181 Патент 2561407 РФ, МПК В32В15/08, В22F7/02. Способ изготовления двухслойных листовых металлополимерных материалов / Н. А. Адаменко, А. В.

Казуров, С. П. Писарев, И. В. Сергеев, С. М. Рыжова, Г. В. Агафонова ; ВолгГТУ. – № 2014130321/05 ; заявл. 22.07.2014; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 12 с.

182 Новая методика исследования трибологических свойств смазываемых пар трения по методу «колодка – ролик» / В. Н. Поляков, И. М. Елманов, Г. В. Даровской, М. А. Буракова, И. С. Морозкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 8. – С. 40–42. – ISSN 1819-2092.

183 Патент 2211125 РФ, МПК 7 В 23 К 20/08, В 32 В 15/01 Способ получения плоских биметаллических титаностальных заготовок / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, И. Б. Степанищев; ВолгГТУ. – № 2002101333/02 ; заявл. 10.01.2002 ; опубл. 27.08.2003. – 1 с.

184 Рузинов, Л. П. Планирование эксперимента в химии и в химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчиков. – Москва : Химия, 1980. – 280 с.

185 Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : Изд-во УПИ 1985. – 149 с.

186 Кохановский, В. А. Планирование экспериментальных исследований / В. А. Кохановский, М. Х. Сергеева. – Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2014. – 256 с.

187 Патент 2712156 Российская Федерация, МПК В23К20/08 Способ получения износостойких покрытий на поверхностях пластин из алюминиевого сплава и меди / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, О. В. Слаутин, Д. В. Проничев, В. Н. Арисова, А. Г. Серов, В. П. Кулевич, Н. В. Кривченко ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 2019121063 ; заявл. 03.07.2019 ; опубл. 24.01.2020 Бюл. № 3. – 10 с.

188 Burris, D. L. A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite / David L. Burris, W. Gregory Sawyer // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 410–418. – DOI 10.1016/j.wear.2005.12.016

189 Патент 2002579 РФ, МПК В22F3/08. Способ взрывного прессования порошков / В. Н. Арисова, Н. В. Орешин, Р. К. Ткачев, А. Ф. Трудов ; Волгоградский политехн. ин-т. – № 05012775 ; заявл. 02.07.1991 ; опубл. 15.11.1993, Бюл. № 41-42. – 4 с.

190 Patent EP 1775487A2. Plain bearing / Takuya Daido Metal Company Ltd. Tanaka, Naohisa Daido Metal Company Ltd. Kawakami, Takeyuki Daido Metal Company Ltd. Nakasone, Isei Daido Metal Company Ltd. Naka ; filed 09.10.06; publ. 18.04.07.

191 Адаменко, Н. А. The properties of an iron-fluoroplastic composite produced by explosive pressing in vessels / Н. А. Адаменко, Ю. П. Трыков, А. В. Казуров // Journal of Advanced Materials. – 2003. – Vol. 10, No. 4. – P. 399–402.

192 Production of fluorine-containing composite materials based on polydieneurethane and montmorillonite / С. В. Кудашев, А. В. Нистратов, В. Н. Арисова, Т. И. Даниленко, В. Ф. Желтобрюхов // International Polymer Science and Technology. – 2018. – Vol. 45, No. 1. – P. 11–14.

193 Патент 2685314 Российская Федерация, МПК В23К20/08, В32В15/01 Способ получения композиционного материала из меди, титана и стали / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, С. П. Писарев, О. В. Слаутин, Д. В. Проничев, В. Н. Арисова, В. Ф. Казак, Р. Е. Новиков ; ВолгГТУ. – № 2018112514 ; заявл. 06.04.2018 ; опубл. 17.04.2019, Бюл. № 11. – 15 с.

194 Патент 2425740 РФ, МПК В 23 К 20/08, В 23 К 101/04. Способ получения изделий с внутренними полостями сваркой взрывом / Ю. П. Трыков, С. П. Писарев, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, В. Н. Арисова, А. И. Богданов, В. Ф. Казак, О. С. Киселев ; ВолгГТУ. – № 2012118875/02 ; заявл. 04.05.2012 ; опубл. 27.06.2013 Бюл. № 18. – 19 с.

УТВЕРЖДАЮ:
Технический директор
Ростовского-на-Дону электровозоремонтного
завода – филиала АО «Желдорремаш»

Б.Н. Воронов
2022 г.



ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ИСПЫТАНИЯ

Комиссия в составе д.т.н., доцента кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВО РГУПС М.А. Мукутадзе, соискатель кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВО РГУПС В.И. Киришиевой и ведущего технолога ТО Ростовского-на-Дону электровозоремонтного завода – филиала АО «Желдорремаш» В.В. Алексеенко составила настоящий акт в том, что в результате совместных научно-исследовательских работ разработаны и прошли промышленные испытания подшипники скольжения с антифрикционным композиционным самосмазывающим покрытием и маслоподдерживающей канавкой. Эти подшипники устанавливались в узле «Пружинно-вальценовального» станка. Особенностью станка является работа на двух режимах:

- для протяжки листов со скоростью 0,15 м/с (9 м/мин);
- для навивки пружин со скоростью 1,13 м/с (72 об/мин).

При первом режиме работает фторопластсодержащее антифрикционное покрытие в режиме граничного трения, во втором – подшипники работают в режиме жидкостного трения. Автоматический переход из режима граничного трения в жидкостное обеспечивается маслоподдерживающей канавкой. Данные подшипники повышают несущую способность узла, увеличивая ресурс работы на 10-15%, и одновременно увеличивают демпфирующую способность. В настоящее время испытания продолжаются.

Зав. кафедрой
«Высшая математика»
ФГБОУ ВО РГУПС,
д.т.н., доцент
М.А. Мукутадзе

Соискатель кафедры «Высшая
математика» ФГБОУ ВО РГУПС
В.И. Киришиева

Ведущий технолог ТО Ростовского-на-
Дону электровозоремонтного завода –
филиала АО «Желдорремаш»
В.В. Алексеенко