

М 491286
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 621.891

Грязин Сергей Витальевич

КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СМАЗКИ С УЧЕТОМ
ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА МАСЕЛ

05.02.02 - Машиноведение и детали машин

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники
РСФСР, доктор технических наук,
профессор Решетов Д.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Коровчинский М.В.
- кандидат технических наук
Широбоков В.В.

Ведущее предприятие - Московский агрегатный завод "Дзержинец"

Защита состоится "26" сентября 1990 г. в 10 часов
на заседании специализированного совета К 053.15.11 в Москов-
ском государственном техническом университете имени Н.Э. Баума-
на "

анская ул., 5.

отакте МТУ

выслать по указан-
лизованного сове-

М 491286

1990 г.

П.К. Попов

6 " июня 1990 г.
вкз. Типография
улица, 5.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы связана с важнейшей задачей промышленности повышения надежности, удельной мощности, качества создаваемых машин, решение которой сопровождается увеличением силовой, скоростной и тепловой нагруженности большинства деталей. Наилучшие условия работы трущихся поверхностей тяжело-нагруженных деталей достигаются в режиме упругогидродинамической смазки, основным рабочим элементом которых является упругогидродинамический контакт – контакт упругих тел, разделенных тонким слоем смазочного материала. Упругогидродинамический режим смазки имеет место в зубчатых передачах, фрикционных вариаторах, подшипниках качения, кулачковых механизмах и других тяжелонагруженных узлах трения современной техники. Трение, износ и работоспособность тяжелонагруженных контактов деталей машин зависят от теплофизических и реологических свойств смазочных материалов, правильности их выбора. Изучение процесса смазки при неизотермическом режиме с учетом взаимосвязей теплофизических и реологических свойств масел с эксплуатационными параметрами узлов трения является актуальным с точки зрения повышения работоспособности тяжелонагруженных деталей машин и механизмов.

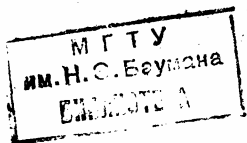
Существующие аналитические и численные решения упругогидродинамических задач смазки не учитывают всей сложности явлений, происходящих во фрикционном контакте. Реологические характеристики смазочных материалов при высоких давлениях, скоростях сдвига и температурах в условиях малых времен приложения нагрузок до сих пор мало изучены и требуют проведения многочисленных трудоемких экспериментов. Известно, что все смазочные материалы обладают предельным напряжением сдвига, о существовании которого впервые предположил А.И. Петрусович. Этот важнейший реологический параметр масел оказывает существенное влияние на работоспособность тяжелонагруженных контактов деталей машин. Однако в настоящее время недостаточное количество экспериментальных исследований по определению предельного напряжения сдвига смазочных материалов приводит к неудовлетворительному моделированию свойств масел в предельно тяжелых условиях контакта, ограничивает возможность реального выбора смазочных материалов в зависимости от условий

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1491286

Грязин С.В. Контактно-гидро



эксплуатации, препятствует развитию упругогидродинамической теории смазки. В связи с этим, для дальнейшего прогресса в области упругогидродинамической теории смазки тяжело нагруженных деталей машин необходимы дальнейшие экспериментальные работы по изучению реологических свойств смазочных материалов в предельно тяжелых условиях контакта, исследования толщины масляной пленки и силы трения с учетом тепловых явлений и реологических свойств смазочных материалов в контакте.

Цель работы: В работе исследуется влияние важнейшей малоизученной реологической характеристики смазочных материалов — предельного напряжения сдвига на смазку тяжело нагруженных контактов деталей машин. В диссертации решались следующие задачи:

1. Создание экспериментальной установки и разработка методики исследования в широком диапазоне температур величины предельного напряжения сдвига различных масел в условиях близких к условиям нахождения масла в реальных упругогидродинамических контактах деталей машин.

2. На основе теоретического решения неизоэнтальпической упругогидродинамической задачи теории смазки с учетом реологических свойств используемых смазочных материалов провести анализ влияния величины предельного напряжения сдвига на толщину масляной пленки и силу трения скольжения в тяжело нагруженном контакте качения со скольжением.

