Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский Государственный Университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт «Политехнический»
Факультет «Автотракторный»
Кафедра «Автомобильный транспорт»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН
Рецензент
_____
«___»_____2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____Ю.В. Рождественский
«___»_____2018 г.

Исследование механизма трения и изнашивания трибосопряжений в режиме граничной смазки

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ– 23.04.03.2018.259.00.00ПЗ ВКР

Руководитель работы
доцент
_____И.В. Мухортов
«___»_____2018 г.

Автор работы
студент группы П – 219
_____Т.Р. Гильмуллин
«___»_____2018 г.

Нормоконтроллер
доцент
_____А.А. Дойкин
«___»_____2018 г.

Челябинск 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7
1 ОБОСНОВАНИЕ НАЛИЧИЯ РЕЖИМА ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ И ЕГО СУЩЕСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ 10
2 ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ 17
2.1 Механизмы трения с неэффективной смазкой. Эволюция взглядов на природу внешнего трения 17
2.2 Механизмы трения, осуществляющиеся при эффективной смазке. Этапы развития теории граничной смазки и граничного трения 26
2.2.1 Первая четверть XX века 26
2.2.2 Вторая четверть XX века 34
2.2.3 Третья четверть XX века 41
2.2.4 Последняя четверть XX и начало XXI века 46
2.2.5 Итоги развития представлений о граничной смазке в XX веке 54
3 ТИПЫ ПРИСАДОК К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ, УЛУЧШАЮЩИХ УСЛОВИЯ ТРЕНИЯ 59
3.1 Антифрикционные присадки 60
3.2 Противоизносные присадки 60
3.2.1 Серусодержащие присадки 61
3.2.2 Серу- и хлорсодержащие присадки 62
3.2.3 Фосфор и серусодержащие присадки 62
3.2.4 Фосфор и хлорсодержащие присадки 63
3.2.5 Серу, фосфор и хлорсодержащие присадки 64
3.2.6 Молибденсодержащие присадки 64
3.3 Противозадирные присадки 65
3.3.1 Хлорсодержащие присадки 65
3.3.2 Серу, фосфор и хлорсодержащие присадки 66
4 МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ПРИСАДОК, СНИЖАЮЩИХ ИЗНОС 67
4.1 Антифрикционные присадки 67

4.2 Противоизносные присадки 68
4.2.1 Серусодержащие присадки 70
4.2.2 Фосфорсодержащие присадки 71
4.3 Противозадирные присадки 72
4.3.1 Серусодержащие присадки 72
4.3.2 Хлорсодержащие присадки 73
4.3.3 Серу- и хлорсодержащие присадки 74
4.3.4 Фосфор- и хлорсодержащие присадки 75
4.3.5 Серу- и фосфорсодержащие присадки 75
4.3.6 Серу, фосфор- и хлорсодержащие присадки 76
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 77
5.1 Построение экспериментальных зависимостей 77
5.1.1 Исследование зависимости силы и коэффициента трения от скорости скольжения 77
5.1.2 Исследование зависимости силы и коэффициента трения от вязкости моторного масла 80
5.1.3 Исследование зависимости силы и коэффициента трения от контактного давления 86
5.2 Анализ результатов экспериментальных исследований 91
5.3 Выводы по результатам экспериментальных данных 92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 95
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 96

ВВЕДЕНИЕ

Поршневой ДВС как техническая система, предназначенная для преобразования тепловой энергии топлива в механическую энергию путем совершения работы расширения газов при сгорании в цилиндре, включает в себя ряд механизмов и систем, функционирование которых протекает в существенно различных условиях, определяемых кинематикой, динамикой, а также характером смазывания и температурных полей деталей.

Так, главной особенностью кинематики ЦПГ можно считать реверсивный характер и синусоидальное изменение скорости движения поршня и поршневых колец относительно цилиндра (с достижением максимума примерно в середине хода поршня и нуля в мертвых точках КШМ). Это обусловливает существование сразу нескольких, сменяющих друг друга, режимов смазки и трения для сопряжений «поршень-цилиндр» и «кольцо-цилиндр» [4].

Из известных видов режимов смазки наиболее неблагоприятным и опасным для нагруженных узлов трения является режим граничной смазки, он сопровождается изнашиванием контактирующих тел и большими энергетическими потерями, чем при жидкостной смазке. Тем не менее, обеспечение эффективной граничной смазки является весьма актуальной задачей, так как ее реализация в разы снижает коэффициент трения, многократно снижает интенсивность изнашивания и на несколько порядков уменьшает фрикционный перенос металлов.

По поводу режимов трения поршневых колец, до сих пор ведутся активные споры. Так часть исследователей поддерживает взгляды на преимущественно гидродинамический характер трения кольца о цилиндр, в то время как другие утверждают об отсутствии каких-либо признаков гидродинамики в условиях работы этого трибосопряжения. Однако наиболее популярна третья точка зрения о сочетании указанных выше режимов. Так при рабочих режимах двигателя преобладает жидкостный режим трения, а граничный наступает при снижении

скорости вращения коленчатого вала, а также, при нулевой скорости скольжения в моменты нахождения поршня в верхней и нижней мертвых точках.

Однако, несмотря на практическую значимость, режим трения в сопряжении «поршневое кольцо – гильза цилиндра», до сих пор слабо изучен. Анализ научных публикаций показывает, что в настоящее время не существует единого мнения относительно характера трения в данном сопряжении, в связи с этим поставлена цель данной работы.

Объект исследовательских испытаний: узел трения, моделирующий сопряжение «верхнее компрессионное поршневое кольцо – гильза цилиндра» и узел плоскопараллельного трения, смазываемые моторными маслами.

Предмет исследования: закономерности трения при смазке в условиях невозможности реализации гидродинамического режима.

Гипотеза исследования: в смазываемых конформных узлах трения скольжения, при невозможности реализации гидродинамического режима вследствие дефицита смазки или низкой скорости смещения поверхностей или высоких контактных давлений, при переходе от жидкостного трения к граничному реализуется режим граничной смазки, имеющий специфические закономерности. Данный режим может реализовываться в широкой области значений параметров узла трения. Параметры режима граничной смазки в значительной степени определяют эксплуатационные свойства как смазочного материала, так и узла трения.

Краткая характеристика методолого-теоретической базы и методов исследования: методолого-теоретической базой являются исследования кафедры «Автомобильный транспорт» в области механизмов действия противоизносных присадок и механизмов трения и смазки. Методы экспериментальных исследований базируются на ранее выполненных исследованиях на трибологическом оборудовании ВАЛ «Триботехника» кафедры «Автомобильный транспорт».

Цель исследования:

Исследовать механизм трения и изнашивания трибосопряжения в режиме граничной смазки. Определить экспериментальным путем закономерности, характеризующие режим граничной смазки и их связь с параметрами смазочного материала.

Задачи исследования:

1) Выполнить обзор механизмов трения и изнашивания в узлах трения поршневых двигателей внутреннего сгорания.

2) Выявить существование и провести исследование переходного режима от жидкостного трения к граничному.

3) Разработать методики измерения параметров трения в модельных узлах, определение параметров и их зависимостей, характеризующих режим трения.

4) Выполнить построение экспериментальных зависимостей силы трения от нагрузки при различном количестве смазки в контакте трения.

5) Выполнить построение экспериментальных зависимостей силы плоскопараллельного трения от температуры в условиях дефицита смазки.

6) Выполнить построение математической или описательной модели трения при режиме, переходном от жидкостного к граничному.

1 ОБОСНОВАНИЕ НАЛИЧИЯ РЕЖИМА ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ И ЕГО СУЩЕСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Процессы трения занимают важное место в нашей повседневной жизни, поскольку встречаемся мы с ними буквально на каждом шагу. Благодаря статическому трению между контактирующими объектами мы можем передвигаться, брать и удерживать в руках предметы, за счет трения окружающие нас объекты остаются на месте и т. д.

Немаловажную роль процессы трения занимают и в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Наибольшие потери на трение в двигателях внутреннего сгорания приходятся на цилиндропоршневую группу (больше половины всех потерь на трение). Условия трения в сопряжениях цилиндропоршневой группы оказывают значительное влияние на характеристики поршневых двигателей внутреннего сгорания. Поршневые кольца двигателей внутреннего сгорания подвержены различным механизмам изнашивания в зависимости от расположения их по высоте поршня, условий работы двигателя и смазки.

Сопряжение «гильза цилиндра – верхнее компрессионное кольцо» – является одним из наиболее нагруженных, ответственных и ограничивающих ресурс двигателя сопряжений. Максимальный износ происходит в зоне остановки верхнего компрессионного кольца у верхней мертвой точки (ВМТ). Трение поршневых колец, в частности верхних компрессионных колец, осуществляется в условиях дефицита смазочного масла, при высоких температурах, при плоскопараллельном реверсивном скольжении. В этих условиях, возможно интенсивное изнашивание поверхности гильзы цилиндра, увеличение прорыва газов в картер двигателя, увеличение поступания масла в камеру сгорания и т.д. Все это приводит к снижению топливной экономичности и экологических показателей двигателя и, в конечном счете, к снижению ресурса работы двигателя и транспортного средства в целом [4].

Поэтому одной из наиболее актуальных задач является снижение трения и износа в сопряжениях гильз цилиндров с поршнями и поршневыми кольцами, а для этого, необходимо понимать какой же режим трения преобладает в этом трибоспоряжении.

Современной трибологии известно несколько принципиально различных режимов трения (рисунок 1): сухое – трение, которое осуществляется без смазочного материала; жидкостное – режим трения, при котором поверхности трения разделяются слоем смазки различной толщины и природы; смешанное – трение, при котором имеются области сухого и жидкостного трения; граничное трение – при толщине смазочного слоя в несколько атомарных диаметров.

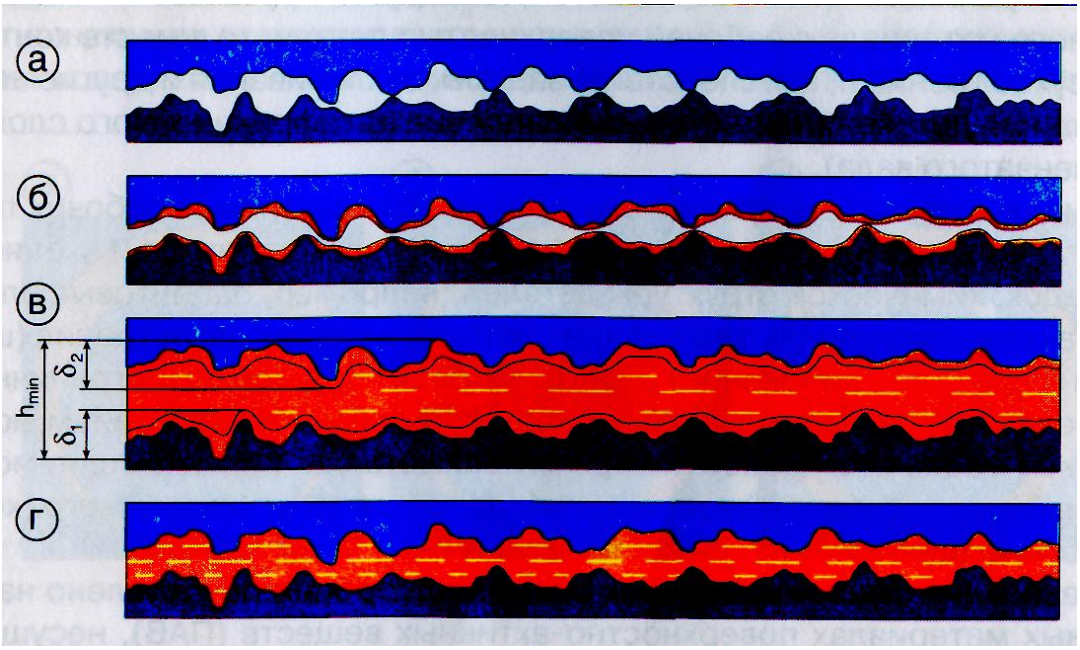


Рисунок 1 – Виды трения по наличию смазочного материала: а – трение без смазки (сухое трение); б – граничное трение; в – жидкостное трение; г – смешанное трение; h_{min}– величина зазора между трущимися поверхностями; δ_1, δ_2 – высота микронеровностей на трущихся поверхностях

Режимы смазки часто представляют в виде кривой Герси-Штрибека, (рисунок 2), которая показывает зависимость коэффициента трения от таких характеристик, как вязкость, скорость и внешняя нагрузка.

Немецкий инженер-механик Рихард Герман Штрибек предложил данную диаграмму в 1902 году, которая впоследствии была названа его именем.

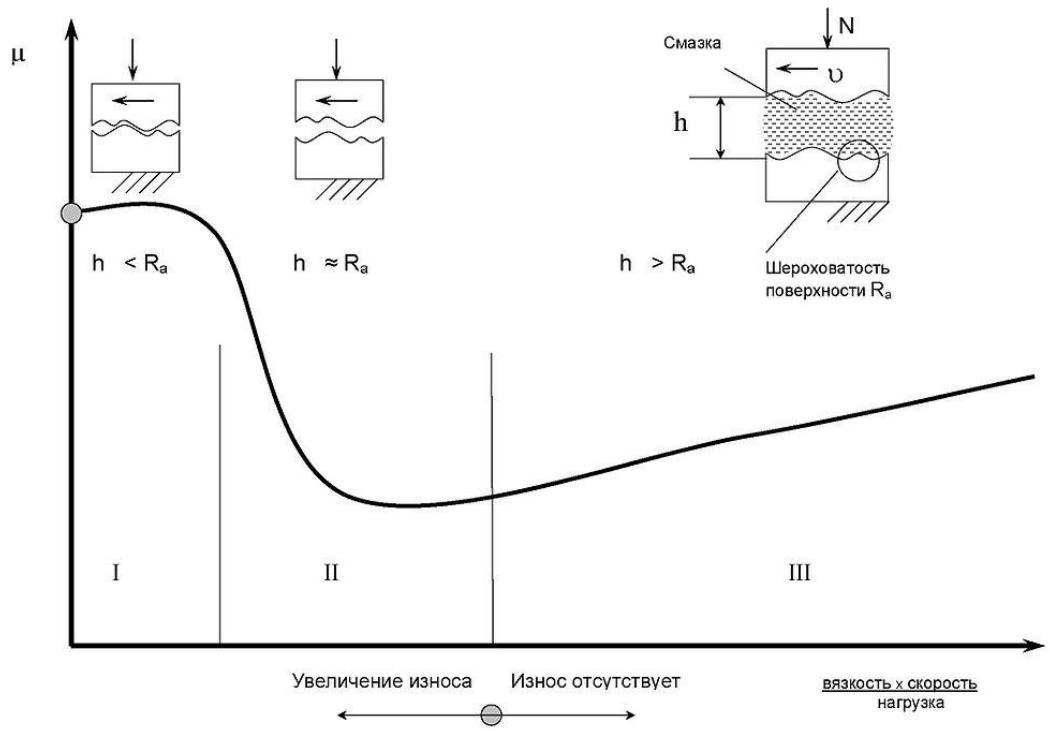


Рисунок 2 – Кривая Герси-Штрибека

Область значений I на диаграмме соответствует наиболее жесткому режиму смазки – граничному. Такой режим смазки осуществляется там, где присутствуют высокие удельные нагрузки на узел трения, низкие скорости перемещения трущихся тел и повышенные температуры, которые приводят к снижению μ. Для граничного режима характерно не только повышенное значения коэффициента трения, но и постоянное изнашивание трущихся тел.

Важнейшим свойством смазочных материалов при реализации граничной смазки является поверхностная и химическая активность по отношению к материалу поверхностей трущихся тел. Толщины граничных слоев при высоких нагрузках не превышают сотых долей микрометра.

Область значений III на диаграмме соответствует гидродинамическому режиму смазки. Определяющими характеристиками для такого режима являются вязкость смазочного материала и шероховатость поверхностей трения. Вязкость

зависит от температуры и давления, так с повышением температуры она снижается, а с увеличением давления в смазочном слое повышается, это учитывается эластогидродинамической теорией смазки.

Область значений II разделяет зоны реализации граничного и жидкостного режимов смазки. Эта область реализации смешанного режима смазки (полужидкостного). При таком режиме, одни участки контакта поверхностей разделены гидродинамическим слоем, а другие – граничным слоем. Для такого режима существенное значение имеют такие характеристики смазочного материала, как его вязкость, так и способность создавать на поверхностях трения прочные граничные слои. Чем больше доля контактов, полностью разделенных смазочным материалом, тем ниже коэффициент трения при смешанной смазке и ниже износ. На границе зон гидродинамической и смешанной смазки расположена зона эластогидродинамической смазки [2].

Однако с развитием техники эксперимента в последние десятилетия было выяснено, что граничный режим трения очень сложен и имеет множество особенностей, не укладывающихся в стандартную кривую Герси-Штрибека. Поэтому в работе [5] авторы, основываясь на большом количестве экспериментальных данных, предложили новую карту трения (рисунок 3), обобщающую диаграмму Герси-Штрибека, на которой более детально представлена область граничной смазки.

На диаграмме, при увеличении нагрузки L ньютоновское течение вязкой жидкости в ЭГД – режиме переходит в граничный режим. При больших нагрузках L и малых толщинах h смазки, сила трения имеет максимум (статическое трение Fs). Если теперь повысить скорость, то установится прерывистый режим, а дальнейшее возрастание V приведёт к постоянному значению коэффициента трения μ, независящему от величины скорости, и соответственно к постоянной кинетической силе трения F_k [5].

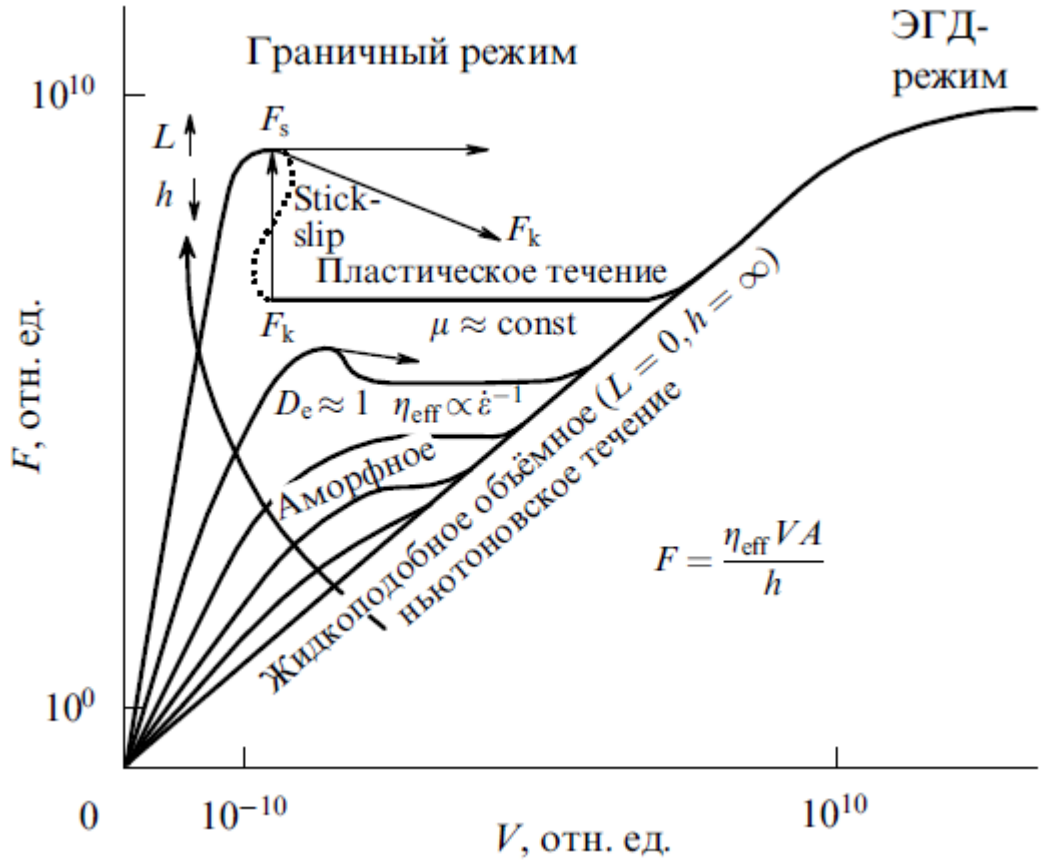


Рисунок 3 – Новая карта трения, раскрывающая особенности граничного режима трения. Скорость скольжения V и сила трения F измерены в произвольных единицах, и значения соответственно 10^{-10}, 10^{10} и 0, условно показывают большие диапазоны

Интерес к проблемам граничной смазки не ослабевает и по сей день, так в настоящее время публикуется огромное количество экспериментальных работ по исследованию граничного трения при различных условиях. Одним из наиболее популярных направлений является исследование особенностей реализации граничного трения при наличии молекулярно-тонкой пленки смазочного материала между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями.

Одной из причин, обуславливающих актуальность таких исследований, является то, что в последнее время существует тенденция к ужесточению условий работы смазанных узлов трения (в частности, это вызвано их миниатюризацией вплоть до создания МЭМС и НЭМС), а их описание, как правило, не

укладывается в идеологию классической механики и требует создания новых теорий.

Вторая причина заключается в том, что хотя идеализированные случаи применения атомарно-гладких поверхностей и ультратонких пленок однородных смазок далеки от условий, реализующихся в традиционных узлах трения, проведение таких экспериментов (как реальных, так и компьютерных) позволяет изучить особенности режима граничного трения, когда влияние неоднородностей смазки и шероховатостей поверхностей сводится к минимуму.

Из известных видов режимов смазки наиболее неблагоприятным и опасным для нагруженных узлов трения является режим граничной смазки, он сопровождается изнашиванием контактирующих тел и большими энергетическими потерями, чем при жидкостной смазке. Тем не менее, обеспечение эффективной ГС является весьма актуальной задачей, так как ее реализация в разы снижает коэффициент трения, многократно снижает интенсивность изнашивания и на несколько порядков уменьшает фрикционный перенос металлов.

Следует сказать, что большинство тяжелонагруженных узлов трения современных машин и механизмов, смазываемые жидкими или пластичными смазочными материалами (СМ), в определенные моменты (при пуске-остановке, в “мертвых точках” механизмов возвратно-поступательного движения и т. д.) или постоянно (в сопряжениях, работающих при малых скоростях перемещения и высоких удельных нагрузках и температурах или при наличии геометрии, затрудняющей реализацию режима жидкостной смазки) работают в режиме граничной смазки (ГС). При таком режиме трения поверхности не разделены полностью слоем СМ, а непосредственный контакт рабочих элементов узла, приводящий к резкому росту энергоемкости процесса трения, ускоренному изнашиванию трущихся тел, снижению параметрической надежности узла и, в конечном счете, к необратимой порче рабочих поверхностей и к полной потере работоспособности узла предотвращается или, по крайней мере, минимизируется образованием на участках непосредственного контакта граничных слоев,

образующихся в результате взаимодействия поверхностей трения с активными компонентами смазочной среды [2].

Образование граничных слоев, позволяет снизить потери на трение в узле, уменьшить износ сопряженных деталей и существенно снизить вероятность возникновения задиров и заеданий пар трения. Эта способность обусловлена следующими причинами:

во-первых, граничные слои разделяют трущиеся поверхности на расстояния, превышающие радиус действия адгезионных сил, или, во всяком случае, обеспечивают значительное снижение этих сил, поскольку они резко (в 3-й или 4-й степени) уменьшаются при увеличении расстояния между твердыми телами. Смазочный слой толщиной в одну молекулу уже заметно (приблизительно на порядок) снижает трение стальных поверхностей, в то время как обычно толщина граничных слоев составляет доли микрометра;

во-вторых, граничные слои обладают анизотропией механических свойств. Тончайшие граничные слои способны не разрушаясь выдерживать большие нормальные нагрузки. В то же время при относительно невысоких тангенциальных усилиях в граничных слоях происходит сдвиг по плоскостям наименьшего скольжения;

в-третьих активные компоненты смазочного материала, взаимодействуя с поверхностью трущихся тел, вызывают адсорбированное пластифицирование тончайших поверхностных слоев (эффект Ребиндера), избирательное растворение некоторых составляющих поверхностного слоя металла и перенос их на ответную поверхность, что также снижает поверхностную прочность контактирующих материалов и т.д. Благодаря этим явлениям, при граничной смазке сдвиговые деформации локализуются в тонком поверхностном слое металла, что предохраняет его нижележащие слои от разрушения [3].

2 ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

2.1 Механизмы трения с неэффективной смазкой. Эволюция взглядов на природу внешнего трения

Для того чтобы охарактеризовать современное состояние учения о граничном трении, следует коротко рассмотреть эволюцию взглядов на природу внешнего трения и остановиться на существующих теориях трения, получивших наибольшее признание, а затем перейти к этапам формирования теории граничного трения и граничной смазки.

Основной характеристикой трения, имеющей прикладное значение, является коэффициент трения μ, который связывает силу трения F с приложенной к трущимся поверхностям нагрузкой N:

$$F = \mu \cdot N \quad (1)$$

Этот закон изложил Леонардо да Винчи в своей работе еще в 1508 г. Но точно сформулировал его Г. Амонтон в 1751 г., за что и был назван его именем.

Амонтон считал, что выступы находящиеся на поверхности трения обуславливают сопротивление относительному смещению поверхностей и полагал что их контакт осуществляется механически, то есть выступы взаимодействующих плоскостей цепляются друг за друга. То есть Амонтон в своем представлении не связывал коэффициент трения ни с нагрузкой, ни с формой и размером трущихся поверхностей. Ученый полагал, что коэффициент трения связан в основном с природой и состоянием поверхности трения. Вследствие недостатка познаний того времени, касательно природы и строения поверхности трущихся тел, многие ученые приняли эту ошибочную точку зрения и продолжали ее развивать (Лейбниц, Орлов, Эйлер и др.) [6].