3. Разработать методику расчета параметров упругогидродинамического контакта и дать рекомендации по выбору масел для смазки тяжело нагруженных деталей машин с учетом предельного напряжения сдвига смазочного материала.

Методы исследования. При разработке теоретических положений использованы численные методы решения систем дифференциальных уравнений, теория местных контактных деформаций Герца, теория течения жидкости и теория теплопроводности.

Экспериментальные исследования предельного напряжения сдвига смазочных материалов проведены при кратковременном действии высокого давления методом удара стального шара о плоскую стальную полированную поверхность, смазанную исследуемым образцом масла. Результаты испытаний обработаны статистическими методами.

Научная новизна. Экспериментально исследована величина предельного напряжения сдвига различных смазочных материалов

в широком диапазоне температур при кратковременном действии высокого давления в условиях близких условиям нахождения масла в упругогидродинимических контактах тяжело нагруженных деталей машин. По результатам экспериментальных данных установлена зависимость предельного напряжения сдвига смазочных жидкостей от давления и температуры.

Решена неизотермическая упругогидродинимическая задача смазки тяжело нагруженных деталей машин при качении со скольжением с учетом теплофизических и реологических свойств смазочных материалов. Показано совместное влияние предельного напряжения сдвига смазочных жидкостей и тепловых процессов на толщину масляной пленки и силу трения скольжения в тяжело нагруженном смазанном контакте качения со скольжением. Представлена взаимосвязь между коэффициентом трения скольжения и предельным напряжением сдвига смазочного материала в упругогидродинимическом контакте.

Практическая ценность и реализация работы. Разработана методика определения величины предельного напряжения сдвига смазочных материалов при различных температурах.

Предложена методика неизотермического расчета толщины смазочного слоя и силы трения скольжения в тяжело нагруженных контактах качения со скольжением с учетом предельного напряжения сдвига смазочного материала. Получены формулы для расчета коэффициента трения скольжения и температуры в смазочном слое, необходимые при расчете на трение и работоспособность зубчатых и фрикционных передач, подшипников качения, кулачковых механизмов и других тяжело нагруженных узлов трения. Даны рекомендации по выбору смазочных материалов для смазки тяжело нагруженных контактов качения со скольжением в зависимости от величины предельного напряжения сдвига.

Результаты исследований внедрены в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах на Московском агрегатном заводе "Дзержинец".

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 49й Московской научно-технической конференции "Триботехника - машиностроению" (Москва, 1989). Работа полностью доложена и обсуждена на кафедре "Детали машин" МГТУ имени Н.Э. Баумана в 1990 году.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы две печатные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 157 наименований и приложения. Работа изложена на 139 страницах, имеет 28 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан краткий обзор теоретических и экспериментальных работ по теме исследований, изложено современное состояние развития упругогидродинимической теории смазки, основы которой в 40^х годах разработаны А.И.Петрусевичем, А.М.Эртелем, А.Н.Грубиным и в дальнейшем развиты в работах советских ученых П.Л.Капицы, М.В.Коровчинского, Д.С.Коднира, Ю.Н.Дроздова, М.А.Галахова, М.В.Райко, В.В.Широбокова, Д.Л.Бакшвили, А.С.Райкова, А.Н.Бурмистрова, В.П.Ковалева, И.И.Кудиша, А.П.Кириллова, а также за рубежом Круком, Даусоном, Камероном, Кеннелом, Чентом и другими исследователями.

Главное внимание уделено теоретическим и экспериментальным исследованиям толщины смазочного слоя и силы трения скольжения, в которых показано, что толщина смазочного слоя формируется во входной зоне упругогидродинимического контакта, где давление относительно мало, а сила трения скольжения определяется областью высокого давления, распределение которого в зоне контакта близко к герцевскому. Анализ работ показал, что на толщину масляной пленки и трение скольжения в упругогидродинимическом контакте деталей машин решающее значение оказывает тепловыделение в зоне трения и реологические свойства смазочных материалов, которые под действием высоких контактных давлений, температур и скоростей сдвига отклоняются от ньютоновского характера течения смазочной жидкости, проявляя свойства твердого пластичного тела, характеризуемого предельным напряжением сдвига. Впервые предположение о существовании предельного напряжения сдвига у смазочных материалов выдвинуто в СССР А.И.Петрусевичем. Значительно позднее к этой гипотезе за рубежом пришли Смит, Плинт, Джонсон, Камерон и другие.

Зарубежными учеными Баэром, Винером, Якобсоном и другими

исследователями установлено, что величина предельного напряжения сдвига τ_L зависит от типа смазочного материала, давления, температуры, при атмосферном давлении оно мало (обычно не превышает 1...5 МПа) и возрастает пропорционально давлению:

$$\tau_L = \tau_{L0} + \gamma p, \quad (I)$$

где τ_{L0} - предельное напряжение сдвига при атмосферном давлении, γ - коэффициент пропорциональности между предельным напряжением сдвига масла и давлением. В дальнейших исследованиях Бэйр и Винер установили, что величина предельного напряжения сдвига масла также зависит от специфических условий нахождения масла в контакте, где оно подвергается сжатию в течение короткого промежутка времени (порядка 10^{-3} ... 10^{-5} с). Для изотермических условий установлено, что предельное напряжение сдвига масла во многом определяет силу трения, а достижение его во входной зоне упругогидродинамического контакта приводит к снижению толщины масляной пленки.

Анализ опубликованных работ показал, что несмотря на актуальность учета предельного напряжения сдвига масла при решении упругогидродинамических задач смазки, этот важнейший реологический параметр смазочных материалов до сих пор остается малоизученным. Недостаток экспериментальных работ в этой области приводит к неудовлетворительному моделированию поведения смазочных материалов в предельно тяжелых условиях упругогидродинамического контакта, препятствует развитию упругогидродинамической теории смазки.

Во второй главе разработана методика экспериментального исследования величины предельного напряжения сдвига смазочных материалов при кратковременном воздействии высоким давлением.

Экспериментальные исследования величины предельного напряжения сдвига проведены методом предложенным шведским ученым Б. Якобсоном, при котором исследуемый образец масла сжимался во время удара стального шара о смазанную плоскую горизонтальную поверхность. В этом случае условия и время сжатия масла близки к условиям нахождения масла в упругогидродинамических контактах деталей машин.

В отличие от исследований Б. Якобсона разработана конструкция импульсного реометра, позволяющая проводить измерения предельного напряжения сдвига масел при различных темпе-

ратурах (рис. 1). Длительность сжатия масла составляла около 133 мкс, а максимальное давление по Герпу достигало 5,7 ГПа. По данным зарубежных исследований уже при давлении около 2 ГПа масло переходит в твердое пластичное состояние не более чем за 5 мкс, и скорость скольжения необходимая для достижения предельного напряжения сдвига ничтожно мала. Таким образом в экспериментах напряжения сдвига смазочного материала, сжатого во время удара между шаром и плоскостью, достигало предельного значения практически на всей площади контакта. При падении в тележке (2) шар (1) не вращался, но в процессе удара под углом, заданным наклоном направляющих (3), под воздействием напряжений сдвига масляной пленки достигающих предельного значения, шар начинает вращаться. Изменяя величину горизонтальной составляющей скорости шара в начале удара, находился такой угол наклона направляющих β_0 , при котором шар под воздействием предельного напряжения сдвига смазочного материала переходит в чистое качение, то есть абсолютная скорость его нижней точки равна нулю. Условие чистого качения фиксировалось по импульсу передаваемому второй горизонтальной плоской поверхности тележки (6), свободно перемещающейся в горизонтальном направлении. Величина импульса измерялась на экране запоминающего осциллографа (9), на который поступал усиленный сигнал от индуктивного датчика (7), фиксирующего перемещение тележки (6) при падении на нее шара отскочившего после удара о первую смазанную исследуемым образцом масла горизонтальную поверхность. По величине угла β_0 определялся коэффициент пропорциональности между предельным напряжением сдвига смазочного материала и давлением f .