Но спустя пол века, в начале 18 века возникли работы, противоречащие представлениям Амонтона. Так было доказано, что на более гладких поверхностях коэффициент трения выше, чем на более шероховатых, что в корне противоречило механической теории Амонтона и его последователей. И в 1785г, талантливый французский физик Шарль Кулон предложил расширить закон Амонтона, добавив в него второй член, который бы характеризовал адгезию поверхностей, тогда силу трения по его мнению нужно выразить следующим образом:

$$F = C + \mu N, \qquad (2)$$

где C – характеристика сцепления (связанная с адгезией), не зависящая от нагрузки.

Так в этой формуле Кулон изложил действительную природу трения, и предложил учитывать при этом два вида тангенциального сопротивления – зависящее и не зависящее от внешней нагрузки. Из формулы видно, что даже при N=0, имеется трение, определяющееся контактированием поверхностей [6].

Спустя почти пятьдесят лет, ученые стали постепенно отказываться от взглядов на процесс трения, как лишь на механическое явление. Так в 1834 г. Дезаголье впервые предложил учитывать молекулярные силы, при изучении трения тел, но его взгляды не разделили ученые того времени и вскоре они были забыты. И лишь в период открытия закона сохранения энергии и формирования учения о молекулярном строении вещества, в теории трения появилась новая ветвь развития.

Бриллюэн в 1901г. публикует свою работу «Молекулярная теория трения твердых тел с гладкой поверхностью», в которой говорит о молекулярном строении поверхности твердых тел и периодическом распределении сил притяжения на ней, способствующих образованием множественных выступов и впадин. Автор утверждал, что для каждой свободной, слабо закреплённой молекулы, имеется большое количество положений устойчивого и неустойчивого

равновесия. А всякое близкое сближение молекул контактирующих поверхностей ведет к повышению их кинетической энергии, ввиду взаимного их перемещения. Затем кинетическая энергия переходит в тепловую. Однако дальнейшее развитие теории было невозможно, ввиду невозможности экспериментального исследования контакта идеально гладких поверхностей трения.

Среди исследователей того времени, выделяются работы Уильяма Харди – основателя учения о граничном трении. Харди выдвинул положение о том, что реализация тангенциального усилия между трущимися телами является осуществимой только благодаря наличию дискретной структуры молекулярных полей твердых тел. Также Харди уделял повышенное внимание поверхностным пленкам, которые образовывались на поверхностях трения твердых тел, он считал что при отсутствии подобных пленок, происходил бы непосредственный контакт сваривания этих тел. В 1922 году Харди в своей работе, первым из исследователей того времени, открыл существование граничных смазочных слоев и сам процесс трения при граничной смазке [7].

Терцаги в 1925 г. в своих исследованиях говорил, что при трении твердых тел необходимо различать контурную площадь контактирования (которая нам кажется), от фактической (истинной) площади контакта. По мнению автора, последняя из них много меньше контурной (исходя из современных данных в 100 … 10000 раз), а ее непосредственное измерение представляется весьма затруднительным. Площадь фактического контакта зависит от прилагаемого сжимающего усилия, и с ростом последней существенно возрастает. Причиной сопротивления относительному смещения твердых тел Терцаги считал возникновение сил молекулярного притяжения в местах фактического контакта взаимодействующих поверхностей.

Томлинсон в 1929 г. впервые предпринял попытку выработать теорию трения, в которой были бы учтены влияние сил молекулярного притяжения и отталкивания между атомами трущихся тел. По мнению Томлинсона, процесс трения можно рассматривать как комплексное действие двух основный явлений различного рода:

1) во-первых процесс разрыва молекулярных связей, сопровождающийся необходимыми потерями энергии;

2) во-вторых процесс возникновения новых связей с проявлением сил отталкивания, которые компенсируют собой воздействие внешних сил.

Дальнейшее развитие теории трения твердых тел, которая учитывает законы молекулярного взаимодействие связано с именем советского ученого Б.В. Дерягина. В основу теоретической схемы им была выбрана наглядная модель двух наложенных один на другой идеальных и одинаково ориентированных монокристаллов, имеющих шероховатость, обусловленную сферическими силовыми полями атомов поверхности, рассматриваемых автором теории как упругие шары.

Под влиянием нагрузки N (веса кристалла) шары верхнего тела входят во впадины между шарами нижнего тела (например, достигая положения точки А на рисунке 4). При этом шары занимают наиболее выгодное энергетическое положение, с минимумом потенциальной энергии и сближаются между собой до расстояний, при которых проявляются силы отталкивания между электронными оболочками.

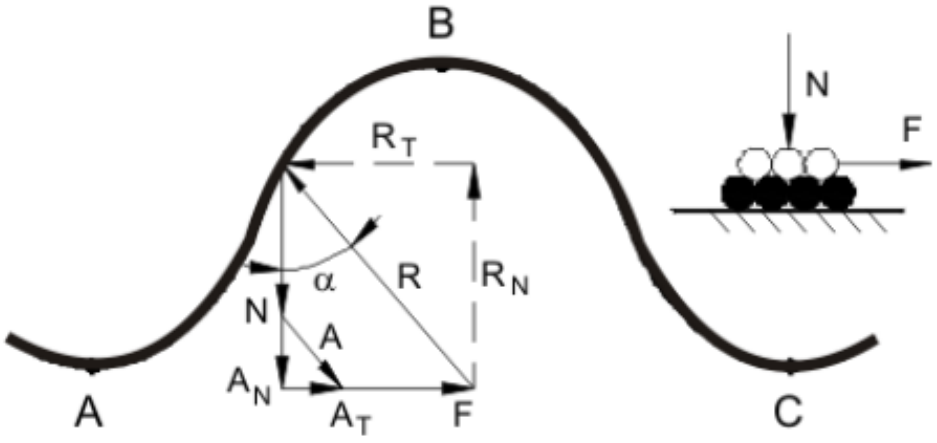


Рисунок 4 – Механизм трения по Б.В. Дерягину: АВС– траектория движения атома, N – нагрузка, А – сила притяжения, F– внешняя сила, R – равнодействующая сил отталкивания

В качестве элементарного процесса трения, Дерягин рассматривал взаимодействие упругих шаров (атомных электронных оболочек), одни из которых подвижные, а другие – нет. Под действием внешней силы верхние шары начинают двигаться из потенциальной «ямы» (точка А) по поверхности нижних шаров, приобретая при этом потенциальную энергию. После преодоления некоторого потенциального барьера (точка В), они скачком переходят в соседнюю потенциальную «яму» (точка С), выделяя при этом тепловую энергию (как источник тепла, развивающийся при трении) [6].

А.С. Ахматов, развивая теорию трения Б.В. Дерягина, для случая граничного трения твердых тел, когда на поверхностях трения находятся псевдокристаллические слои смазочного материала, предложил учитывать при трении помимо Вандер-Ваальсовых сил притяжения поверхностей трения твердых тел также и силы притяжения граничных смазочных слоев того же происхождения. Тогда закон трения будет выглядеть следующим образом:

$$F = \mu \cdot N + \mu \cdot S \cdot \left(P_0 + P_y\right), \quad (3)$$

где P_y – удельная сила притяжения между граничными слоями.

Однако стоит отметить, что Строгая молекулярная теория трения Б.В. Дерягина, не учитывает кинетику молекулярного взаимодействия и поэтому является справедливой лишь для абсолютно жестких и абсолютно гладких поверхностей. Расчет же конкретных величин трения по этим формулам сейчас затруднен, поскольку молекулярные характеристики для реальных твердых тел, к сожалению, в настоящее время еще остаются невыясненными.

С именами таких ученых как Бикермана и Райдила, а также Боудена и его школы связано последующее развитие теории трения и взглядов на механизм трения Карла Терцаги.

Так, согласно учению Боудена контакт поверхностей происходит по выступам, где концентрируются очень большие давления, под воздействием которых, в точках контакта происходит пластическое течение материалов, при

котором возникает значительная адгезия, и обе поверхности в местах контакта образуют как бы одно целое. Для металлов подобный процесс называют холодным свариванием (рисунок 5).

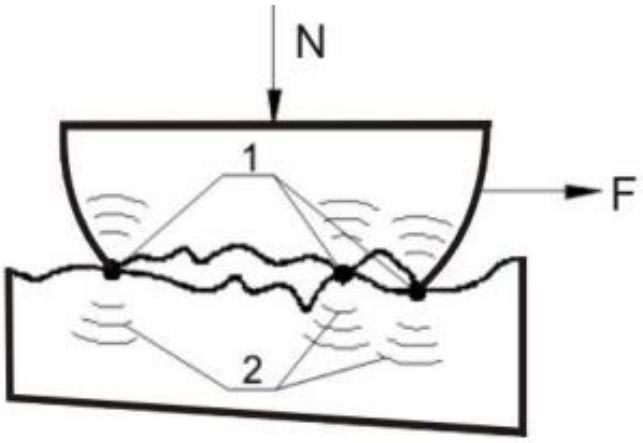


Рисунок 5 – Механизм трения по Ф. Боудену: 1 – область пластического течения; 2 – область упругой деформации; F – сила трения; N – нормальная нагрузка

Сила трения при этом определяется как сила, необходимая на разрушение (срез) этих мостиков сварки, при взаимном смещении контактирующих тел. При движении одного тела по другому, выступы более твердого тела будут «пропахивать» канавки в более мягком теле. Поэтому сила трения, по мнению Боудена, представляется в следующем виде:

$$F = S_0 \cdot \tau + S \cdot P, \quad (4)$$

где F – сила трения;

S_o – фактическая площадь контакта;

τ – сопротивление материала на срез;

S – поперечное сечение дорожки трения (площадь поперечного профиля царапины);

P – удельное сопротивление вытеснения металла, приблизительно равно пределу текучести.

Боуден считает, что адгезия играет основную роль при трении тел, и трение нельзя рассматривать как поверхностное явление. В основе трения лежат объемные свойства материалов, такие, например, как соотношение твердостей трущихся тел, а при достаточно больших скоростях скольжения и соотношение температур плавления тел. Коэффициент трения Боуден выразил как отношение сопротивления на срез к пределу текучести более мягкого материала [6]:

$$\mu = \frac{\tau}{P} \tag{5}$$

Стоит отметить, что теория трения по Боудену, является справедливой только если трение происходит при постоянном напряжении, в условиях пластического контакта.

Однако же при трении реальных тел большую роль по формированию трения играют силы, возникающие при взаимном зацеплении выступов, всегда имеющихся на поверхностях трения.

По этому поводу П.А. Ребиндер и Г.И.Епифанов указывали, что в общем случае при трении протекают следующие процессы:

1) упругое и пластическое деформирование микронеровностей и пластическое течение в поверхностных слоях, приводящие к пластическому износу;

2) повторные микропластические деформации при периодических встречах микронеровностей, приводящие к установленному разрушению;

3) изменение механических и физических свойств поверхностных слоев металла вследствие глубокой пластической деформации.

Г.И. Епифанов считает, что в процессе трения пластически деформируются довольно толстые поверхностные слои. В опытах со сферическим ползуном и резцом с фаской им было установлено, что впереди движущегося индентора образуется застойная зона ОАБ (рисунок 6) более слабого элемента фрикционной пары. За площадь среза принимается площадь внутренней границы

ОБ застойной зоны ОАБ. Истинной площадью трения является суммарная площадь сдвига, образующегося в процессе трения.

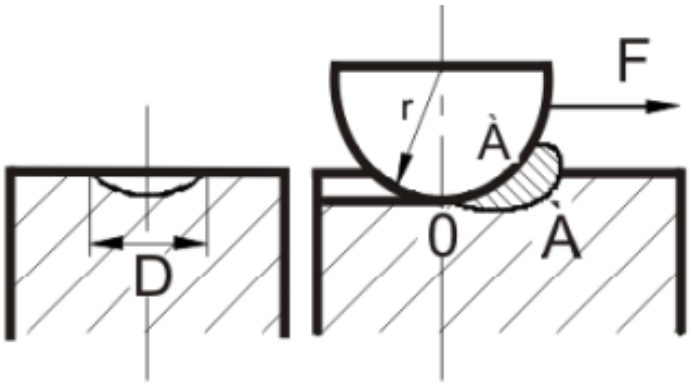


Рисунок 6 – Механизм трения по Г.И. Епифанову

При исследовании трения и адгезии свежеобработанных полусферических образцов из меди, латуни, технического железа, магниевого сплава, скорлупы кокосового ореха и слоновой кости по олову и свинцу оказалось, что трение во всех опытах примерно одинаковое; адгезия для неметаллов большая, а для металлов – ничтожная. Это позволило автору считать, что адгезия не играет первостепенной роли в процессе формирования силы трения. Сила трения определяется в основном сопротивлением на сдвиг более мягкого материала.

Значительным этапом развития в учении о трении было признание возможности наличия упругих деформаций контактирующих неровностей. На основе этих представлений, была разработана молекулярно-механическая теория трения, которая получила наибольшее признание [6].

Молекулярно-механическая теория рассматривает двойственный процесс трения, заключающийся в преодолении адгезионных связей, возникающих на площадках фактического контакта, и в объемном деформировании внедрившимися неровностями тонкого поверхностного слоя. Трение определяется как результат взаимодействия всех выступов, имеющихся на реальном контакте. Оно зависит от микрогеометрии (высоты максимальной неровности, его радиуса закругления и показателей параболы, выражающей опорную поверхность), механических свойств (модуля упругости или твердости и прочности адгезионной

связи) и внешних условий (нагрузки и скорости скольжения тел). Предполагается, что влияние температуры проявляется через изменение механических свойств трущихся тел.

В результате совместного рассмотрения задач теории упругости и пластичности И.В. Крагельским и Н.М. Михиным была получена следующая трехчленная формула, представляющая в общем случае величину граничного трения:

$$f = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta + k \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{R}}, \qquad (6)$$

где τ_0– прочность на срез адгезионной связи;

Pr – средние нормальные напряжения на контакте;

β – пьезокоэффициент, характеризующий прочность на срез при увеличении нормального напряжения;

k – коэффициент, зависящий от вида контакта;

a – коэффициент гистерезисных потерь;

h – величина внедрения;

R – радиус неровности.

Авторы молекулярно-механической теории трения утверждают, что она еще далека от своего завершения. На существующем уровне теория позволяет вычислять коэффициент трения по физико-механическим и микрогеометрическим характеристикам трущихся тел для случая трения покоя и при стационарных режимах трения, при условии слабо выраженных реологических свойств материала. В условиях нестационарных режимов трения и при условии ярко выраженных реологических свойств материалов представляется возможным прогнозировать диапазон изменения коэффициента трения. Построение же аналитических зависимостей в этом случае представляет собой чрезвычайно сложную задачу [6].

Однако приведенная информация относится к случаю неэффективной смазки, и имеет малое значение для случаев эффективной смазки, имеющих прямое отношение к ДВС и автомобилям в целом.

Современные масла на синтетической и полусинтетической основе, используемые для смазывания сопряжений двигателя, трансмиссии и др. механизмов отличаются высокими антифрикционными свойствами, обладают отличной адгезией к поверхности деталей, практически исключающей внешнее трение, минимизируют механические потери и износ сопряжений. Поэтому далее следует перейти к механизмам трения при наличии смазочного материала.

2.2 Механизмы трения, осуществляющиеся при эффективной смазке. Этапы развития теории граничной смазки и граничного трения

2.2.1 Первая четверть XX века

К концу 19 века стало очевидно, что гидродинамическая теория смазки, связывающая трибологическое поведение смазанного узла трения только с одной фундаментальной характеристикой смазочного материала – его сдвиговой вязкостью, не может объяснить причину некоторых явлений. Например причину того, что смазочные материалы, имеющие одинаковую вязкость, в условиях, не способствующих образованию гидродинамического клина, оказывают подчас совершенно различное антифрикционное и противоизносное действие [7].

Так в 1903 г. А. Кингсбюри предположил, что в условиях, «когда нагрузка на узел трения будет очень велика или поверхность шероховата, или когда условия не благоприятствуют образованию масляного клина, способность смазочного материала снижать трение зависит от его маслянистости. Природа этого свойства является как бы местным увеличением вязкости жидкости, находящейся в области сил притяжения молекул поверхностного слоя металла»

Спустя десятилетие британский физик Д. Рэлей обнаружил, что невидимые на глаз пленки жиров на поверхностях стекла заметно снижают трение по

сравнению с трением этих же тел, но увлажненных или даже погруженных в воду или парафиновое масло.

В 1921 г. И. Лангмюр перенес мономолекулярную пленку поверхностно-активного вещества с воды на стеклянную пластину, что позволило снизить коэффициент трения в сопряжении стекло-стекло с единицы до 0,13. Несколько позднее А. Дево показал, что как «толстый», так и мономолекулярный слой масла (воска) оказывает при статическом трении одинаковое смазочное действие. Такой слой эффективен даже при концентрации, много меньшей, чем требуется для образования конденсированного монослоя.

В 1918-1921 Р. М. Дилей, на основании большого объема чисто трибологических экспериментов, заключил, что «ненасыщенные молекулы смазочного вещества прикрепляются, по-видимому, к молекулам металла, который они смачивают, образуя покровы, способные предупредить сцепление молекул соприкасающихся поверхностей». И наконец, в 1914 г. было установлено, что смазочную способность нефтяных масел можно повысить до уровня растительных за счет добавления в нефтяные масла поверхностно-активных компонентов, прежде всего – жирных кислот. В 1919-1920 гг. на подобные методы повышения смазочной способности нефтяных масел уже были взяты патенты [7].

Дальнейшие основополагающие исследования связаны с именем британского ученого Уильяма Бейта Харди, названного впоследствии первооткрывателем граничной смазки. Свои исследования статического трения смазанных поверхностей в условиях невозможности образования жидкостной пленки Харди начал в 1918 г.

Первую свою статью, на данную тематику, Харди опубликовал в 1919г., в которой показал что при трении тщательно очищенных стеклянных поверхностей происходят точечные сваривания, которые сопровождаются отрывом маленьких кусочков стекла с поверхности одного образца и привариванием их на поверхность другого. Однако при нанесении на стекла тонкого слоя (предельной толщины около 1мкм) ПАВ, например жирной кислоты, этот эффект

прекращается, и скольжение поверхностей происходит беспрепятственно. Способность производить такой эффект зависит целиком от химического строения молекул жидкости, определяющего ее способность адсорбироваться твердым телом [8].

В 1922 году была опубликована знаменитая статья Харди «BoundaryLubrication – TheParaffinSeries, в которой он впервые открыл существование граничных смазочных слоев и самого процесса трения при граничной смазке.

В своей статье Харди говорил, что есть некоторый режим смазки, в котором поверхности твердых тел находятся так близко друг к другу, что влияют непосредственно на физические свойства смазочного материала. Тогда, по мнению автора, трение зависит не только от смазочного материала, но и от химической природы границ твердых тел. Граничная смазка при этом так сильно отличается от совершенной смазки, что заставляет предположить наличие разрыва между двумя состояниями.

Данный вывод Харди сделал основываясь на результатах своих экспериментов, в процессе которых оценивал статическое трение нагруженного ползуна (плоского или полусферического) по плоской пластине. Полусферический ползун Харди использовал, чтобы обеспечить «выдавливание» избыточного смазочного материала и осуществить смазывание тонким слоем, непосредственно примыкающим к поверхностям трения. Испытания проводились в камере, сквозь которую пропускался чистый и обезвоженный воздух. Образцы изготавливались из стекла, стали и висмута. В качестве СМ применялись чистые химические соединения (гомологические ряды парафинов и соответствующих спиртов и жирных кислот). Смазка осуществлялась либо с избытком, либо путем получения тонкой невидимой пленки. Коэффициенты трения при любом методе нанесения СМ были практически одинаковы, т. к. при обильной смазке его излишек выдавливался из зоны трения и контакт осуществлялся через тонкую пленку СМ.

Этот тонкий слой, который не выдавливается под действием высоких давлений (до 103 МПа) и играет основную роль в разделении контактирующих поверхностей при их относительном перемещении, Харди назвал **граничным**. То особое состояние СМ, в котором оно находится под воздействием силового поля твердой фазы и которое, согласно Харди, «нельзя назвать ни жидким, ни твердым», он также назвал **«граничным»**.

Коэффициент трения по Харди при этом представляет собой линейную убывающую функцию молекулярной массы смазочной среды для каждого гомологического ряда (то есть длины углеродной цепи или количества метиленовых групп в ней). Эти зависимости сохраняются при трении образцов различных материалов (рисунок 7).

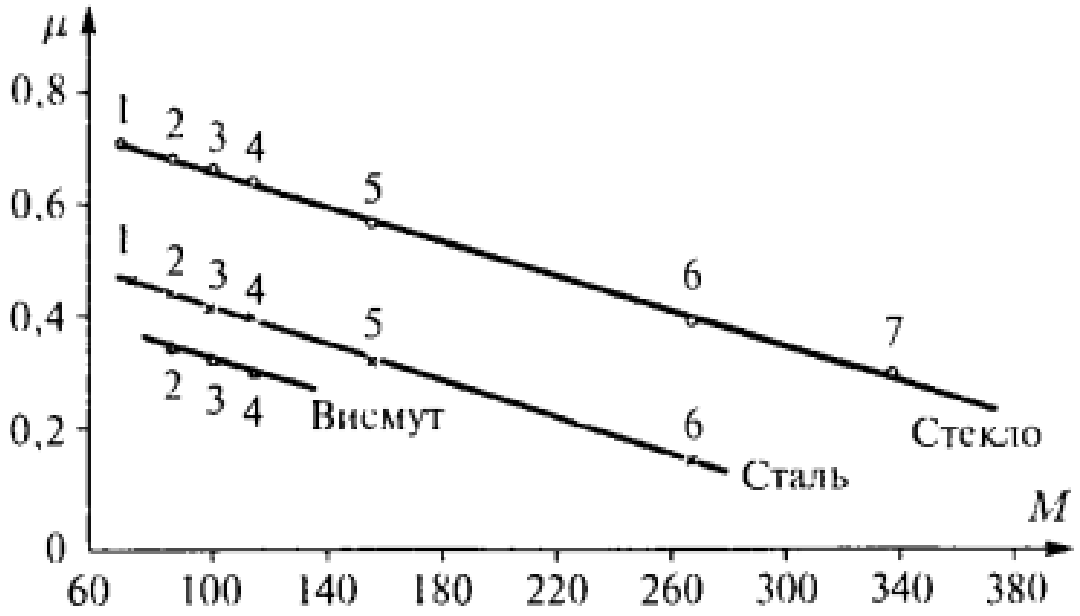


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента статического трения от молекулярной массы парафинов для одноименных трущихся тел

Так при одинаковой молекулярной массе наибольшие коэффициенты трения всех исследованных материалов были получены при смазывании парафинами, а наименьшие – при смазывании жирными кислотами.

Характер этих зависимостей сохраняется при трении по пластине как полусферического, так и плоского ползуна (рисунок 8).

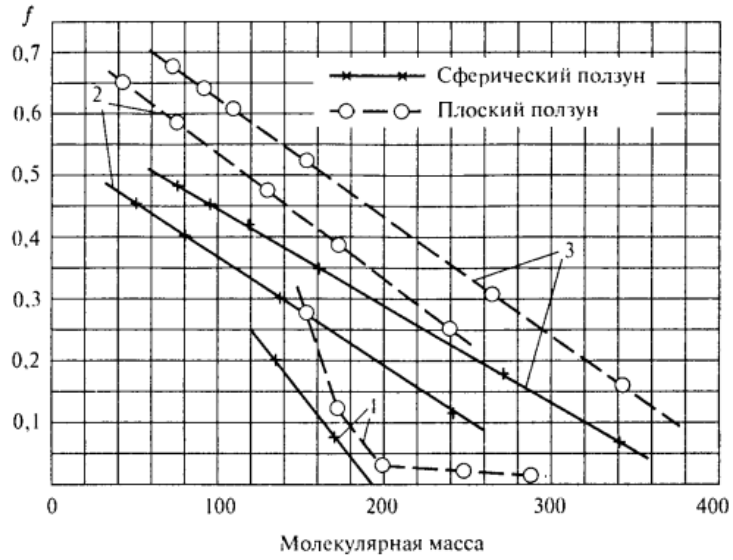


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента статического трения стальных образцов от молекулярной массы по Харди и Биркамшоу: 1 – жирных кислот; 2 – спиртов; 3 – парафинов

Таким образом, согласно Харди, для гомологических рядов нормальных парафинов, спиртов и жирных кислот коэффициент трения f связан с молекулярной массой М углеводородов зависимостью:

$$f = b - aM, \tag{7}$$

где параметр a характеризует гомологический ряд и не зависит от материала трущихся тел (для одноименных пар), а параметр b зависит только от материала пар трения, уменьшаясь в направлении стекло – сталь – висмут, так что при изменении материала трущихся тел прямая, аппроксимирующая зависимость f от M, сдвигается параллельно самой себе [7].

Для разноименной пары трения значение – равно полусумме значений этого параметра, полученных из независимых экспериментов для каждого из материалов («правило среднего»). Убывание коэффициента трения с ростом

длины углеводородной цепи молекул смазочной среды Харди объясняет тем, что эти молекулы адсорбируются на поверхностях трения полярными группами к поверхности и образуют ориентированные слои, подобные тем, которые Лангмюр наблюдал при изучении адсорбции на поверхности жидкости. Эти молекулы в конденсированном адсорбционном слое ориентированы практически перпендикулярно к поверхности, образуя «молекулярный ворс» (рисунок 9).