Эксперименты по определению величины коэффициента f проводились при различных температурах. Для этого шар и съемная плоская стальная плита, на которую наносился слой смазочного материала, прогревались в термостате до заданной температуры. Время требуемое для установки прогретой плиты и проведения эксперимента не превышало нескольких секунд, поэтому падения температуры поверхностей нагретых тел не происходило, что подтверждалось показаниями бесконтактного термометра производства WILMER.

Проведенные в широком диапазоне температур исследования величины коэффициента пропорциональности между предельным напряжением сдвига и давлением различных смазочных материалов

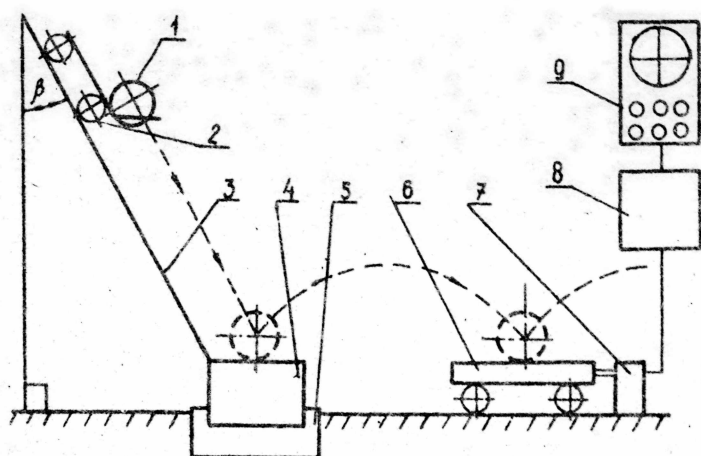


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1 - шар; 2 - тележка для разгона шара; 3 - наклонные направляющие; 4 - съемная плоская плита; 5 - массивное основание; 6 - тележка, свободно перемещающаяся в горизонтальном направлении; 7 - датчик импульса; 8 - усилитель сигнала; 9 - запоминающий осциллограф

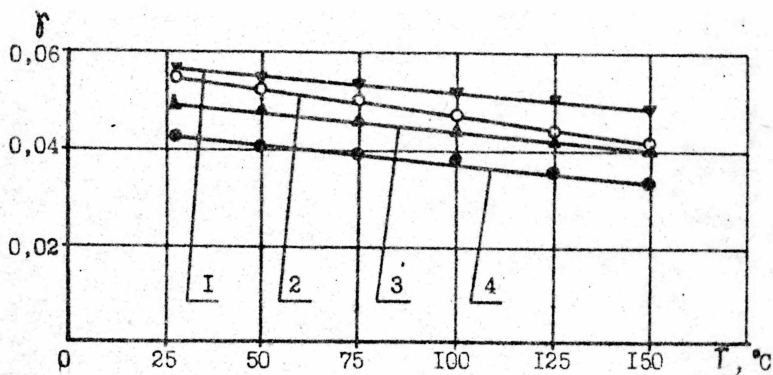


Рис. 2. Зависимость коэффициента предельного напряжения сдвига от температуры для различных масел:

1 - Б-3В; 2 - МС-20; 3 - МТ-16л; 4 - ТСЭп-8

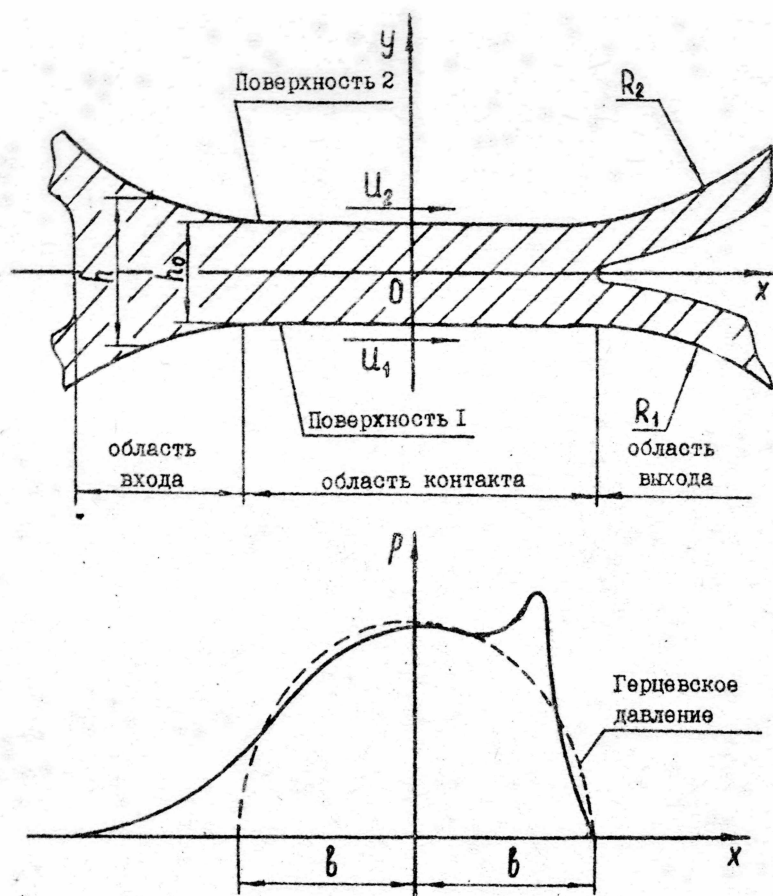


Рис. 3. Схема линейного упругогидродинамического контакта

показали, что величина коэффициента γ линейно убывает с увеличением температуры (рис. 2). На основании полученных экспериментальных данных получена зависимость, описывающая предельное напряжение сдвига как функция давления и температуры:

$$\tau_L = (\tau_{L0} + \gamma_0 p) [1 - \varepsilon (T - T_0)], \quad (2)$$

где γ_0 - коэффициент пропорциональности между предельным напряжением сдвига и давлением при температуре T_0 ; ε - температурный коэффициент предельного напряжения сдвига. В таблице для исследуемых масел представлены значения коэффициентов предельного напряжения сдвига γ и ε , полученные при кратковременном действии высокого давления.

Таблица

Коэффициенты предельного напряжения сдвига масел

Масло	γ при $T_0 = 27^\circ\text{C}$	$\varepsilon, 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
МС-20	0,0546	2,0
МТ-16п	0,0496	1,6
ТСЗп-8	0,0425	1,8
Б-3В	0,0568	1,9

В третьей главе разработана методика неизотермического расчета толщины смазочного слоя в линейном упругогидродинамическом контакте качения со скольжением с учетом предельного напряжения сдвига смазочного материала.

Схема упругогидродинамического контакта цилиндрических тел, поверхности которых движутся со скоростью U_1 и U_2 и имеют температуру T_0 , показана на рисунке 3. В расчете учитывалось, что касательное напряжение смазочного материала не может превышать предельного значения τ_L , при меньших значениях которого смазочная жидкость ведет себя как ньютоновская, то есть

$$\tau = \mu(p, T) \frac{\partial u}{\partial y} \leq \tau_L(p, T), \quad (3)$$

где $\tau_L(p, T)$ - предельное напряжение сдвига, описывается зависимостью (2), полученной на основании экспериментальных данных; $\mu(p, T)$ - вязкость смазочного материала, $\mu(p, T) = \mu_0 \cdot e^{\alpha p - \delta(T - T_0)}$; μ_0 - вязкость при атмосферном давлении и температуре T_0 , α - пьезокоэффициент вязкости, δ - температурный коэффициент вязкости. Реологическое уравнение (3) решалось совместно с уравнением равновесия сил

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (4)$$

и уравнением энергии

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + W = 0 \quad (5)$$

с граничными условиями

$$T = T_0, \quad u = U_1 \text{ при } y = -h/2 \text{ и } T = T_0, \quad u = U_2 \text{ при } y = h/2, \quad (6)$$

где K - коэффициент теплопроводности масла; W - энергия, диссипируемая в виде тепла благодаря вязкости, принималась постоянной по толщине смазочного слоя.