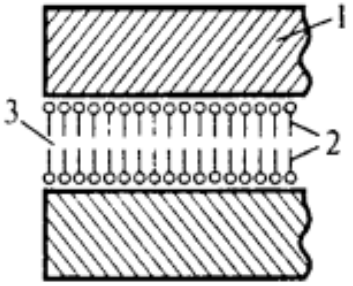


Рисунок 9 – Модель контакта при граничной смазке (по Харди): 1 – поверхность трения; 2 – адсорбированная молекула (о – активная группа, I – углеводородный радикал); 3 – поверхность сдвига

Чем полярнее молекула, чем длиннее ее цепь, тем на большее расстояние разведены эти поверхности и, соответственно, тем слабее взаимодействие силовых полей твердых тел, обуславливающее, согласно Харди, сопротивление взаимному перемещению этих тел (т.е. тем меньше коэффициент трения). «По-видимому, – пишет далее Харди, – при достаточной длине цепи исчезает поле, и трение, следовательно, отсутствует». Действительно, при соответствующей молекулярной массе смазывающей среды перемещение ползуна происходит при минимальном тяговом усилии, и Харди даже наблюдал самопроизвольное перемещение ползуна («эффект сверхскользкости»).

Латентный период граничной смазки.

Харди (совместно с И. Даблдей) установил также эффект «латентного периода трения» в поверхностно-активных средах. При выдержке в такой среде через определенный промежуток времени (от нескольких минут до нескольких часов) трение снижается от начального, достаточно высокого, до некоторого,

существенно меньшего значения, которое уже мало зависит от времени выдержки. Харди связывает этот эффект с кинетикой адсорбции и ориентации молекул смазывающего вещества в силовом поле твердой фазы. Для нормальных углеводородов, молекулы которых симметричны (и, следовательно, не обладают поверхностной активностью), латентного периода не наблюдается. Молекулы же ПАВ либо сразу адсорбируются «правильно» – карбоксильной группой (для жирных кислот) к металлу, либо – «неправильно» (метильным радикалом к металлу). Поскольку в последнем случае положение молекул неустойчиво, они через некоторое время (латентный период) опрокидываются и занимают устойчивое положение [9].

Влияние нагрузки.

Эксперименты Харди показали, что при трении полусферического ползуна по плоской пластине в различных средах коэффициент трения в условиях граничной смазки не зависел от нагрузки. Но при использовании плоского ползуна в области АВ малых нагрузок наблюдалось снижение коэффициента трения с ростом нагрузки до определенной величины, при превышении которой увеличение нагрузки уже не оказывало влияния на коэффициент трения (рисунок 10).

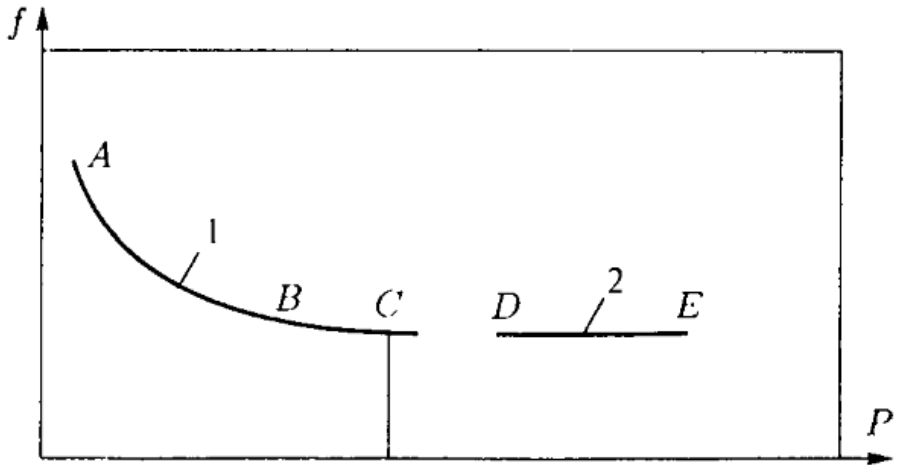


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента трения от нагрузки при граничной смазке (по Харди и Биркамшоу): 1 – плоский ползун; 2 – полусферический ползун

Харди объяснил это тем, что в области малых нагрузок плоский ползун не выдавливает мультимолекулярный слой из контакта, в результате чего сдвиг происходит в этом слое, потерявшем текучесть, свойственную смазочному материалу в объеме. Когда слой утончается под давлением нагрузки до толщины в одну молекулу, обеспечивается выполнение закона Амонтона, т.е. независимость коэффициента трения от нагрузки, так что в левой части зависимости изменение трения происходит вследствие изменения толщины слоя смазки, а в правой части – вследствие взаимодействия между упорядоченными молекулярными слоями [10].

Исследования строения граничных слоев.

В конце рассматриваемого периода были начаты интенсивные исследования строения граничных слоев, образующихся на твердой подложке. Осуществить это непосредственно в трибологическом контакте не позволяли инструментальные методы того времени. Поэтому исследователи ограничивались изучением состава и структуры граничных слоев, образовавшихся на индивидуальных пластинах из различных материалов. У. Брэгг (1925), применив рентгеновские методы, установил, что граничные пленки имеют слоистое строение. Эти результаты позволили ему предположить, что смазочные свойства различных сред обусловлены их способностью приобретать в фрикционном контакте слоистую структуру. Граничный слой, по его представлениям, подобен колоде игральных карт: он выдерживает большие нормальные давления, но при сдвиге отдельные карты легко скользят друг относительно друга. Такое упрошенное представление очень наглядно в качестве первого приближения.

Важно отметить, что Харди рассматривал граничную пленку как термодинамическую фазу: «Наши исследования, равно как и анализ структуры жирных пленок на твердых поверхностях, выполненный Брэггом и его сотрудниками, подтверждают реальность существования граничной фазы. Как это впервые отметил Лесли, она обычно образуется с выделением тепла; в этой фазе сосредоточены сильнейшие электрические поля, проявляющиеся в так называемых контактных разностях потенциалов; наконец, она имеет особую

молекулярную структуру. При граничной смазке мы имеем дело с половиной такой фазы, причем наши результаты показывают, что эта половина имеет толщину в несколько молекул».

2.2.2 Вторая четверть XX века

В рассматриваемый период продолжались исследования строения граничных слоев, нанесенных на одну отдельно взятую поверхность твердого тела. Было установлено, что граничные пленки представляют собой ориентированные многослойные образования.

Так, Трилля (1931), используя рентгеновский структурный анализ, показал, что жирные кислоты, парафины, эфиры, кетоны, спирты и другие длинноцепные соединения, нанесенные на стеклянные или металлические пластинки, располагаются в виде слоев, параллельных поверхности подложки. Расстояния между слоями линейно возрастают с увеличением числа атомов углерода в молекулярной цепи для каждого гомологического ряда. Во всех случаях наблюдалась ориентация молекул в слоях, причем ориентация увеличивалась во времени до определенного уровня, а некоторые факторы, – например, наличие на стеклянной подложке пленок воды – снижали или даже устраняли эффект ориентации.

По мере удаления от поверхности эффект ориентации ослабляется. Трилля в граничном слое наблюдал 400 – 600 элементарных «пластин» и, считая каждую состоящей из двух молекулярных слоев, он для олеиновой кислоты рассчитал толщину граничного слоя в 0,9 – 1,1 мкм.

Эффект Ребиндера.

Крупные открытия, позволившие сделать большой шаг в понимании механизма процессов трения при граничной смазке и подойти вплотную к управлению этими процессами, были сделаны отечественными учеными П. А. Ребиндером и Б. В. Дерягиным.

П.А. Ребиндер (1928) установил, что адсорбция полярных соединений, растворенных в неполярной среде, окружающей твердые тела, облегчает

диспергирование этих тел. Указанный эффект, сводящийся к пластифицированию тончайших поверхностных слоев твердых тел в поверхностно-активной среде (эффект Ребиндера), играет важную роль в процессе граничной смазки, на что убедительно указал сам П. А. Ребиндер.

Эффект Дерягина.

В этот же период Б. В.Дерягин ввел представление о расклинивающем действии тонких смазочных слоев. Этот эффект заключается в том, что при достаточно сильном взаимодействии поверхностей контактирующих тел с молекулами смазочного материала пленка, разделяющая эти поверхности, будучи сжата до определенной толщины, сопротивляется своему утоньшению и развивает некоторое противодавление, стремящееся раздвинуть эти поверхности.

Расклинивающий эффект определяется расстоянием между контактирующими поверхностями, резко возрастая с его уменьшением, причем он отличен от вязкого сопротивления среды сближению погруженных в нее тел. Б. В.Дерягин, исследуя течение различных жидкостей в капиллярах специальной формы, установил также, что механические свойства граничного слоя толщиной в несколько десятых микрометра отличны от свойств жидкости в объеме.

Еще более убедительно наличие аномальной вязкости граничных слоев было показано им же с помощью специально разработанного «метода сдувания». Под воздействием тангенциальной силы, создаваемой потоком воздуха или другого газа, направленным параллельно поверхности твердого тела, в пленке масла, нанесенной на эту поверхность, возникает послойное течение, в результате чего она приобретала форму пологого клина. Анализ формы этого клина позволяет оценить «пристенную» вязкость исследуемой жидкости в функции расстояния от стенки. Так, при переходе от объема масла, включающего ПАВ, к граничному слою (на расстояния 0,1 … 0,2 мкм от поверхности твердого тела) вязкость скачкообразно изменяется (в большинстве случаев увеличивается), т.е. граничная пленка имеет четко выраженную границу раздела с объемом жидкости.

На основании этого, Дерягин сделал вывод, что граничный слой жидкости находится в особом агрегатном состоянии и имеет свойство особой фазы,

отличной от объемной. Особая структура граничных слоев «делает естественным сближение их свойств со свойствами смектических фаз жидких кристаллических веществ». Наблюдается четкий параллелизм между изменением вязкости пристенных граничных слоев, связанным с их особой структурой, и эффективностью смазочного действия [10].

Граничный слой как квазикристаллическое и квазитвердое тело.

В 1940 г. Бику, Гивенсу и Смиту при испытании на четырехшариковом волчке удалось установить существование некоторой «критической» скорости, при превышении которой коэффициент трения начинает заметно уменьшаться, а электрическое сопротивление в контакте резко увеличивается, что было объяснено переходом от граничной к «квазигидродинамической» смазке.

В эти же годы А. С. Ахматов рассматривает формирование граничных слоев из расплава или раствора как одно из явлений кристаллизации, а граничный слой – как моно- или поликристаллическое тело, возникшее за счет зародышевой функции первичного слоя.

Граничный слой может рассматриваться как квазитвердое тело, обладающее упругостью формы и определенным предельным напряжением сдвига, зависящим от толщины смазочного слоя и приложенного поперечного давления.

Это было показано экспериментами на наклонном маятнике. Поскольку затухание амплитуды колебаний при сформированном граничном слое происходит по линейному закону, т. е. трение не зависит от скорости, как и при сухом трении твердых тел. А при дезориентированном граничном слое затухание происходит по логарифмическому закону, поскольку трение зависит от скорости, как при внутреннем трении, то есть при комнатной температуре граничный слой ведет себя как твердое тело, а при 85° С – как вязкая жидкость (рисунок 11).

А. С. Ахматов (1940) также установил наличие некоторой «критической» толщины граничного слоя (порядка 50 молекулярных слоев), при превышении которой начинает проявляться зависимость коэффициента трения от скорости, т.е.

снижение амплитуды колебаний маятника во времени происходит по логарифмическому закону [11].

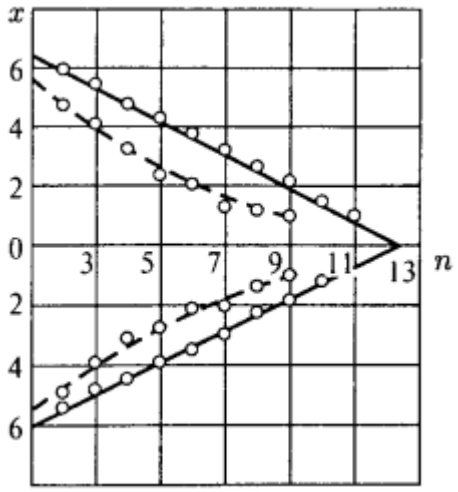


Рисунок 11 – Затухание колебаний наклонного маятника А. С. Ахматова в присутствии граничного слоя стеариновой кислоты толщиной 25 молекулярных слоев на стали: -о- - при 18,5° С –квазитвердое состояние слоя; --о-- - при 85° С жидкое состояние слоя

Способы разрушения граничных слоев при трении.

В рассматриваемый период было положено начало исследованию трех основных причин разрушения граничного слоя: из-за постепенного истощения активных компонентов в смазочном материале, превышения нагрузки в контакте над некоторой критической величиной и превышения критической температуры при трении. Так, в 1934 г. Бюхе, а затем Лангмюр и Шефер показали, что смазочный слой определенной толщины, разделяющий трущиеся тела, после определенного числа проходов ползуна разрушается, о чем свидетельствует резкое увеличение коэффициента трения.

В 1939 г. Б. В. Дерягин установил, что долговечность граничного слоя зависит от природы смазочного материала, возрастает при увеличении толщины этого слоя и при введении в масло жирной кислоты даже в малой концентрации. Она снижается с ростом нагрузки и скорости скольжения, а также с попаданием в масло кислорода. При этом смазочные среды, обеспечивающие большую

долговечность граничного слоя, развивают большее расклинивающее давление, которое, в свою очередь, может служить «мерой прочности связи между маслом и поверхностью твердого тела».

В экспериментах П. А. Ребиндера и Н. Н. Петровой (1939) разрушение граничных слоев при трении происходит при достижении определенного «критического» давления в контакте, признаком чего является резкое возрастание коэффициента трения и скачкообразное повышение скорости изнашивания. Это критическое давление зависит как от состава смазочной среды, так и от свойств металла, из которого изготовлены трущиеся тела. Для сравнительно мягких металлов (меди, алюминия) даже в средах, обладающих значительной поверхностной активностью, критические давления не превышали 100 МПа, а для стальных пар трения оно не достигалось при 140 МПа. Тем не менее, для каждой пары трения критическое давление возрастало с увеличением поверхностной активности смазочных сред. Авторы работы связывают этот эффект с различной способностью молекул среды к проникновению в микропоры металла, что препятствует локализации напряжений в точках фактического контакта.

Проведенные в этот период исследования показали, что при повышении температуры узла трения до некоторого критического уровня также достигается разрушение граничного смазочного слоя.

Фундаментальные исследования предельных температур работоспособности в этот период были проведены в Кембриджской лаборатории Ф. Ф. Боудена. Там к концу тридцатых годов был разработан весьма совершенный для своего времени трибометр (машина трения Боудена-Лебена), с помощью которого Боуден и его сотрудники установили, что при смазывании трибологического контакта (пара трения «сталь – сталь») такими средами, как белое масло, жидкие спирты и низшие жирные кислоты перемещение осуществляется скачками (скачкообразное изменение коэффициента трения), а если смазывание осуществляется высшими жирными кислотами, то перемещение осуществляется непрерывно, без скачков (1939).

В 1940 г. Тейбор показал (также для пары трения «сталь – сталь»), что если при смазывании высшими жирными кислотами и некоторыми коммерческими маслами при комнатной температуре наблюдается непрерывное («гладкое») скольжение, то при нагреве узла трения и окружающего его смазочного материала до определенной (для каждого смазочного материала) температуры, непрерывное скольжение сменяется скачкообразным и коэффициент трения увеличивается до значений, характерных для сухого трения (рисунок 12).

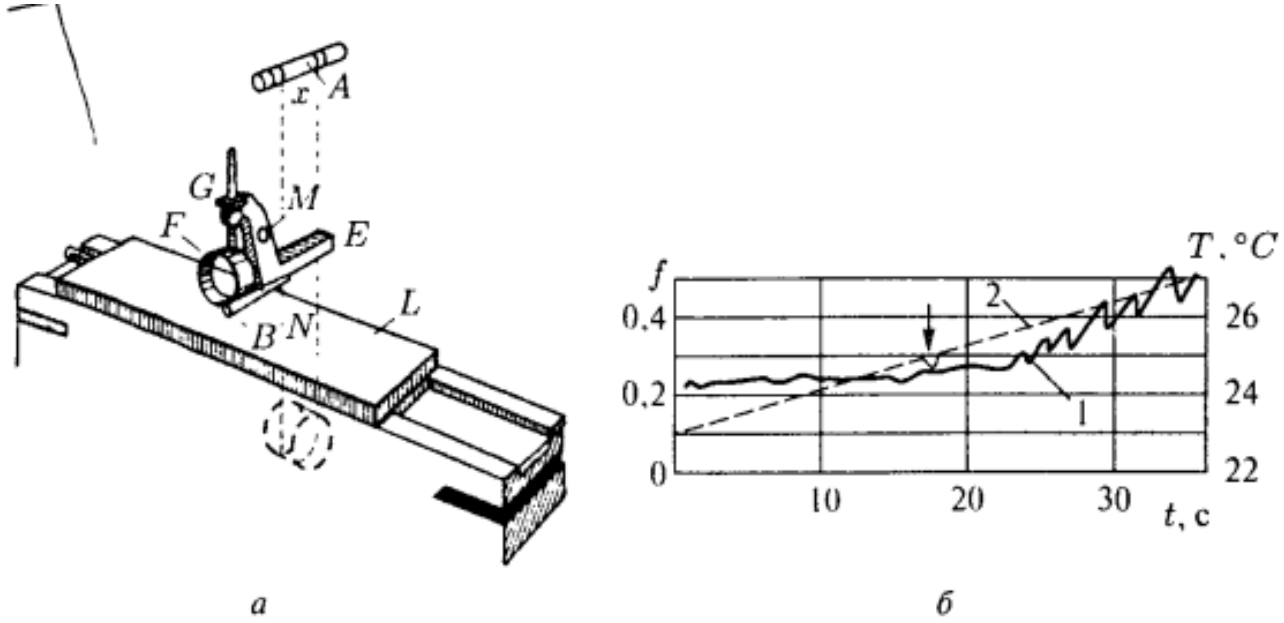


Рисунок 12 – Машина трения Боудена-Лебена (а) и участок зависимости (б) коэффициента трения *f* образцов из мягкой стали со смазкой дифениламином (1) и повышение температуры *T* (2) от времени испытания *t*. Стрелкой показана температура плавления смазочного материала (по Тейбору)

Этот переход от непрерывного скольжения к скачкообразному является обратимым и непрерывное скольжение возобновляется по мере остывания трибологического контакта до этой же температуры, названной Тейбором «переходной». Тейбор предположил, что переход от непрерывного скольжения к скачкообразному объясняется дезориентацией и десорбцией молекул смазочного материала в граничном слое, а значение переходной температуры может служить характеристикой прочности связи граничного слоя с поверхностью трения.

Первая модель процесса разрушения граничного слоя.

В 1944 г. Фривинг попытался дать представлениям об адсорбционно-десорбционном механизме образования и разрушения граничных смазочных слоев определенное теоретическое обоснование. Разделение трущихся тел при граничной смазке осуществляется слоем, состоявшим из молекул ПАВ, адсорбированных на поверхностях трения из смазочного материала. Этот слой находится в динамическом равновесии с объемом смазочного материала, т. е. одновременно идут два процесса – адсорбция ПАВ и их десорбция, причем равновесие с ростом температуры смещается в сторону уменьшения доли молекул ПАВ, находящихся в адсорбированном состоянии. Переходная температура реализуется в тот момент, когда концентрация молекул ПАВ на поверхности падает вследствие десорбции до определенной, постоянной для данноготрибосопряжения величины. Отсюда, исходя из того, что константа равновесия связана с температурой процесса изохорой Вант Гоффа, Фривинг пришел к уравнению:

$$lnC = -\frac{U}{RT_t} + const, \tag{8}$$

где C – концентрация ПАВ;

U – «теплота адсорбции»;

R – газовая постоянная;

T_t – переходная температура (по абсолютной шкале).

Линейность зависимости InC от $1/T_t$ (Фривинг доказал экспериментально применительно к ряду жирных кислот и их производных, растворенных в различных концентрациях в инактивном масле (рисунок 13). Из этих графиков он рассчитал значения U для исследуемых ПАВ. Для жирных кислот они были в пределах 50-56 кДж/моль, для метилстеарата – 36 кДж/моль, для этилстеарата – 16,4 кДж/моль.

Полученные результаты подтверждают предположение, что разрушение граничного слоя происходит из-за десорбции ПАВ. В дальнейшем идеи Фривинга были развиты рядом исследователей.

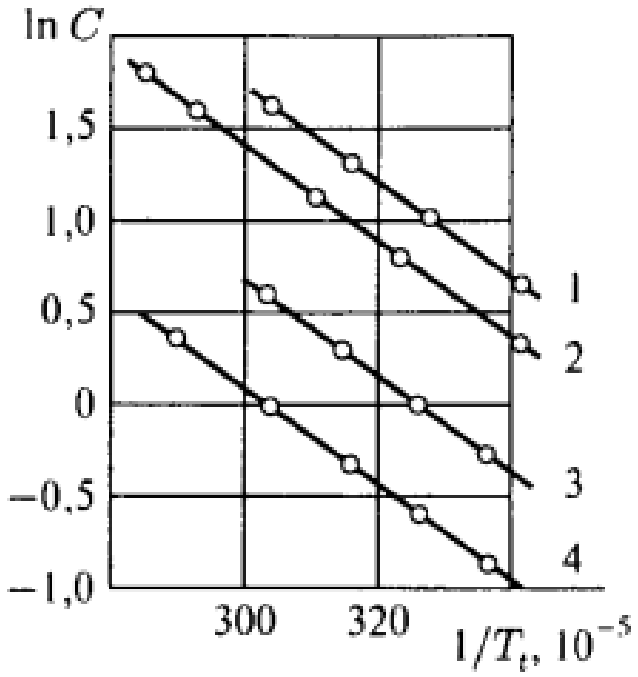


Рисунок 13 – Зависимость обратных переходных температур от концентрации в белом (инактивном) масле жирных кислот: 1 – капроновой, 2 – олеиновой, 3 – миристиновой, 4 – стеариновой (по Фривингу)

2.2.3 Третья четверть XX века

Модель Боудена и характерные зависимости коэффициента трения от температуры.

Боуден с коллегами, полемизируя с Харди, (чью модель граничной смазки они считали упрошенной и годной лишь для описания легких режимов этого процесса) пришли к заключению, что в тяжелонагруженных узлах трения, по вершинам отдельных микронеровностей контактирующих тел имеет место непосредственный металлический контакт, который локализуется адсорбированными молекулами активного компонента смазочного материала. Так

по мнению Боудена и его школы, контакт поверхностей в режиме граничной смазки представлялся следующим образом (рисунок 14).

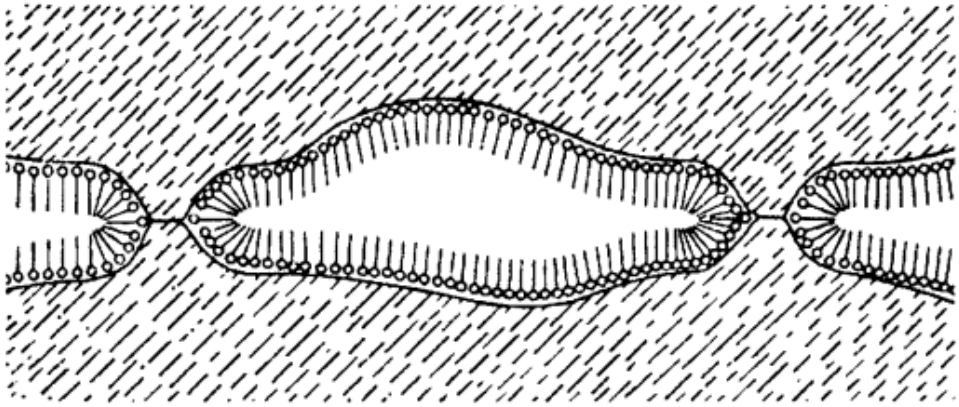


Рисунок 14 – Модель контакта при граничной смазке по Боудену

Сила трения F этих тел складывается из сопротивления $\tau_м$ срезу адгезионных связей на участке металлического контакта и сопротивления $\tau_{см}$ сдвигу смазочного слоя на остальной площадке контакта, которое, естественно, во много раз меньше:

$$F = A|\alpha\tau_{\text{м}} + (1 - \alpha)\tau_{\text{см}}|, \quad (9)$$

где A – суммарная площадь контакта, несущая нагрузку;

a – доля металлического контакта;

$\tau_м$ и $\tau_{см}$ – удельные сдвиговые сопротивления соответственно на участке металлического контакта и на полностью смазанном участке поверхности (определяются при независимом эксперименте).

Такая модель удовлетворительно объясняет как наличие изнашивания трущихся тел в процессе граничной смазки даже до разрушения граничного слоя, так и фрикционный перенос частиц металла с одной поверхности трения на другую при граничной смазке.

В этой же работе были представлены зависимости коэффициента трения от температуры для следующих основных типов смазочных сред при граничной

смазке (рисунок 15): для инактивного (например, чистого парафинового) масла (I), для ПАВ (например, для жирной кислоты) или его раствора в инактивном масле (II), для противозадирного (ЕР) смазочного материала (III) и для смеси противозадирного смазочного материала и жирной кислоты (IV). Резкое снижение трения в химически активных средах при превышении определенной температуры T_r объясняется образованием па поверхностях трения защитной пленки из продуктов химической реакции активного компонента смазочного материала с металлом (кривая III на рисунке 15). Комбинация ЕР присадки и жирной кислоты может обеспечить низкое трение в широком интервале температур (кривая IV).

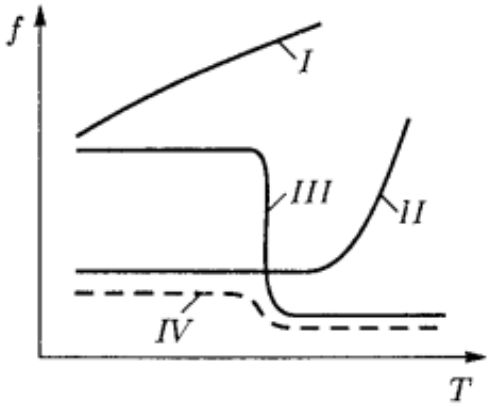


Рисунок 15 – Характерные зависимости коэффициента трения от температуры в режиме граничной смазки (по Боудену)

Трехчленный закон трения при граничной смазке.

А.С. Ахматов, развивая двучленный закон трения, Б.В. Дерягина, пришел к выводу что необходимо учитывать также влияние на силу трения поля твердой фазы, и предложил закон трения в следующем виде:

$$F = f[S_0(p_0 + p_m) + N], \quad (10)$$

где f – «истинный» коэффициент трения;

S_0 – площадь фактического контакта;

p_o и p_m – удельные силы притяжения соответственно граничных слоев и конденсированных фаз;

N – нормальная нагрузка.

Таким образом в уравнении (10) отдельно учитываются Вандер-Ваальсовые силы притяжения граничных слоев и конденсированных фаз. С помощью этой формулы, А. С. Ахматов и Г. Н. Учуваткин (1969) смогли определить и p_o, и p_m.

Для ряда металлов авторы показали, что пленка ПАВ толщиной 500 молекулярных слоев полностью экранировала силовое поле твердого тела, и F в этих условиях зависит только от p_o и N.

Исследования строения полимолекулярных граничных слоев.

Большую роль в исследовании полимолекулярных слоев сыграли исследования Г.И. Фукса. Он установил, что при давлениях не выше 5 -6 МПа и гладких поверхностях осуществляется смазывание полимолекулярным граничным слоем (толщиной 0,3-0,04 мкм), что обеспечивает коэффициенты трения лишь немногим меньшие, чем при жидкостной смазке (0,01 - 0,1 и менее). Г. И. Фуксом также был разработан метод, расширяющий область существования полимолекулярного граничного слоя. Осуществлялось разделение зоны сдвига в граничном слое и зоны формирования фактической площади контакта путем организации на поверхности трения подслоя мягкого материала (металла или полимера), на котором адсорбируется специально подобранное ПАВ. Этот мягкий подслой, деформируясь, обеспечивает снижение давления на фактических пятнах контакта до значений, обеспечивающих существование полимолекулярной смазки на возможно большей доле поверхности контакта, а ПАВ способствует упрочнению граничного слоя и минимизации доли металлического контакта, в то время как основной смазочный материал обеспечивает сопротивление граничного слоя утонению [13].

Кинетическое описание процесса граничной смазки и концепция «дефекта смазочного слоя».

В конце 50-х гг. XX в. прошлого века появились попытки кинетических описаний процесса трения при граничной смазке и создания на их основе

уравнений для прогнозирования трибологических характеристик этого процесса. Одной из первых таких работ, не вполне корректной, но оказавшей большое влияние на все последующие попытки подобных описаний, была теория Кингсбюри.

Он предложил теоретическое описание процесса образования и разрушения адсорбционного слоя ПАВ, а прочность этого слоя, как и Фривинг, связал с теплотой адсорбции ПАВ на поверхности трения. Доля α металлического контакта («дефект смазочной пленки» в терминах Кингсбюри) рассматривалась как вероятность металлического контакта и определялась соотношением между временем прохождения единичной неровностью контртела расстояния между двумя молекулами ПАВ, адсорбированными на исследуемой пластине, и временем пребывания молекулы ПАВ в адсорбированном состоянии, определяемым по формуле Я.И. Френкеля:

$$\alpha = 1 - exp\left\{-\frac{Z}{\nu t_0} exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\}\right\}, \quad (11)$$

где Z – расстояние между адсорбированными молекулами, принимаемое в первом приближении равным диаметру молекулы;

v – скорость относительного перемещения единичной неровности;

t_0 – величина, обратная периоду колебания молекулы ПАВ в адсорбированном состоянии;

E – теплота адсорбции по Кингсбюри;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Подстановка значения α из уравнения (9) в уравнение (11) позволила рассчитать коэффициент трения при граничной смазке в широком диапазоне изменения действующих факторов, не выходя, разумеется, за пределы режима граничной смазки [7].

Влияние окислительных процессов.

В рассматриваемый период активно изучалось влияние различных газовых сред на смазочную способность масел (Г. В. Виноградов, 1958-69; Клаус и Бибер, 1964; Годфри, 1959; Р. М. Матвеевский, 1971; Т. Сакураи, 1973 и др.). Было установлено, что влияние газовых сред на противоизносные и противозадирные свойства смазочных материалов связано, прежде всего, с ускорением или торможением окислительных процессов в зоне трения. При тяжелых режимах граничной смазки в углеводородных средах развиваются сложные механохимические процессы, из которых процессы окисления, в которые вовлекаются как смазочная среда, так и металл, имеют наибольшее значение.

Было доказано, что окислительные процессы в зоне трения обеспечивают образование на рабочих поверхностях защитных оксидных слоев, которые снижают трение и износ трущихся тел и предотвращают заедание сопряжения. Эти процессы связаны с наличием молекулярного кислорода в зоне трения, окисляемостью смазочных материалов и трущихся тел в трибологическом процессе.

Для каждого сочетания смазочного материала, материалов трущихся тел и условий работы трибосопряжения существует оптимальная концентрация кислорода, обеспечивающая минимальный износ. При мягких режимах трения повышение доступа кислорода в зону трения приводит к повышенному износу. Если в масле содержатся высокоактивные кислородсодержащие соединения (например, продукты окисления масла – органические пероксиды), то они заменяют молекулярный кислород и обеспечивают смазочное действие даже в вакууме. Кислород и модифицирующие поверхности трения химически активные агенты могут действовать как синергетически, так и антагонистически [13].

2.2.4 Последняя четверть XX и начало XXI века

Основные направления исследований.

В эти годы заметно возрос интерес к рассматриваемой проблеме. Такие авторитетные эксперты, как Даусон и Тейлор приходят к выводу, что изучение

трения при граничной смазке становится одним из приоритетных направлений в трибологии (1985). Важной причиной обостренного внимания исследователей к проблемам граничной смазки является, в частности, ужесточение – как по нагрузкам, так и по температурам – условий работы смазанных узлов трения, стремление к их миниатюризации, бурное развитие нанотрибологии, стимулируемое требованиями новой техники, – прежде всего компьютерной, и т.д.

Широкое применение новой экспериментальной техники и современных инструментальных методов исследования в эти годы позволило получить более ясное представление как о продуктах, образующихся на поверхностях трения в процессе трибохимических реакций, имеющих место при граничной смазке, так и о самом изучаемом процессе. Стало возможным проводить исследование непосредственно в процессе трения (например, с использованием атомно-силового микроскопа, фрикционного силового микроскопа и установки для измерения поверхностных сил SFA). В эти же годы предложен ряд новых моделей (в том числе – кинетических) процесса трения в режиме граничной смазки. Разумеется, совершенствовались также методы исследования поверхностных слоев после окончания трибологического эксперимента (сканирующий туннельный микроскоп, оже-электронная спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, рентгеновский микроанализ, Фурье-ИК-спектроскопия и т.д.) [7].

Трибохимические процессы при граничной смазке.

Б.И. Костецкий выдвинул концепцию протекания трибохимических процессов без рассмотрения конкретных механизмов их реализации. Вследствие взаимодействия активированных трением поверхностных слоев с окружающей (в том числе смазочной) средой на поверхностях трения спонтанно образуются «вторичные структуры» (ВС), которые по строению, свойствам и составу коренным образом отличаются от исходных материалов и представляют собой новую фазу (тонкопленочный объект), обладающую экстремальными антифрикционными и противоизносными свойствами. Во вторичных структурах

аккумулируется от 90 до 98 % энергии трения. В определенном диапазоне скоростей, нагрузок и температур («диапазон структурной приспосабливаемости») коэффициенты трения и износ во много раз ниже, чем за пределами этого диапазона (осуществляется «нормальное» изнашивание), а за его пределами осуществляется переход в режим «патологического изнашивания». Это объясняется тем, что в диапазоне структурной приспосабливаемости процессы образования и разрушения ВС на поверхностях трения находятся в динамическом равновесии, а вне этого диапазона происходит нарушение этого равновесия, что ведет к переходу либо к интенсивному адгезионному изнашиванию, либо к интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию. В конечном счете, постулируется наличие явления самоорганизации трибосистем в процессе трения. Это представление плодотворно развивалось школой Б. И. Костецкого (Л. И. Бершадский, А. К. Караулов, В. С. Романов и др.) в последующие десятилетия [12].

Трибополимеризация.

В рассматриваемый период продолжается развитие исследований процесса трибополимеризации, включая изучение его механизма и практическое его использование для обеспечения улучшения смазочного действия масел. Так было установлено, что химические соединения, образующие в зоне трения металл-полимерные комплексы, обеспечивают более эффективное противоизносное действие, чем не образующие их. Для получения полимерных пленок с высокими противоизносными и противозадирными свойствами, наряду с наличием в соединении активных полимеризующихся, а также функциональных групп, мономер или олигомер должен иметь определенную конфигурацию или конформацию, которая обеспечивает легкую хемосорбцию соединения на поверхности металла.

Последние десятилетия отечественные исследователи, в основном, сосредоточили внимание на изучении механизма приработочного действия трибополимеробразующих (ТПО) присадок к маслам. Так например было установлено, что при введении в инактивную смазочную среду (тетрадекан) ТПО

химических соединений наблюдается резкое повышение момента трения, что связано с вытеснением с поверхности контакта молекул тетрадекана более полярными молекулами ТПО, обладающими крайне низкой смазочной способностью. Это приводит к усилению адгезионного взаимодействия между поверхностями, что обеспечивает изнашивание их по вершинам неровностей, значительную активацию этих участков контакта; к повышению температуры, активизации экзоэлектронной эмиссии и каталитического влияния свежеобнажаюшейся поверхности металла, что, в свою очередь, обеспечивает трибополимеризацию молекул ТПО соединений. Образуются высокомолекулярные соединения, покрывающие фактическую площадь контакта трущихся тел, так что износ металла в дальнейшем заменяется износом образовавшейся и постоянно восстанавливающийся по мере изнашивания полимерной пленки. Таким образом, приработка осуществляется без значительного съема металла [7].

Исследования деградации смазочных материалов при трении.

Такие исследования интенсивно продолжались в рассматриваемый период. Так, на узле трения, установленном непосредственно в камере растрового электронного микроскопа, было показано, что повреждение граничного слоя происходит вследствие «выглаживания» стальных образцов при граничной смазке инактивным маслом, т. е. граничный слой теряет работоспособность, когда в процессе трения изнашиваются микрошероховатости рабочих поверхностей трущихся тел и тем самым устраняются микрорезервуары масла, из которых подпитывается граничный слой (В. Холзауер, 1990).

На долговечность граничной пленки масла в процессе трения основное влияние оказывает природа исследуемого смазочного материала и природа трущихся тел, а введение в смазочный материал различных ПАВ повышает его ресурс.

Рассматривают две причины потери смазочным материалом своих трибологических свойств в процессе трения. Первая связана с тем, что продукты износа, обладая большой удельной поверхностью, адсорбируют активные

компоненты смазочного материала и уносят их из зоны контакта. Другие исследователи связывают деградацию смазочных материалов, приводящую к заеданию трибосопряжений, с необратимыми трибохимическими превращениями в продукты, не обладающие смазочной способностью. Продукты деградации масла подобны продуктам его окисления при 400°С и выше, в то время как доза масла, не проникшая в зону контакта, имеет температуру не выше 150° С.

Модели процесса граничной смазки.

На поверхности раздела твердое тело – жидкость всегда создается пристенный слой жидкости, свойства которого отличаются от свойств объемной жидкой фазы вследствие действия поверхностных сил твердой подложки. Это впервые было отмечено в исследованиях Харди и Лесли.

В.А. Левченко (1994) на основе изучения эпитропных жидкокристаллических (ЭЖК) смазочных слоев предложил новую модель граничного слоя, которая впоследствии получила название модели Дерягина – Левченко формирования структурно-упорядоченного ЭЖК-слоя граничной смазки.

Модель с высокой точностью отражает трибологический узел, работающий в условиях граничной смазки, пространство в котором заполнено ЭЖК-слоем смазочного масла. Адсорбционные (переходные) слои между твердыми поверхностями и ЭЖК-слоями имеют упорядоченность, отличающуюся от более удаленных от поверхности ЭЖК-слоев (рисунок 16). Согласно термодинамическим представлениям Гиббса свойства граничной фазы могут быть отличными от свойств объемной фазы.

Как показано на рисунке 16, под действием поверхностных сил, твердая поверхность изменяет расположение центров масс молекул ЭЖК-слоев смазочного материала, ориентируя их гомеотропно к границе поверхности и формируя тем самым слой с квазисмектическим упорядочением (гиперплотной упаковкой) и параметром ориентационного порядка Q_s близким к 1.

Так как слой ЭЖК расположен между двумя твердыми подложками с выраженной гомеотропной ориентацией, то направление вектора-директора едино

по всему объему слоя. Твердые подложки, индуцируя в объем смазочного ЭЖК-слоя гомеотропную ориентацию, тем самым, как показано на модели, формируют однородную упорядоченность в узле трения.

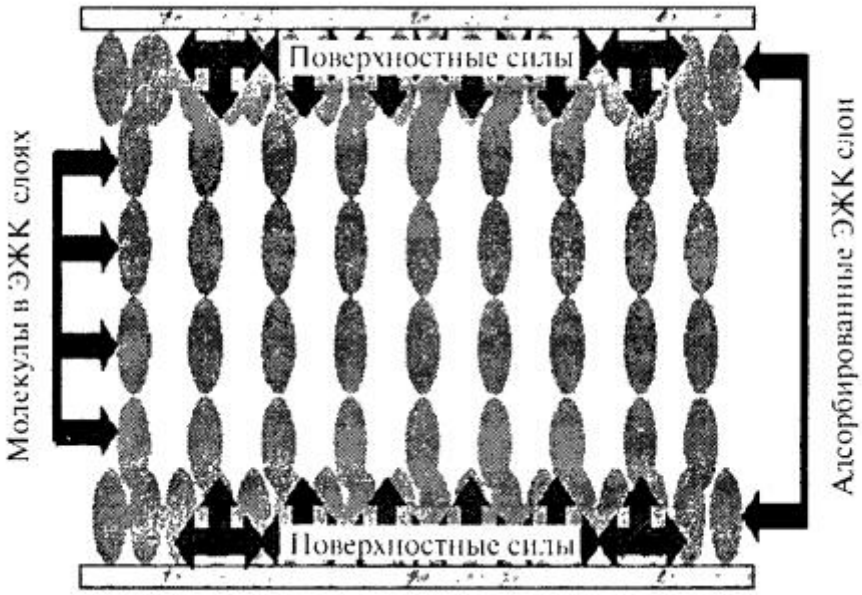


Рисунок 16 – Модель Дерягина-Левченко формирования структурно-упорядоченного ЭЖК-слоя граничной смазки

Применение модели Дерягина-Левченко в граничном трении позволило разработать механизм управления структурированными ЭЖК граничного слоя в рабочем режиме агрегатов с большими удельными нагрузками (турбин, компрессоров и др.). Данный механизм заключается в создании на границе металл-металл управляемого структурированного ЭЖК граничного слоя масла, обладающего в силу особенностей своей структуры упругостью формы, ориентационным параметром порядка и создающего необходимые условия для минимальной диссипации энергии при относительном скольжении твердых тел.

Также в эти годы был предложен ряд новых моделей процесса граничной смазки. Например Л.И. Бершадский и А.И. Богданович создали кинетическое описание процесса нормального механо-химического изнашивания при граничной смазке как обобщенной трехстадийнойтрибологической реакции. На основании этого положения, авторы разработали расчетно-экспериментальную

методику оценки кинетических характеристик (константы скорости, энергии активации, значения порядка) для каждой ее стадии. Позднее они же показали, что в диапазоне условий, соответствующих нормальному механо-химическому изнашиванию, значения энергии активации поверхностного разрушения (т. е. изнашивания) сталей в углеводородных средах инвариантны. За пределами этого диапазона (т. е. в условиях повреждаемости) эти величины существенно меньше.

В рассматриваемый период, И.А. Буяновский сформулировал концепцию трех переходных температур при граничной смазке.

Обобщенная зависимость коэффициента трения от температуры при граничной смазке (рисунок 17) характеризуется тремя переходными температурами, каждая из которых соответствует реализации процесса граничной смазки на определенном этапе, а именно:

– двумя критическими температурами $T_{кр1}$ и $T_{кр2}$, при достижении каждой из которых происходит переход к резкому повышению трения и интенсивному адгезионному изнашиванию;

– температурой химической модификации $T_{хм}$, при которой обеспечивается эффективное разделение трущихся поверхностей образующимся модифицированным слоем.

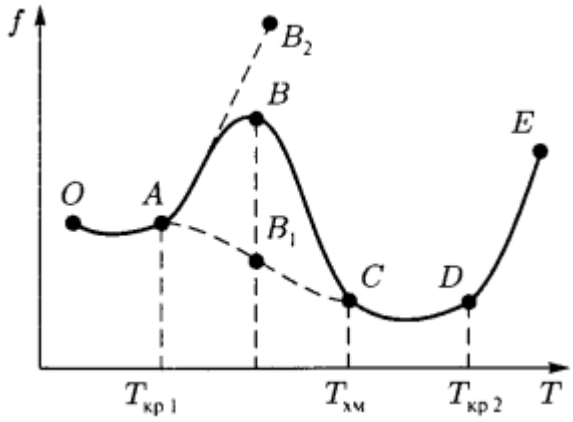


Рисунок 17 – Обобщённая зависимость коэффициента трения от температуры в трибологическом контакте, в режиме граничной смазки

Реализация критических температур (как $T_{кр1}$, так и $T_{кр2}$) связана с разрушением граничного слоя, (соответственно, адсорбционного и химически модифицированного), разделяющего трущиеся тела, и адгезии этих тел на участке металлического контакта. Реализация температуры химической модификации связана с образованием этого слоя. Математические модели процессов реализации этих температур учитывают характеристики смазочных материалов (прежде всего – концентрацию активного компонента), контактирующих тел (твердость), характеристики взаимодействия смазочных материалов и трущихся тел (теплота адсорбции, энергия активации процесса химического модифицирования, порядки процессов образования и разрушения смазочных слоев) и характеристики режима процесса (скорость относительного перемещения, удельная нагрузка) [8].

Также стоит, отметить успешно развиваемую в последние десятилетия Э. Л. Аэро, Н.М. Бессоновым и А. Н. Булыгиным «гидродинамическую теорию граничного трения». В отличие от классической гидродинамической теории, в которой не учитывается отличие свойств среды (и прежде всего – вязкости) в граничном слое от свойств этой жидкости в объеме, а также не учитывается разница между внутренним трением жидкости и трением ее о твердую стенку. Авторы указанной выше теории, предложили «моментную теорию», которая учитывает ориентационные явления в жидкости и которая, по их мнению, является основой теории граничной смазки.

В соответствии с этой теорией, каждая частица характеризуется не только поступательной скоростью, как в классической гидродинамике, но и независимой скоростью вращения. Свое название эта теория получила вследствие того, что в ней наряду с уравнением баланса импульса появляется уравнение баланса моментов, что в конечном счете позволяет получить уравнения поступательно-вращательного движения моментной жидкости.

Моментная теория позволяет описать ряд явлений, имеющих место при граничной смазке, и дает возможность прогнозировать оптимальные режимы работы ряда узлов трения.

Таким образом, в рассматриваемый период накоплен большой экспериментальный материал о процессе трения при граничной смазке, а с другой стороны, предложен ряд новых моделей процесса, позволяющих его описать или, по меньшей мере, способствующих лучшему его пониманию. Во всяком случае, прямыми экспериментами на микро- и наноуровне подтверждено существование граничных слоев, имеющих особое строение и свойства. Успехи в исследовании процесса граничной смазки уже в настоящее время обеспечили значительный прогресс техники, в частности, в наиболее современных ее областях.

2.2.5 Итоги развития представлений о граничной смазке в XX веке

Прошло более девяноста лет со дня выхода в свет первой статьи Харди и Даблдей, в которой впервые было введено представление о граничной смазке и о граничном состоянии вещества. Прошло девяносто лет с того дня, когда ученым и инженерам, особенно после дальнейших исследований самого Харди и его последователей (Дерягина, Ахматова, Боудена, Тейбора, других ученых) на десятки лет стал, казалось бы, ясен механизм трения в условиях граничного трения. То есть в условиях, когда трущиеся поверхности разделены тонким слоем продукта взаимодействия активных компонентов смазочного материала с поверхностями трения, что для исследуемых этими авторами условий трибологического контакта означало смазку адсорбционным слоем.

Анализируя историю развития представлений о граничной смазке, можно смело утверждать, что за эти годы накоплен огромный фактический материал, который непрерывно пополняется и уточняется по мере совершенствования методов исследования. Выдвинуты модели трибологического процесса в режиме граничной смазки. Однако весь этот опыт позволяет лишь уточнить и приближенно (и при этом качественно!) описать данный режим. Тем не менее, принципиально новых представлений о механизме смазки адсорбционным слоем по сравнению с работами Харди и других великих исследователей первой половины и середины XX в. на данных момент нет.

Что же мы знаем о граничной смазке сегодня? Установлено, что граничный слой состоит из ориентированных слоев адсорбированных молекул смазочного материала, причем ориентация этих молекул – процесс кинетический (Харди, Ахматов, Дерягин); что этот слой может быть уподоблен квазикристаллическому и квазитвердому телу, обладающему истинной упругостью (Ахматов); что этот слой имеет аномальную, отличную от объемной вязкость (Дерягин); что он разрушается в результате дезориентации и десорбции молекул смазочной среды (или плавления образовавшегося мыла) при некоторой критической температуре (Тейбор, Матвеевский, Камерон). Экспериментами на индивидуальных поверхностях показано слоистое строение граничной пленки, причем наиболее прочно связан с поверхностью первый из этих слоев, мономолекулярный, обращенный активной группой к твердому телу, а каждый последующий слой представляет собой бимолекулярный «листок» углеводородными радикалами наружу. При этом толщина граничного слоя простирается далее радиуса действия остаточного поля твердой фазы.

Относительно немногие работы позволяют непосредственно сулить о строении граничных слоев в трибологическом контакте: Фивег и Клюге показали наличие ориентации молекул смазочной среды в граничном слое. В последние десятилетия XX в. исследователи, пользуясь созданной к этому времени весьма совершенной испытательной аппаратурой (surfaceforceapparatus, atomicfrictionmicroscope), подтвердили многие представления о строении граничного слоя, ранее выдвинутые предположительно на основании анализа трибологического процесса в режиме граничной смазки (по выражению Спайкса, «полученные методом черного ящика»). Прежде всего, это относится к работам Израелашвили и др., в которых в 80-90 гг. применительно к некоторым простым средам прямыми экспериментами в контакте молекулярно гладких твердых тел при граничной смазке установлено слоистое строение граничных слоев адсорбционного происхождения. Если эти данные подтвердятся применительно к подвижному фрикционному контакту для различных сред, это будет триумфом идей Харди-Дерягина-Ахматова.

Возможность подобных подтверждений будет определяться прогрессом лабораторного оборудования. Альтернативой представлениям Харди и его последователей может явиться теория Васильева, которая не постулирует слоистого строения граничного слоя, а контакт рассматривается как микропора с подвижной стенкой.

Значительный прогресс в понимании природы граничной смазки наблюдается с тех пор, когда исследователи обратили внимание на роль трибохимическихпревращений в трибологических процессах при граничной смазке. Уже ранние работы Бюхе, Лангмюра, Дерягина и других исследователей показали, что в процессе трения при граничной смазке происходит деградация активных компонентов смазочных материалов, потеря ими способности осуществлять смазочное действие.

В основном трудами отечественных ученых было установлено, что в определенных условиях трибохимические превращения приводят к образованию граничных слоев, обеспечивающих значительное снижение трения в сопряжении, расширению области его работоспособности и уменьшению износа трущихся тел.

В первую очередь это трибоокисление, которое приводит с одной стороны к образованию оксидов на поверхностях трения – обеспечивающих экранирование свежеобнажаемых при трении и предельно активированных поверхностей металла. А с другой стороны, к образованию продуктов окисления смазочного материала (прежде всего – окисления низкомолекулярных углеводородов). Эти продукты окисления обладают значительной смазочной способностью и поэтому расширяют пределы работоспособности смазанных трибосопряжений (Виноградов, Подольский).

Это трибополимеризация, в результате которой, предварительно введенные в смазочный материал определенные мономеры и олигомеры образуют на поверхностях трения тончайший слой полимера. Этот слой способствует предотвращению металлического контакта трущихся тел, обеспечивая снижение трения. А изнашивание трущихся деталей заменяет изнашиванием постоянно возобновляемых полимерных пленок (Ю.С.Заславский, Р.Н. Заславский).