Упругие деформации контактирующих тел принимались согласно методу Эртеля и Грубина, и толщина масляной пленки в зоне входа в упругогидродинамический контакт определялась по формуле

$$h = h_0 + \frac{\delta^2}{2R'} \left\{ \frac{x}{\delta} \left[\left(\frac{x}{\delta} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} - \ln \left[\frac{x}{\delta} \left[\left(\frac{x}{\delta} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right] \right\}, \quad (7)$$

где δ - полуширина линейного контакта по Герцу; R' - приведенный радиус кривизны поверхностей контактирующих тел; h_0 - толщина масляной пленки в центре упругогидродинамического контакта.

Интегрирование уравнения (3) с граничными условиями (6) дает уравнение движения

$$u(y) = U_1 + \int_{-h/2}^y \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (8)$$

и уравнение неразрывности

$$Q = \int_{-h/2}^{+h/2} u(y) dy = \frac{U_1 + U_2}{2} h_0, \quad (9)$$

где Q - объемный расход смазочного материала на единицу

ширины упругогидродинамического контакта.

Система уравнений (3)...(9) описывает течение смазочного материала во входной зоне упругогидродинамического контакта, для совместного решения которых разработан комплекс прикладных программ для ЕС ЭМ, позволяющих рассчитывать распределение касательных напряжений и эпюру давления во входной зоне упругогидродинамического контакта. За рабочую толщину масляной пленки принималось такое значение h_0 , при котором давление на входе в упругогидродинамический контакт достигает большого значения.

На основании экспериментальных данных о величине предельного напряжения сдвига смазочных материалов проведены сравнения результатов расчета толщины масляной пленки с измеренными значениями на роликовых машинах трения различными исследователями. В области небольших скоростей скольжения получено хорошее согласие с экспериментальными данными как при низких, так и при высоких скоростях качения. Однако с увеличением скорости скольжения расхождение увеличивается, измеренные значения толщины смазочного слоя оказываются меньше вычисленных теоретически. Анализ экспериментально измеренных величин предельного напряжения сдвига минеральных и синтетических масел МС-20, МТ-16п, ТСЗп-8, Б-3В широко применяемых на практике для смазки тяжело-нагруженных контактов деталей машин показал, что толщина смазочной пленки в упругогидродинамических контактах деталей машин формируется во входной зоне за счет ньютоновских свойств этих масел. Причиной снижения толщины смазочного слоя при высоких скоростях скольжения является не низкое значение величины предельного напряжения сдвига масел, а тепловые процессы, приводящие к снижению вязкости масел. Установлено, что скорость скольжения оказывает не столь значительный вклад в образование тепла в зоне входа, чтобы уменьшить толщину масляной пленки до хорошего согласия с экспериментальными данными. При наличии скольжения большое тепловыделение происходит в зоне контакта, где в результате высокого давления возникают значительные силы трения скольжения, приводящие к дополнительному прогреву масла и снижению вязкости в области входа в результате нагрева поверхностей трения. Показано, что дальнейшее развитие упругогидродинамической теории смазки необходимо вести с учетом тепловыделения не только в области входа, но и в зоне упругогидродинамического контакта.