Также это реализация явления избирательного переноса для трибосопряжений типа «сталь – латунь» и «сталь – бронза» в некоторых средах при определенных условиях (Гаркунов, Крагельский). При котором в результате избирательного растворения элементов, легирующих сплавы на основе меди, обе поверхности трения оказываются покрытыми тончайшим слоем чистой меди, изобилующим вакансиями и легко деформируемым, на котором хемосорбируются ПАВ, образовавшиеся в процессе трения в результате комплекса взаимосвязанных трибохимических и механохимических процессов.

Учет перечисленных явлений в будущем позволит направленно воздействовать на смазочные материалы, обеспечивая оптимизацию их характеристик в конкретных условиях функционирования. Важно отметить, что трибохимические процессы обеспечивают один из важнейших каналов реализации процесса самоорганизации при граничной смазке (Костецкий, Бершадский, Буше, Поляков).

В свою очередь достигнуты значительные успехи в выявлении механизма трибохимического действия высокоэффективных химически активных смазочных сред (Сакураи, Санин). А также в разработке кинетических моделей этого действия (Бершадский, Лашхи, Подольский, Буяновский). Стало известно многое о составе и о строении образуемых в трибологическом процессе модифицированных слоев и сделаны серьезные шаги в разработке научных методов создания смазочных сред, обеспечивающих трибосопряжению заданные трибологические характеристики.

Судя по всему, дальнейшее проникновение в механизм смазочного действия химически активных сред будет определяться совершенствованием инструментальных методов исследования тончайших модифицированных слоев, образующихся при трении. Наиболее перспективны методы, позволяющие осуществлять это непосредственно в течение трибологического процесса.

Впрочем, прогноз исследований в этом направлении напрямую связан с прогнозом развития направлений создания новых химически активных присадок. Подводя итоги, следует сказать, что к настоящему времени накоплен большой

экспериментальный материал о субмикромеханике процесса трения при граничной смазке. Оценивая успехи трибологии в этом направлении, стимулируемые бурным развитием экспериментальной техники за последние десятилетия, можно утверждать в 1997 г. что в один прекрасный день мы, наконец, будем представлять ясно, что такое граничная смазка.

Однако даже сегодня мы не рискнем точно предсказать, когда этот «прекрасный день» настанет. И, разумеется, тем более, трудно определенно назвать день, начиная с которого успехи в изучении и описании процесса граничной смазки позволят довести теорию рассматриваемою процесса до уровня инженерных расчетов, подобно теории гидродинамической смазки. Ясно только, что переход на стадию инженерных расчетов станет возможным лишь после достижения более ясного понимания природы рассматриваемого процесса, и в частности, после уточнения данных о свойствах и строении граничных слоев и механизме их образования и разрушения.

3 ТИПЫ ПРИСАДОК К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ, УЛУЧШАЮЩИХ УСЛОВИЯ ТРЕНИЯ

Смазывающая способность является важнейшим эксплуатационным свойством, которое характеризует смазочные материалы и смазочные масла. Чем выше смазывающая способность масел и поверхностная активность, тем лучше оно способно создавать на поверхности контактирующих тел прочную пленку, которая способна уменьшить или вовсе предотвратить их износ при рабочих нагрузках и скоростях.

Теория гидродинамической смазки, оказала существенное влияние в эволюции смазочной техники. На основании этой теории возникла возможность теоретически объяснить и сформулировать требования к качеству смазочных масел. Так впервые обратили внимание на смазывающую способность масел.

Согласно гидродинамической теории, жидкостная смазка определяется вязкостью масла, с ней связано смазывающее действие. Однако в режиме граничной смазки, вязкость уже не имеет какого-либо решающего значения, а смазывающее действие определяется в основном поверхностно-активными свойствами масла. Смазывающая способность граничных пленок оценивается с помощью маслянистости, то есть способности смазки обеспечивать снижение коэффициента трения.

В режиме граничного трения, активными центрами твердой поверхности на металле адсорбируются поверхностно-активные компоненты масел, в результате образуется граничная пленка, она разграничивает контактирующие поверхности и позволяет предотвратить их непосредственный контакт. Однако действие таких адсорбированных пленок реализуется только при относительно низких температурах и нагрузках, в таких режимах эти пленки могут эффективно защищать поверхности металла от износа. Но в то же время, если нагрузки и температуры превышают эти значения, то пленки разрушаются (десорбируются), и в результате смазочная способность масла практически теряется.

Чтобы обеспечить защиту контактирующих поверхностей от износа и заеданий при высоких удельных нагрузках и повышенных температурах, на поверхностях трущихся тел необходимо создавать прочные граничные пленки, за счет использования разного рода химических активных соединений –**присадок**. В отличии от поверхностно-активных компонентов масел, которые только адсорбируются на поверхности металла, не вступая с ним в химическую реакцию, присадки, добавляющиеся в масла, взаимодействуют с поверхностями трения химически, образуя при этом более прочные граничные пленки.

По характеру действия присадок, применяемых с целью повышения и улучшения смазочных свойств масел они подразделяются на: антифрикционные, противоизносные и противозадирные [13].

3.1 Антифрикционные присадки

Действие этих присадок основано на повышение маслянистости, за счет чего они позволяют снизить и стабилизировать коэффициент трения. В роли антифрикционных присадок обычно выступают вещества, молекулы которых адсорбируются на поверхности металла и предотвращают непосредственное контактирование поверхностей трения, то есть вещества отличающиеся поверхностной активностью. Адсорбированные пленки поверхностно-активных веществ могу удерживаться на поверхностях при температурах не выше 140ºС. К таким веществам относятся: природные жиры, жирные кислоты, их эфиры и соли, натуральные и синтетические жиры и др.

3.2 Противоизносные присадки

Действие таких присадок позволяет снизить или даже предотвратить интенсивный износ взаимодействующих поверхностей в режиме нормального трения без заедания. Многие поверхностно-активные вещества могут использоваться в качестве противоизносных присадок, но только при условии умеренных нагрузок и температур. Тем не менее в процессе трения, контактирующие поверхности сильно нагреваются и способность смазочного

материала адсорбироваться на поверхностях трения заметно снижается. В связи с этим в роли противоизносных присадок целесообразно применять только ПАВ, способные при повышенных температурах взаимодействовать с поверхностью металла и образовывать пленки, предупреждающие сваривание поверхностей. В качестве противоизносных присадок применяют производные кислот фосфора: фосфористой, фосфоновой и фосфорных кислот, их эфиры, а также некоторые соединения, содержащие неактивную серу.

3.2.1 Серусодержащие присадки

Присадки на основе серы эффективны в качестве противоизносных присадок, также в большинстве случаев им присущи и противокоррозионные свойства. Эффективность таких присадок, в качестве присадок которые улучшают смазывающие свойства масел, обусловлена их строением. Так вещества, которые содержат прочносвязанную серу, образуют комплексные соединения с металлами, исключающие интенсивный износ. Вещества, содержащие слабосвязанную серу, в условиях повышенных температур в зоне контакта трущихся поверхностей, образуют химические связи с поверхностью трения, тем самым обеспечивая противозадирные свойства смазочных масел.

В качестве веществ, широко используемых в роли противоизносных и противозадирных присадок, можно отнести ксантогенаты, три-тиокарбонаты, сульфиды и дисульфиды, высокомолекулярные соединения содержащие серу и др.

Так например известны эффективные противозадирные присадки ЛЗ-6/9, ЛЗ-23к, ЛЗ-24, ЛЗ-25к, ЛЗ-28, полученные на базе различных ксантогенатов. При добавлении 5% присадки ЛЗ-23к (содержащей 40,25 серы) к маслу, она повышает обобщенный показатель износа (ОПИ) масла ТС-14,5 с 23 до 72.

В качестве высокоэффективной противозадирной присадки к трансмиссионным маслам применяется присадка ОТП (осерненныйтетрамер пропилена). При добавлении 5% такой присадки к маслам, заметно улучшаются их эксплуатационные качества и уменьшается расход [14].

3.2.2 Серу- и хлорсодержащие присадки

Органические соединения, имеющие в своем составе серу и хлор, являются самыми распространенными присадками, ввиду своей эффективности. Эффективность обусловлена механизмом действия подобных присадок, так в условиях высоких температур, серу- и хлорсодержащие присадки вступают в реакцию с металлом, образуя на поверхностях контактирующих деталей гибридную пленку, одна из которых состоит из хлоридов железа, а вторая из сульфидов. Пленка образованная сульфидом железа помогает избежать заедания, а хлоридная пленка служит для уменьшения износа и трения. Для использования этих веществ в качестве присадок были исследованы вещества, полученные при взаимодействии галогенированных углеводородов с органическими сульфидами и ксантогенатами, хлоридов серы с ненасыщенными органическими соединениями, хлорированием серусодержащих, а также осернением хлорсодержащих органических соединений.

3.2.3 Фосфор и серусодержащие присадки

В литературе, как отечественной, так и иностранной существует довольно много информации о применении производных дитиофосфорных кислот (ДТФ), как присадок к смазочным маслам. Особенно популярны металлические соли, а также эфиры ДТФ кислот. Первые из них нашли широкое применение в моторных и трансмиссионных маслах, характеризуются хорошими антиокислительными, противокоррозионными, противоизносными, в ряде случаев противозадирными, противопиттинговыми свойствами. Основной компонент таких присадок – диалкилл(арил) дитиофосфаты цинка.

Диалкилдитиофосфаты цинка и бария, наиболее эффективные присадки среди этого класса, которые существенно повышают критическую нагрузку, такие соединения получают на основе низкомолекулярных спиртов – присадки ДФ-11 и ДФ-12. Способность фосфорсодержащих присадок уменьшать износ трущихся поверхностей в режиме умеренных нагрузок, повышать нагрузку заедания и

обеспечивать маленькую шероховатость взаимодействующих поверхностей, является их определяющим свойством. Противоизносные свойства подобных присадок обеспечиваются за счет наличия в их составе атома фосфора. В то время как наличие серы не сказывается на снижении износа в режиме умеренных нагрузок, она достаточно эффективно проявляет себя в условиях повышенных нагрузок и способствует предотвращению заедания.

На противоизносные свойства дитиофосфатов определенное влияние оказывает также длина и строение углеводородных радикалов. Однако среди исследователей не существует пока единого мнения о характере их влияния. Так часть из них считает, что критическая нагрузка имеет обратную зависимость от длины углеводородного радикала, другие не замечают влияния алкильной группы на характер трения и износа.

Однако применение присадок на основе ДТФ кислот ограничено ввиду образования ими в условиях работы прочного, плотного слоя золы, который существенно ухудшает работу деталей ЦПГ. Решение подобной проблемы пытаются найти с помощью получения малозольных и беззольных присадок.

3.2.4 Фосфор и хлорсодержащие присадки

Для снижения износа при трении в режимах повышенных нагрузок, нашли применение органические соединения, имеющие в составе хлор и фосфор. Эти элементы характеризуются повышенной активностью по отношению к металлам, тем не менее при одновременно присутствии указанных компонентов в смазочном материале, главную роль играет хлор, а не фосфор. Среди таких присадок, наиболее эффективными являются вещества, которые содержат трихлорметильную группу.

Наиболее популярна противоизносная присадка ХлорЭф-40, добавление этой присадки в количестве двух процентов, повышает обобщенный показатель износа масла (ОПИ) ТС-14,5 с 25 до 75.

3.2.5 Серу, фосфор и хлорсодержащие присадки

Соединения, содержащие в своем составе 3 элемента, как например: сера, хлор и фосфор, тоже нашли свое применение в качестве противоизносных присадок. Такие присадки показывают неплохие результаты как в режимах повышенных нагрузок, так и при высоких скоростях и низких нагрузках. Наиболее популярны такие присадки в агрегатах трансмиссии и других энергопередающих механизмах.

3.2.6 Молибденсодержащие присадки

Твердые высокодисперсные добавки на основе молибдена и графита, получили наибольшее распространение в качестве противоизносных присадок к смазочным маслам в течении последних годов. Данный тип присадок отличается от других тем, что при введении таких присадок в состав масла, эти добавки не растворяются (образуя коллоидные растворы), а образуют в них твердую фазу.

Широко известен среди таких добавок – дисульфид молибдена. Его эффективность обусловлена высокой смазочной способностью, хорошей адгезией к металлическим поверхностям и высокой эффективностью при малых концентрациях. Он используется в современных дизельных маслах, для смазки коренных подшипников коленвала, цилиндров двигателя и т.д, для смазки трансмиссий автомобиля и улучшения приработки механизмов и деталей.

Основным преимуществом сульфида молибдена перед остальными противоизносными присадками, является температурный режим работы этой присадки, так его разложение начинается при более высоких температурах (150-200^{o}C).

Сульфид молибдена в целом хорошо влияет на качество работы двигателя, так при добавлении этой присадки в количестве 1-3% в базовое масло, наблюдается повышение мощности на всех режимах эксплуатации, уменьшение лакообразования и осадкообразования масла. В это же время, расход масла падает

на 30%, а топлива на 4-7%, существенно увеличивается срок службы поршневых ДВС [17].

3.3 Противозадирные присадки

Принцип действия таких присадок основан на образовании ими пленок, которые значительно поднимают критическую нагрузку, способствуют уменьшению интенсивного износа, а также резко снижают риск заедания сопряжения в режиме экстремальных нагрузок и температур. При повышенных температурах, продукты противозадирных присадок разлагаются и вступают в химическую реакцию с металлом, вследствие чего происходит образование соединения с металлом, которые имеют значительно меньшее сопротивление срезу и существенно ниже температуру плавления, чем чистые металлы, в этом заключается принцип их действия. Благодаря образованию подобных соединений исключается заедание и схватывание контактирующих поверхностей.

В качестве противозадирных присадок эффективны органические производные серы, хлора, соединения содержащие фосфор и галогены. Наиболее часто используются присадки, содержащие комбинацию этих элементов, ввиду малой эффективности присадок на основе одного активного элемента. Например самыми эффективными противозадирными присадками, применяемыми в трансмиссионных маслах являются те, что содержат серу и фосфор, хлор и фосфор, серу и хлор, а также все эти элементы одновременно.

Также стоит сказать, что такое разделение присадок весьма условно, так как противоизносные и противозадирные присадки одновременно обладают и антифрикционными свойствами.

3.3.1 Хлорсодержащие присадки

Наибольшую эффективность такие присадки проявляют в условиях задира, именно поэтому они нашли широкое применение как противозадирные присадки к маслам. Механизм действия присадок содержащих в своем составе хлор,

основан на образовании ими на контактирующих поверхностях металла пленок хлоридов железа, непосредственно которые и снижают задир.

Строение таких присадок, степень хлорирования и активность атомов хлора в соединении влияют в конечном счете на их результативность. По степени активности в порядке убывания располагаются: хлорсодержащие алифатические соединения, соединения с хлором в цепи, мало активны соединения с хлором в цикле.

Наиболее известные присадки, содержащие в своем составе хлор это хлорированные насыщенные алифатические и ароматические углеводороды, гексахлорэтан, гексахлорциклопентадиен и др. Заграничные присадки на основе хлора производятся с содержанием хлора 30-50%. Наша промышленность производит хлорированный парафин с 39-42% содержанием хлора.

3.3.2 Серу, фосфор и хлорсодержащие присадки

Соединения, содержащие в своем составе серу, хлор и фосфор, также нашли свое применение и в качестве противозадирных присадок. Так достаточно эффективными противозадирными присадками являются эфиры дитиофосфорных кислот, имеющие в своем составе хлор. Например продукты взаимодействия дитиофосфата натрия с полигалогенными соединениями. В качестве примера таких присадок, можно привести ЛЗ-309 и ЛЗ-309/2, при введении которых в количестве 4-6% в масла для гипоидных передач, им сообщаются высокие противозадирные свойства.

4 МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ПРИСАДОК, СНИЖАЮЩИХ ИЗНОС

Присадки и смазочные материалы оказывают существенное влияние на предельное состояние машин и механизмов. Это влияние связано не только с состоянием и качественными характеристиками контактирующих поверхностей, но и с физико-химическими свойствами поверхностных слоев трущихся деталей, при взаимодействии в условиях действия активной смазки (сорбцией, образованием пленок на металлических поверхностях, химическим модифицированием этих поверхностей).

В связи с этим присадки, которые служат для улучшения параметров работы контактирующих пар трения в режимах повышенных нагрузок и температур, подразделяют на две группы: 1) к первой группе относятся присадки, возникающие в результате адсорбции или хемосорбции на поверхностях металла - антифрикционные; 2) ко второй группе относятся присадки, которые вступают в химическую реакцию с металлом и образуют с ним химические соединения (неорганические производные хлора, серы, фосфора и др.), которые играют роль квазитвердых или квазисмазочных слоев – противоизносные и противозадирные присадки [18].

4.1 Антифрикционные присадки

Действие антифрикционных присадок основано на повышении ими маслянистости, благодаря чему достигается снижения коэффициента трения. В связи с этим используют масла, поверхностно-активные добавки которых имеют выгодную конфигурацию молекулы, тобишь необходимо наличие длинной неразветвленной углеродной цепи с активной концевой группой (-COOH), подобной структурой могут отличиться только высшие жирные кислоты и их эфиры.

Значительная часть смазок, относящихся к поверхностно-активным веществам, теряет свою эффективность при температуре порядка 200°C. Вероятнее всего это объясняется тем, что при значениях температуры выше

указанной, механизм смазывающего действия присадок связан не с физической адсорбцией, а с хемосорбцией. Процесс хемосорбции характеризуется образованием химических связей между молекулами присадки и металлом, однако атомы металла не покидают свою кристаллическую решетку, т.е. происходит насыщение свободных связей поверхностных атомов металла без нарушения их связей с кристаллической решеткой. Хемосорбция протекает тогда, когда для реакции требуется значительная энергия активации.

Механизм действия антифрикционных присадок по Боудену и Тейбору заключается в том, что на поверхностях металла протекает процесс хемосорбции жирных кислот, растворенных в масле, которые образуют пленку мыл. Также существует и ряд других органических соединений (например спирты, сложные эфиры и др), которые адсорбируясь на металлической поверхности образуют защитные пленки. Однако, защитные пленки, которые создают антифрикционные присадки, эффективно защищают сопряжения от интенсивного износа и повышенного трения только в условиях средних нагрузок и температур. Также стоит отметить, введение в масло некоторых антифрикционных присадок (различные жирные кислоты) снижает усталостную долговечность металлов.

4.2 Противоизносные присадки

Важнейшее свойство противоизносных присадок заключается в способности создавать на поверхностях трения прочные граничные пленки, подобные пленки образуются за счет протекания химической реакции присадок с металлом. Особенно важная роль таким пленкам отводится в режимах тяжелых нагрузок. При тяжелых режимах граничного трения, осуществляется обнажение атомов кристаллической решетки железа, эти атомы обладают значительной потенциальной энергией, именно этим объясняется высокая хемосорбционная способность поверхности железа.

Отличительной особенностью химической реакции от процесса хемосорбции является то, что в процессе протекания химической реакции создается новая структура, тобишь атомы металла покидают свою

кристаллическую решетку, чтобы образовать новую. Разница между двумя указанными процессами состоит в том что пленки образованные в результате хемосорбции являются моноатомными или мономолекулярными. В то время как пленки образованные за счет процесса химической реакции обладают неограниченной толщиной. Наиболее стабильны и долговечны поверхностные пленки, образованные в процессе химической реакции, затем идут пленки, образованные в результате хемосорбции, а самыми слабыми с точки зрения этой позиции являются физически адсорбированные пленки.

Механизм действия противоизносных присадок можно разделить на несколько стадий: во-первых на поверхностях металла происходит образование граничных пленок; во-вторых при температуре, близкой к комнатной, протекает процесс хемосорбции молекул присадки на поверхности трения; на последнем этапе активные элементы присадки химически взаимодействуют с поверхностью металла, этот процесс протекает при более высокой температуре.

В процессе трения, в зоне контакта происходит значительный нагрев сопряжений, за счет этой теплоты молекула противоизносной присадки разлагается, образуя продукты разложения. Эти продукты вступают в реакцию с поверхностью трения, образуя при этом пленки новых соединений, (происходит процесс хемосорбции). При значительном повышении температуры, эти хеморбированные пленки взаимодействуют с металлом.

Несмотря на огромное количество исследований механизма действия противоизносных присадок и влияния их химического строения на противокоррозионные свойства, среди исследователей до сих пор не существует единого мнения ни на способы исследования процессов происходящих на поверхностях металла, ни на сам механизм действия этих присадок. Поэтому взгляды на механизм действия этих присадок могут быть столь противоречивыми. Однако есть несколько положений, относительно которых исследователи пришли к согласию: так например установлено, что эффективность этих присадок зависит от их строения, в первую очередь от «активности» элементов, входящих в их состав (сера, хлор, фосфор) [20].

4.2.1 Серусодержащие присадки

Ряд исследователей считают, что в основе противоизносного действия таких присадок лежит высвобождение элементарной серы, при местных повышениях температуры в области граничного трения и химическая реакция серы с металлом поверхности трения.

Также было установлено что серусодержащие кислородные соединения эффективнее, чем те же соединения, не имеющие в своем составе кислород. В таких соединениях как сульфоны и сульфоксиды, атомы серы являются донорами электронов, благодаря которым на поверхности металла образуются стойкие граничные слои, причем сульфоксиды более эффективны в снижении износа.

По Форбсу, механизм действия таких присадок заключается в следующем: в первую очередь происходит процесс адсорбции молекул присадок на металлической поверхности, далее следует разрыв связей S-S, в результате которого образуется меркаптидRSMe, именно он и обеспечивает необходимое противоизносное действие. С последующим увеличением температуры в зоне трения, происходит образование неорганического слоя, который содержит на поверхности серу, это и объясняет противозадирное действие.

Однако были проведены исследования, в ходе которых изучали продукты взаимодействия органических соединений серы с порошком железа в интервале температур 50-170°C, удалось получить данные, позволяющие соотнести противозадирный эффект таких соединений с их способностью образовывать в ходе реакции вещества, обеспечивающие сульфидирование стальной поверхности, что противоречило гипотезе Форбса. В отличии от теории Форбса, эффективность этих соединений связывали прежде всего с физическими свойствами пленок, адсорбированных на поверхности металла, а также скоростью их образования, а не легкостью разрыва связей S-S, как утверждал Форбс.

Также было установлено, что соединения имеющие в своем составе активную серу не только химически взаимодействуют с поверхностью трения, но также проявляют и поверхностно-активные свойства. Благодаря им облегчается

пластическое течение поверхностных слоев, а вввиду химического взаимодействия с ними, образование защитных пленок сульфида заметно ускоряется. Эти пленки помогают предотвратить и заедание способствуют образованию оптимальной микрогеометрии поверхностей [21].

4.2.2 Фосфорсодержащие присадки

Присадки на основе фосфора эффективны при средних режима трения и умеренных температурах, в таком режиме они достаточно хорошо снижают износ поверхностей трения. Существует множество различных мнений на счет механизма действия фосфорсодержащих присадок.

Наиболее распространена из них фосфидная теория Бика. Согласно этой теории под воздействием высоких местных температур трения, на поверхности металла происходит процесс образования легкоплавкой эвтектической смеси фосфидов металла, эта смесь и определяет «химическую полировку» поверхности. Это предположение подтвердилось в ходе опытов, в которых исследовали термическое разложение триалкилфосфитов при температуре 250-260°С. В первую очередь происходит процесс адсорбции этих соединений на поверхности трения, однако под воздействием повышенных нагрузок и контактных температур, они распадаются на более простые соединения, такие как фосфорная кислота, непредельные углеводороды и фосфин, последний из которых затем вступает в реакцию с поверхностью металла, образуя на ней пленку фосфидов металлов.

Однако существует и другие мнения, так например некоторые исследователи считают, что активность трифенисфосфатов в процессе граничного трения определяется образованием на поверхностях трения кислых органических фосфатов и фосфатов металлов. В первую очередь происходит процесс адсорбции этого соединения на поверхности трения, а затем происходит процесс его гидролитического разложения с образованием кислых органических фосфатов.

Подобно сернистым, эффективность фосфорсодержащих присадок зависит от природы и строения применяемых соединений. Так например среди эфиров

фосфорных кислот, фосфиты более эффективны чем фосфаты, а алкиловые эфиры с длинной алифатической цепью, дают лучшие результаты, чем ариловые эфиры.

Также было установлено, что эффективность фосфорсодержащих присадок зависит не от химической активности фосфорной кислоты, а от пространственного строения углеводородных радикалов: то есть чем более длинный и разветвленный углеводородный радикал, тем более затруднена сорбция присадки на металле. Противоизносную же пленку на поверхности трения образует фосфат-анион, который, взаимодействуя с металлом, образует на нем пленку фосфата металла [23].

4.3 Противозадирные присадки

Механизм действия противозадирных присадок заключается в их способности образовывать квазисмазочные слои. Подобные слои образуются при определенных условиях (давление, температура) и представляют собой продукты взаимодействия различных реакционноспособных функциональных групп в молекуле присадок с поверхностью металла. В большинстве случаев, эффективность действия таких присадок обусловлена образованием сульфидов и хлоридов, металлом и различных соединений фосфора с металлом.

4.3.1 Серусодержащие присадки

В условиях комнатной температуры сера слабо реагирует с большинством металлом. Серусодержащие присадки эффективны только при достаточно высоких температурах, так как образование сульфидов происходит при температуре порядка 200°С, а результативность их действия повышается с увеличением температуры взаимодействующих поверхностей.

Серусодержащие присадки отличаются сильным противозадирным эффектом, который объясняется образованием на поверхности трения пленок сульфидов, отличающихся высокой прочностью и твердостью. Наиболее активны по отношению к металлам сероводород, свободная сера, меркаптаны,

диалкилсульфиды и ксантогеновая кислота: эти продукты вступают в реакцию с металлом, образуя сульфиды металлов.

Благодаря использованию современных физических методов (рентгеновская дифрактометрия и микроанализ, оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия), при исследовании серусодержащих присадок, были сделаны несколько важных выводов, касательно механизма действия присадок:

1) наиболее эффективные сильные противозадирные присадки (дибензил и ди-трет-бутилдисульфид), при разложении под действием температуры образуют толстые пленки сульфида железа в виде мягкого рыхлого слоя, этот слой предупреждает обширные изменения металла и обеспечивает противозадирный эффект; однако слабые присадки (такие как дифенилдисульфид) не образуют пленок сульфидных пленок, возможно это связано с низкой реакционной способностью;

2) обнаружены различия в механизме действия присадок как противоизносных и противозадирных. Так противоизносное действие серусодержащих присадок связано с образованием ими гладких участков, которые покрыты сплошной пленкой. Однако противозадирное действие связано с образованием толстого слоя сульфида железа и незначительного количества оксидов Fe_2O_3 и Fe_3O_4;

3) также была установлена обратная зависимость эффективности действия серусодержащих присадок от их термической стабильности: то есть чем ниже термическая стабильность присадок, тем выше их противозадирные свойства.

4.3.2 Хлорсодержащие присадки

Механизм действия таких присадок связан с образованием ими в процессе трения пленок хлорида железа, за счет взаимодействия хлорсодержащих соединений с поверхностью металла или хлорида водорода, который выделяется за счет разложения этих присадок в процессе трения.

Низкий коэффициент трения обеспечивается за счет низкой температуры плавления хлоридных пленок (так пленки хлоридов железа плавятся при температурах порядка 700°С), их низкого сопротивления срезу и пластинчатой структуры. В отличии от сульфидных пленок, стабильных до температуры порядка 200°С, хлоридные пленки могу сохранятся до температуры в 300°С, снижая трение в большей степени. Однако самые активные присадки на основе серы более эффективны как противозадирные присадки, чем те же присадки на основе хлора.

Хлорсодержащие присадки достаточно чувствительны к наличию влаги, так как в присутствии воды хлориды железа гидрализуются, что ведет к снижению смазывающих свойств и увеличению коррозии за счет образования соляной кислоты. Хлорсодержащие имеют малую эффективность в режиме заедания и слабо влияют на снижение трения.

4.3.3 Серу- и хлорсодержащие присадки

В ходе экспериментов по совмещении компонентов присадок, была получена достаточна эффективная комбинация серы и хлора, так при добавлении небольшой части серусодержащей присадки к хлорсодержащей, она оказывает каталитическое действие – повышает противозадирную эффективность хлорсодержащего компонента. Например смесь хлорсодержащего и серусодержащего вещества в соотношении 70% к 30%, характеризуется достаточно эффективными противозадирными свойствами. Причем эта эффективность имеет слабую зависимость от процентного содержания серы в серусодержащем компоненте присадки, однако от структуры и количества хлора в хлорсодержащем компоненте зависит достаточно сильно.

Эффективность такой комбинации элементов удалось объяснить при анализе результатов коррозионных испытаний смеси серу- и хлорсодержащих присадок, в режиме повышенных рабочих температур. Так их взаимодополняющий эффект состоит в замедлении образования сульфида железа и ускорения образования хлорида железа. Хлорид железа характеризуется

большей пластичностью, чем сульфид, следовательно, ввиду более легкой истираемости обеспечивает больший противозадирный эффект.

4.3.4 Фосфор- и хлорсодержащие присадки

При изучении механизма действия органических соединений содержащих фосфор, фосфор и хлор было установлено, что металлы и их оксиды ускоряют процесс разложения этих веществ, а продукты их разложения взаимодействуют затем с металлом, образуя пленки фосфидов и хлоридов металла. При исследовании характера химического модифицирования поверхности трения с помощью дибутилового эфира трихлорметилфосфоновой кислоты $CCl_3PO(OC_4H_9)_2$, его подвергли термическому разложению, а затем проанализировали продукты разложения и был установлен механизм действия. Он заключается в том, что в первую очередь происходит процесс хемосорбции присадки и продуктов ее разложения на металлической поверхности, в результате чего образуются сложные хлорорганические полимерные соединения, которые защищают поверхность металла. А в режиме повышенных нагрузок и температур, на поверхностях трения образуется хлорид железа, который улучшает режим трения и снижает износ. Органические соединения, имеющие в своем составе хлор и фосфор, разлагаются только при повышенных температурах, в местах контакта трущихся поверхностей, и не разлагаются в объеме масла, так как это привело бы к коррозии металлических деталей узлов трения и всего механизма [24].

4.3.5 Серу- и фосфорсодержащие присадки

Эти присадки эффективны в широком диапазоне режимов работы. Так в режиме умеренных нагрузок и температур, защитное действие этих присадок на поверхность металла обусловлено влиянием фосфора, причем фосфор в органических фосфитах отличается значительно более высокой реакционной способностью. Вследствие этого на стали сначала образуется пленка фосфида железа, а пленка сульфида железа образуется лишь при очень высокой

температуре. В результате опытов, которые проводились на медных и стальных дисках, было выявлено, что связывание фосфора на меди и стали происходит примерно с одинаковой интенсивностью, однако с повышением температуры связывание серы на меди ускоряется сильнее, чем на стали. При всех температурах количества серы на медных дисках больше, чем количество фосфора, кроме того, в случае меди оно значительно выше, чем в случае стали. Последним обстоятельством доказывается существенное влияние природы металла на механизм действия присадки.

Исследование механизма действия дитиофосфатов как присадок, используемых в режиме повышенных давлений, ведутся до сих пор. Под действием температуры и давления, происходит процесс разложения дитиофосфатов, в результате которого образуются химические пленки, содержащие металл, фосфор и серу. Скорость образования этих пленок и их прочность зависят от температуры, типа присадки, ее концентрации и времени воздействия.

4.3.6 Серу, фосфор- и хлорсодержащие присадки

Химически активные соединения, содержащие серу, фосфор и хлор, в последние годы получили широкое распространение как присадки, улучшающие и ускоряющие приработку механизмов. Для образования на стали фосфидных, сульфидных и хлоридных пленок большое значение имеет подвижность атомов фосфора, серы и хлора в молекуле присадки, а также условия протекания реакции между присадкой и металлом. Присадки, содержащие эти три элемента, являются универсальными и ведут себя удовлетворительно как на режимах высоких нагрузок, так и при высоких скоростях и низких нагрузках. Фосфор снижает износ и сглаживает поверхность, сера снижает трение и усиливает противозадирный эффект, обеспечиваемый хлором.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

5.1 Построение экспериментальных зависимостей

Одним из самых информативных и общепринятых методов определения режима трения является построение зависимостей коэффициента трения в данном трибосопряжении от таких параметров, как контактное давление, скорость смещения поверхностей, вязкость смазывающей жидкости и т.д.

5.1.1 Исследование зависимости силы и коэффициента трения от скорости скольжения

Зависимости силы трения и коэффициента трения от скорости скольжения при нагрузке 250, 300, 700 Н и температуре 25 ºС приведены в таблице 1 и на рисунках 18, 19, 20.

Таблица 1 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при усилии прижима N=250, 300, 700Н; t = 25 ºС, S=250мм^2

Скорость (об/мин)	$F_{тр}$ (Н)	$f_{тр}$	$F_{тр}$ (Н)	$f_{тр}$	$F_{тр}$ (Н)	$f_{тр}$
	250 Н		300 Н		700 Н	
100	12,4	0,0496	17	0,056667	40	0,057143
200	12,1	0,0484	16,9	0,056333	34	0,048571
300	11,8	0,0472	16,9	0,056333	34,1	0,048714
400	13,9	0,0556	16,9	0,056333	33,9	0,048429
500	11,5	0,046	16,9	0,056333	34	0,048571
600	13,8	0,0552	17,1	0,057	34	0,048571
700	13,7	0,0548	17	0,056667	33,8	0,048286
800	13,6	0,0544	16,6	0,055333	33,8	0,048286
900	13,2	0,0528	16,4	0,054667	33,6	0,048
1000	12,7	0,0508	16,3	0,054333	33,4	0,047714
1100	12,6	0,0504	15,7	0,052333	33,5	0,047857
1200	12,2	0,0488	16,3	0,054333	33,1	0,047286
1300	12	0,048	16,2	0,054	32,9	0,047
1400	11,8	0,0472	15	0,05	32,7	0,046714

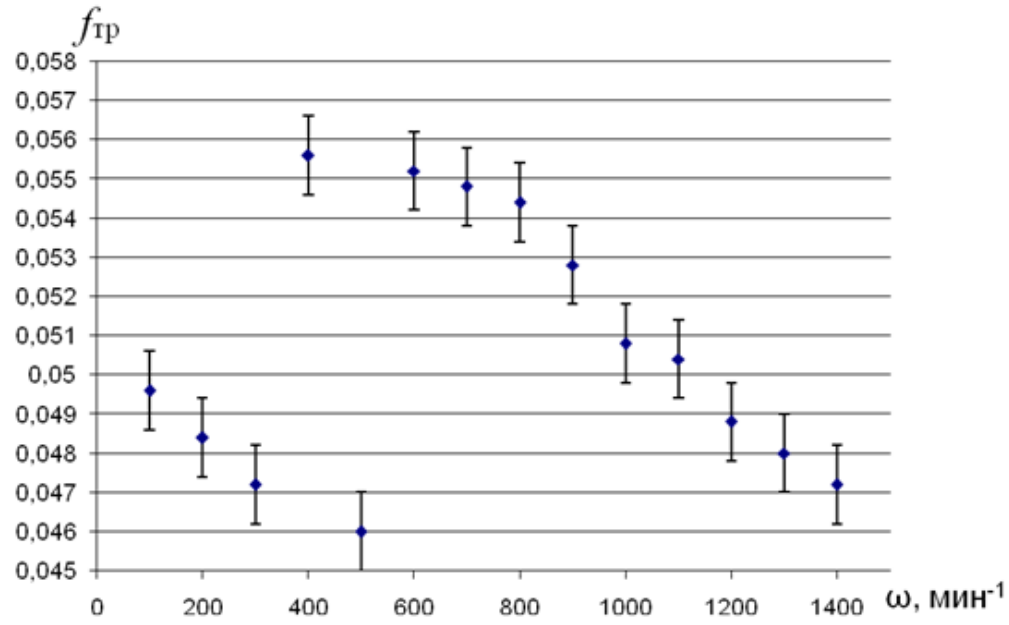


Рисунок 18 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при усилии прижима N=250Н, t = 25 ºС, S=250мм^2

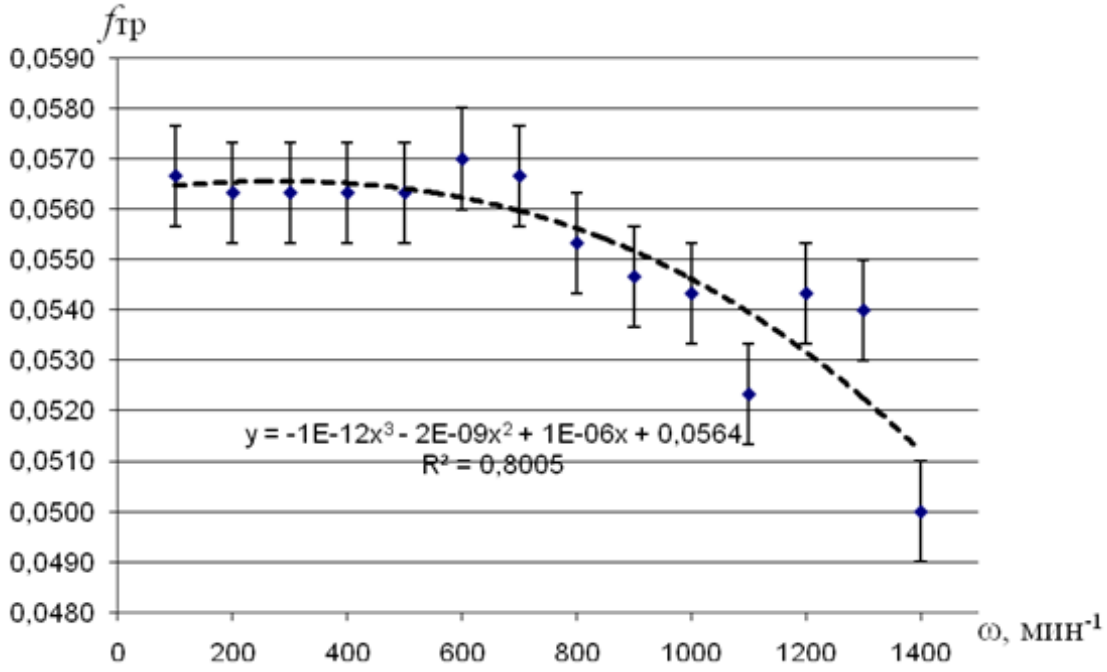


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при усилии прижима N=300Н, t = 25 ºС, S=250мм^2

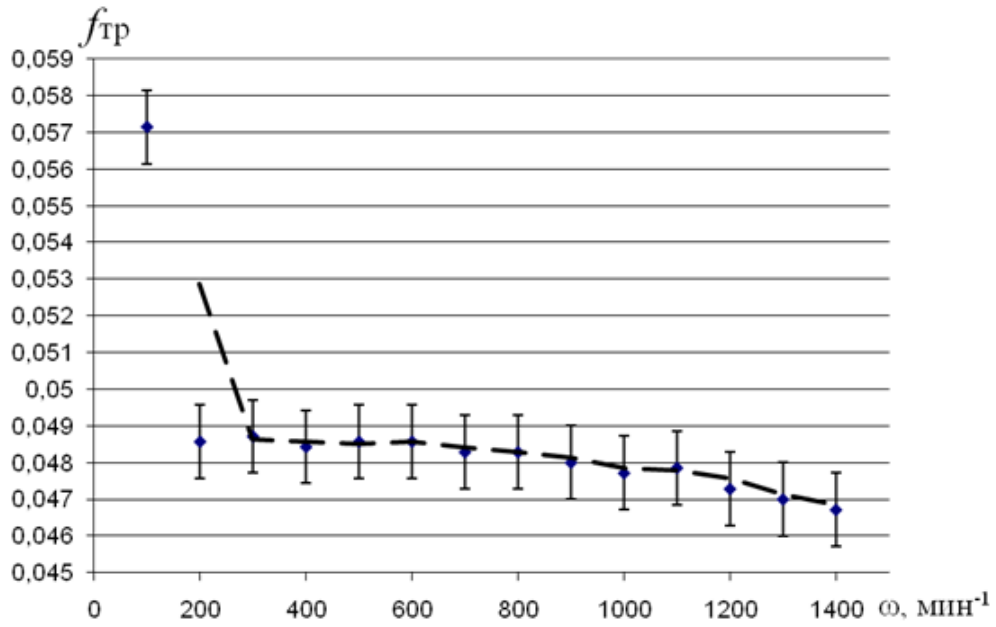


Рисунок 20 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при усилии прижима N=700Н, t = 25 ºС, S=250мм^2

Зависимость силы трения от скорости скольжения для трех значений нагрузки N=250Н, N=300Н, N=700Н приведена в таблице 2 и на рисунке 21.

Таблица 2 – Зависимость силы трения от скорости скольжения для трех значений усилия прижима при t = 25 ºС, S=250мм^2

Скорость, мин$^{-1}$	Сила трения, Н		
	Р=1,0 МПа	Р = 1,2 МПа	Р = 2,8 МПа
100	12,4	17	33,3
200	12,1	16,9	33,2
300	11,8	16,9	32,9
400	13,9	16,9	32,9
500	11,5	16,9	32,8
600	13,8	17,1	32,9
700	13,7	17	32,7
800	13,6	16,6	32,2
900	13,1	16,4	32,3
1000	12,7	16,3	32,1
1100	12,4	15,7	31,9
1200	12,2	16,3	31,8
1300	12	16,2	31,9
1400	11,8	15	31,8

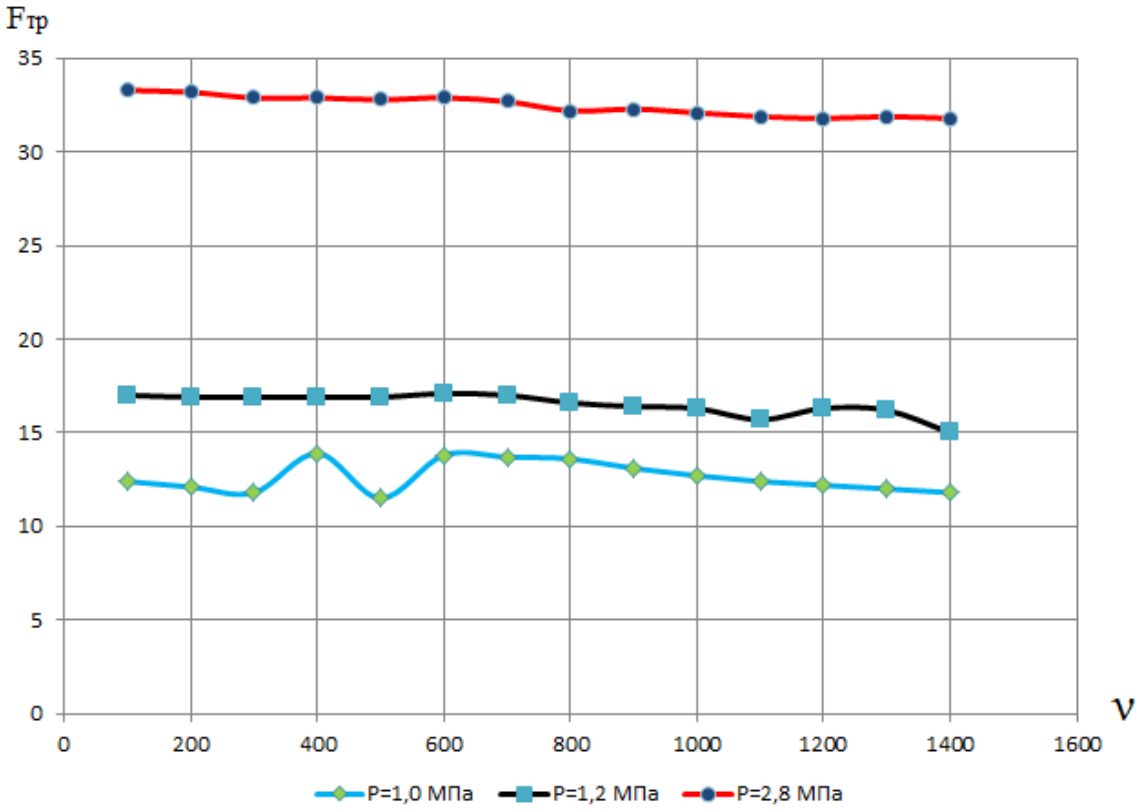


Рисунок 21 – Зависимости силы трения от скорости скольжения для трех значений нагрузки

5.1.2 Исследование зависимости силы и коэффициента трения от вязкости моторного масла

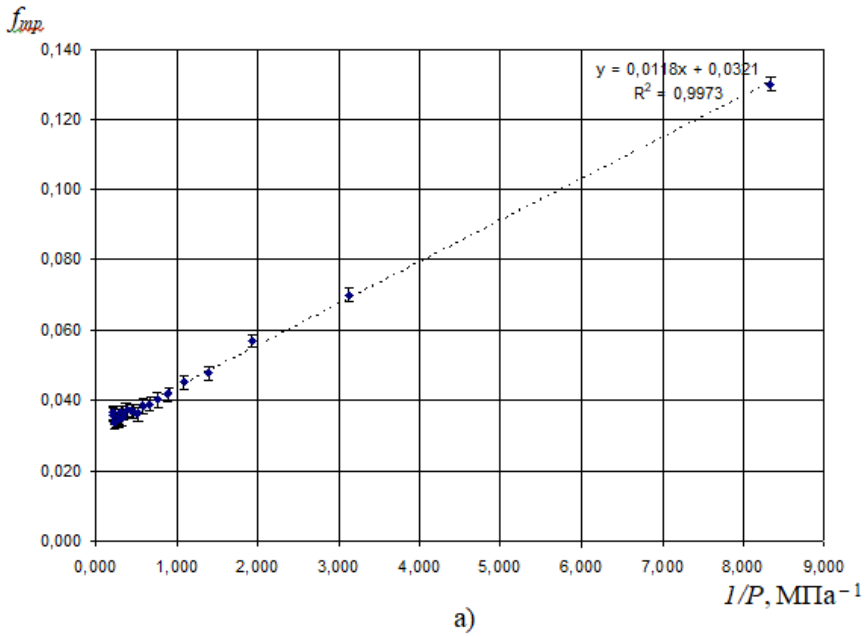
Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки и скорости скольжения ω = 700 мин$^{-1}$,для двух значений температуры t = 25 ºС, 70 ºС представлена в таблице 3 и на рисунках 22,23.

Таблица 3 – Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки; ω = 700 мин$^{-1}$, t = 25 ºС, 70 ºС.

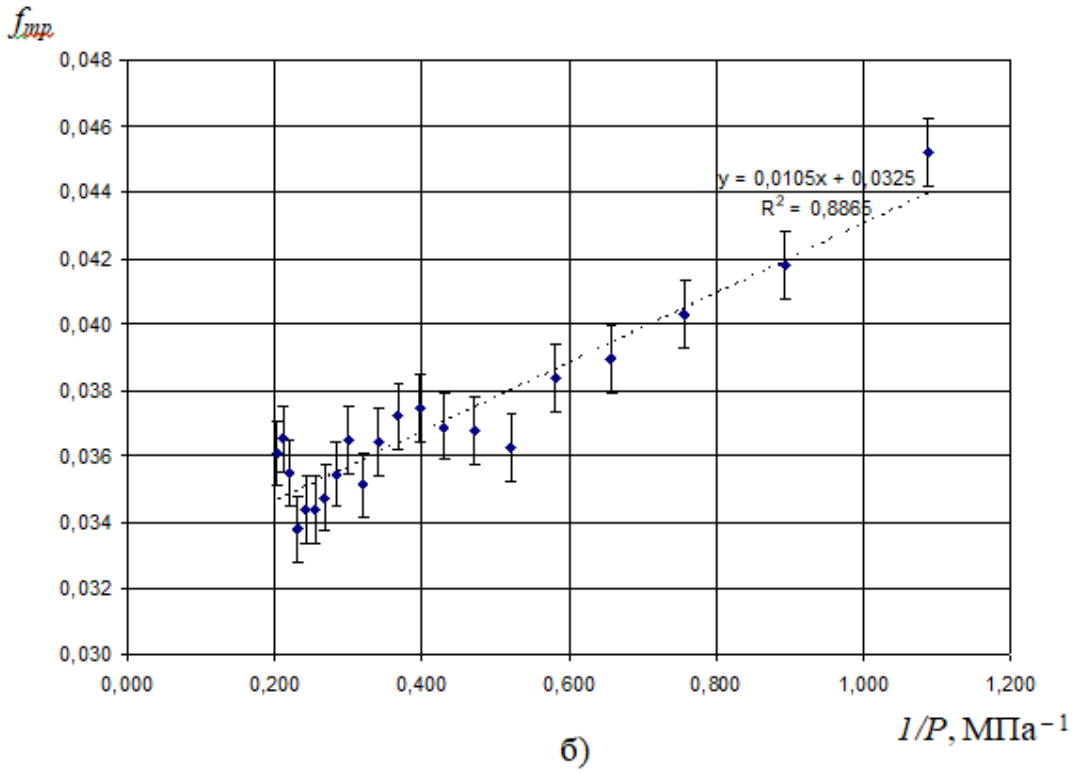
Нагрузка, Н	P, МПа	1/P	t = 25 ºС		t = 70 ºС	
			$F_{тр}$, Н	f_{mp}	$F_{тр}$, Н	f_{mp}
30	0,12	8,333	3,9	0,13	4,1	0,137
80	0,32	3,125	5,6	0,07	6,3	0,079
130	0,52	1,923	7,4	0,057	8,4	0,065
180	0,72	1,389	8,6	0,048	10,8	0,06

Окончание таблицы 3

Нагрузка, Н	P, МПа	1/P	t = 25 ºС		t = 70 ºС	
			$F_{тр}$, Н	f_{mp}	$F_{тр}$, Н	f_{mp}
230	0,92	1,087	10,4	0,045	13,2	0,057
280	1,12	0,893	11,7	0,042	15,2	0,054
330	1,32	0,758	13,3	0,04	17,3	0,052
380	1,52	0,658	14,8	0,039	19,1	0,05
430	1,72	0,581	16,5	0,038	21,3	0,05
480	1,92	0,521	17,4	0,036	23,3	0,049
530	2,12	0,472	19,5	0,037	26,4	0,05
580	2,32	0,431	21,4	0,037	28,1	0,048
630	2,52	0,397	23,6	0,037	30,2	0,048
680	2,72	0,368	25,3	0,037	32,2	0,047
730	2,92	0,342	26,6	0,036	34,5	0,047
780	3,12	0,321	27,4	0,035	36	0,046
830	3,32	0,301	30,3	0,036	38,8	0,047
880	3,52	0,284	31,2	0,035	39,7	0,045
930	3,72	0,269	32,3	0,034	42,1	0,045
980	3,92	0,255	33,7	0,034	43,7	0,045
1030	4,12	0,243	35,4	0,034	43,9	0,043
1080	4,32	0,231	36,5	0,034	–	–
1130	4,52	0,221	40,1	0,035	–	–
1180	4,72	0,212	43,1	0,036	–	–
1230	4,92	0,203	44,4	0,036	–	–

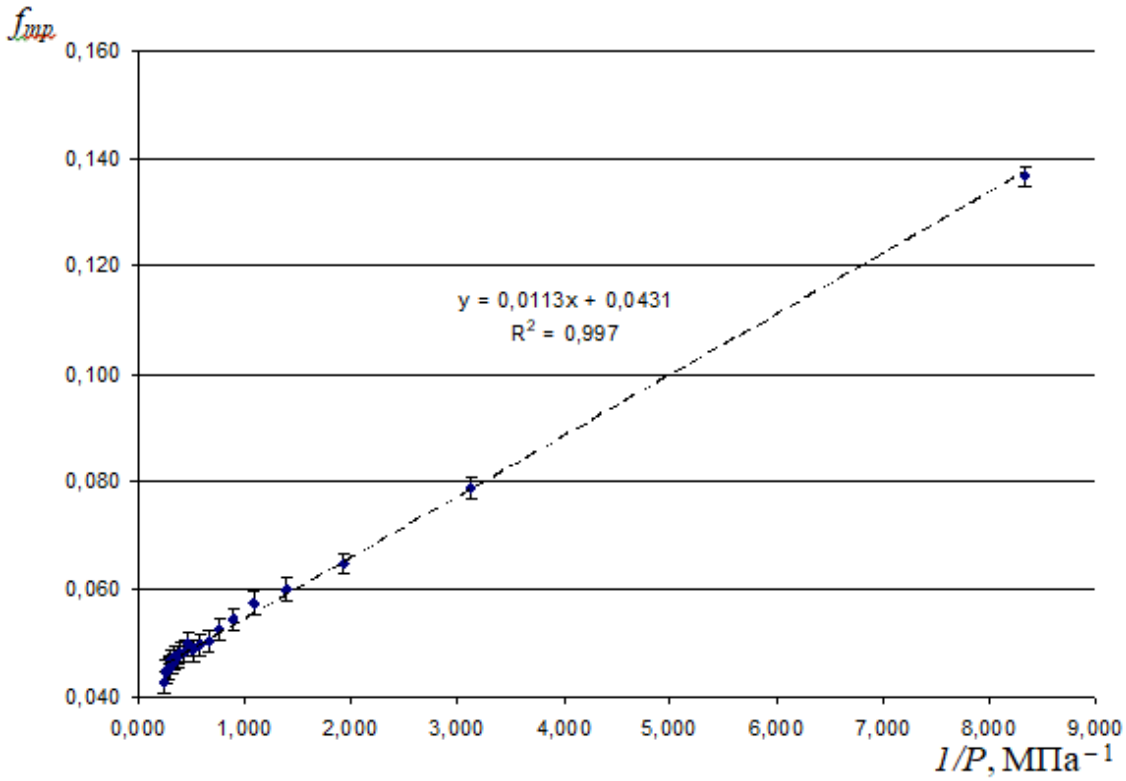


а)



б)

Рисунок 22 – Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки; ω = 700 мин $^{-1}$, t = 25 ºС (а) и фрагмент зависимости (б)



а)

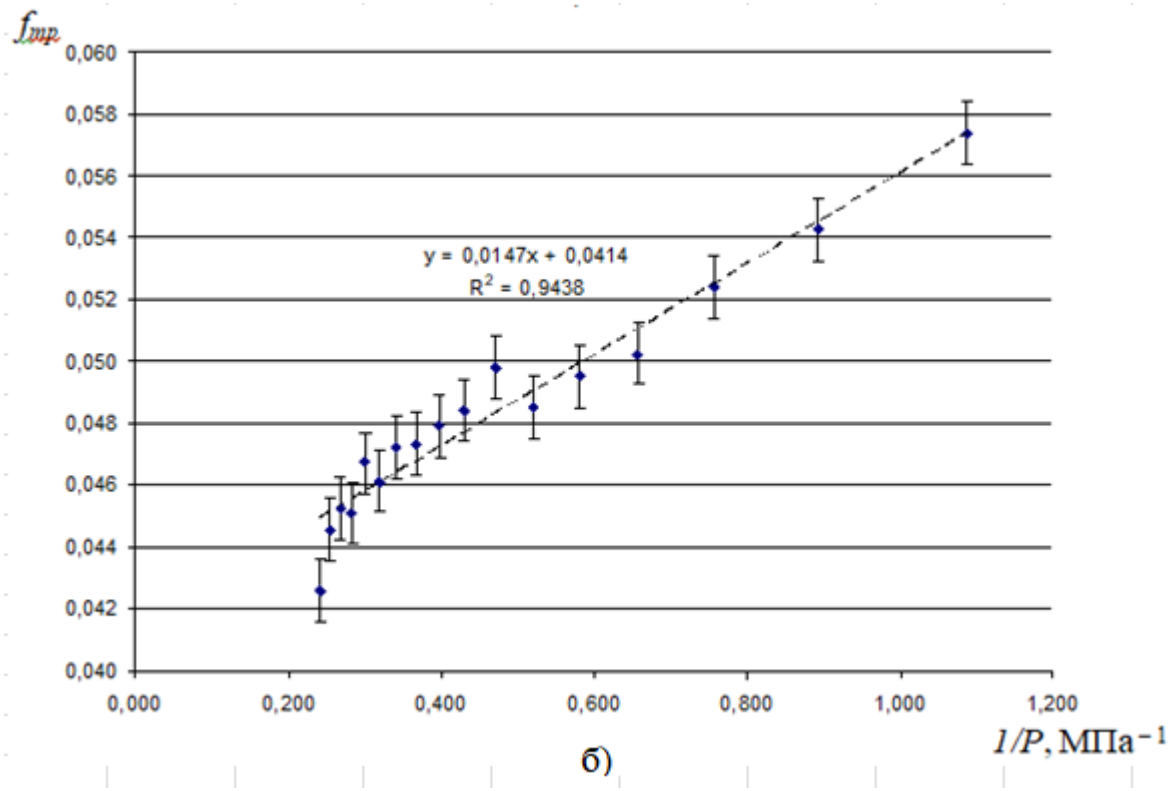


Рисунок 23 – Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки; ω = 700 мин$^{-1}$; t = 70 ºС (а) и фрагмент зависимости (б)

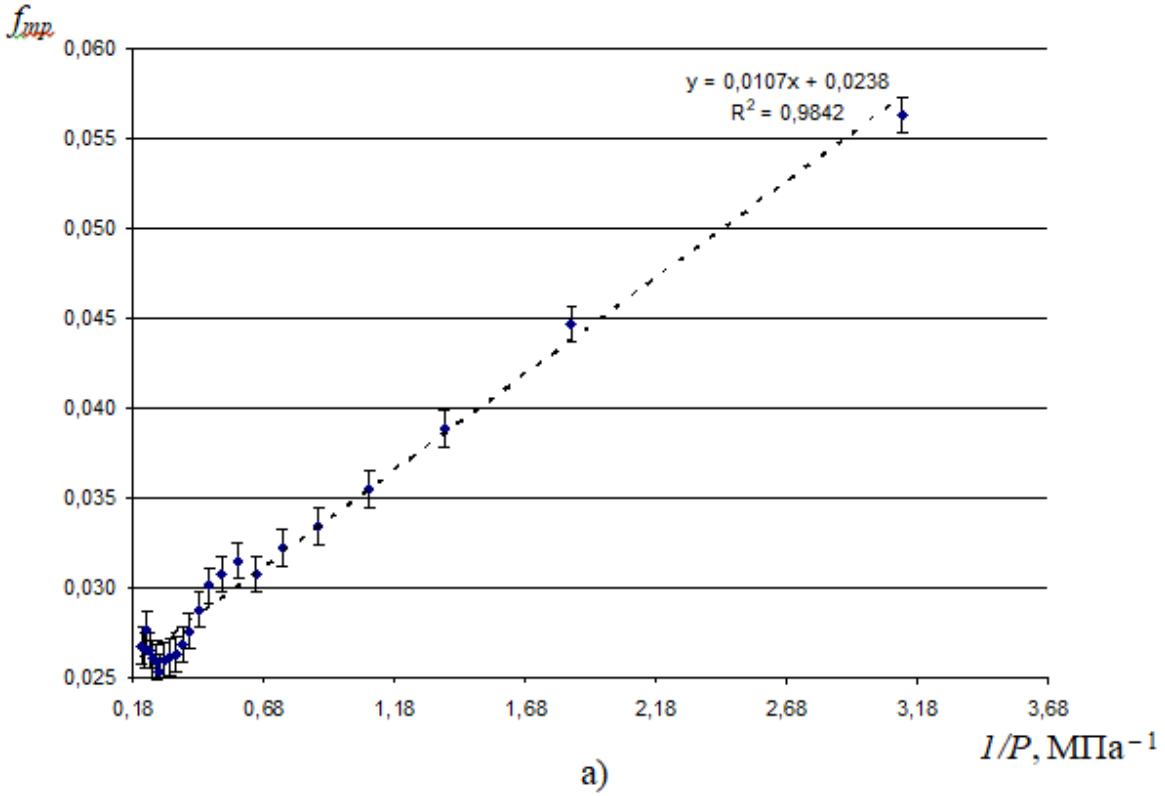
Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки и скорости скольжения ω = 1400 мин$^{-1}$, для двух значений температуры t = 25 ºС, 70 ºС представлена в таблице 4 и на рисунках 24,25.

Таблица 4 – Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки; ω = 1400 мин$^{-1}$, t = 25 ºС

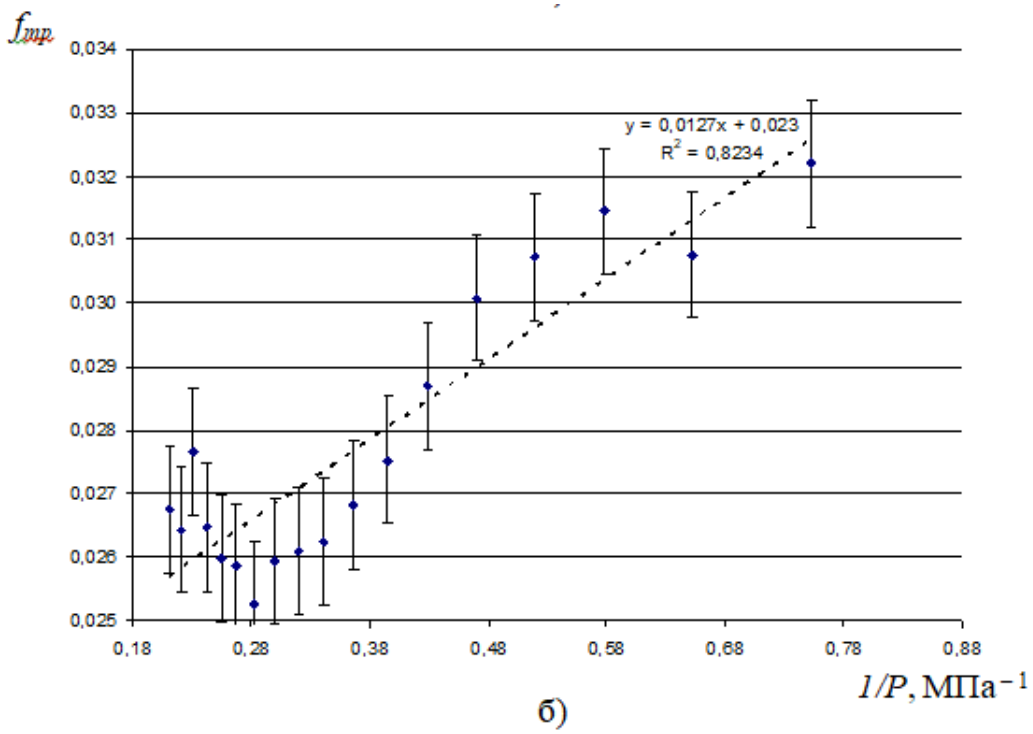
Нагрузка, Н	P, МПа	1/P	t = 25 ºС		t = 70 ºС	
			$F_{тр}$	f_{mp}	$F_{тр}$	f_{mp}
30	0,12	8,333	-	-	3,8	0,127
80	0,32	3,125	4,5	0,056	5,2	0,065
130	0,52	1,923	6	0,045	7,7	0,059
180	0,72	1,389	7,1	0,039	9,1	0,051
230	0,92	1,087	8,2	0,035	11,2	0,049
280	1,12	0,893	9,4	0,033	13,2	0,047
330	1,32	0,758	10,7	0,032	14,8	0,045
380	1,52	0,658	11,8	0,031	16,2	0,043
430	1,72	0,581	13,6	0,031	18,1	0,042
480	1,92	0,521	14,8	0,031	19,4	0,04

Окончание таблицы 4

Нагрузка, Н	P, МПа	1/P	t = 25 ºC		t = 70 ºC	
			$F_{тр}$	f_{mp}	$F_{тр}$	f_{mp}
530	2,12	0,472	16	0,03	21,3	0,04
580	2,32	0,431	16,7	0,029	22,6	0,039
630	2,52	0,397	17,4	0,028	23,8	0,038
680	2,72	0,368	18,3	0,027	27,2	0,04
730	2,92	0,342	19,2	0,026	28,1	0,038
780	3,12	0,321	20,4	0,026	29,8	0,038
830	3,33	0,300	21,6	0,026	21,8	0,026
880	3,53	0,283	22,3	0,025	32,9	0,037
930	3,73	0,268	24,1	0,026	34,2	0,037
980	3,93	0,255	25,5	0,026	36,3	0,037
1030	4,12	0,242	27,3	0,026	38,6	0,037
1080	4,32	0,231	29,9	0,028	–	–
1130	4,52	0,221	29,9	0,026	–	–
1180	4,72	0,212	31,6	0,027	–	–



а)



б)

Рисунок 24 – Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки; ω = 1400 мин $^{-1}$, t = 25 ºС (а) и фрагмент зависимости при высоких контактных давлениях (б)

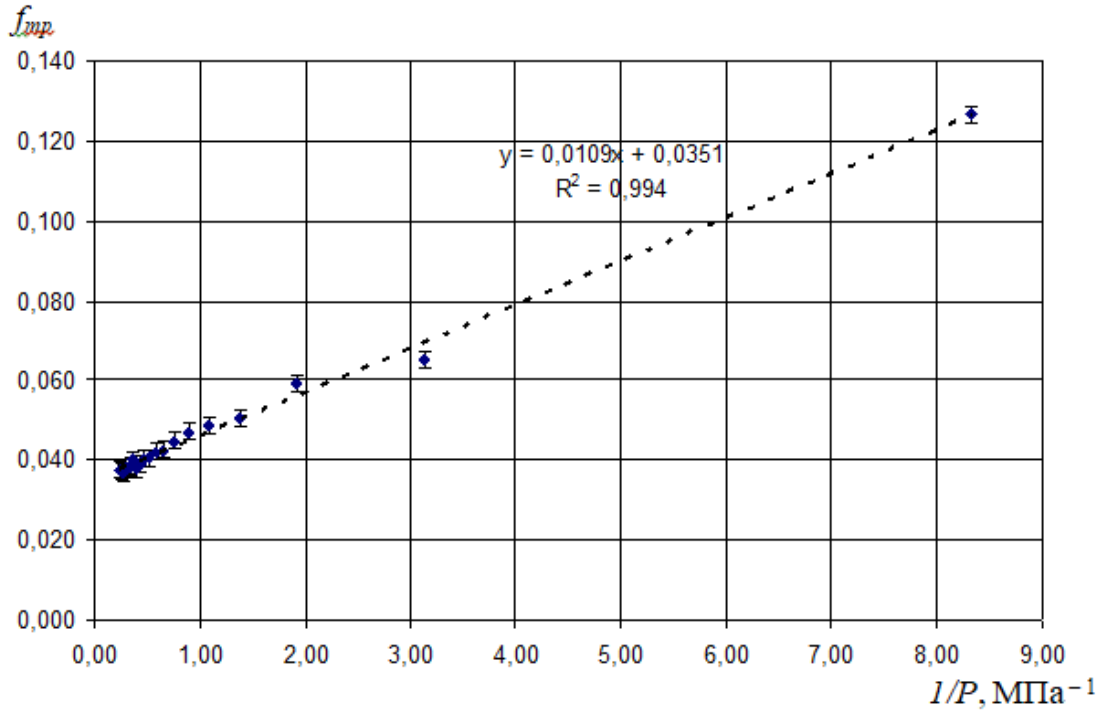


Рисунок 25 – Зависимость коэффициента трения от контактного давления при дефиците смазки; ω = 1400 мин $^{-1}$, t = 70 ºС

5.1.3 Исследование зависимости силы и коэффициента трения от контактного давления

Зависимость коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению для чистого масла SAE20, в диапазоне нагрузок 50-1200 Н, с шагом нагрузки 50Н, представлены в таблице 5 и на рисунке 26.

Таблица 5 – Зависимость коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению, для чистого масла SAE 20, с шагом нагрузки 50Н

Нагрузка, Н	Сила трения, Н	P, МПа	1/P, $МПа^{-1}$	Коэффициент трения
50	25,556	1,667	0,600	0,511
100	37,333	3,333	0,300	0,373
150	43,778	5,000	0,200	0,292
200	50,222	6,667	0,150	0,251
250	57,333	8,333	0,120	0,229
300	64,889	10,000	0,100	0,216
350	70,222	11,667	0,086	0,201
400	76,667	13,333	0,075	0,192
450	83,556	15,000	0,067	0,186
500	89,778	16,667	0,060	0,180
550	95,556	18,333	0,055	0,174
600	101,556	20,000	0,050	0,169
650	110,000	21,667	0,046	0,169
700	113,333	23,333	0,043	0,162
750	119,556	25,000	0,040	0,159
800	125,333	26,667	0,038	0,157
850	129,333	28,333	0,035	0,152
900	132,667	30,000	0,033	0,147
950	139,111	31,667	0,032	0,146
1000	146,000	33,333	0,030	0,146
1050	152,222	35,000	0,029	0,145
1100	157,111	36,667	0,027	0,143
1150	166,222	38,333	0,026	0,145
1200	172,444	40,000	0,025	0,144

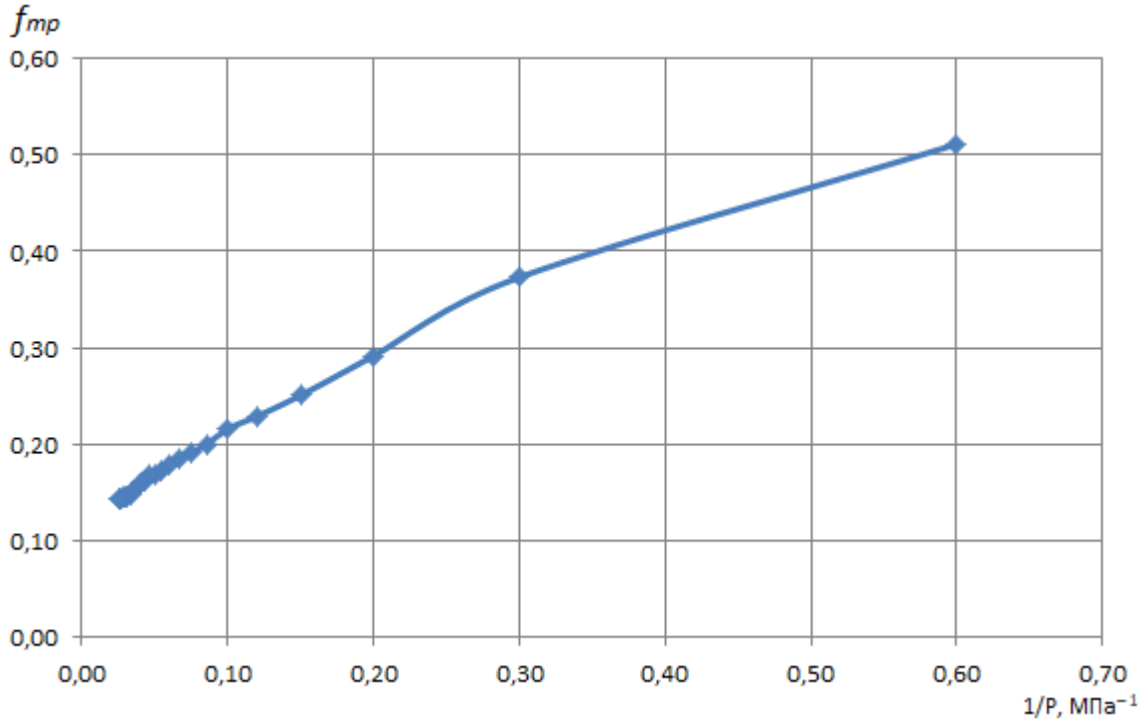


Рисунок 26 – Зависимость коэффициента трения от величины обратной контактному давлению для чистого масла SAE20; диапазон нагрузок 50-1200 Н, шаг нагрузки 50Н, ω = 63 мин $^{-1}$

Зависимости коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению для моторного масла Toyota SAE 0W-20, в диапазоне нагрузок 0-2000 Н, с шагом нагрузки 50Н; представлены в таблице 6 и на рисунке 27.

Таблица 6 – Зависимость коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению, для моторного масла SAE 0W-20

Нагрузка, Н	Сила трения, Н	P, МПа	1/P, МПа $^{-1}$	Коэффициент трения
0	1,556	0,000	-	-
10	13,778	0,333	3,000	1,378
20	20,444	0,667	1,500	1,022
30	22,222	1,000	1,000	0,741
40	23,778	1,333	0,750	0,594
50	24,000	1,667	0,600	0,480
60	25,556	2,000	0,500	0,426
70	26,889	2,333	0,429	0,384

Продолжение таблицы 6

Нагрузка, Н	Сила трения, Н	P, МПа	1/P, $МПа^{-1}$	Коэффициент трения
80	28,222	2,667	0,375	0,353
90	29,556	3,000	0,333	0,328
100	32,222	3,333	0,300	0,322
110	33,111	3,667	0,273	0,301
120	34,667	4,000	0,250	0,289
130	35,778	4,333	0,231	0,275
140	36,444	4,667	0,214	0,260
150	38,000	5,000	0,200	0,253
200	44,667	6,667	0,1500	0,223
250	49,778	8,333	0,1200	0,199
300	55,778	10,000	0,1000	0,186
350	60,889	11,667	0,0857	0,174
400	67,556	13,333	0,0750	0,169
450	72,889	15,000	0,0667	0,162
500	77,333	16,667	0,0600	0,155
550	84,444	18,333	0,0545	0,154
600	92,444	20,000	0,0500	0,154
650	95,111	21,667	0,0462	0,146
700	100,444	23,333	0,0429	0,143
750	106,222	25,000	0,0400	0,142
800	111,556	26,667	0,0375	0,139
850	118,222	28,333	0,0353	0,139
900	123,556	30,000	0,0333	0,137
950	128,889	31,667	0,0316	0,136
1000	134,444	33,333	0,0300	0,134
1050	139,111	35,000	0,0286	0,132
1100	145,333	36,667	0,0273	0,132
1150	150,222	38,333	0,0261	0,131
1200	154,667	40,000	0,0250	0,129
1250	156,889	41,667	0,0240	0,126
1300	163,111	43,333	0,0231	0,125
1350	169,778	45,000	0,0222	0,126
1400	173,778	46,667	0,0214	0,124
1450	181,111	48,333	0,0207	0,125
1500	184,889	50,000	0,0200	0,123
1550	190,222	51,667	0,0194	0,123
1600	192,667	53,333	0,0188	0,120
1650	199,111	55,000	0,0182	0,121
1700	203,111	56,667	0,0176	0,119

Окончание таблицы 6

Нагрузка, Н	Сила трения, Н	P, МПа	1/P, МПа $^{-1}$	Коэффициент трения
1750	207,111	58,333	0,0171	0,118
1800	213,333	60,000	0,0167	0,119
1850	216,000	61,667	0,0162	0,117
1900	218,889	63,333	0,0158	0,115
1950	225,778	65,000	0,0154	0,116
2000	230,444	66,667	0,0150	0,115

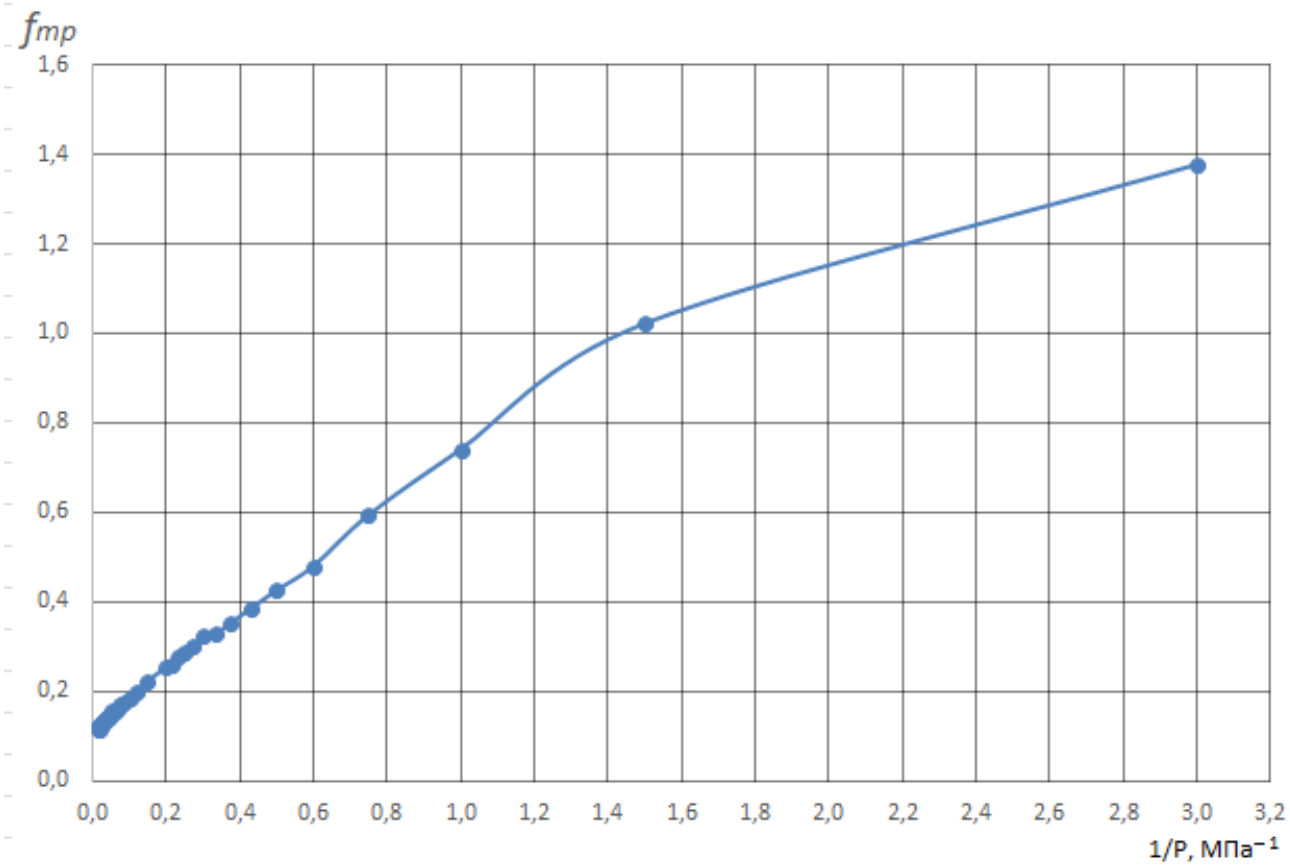


Рисунок 27 – Зависимость коэффициента трения от величины обратной контактному давлению для чистого масла SAE20; диапазон нагрузок 0-2000Н, шаг нагрузки 50Н, ω = 63 мин $^{-1}$

Зависимость силы трения от контактного давления для моторного масла Toyota SAE 0W-20, в диапазоне нагрузок 0-2000Н представлена на рисунке 28.

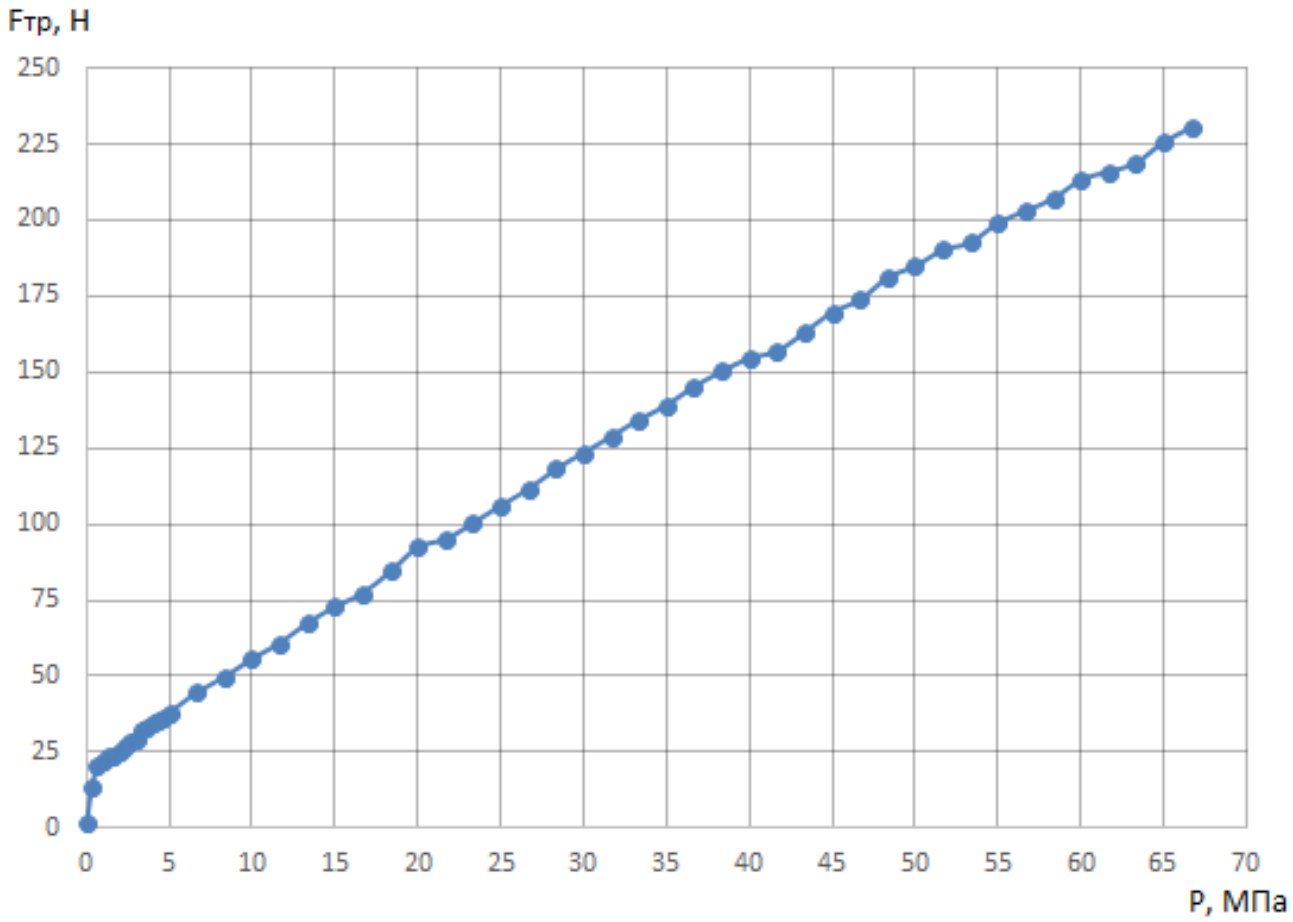


Рисунок 28 – Зависимость силы трения от контактного давления для чистого масла SAE20; диапазон нагрузок 0-2000Н, ω = 63 мин $^{-1}$

Зависимости коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению для чистого масла SAE 20 (синяя) и моторного масла ToyotaSAE 0W-20 (красная), в диапазоне нагрузок 350...2000 Н, и температуре 35…40 ℃ представлены на рисунке 29.

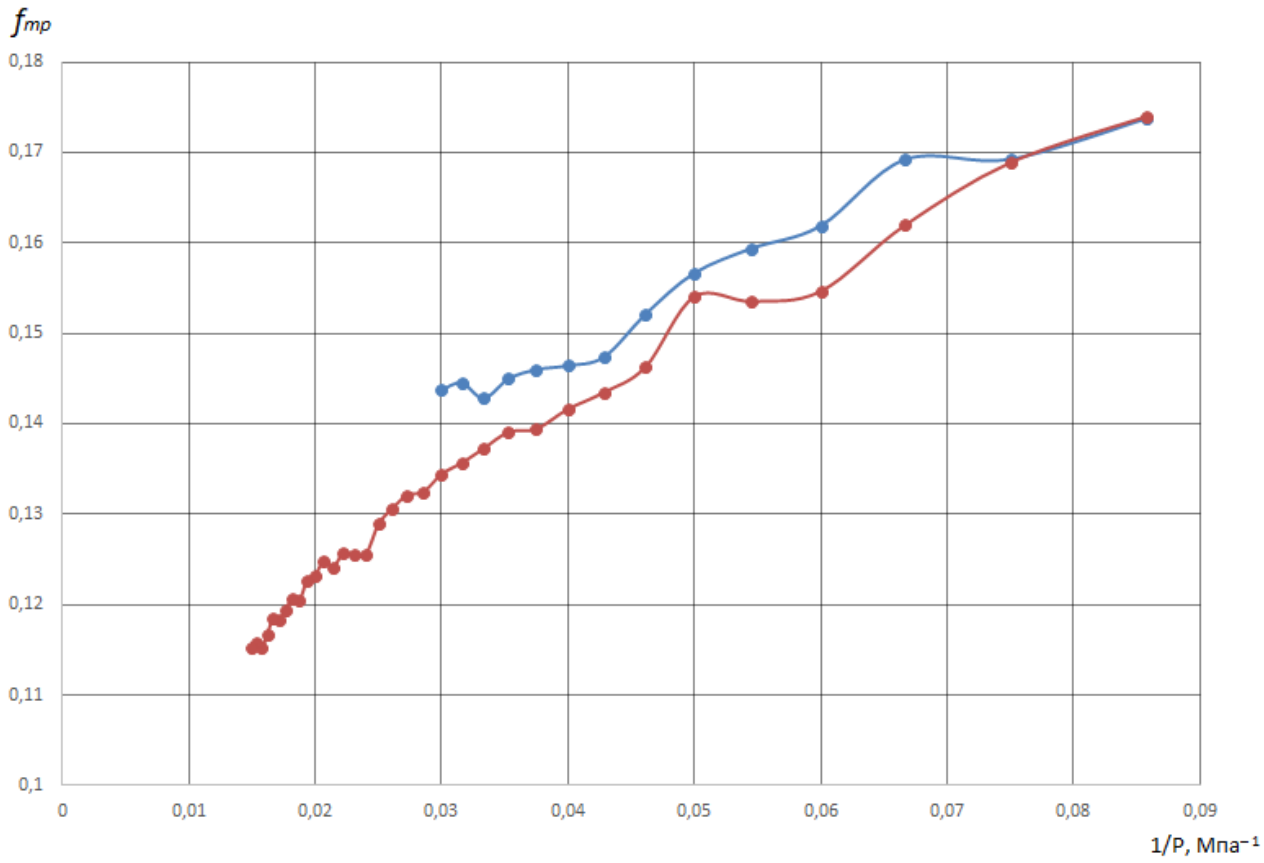


Рисунок 29 – Зависимости коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению для чистого масла SAE 20 (синяя) и моторного масла SAE 0W-20 (красная). Диапазон нагрузок 350...2000 Н. Температуры 35...40 °С.

5.2 Анализ результатов экспериментальных исследований

Для проверки гипотез о жидкостном или граничном режимах трения исследовались зависимости силы и коэффициента трения, от таких параметров как контактное давление, скорость смещения поверхностей, вязкость смазывающей жидкости и т.д.

Анализируя данные приведенные в таблице 1 и на рисунках 18-20, была отмечена слабая зависимость силы трения от скорости скольжения, однако результаты приведенные в таблице 2 и на рисунке 21 указывают на существенную зависимость силы трения от нагрузки. Так для трех значений нагрузки 250, 300, 700Н наблюдается пропорциональное увеличение силы трения, при тех же

значениях скорости скольжения. Такой вид зависимостей характерен для граничного режима трения.

Данные представленные в таблице 3 и на рисунках 23-24, для двух значений температуры 25, 70ºС, (что равносильно разной вязкости масла) показывают, что с увеличением контактного давления сила трения монотонно возрастает, а коэффициент трения убывает, также отмечено что с увеличением температуры (снижением вязкости), сила и коэффициент трения возрастают, данный вид зависимости характеризуется жидкостным режимом трения.

Результаты представленные в таблице 4 и на рисунках 25-26 сопоставимы с указанными выше зависимостями, так при скорости скольжения 1400 мин $^{-1}$ реализуется жидкостный режим трения, ожидаемый для плоскопараллельного трения, однако зависимость коэффициента трения от скорости скольжения ниже, чем характерная для гидродинамического режима.

Зависимости коэффициента трения от контактного давления для чистого масла SAE 20 и моторного масла SAE 0W20, приведенные в таблице 5, 6 и на рисунках 26-28, характеризуются жидкостным режимом трения (монотонное увеличение силы трения и снижение коэффициента трения, при увеличении контактного давления).

5.3 Выводы по результатам экспериментальных данных

Подводя итоги следует сказать, что основной задачей проведенных экспериментальных исследований являлось установление режима или режимов трения, реализуемых в трибосопряжении поршневое кольцо – гильза цилиндра, а также условий перехода от одного режима к другому при изменении скорости, нагрузки и вязкости масла. Выполнение данной задачи необходимо для выбора или построения математической модели и определения параметров, входящих в эту модель.

Монотонный характер зависимости коэффициента трения от контактного давления и линейная зависимость коэффициента трения от величины, обратной контактному давлению (диаграмма Герси), свидетельствуют о жидкостном

характере трения. Слабая и близкая к линейной зависимость силы трения от контактного давления также соответствует жидкостному трению.

Анализ результатов зависимостей коэффициента трения от величины контактного давления, приведенных в таблицах 3,4 и на рисунках 22,23,24,25 для двух значений температуры и двух значений скорости в условиях граничной смазки показал, что коэффициент трения монотонно увеличивается с повышением температуры и монотонно снижается при увеличении скорости. Однако, зависимость коэффициента трения от этих параметров значительно слабее, чем характерные зависимости для гидродинамического режима. В целом, характер трения близок к трению по слою твердой смазки с постоянными механическими параметрами.

Для наглядности в таблице 2 и на рисунке 21 приведены зависимости коэффициента трения от скорости при трех значениях контактного давления. При контактном давлении 1,0 МПа наблюдается спонтанный переход от режима граничной смазки, с характерными значениями коэффициента трения 0,057…0,047 в данном диапазоне скоростей скольжения, к жидкостному режиму с несколько меньшими значениями коэффициента трения. При контактных давлениях 1,2 МПа и 2,8 МПа коэффициент трения зависит только от контактного давления и крайне слабо зависит от скорости. На рисунке 21 видно, что сила трения практически не зависит от скорости, что свидетельствует против представления о жидкостном трении и в пользу представления о наличии на опорной поверхности гильзы слоя смазки с постоянными механическими характеристиками.

Наиболее важным выводом из полученных результатов является отсутствие в данном трибосопряжении граничного режима трения, характеризующегося возрастанием коэффициента трения при увеличении контактного давления. Существует множество моделей граничного режима трения, однако независимо от рассматриваемой модели, общей закономерностью для них является увеличение коэффициента трения при увеличении контактного давления. Это неизбежно вследствие увеличения степени перекрывания рельефов

поверхностей и увеличения энергии, затрачиваемой на тот или иной вид деформации твердого материала поверхностей.

В то же время, гидродинамический режим трения реализуется лишь при низких контактных давлениях, наличии количества смазки, достаточного для формирования масляного клина и высоких скоростях вращения коленчатого вала. Такой режим нехарактерен для маслосъемного кольца вследствие особенностей формы рабочей поверхности. Для нижнего компрессионного кольца гидродинамический режим реализуется при движении поршня в сторону камеры сгорания. При обратном движении он менее вероятен вследствие несимметричности формы рабочей поверхности, предназначенной в этом случае для снятия слоя масла. Для верхнего компрессионного кольца основным режимом трения является режим граничной смазки, основные параметры которого описаны выше. Данный режим не может быть описан на основании моделей жидкостного или граничного трения, а также их сочетания.

Единственным допущением, согласующимся с экспериментальными данными, является наличие на поверхностях трибосопряжения слоя смазочного материала со свойствами, близкими к свойствам твердой смазки. Механизм образования такого слоя вероятнее всего, аналогичен механизму образования граничного слоя смазочного масла, известного благодаря влиянию на гидромеханические характеристики радиальных подшипников жидкостного трения, в частности, подшипников коленчатого вала ДВС.

В заключении можно сделать вывод что, при условии депонирования смазки на хонингованной поверхности гильзы создаются условия для присутствия адсорбированного невыдавливаемого слоя смазки. Трение в нормальных условиях происходит частично в жидкостном режиме (холодный двигатель, много масла), при нагреве и интенсивной работе происходит переход в промежуточный режим граничной смазки. Ценность в том, что и в том и в другом режиме поверхности разделены слоем смазки, а значит для их моделирования можно применить один и тот же подход. Если правильно смоделировать реологические свойства смазочного слоя при граничной смазке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопряжение «гильза цилиндра – верхнее компрессионное кольцо» – является одним из наиболее нагруженных, ответственных и ограничивающих ресурс двигателя сопряжений. Однако по поводу режимов трения поршневых колец, до сих пор ведутся активные споры. Среди исследователей существуют две различные точки зрения на режим трения в этом сопряжении: жидкостное и граничное.

Для того чтобы разобраться какой же режим трения является превалирующим для данного сопряжения необходимо исследовать переход от жидкостного трения к граничному. Так в результате исследования ряда масел был обнаружен промежуточный режим трения с относительно постоянным значением коэффициента трения. У этого режима такие же признаки, как при трении с твердой смазкой, но коэффициент трения мал. Значит это не гидродинамическое, не граничное, а трение по слою смазки с особыми свойствами, исследованиями которого занимались Харди, Ахматов и др.

Таким образом, противоречие между двумя способами описания трения в ЦПГ можно решить с привлечением модели граничной смазки (оно же трение по граничному смазочному слою с особыми свойствами, которые изучаются в настоящее время).

Подводя итоги следует сказать что, при условии депонирования смазки на хонингованной поверхности гильзы создаются условия для присутствия адсорбированного невыдавливаемого слоя смазки. Трение в нормальных условиях происходит частично в жидкостном режиме (холодный двигатель, много масла), при нагреве и интенсивной работе происходит переход в промежуточный режим граничной смазки.

Ценность в том, что и в жидкостном и граничном режиме трения поверхности разделены слоем смазки, значит для их моделирования можно применить один и тот же подход. Если правильно смоделировать реологические свойства смазочного слоя при граничной смазке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО ЮУрГУ 04-2008. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к оформлению и содержанию / Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

2. Буяновский, И.А. Основы триботехники / И.А Буяновский, А.И. Доценко – М.: Инфра-М, 2016г. – 336с.

3. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения – М.: ГИФМЛ, 1963.-472с.

4. Путинцев, С.В. Механически потери в поршневых двигателях – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.- 288с.

5. Luengo, G., Israelachvili J., Granick S. // Wear. 1996. Vol. 200. P. 328.

6. Лужнов, Е.М. Основы триботехники: учебное пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров – М.: МАДИ, 2013. – 136 с.

7. Браун, Э.Д. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д. Браун, И.А. Буяновский, Н.А. Воронин и др. - М.: Издательство ЛКИ, 2008. - 480 с.

8. Крагельский, И.В. Трение, изнашивание и смазка / И.В. Крагельский, В.В. Алисина – М.: Машиностроение, 1978 г. Книга 1,- 400 с.

9. Буяновский, И.А. Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов, при тяжелых режимах граничной смазки // Трение и износ. 1993. Т. 14. № 1. С. 129-142.

10. Крагельский, И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

11. Буяновский, И.А. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел / И.А. Буяновский, З.В. Игнатьева, В.А. Левченко, В.Н. Матвеенко//Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 4. – С. 375-381.

12. Костецкий, Б.И. Механохимические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. – М.: Наука, 1972 – 169 с.

13. Заславский, Ю. С. Трибология смазочных материалов – М.: Химия, 1991 – 240с.

14. Заславский, Ю.С. Механизм действия противоизносных присадок к маслам - М.: Химия , 1978 г. - 224 с.

15. Мухортов, И.В. Усовершенствованная модель реологических свойств граничного слоя смазки / И.В. Мухортов, Н.А. Усольцев, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов – Челябинск: Трение и смазка в машинах и механизмах, 2010. – № 5. – С. 8–19.

16. Мухортов, И.В. Полимолекулярная адсорбция смазочных материалов и ее учет в теории жидкостного трения /И.ВМухортов – Челябинск:Вестник ЮУрГУ, серия «Машиностроение», вып.18. - 2011, - №31 (248), - стр.62 – 67.

17. Оболенцев, Р.Д. Химия сераорганических соединений, содержащихся в нефтях и нефтепродуктах- М.: 1963г., Т 5 - 264 с.

18. Крейн, С.Э. Присадки к маслам/С.Э Крейн, П.И Санин– М.: Химия, 1968г. - 348 с.

19. Mukhortov I., Zadorojznaya E., Levanov I. Rheological Model of a Boundary Layer of Lubricant. Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition Annual, 15-19 May, 2011, Hilton Atlanta, Atlanta, Georgia (USA).

20. Братков, А.А. Теоретические основы химмотологии – М.: Химия, 1985г. - 321 с.

21. Розенберг, Ю.А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин – М.: Машиностроение, 1970г. – 315 с.

22. Mukhortov, I., Zadorojznaya E., Levanov I. Multimolecular adsorption lubricants and its integration in the theory fluid friction. Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition 2013. Detroit Marriott at the Renais-sance Center, Detroit, Michigan,USA. P. 147-149

23. Бондарь, В.В. Технология органических веществ – М.: Химия, 1968г. - 198 с.

24. Виппер, А.Б. Зарубежные масла и присадки /А.Б. Виппер, А.В. Виленкин, Д.А. Гайснер – М.: Химия, 1981 г. - 189 с.

25. Mukchortov, I., Zadorozhnaya, E., Levanov, I., Pochkaylo, K. The influence of poly-molecular ad-sorption on the rheological behaviour of lubricating oil in a thin layer. FME Transactions 2015. 43 (3), pp. 218-222.

26. BoHoon, Kim, Jiechao C. Jiang, Pranesh B. Aswath. 3.Mechanism of wear at extreme load and boundary conditions with ashless anti-wear additives: Analysis of wear surfaces and wear debris. Materials Science and Engineering Department, University of Texas at Arlington, Arlington, TX 76019, United States. Received 26 February 2010, Revised 8 September 2010, Accepted 25 October 2010, Available online 4 November 2010.

27. S.V. Fedorov, 'Energy Balance of Friction and Friction Coefficient in Energetical Interpretation', Tribology in Industry, Vol. 37, No. 3, pp. 380-389, 2015.

28. WANG Yanzhong, WEI Bin, WU Xiangyu, 'Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction', Tribology in Industry, Vol. 34, No. 4, pp. 198-205, 2012

29. Banjac, A. Vencl, S. Otović, 'Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach', Tribology in Industry, Vol. 36, No. 4, pp. 341-347, 2014

30. Кудрин, А.П. Влияние смазочного материала на формирование вторичных структур в условиях неустановившихся режимов трения / А.П. Кудрин, В.И. Маленко, В.Ф. Лабунец // Проблемы трибологии – 2006. – № 1. – С. 158-163.

31. Carlos, M.C.G. Fernandes, Pedro M.P. Amaro, Ramiro C. Martins, Jorge H.O. Seabra. Torque loss in thrust ball bearings lubricated with wind turbine gear oils at constant temperature. Tribology International, Volume 66, October 2013, Pages 194-202.

32. José, A. Brandão, Pedro Cerqueira, Jorge H.O. Seabra, Manuel J.D. Castro. Measurement of mean wear coefficient during gear tests under various operating conditions. Tribology International, Volume 102, October 2016, Pages 61-69.

33. Алтоиз, Б.А. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел/ Б.А. Алтоиз, Е.В. Пыжов, Г.В. Народницкая, С.А. Ханмамедов//Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. 2003. Вып. 9. Одесса: ОНМА. С. 80-86.

34. Q. Yang and T. G. Keith, Jr. Two-Dimensional Piston Ring Lubrication – Part I: Rigid Ring and Liner Solution. Tribology Transactions, Volume 39(1996), The university of Toledo, Department of Mechanical Engineering, Toledo, Ohio 43606.

35. G. Ryk, I. Etsion, Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. Wear 261(2006) 792–796

36. Венцель, С.В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – К.: Техника, 1977. – 208 с.

37. Венцель, С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 240 с.

38. Yeau-Ren Jeng (Member, STLE). Theoretical Analysis of Piston-Ring Lubrication part I – Fully Flooded Lubrication. Transactions, Volume 35(1992), Engine Research Department, General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan 48090-9055

39. Wang Yanzhong, Wei Bin, Wu Xiangyu, Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction, Tribology in Industry. Vol. 34, No. 4(2012) 198–205.

40. Федоров, А.А. Расчет температуры в зоне контакта гильзы цилиндра и верхнего компрессионного кольца дизельного двигателя /А.А Федоров, Д.О. Бытев, В.Г. Новиков, Д.И. Кузнецов - М.: Двигателестроение. 2007. № 3. С. 20-25.

41. Семенов, В.С. Режим смазки пары трения поршневое кольцо- гильза цилиндра ДВС// М.: Двигателестроение -1991.-№10-11.-С.19-23.

42. Bedajangam, S.K. Friction Losses between Piston Ring-Liner Assembly of Internal Combustion Engine: A Review / S.K. Bedajangam, N.P. Jadhavb // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2013. – Vol. 3. – Is. 6,

43. Lenauer, C. Piston ring wear and cylinder liner tribofilm in tribotests with lubricants artificially altered with ethanol combustion products / Claudia Lenauer,

Christian Tomastik, Thomas Wopelka, Martin Jech // Tribology International. – 2015. – Vol. 82. - P. 415-422.

44. Ting, L.L., Mayer, J.E. Piston ring lubrication and cylinder bore wear analysis, part1 –theory. ASME Journal of Lubrication Technology, 1974, pp. 305-314

45. Mishra, P.C. A Review of Piston Compression Ring Tribology / P.C. Mishra // Tribology in Industry. – 2014. -Vol. 36. - № 3. – P. 269–280.

46. Banjac, A. Vencl, S. Otović, 'Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach', Tribology in Industry, Vol. 36, No. 4, pp. 341-347, 2014

47. Felter, C.L..Numerical simulation of piston ring lubrication. / Christian Lotz. Felter // TribologyInternational. – 2008. -Vol. 41. - № 9-10. – P. 914- 919.

48. Путинцев, С.В. Трибометрия поршневых машин: Уч. пособие.- М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.–64с.