В результате теоретических исследований показано влияние

величины предельного напряжения сдвига масла на толщину смазочного слоя. Установлено, что при снижении предельного напряжения сдвига ниже определенной величины, зависящей от типа масла, кинематических и силовых условий нагружения, происходит снижение толщины смазочного слоя. Это объясняется тем, что вследствие низкого предельного напряжения сдвига во входной зоне упругогидродинамического контакта смазочный материал входит в зону контакта в ограниченном количестве. Показано, что повышение вязкости масла в этом случае приводит к ухудшению условий смазки, поэтому применение высоковязких жидкостей с низкими предельным напряжением сдвига (к ним относятся некоторые полиэтилсилоксановые жидкости) для смазки тяжело нагруженных контактов деталей машин является неэффективным. Этот вывод подтверждается исследованиями различных ученых, в которых экспериментально установлена ограниченность применения полиэтилсилоксановых масел для смазки тяжело нагруженных узлов трения качения со скольжением.

В четвертой главе разработана методика расчета силы трения скольжения в линейном упругогидродинамическом контакте качения со скольжением с учетом предельного напряжения сдвига смазочного материала и тепловых процессов в контакте.

Известно, что трение скольжения определяется областью высокого давления, распределение которого в зоне упругогидродинамического контакта близко к герцевскому. Поэтому при анализе сил трения скольжения введен ряд допущений, незначительно влияющих на результаты расчетов: смазочная жидкость является несжимаемой; распределение давления в зоне контакта имеет герцеву форму и не меняется поперек смазочной пленки, толщина которой постоянна; относительная скорость скольжения $2(U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$ поверхностей контактирующих тел достаточно велика (свыше 1%), так что вклады в трение от входной и выходной зон пренебрежимо малы по сравнению с трением в зоне контакта, где давления велики; тепловыделение в контакте происходит в основном за счет нагрева при сдвиге, а теплопередача идет в значительной мере поперек смазочной пленки, уравнение энергии примет вид

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \tau \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

с граничными условиями: $T = T_0$, $u = U_1$ при $y = -h_0/2$ и $T = T_0$, $u = U_2$ при $y = h_0/2$.

При напряжениях сдвига меньших предельного значения смазочная жидкость ведет себя как ньютоновская, то есть

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\tau}{\mu(p, T)} \quad (II)$$

В этом случае, полагая величину τ постоянной поперек смазочной пленки, касательное напряжение при ньютоновском поведении смазочного материала с достаточной точностью определяется из совместного решения уравнений (IO) и (II).

Если напряжение сдвига смазочного материала достигает предельного значения, жидкость перестает вести себя как ньютоновская и начинает проявлять свойства твердого пластичного тела, прочность которого при сдвиге оценивается предельным напряжением. Экспериментально установлено, что величина предельного напряжения сдвига зависит от температуры, которая в свою очередь может изменяться в зоне контакта до сотен градусов, значительно влияя на величину τ_L . В этом случае предполагалось, чем ниже прочность смазочного материала, при сдвиге перешедшего в состояние твердого пластичного тела, тем больше скорость сдвига, то есть градиент скорости обратно пропорционален предельному напряжению сдвига:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{C}{\tau_L(p, T)} \quad (I2)$$

где C - коэффициент пропорциональности.

Из совместного решения уравнений (2), (IO), (I2), полагая коэффициент C величиной постоянной, предельное напряжение трения в исследуемом сечении контакта определяется по формуле

$$\tau = \tau_L(y=0) = (\tau_{L0} + f_0 p) \left(1 - \frac{\varepsilon C h_0^2}{8K} \right) \quad (I3)$$

Величина коэффициента C находится из уравнения

$$A = \sqrt{B} \operatorname{arctg} \sqrt{B} \quad (I4)$$

где A и B - безразмерные параметры, $A = \varepsilon \tau_{L0} h_0 u_{ck} / 8K$,
 $B = \varepsilon C h_0^2 / (8K - \varepsilon C h_0^2)$; τ_{L0} - предельное напряжение сдвига смазочного материала при давлении p и температуре T_0 , $\tau_{L0} = \tau_{L0} + f_0 p$;
 u_{ck} - скорость скольжения, $u_x = u_2 - u_1$.

Зная распределение касательных напряжений в зоне упруго-

гидродинамического контакта, коэффициент трения скольжения вычислялся по формуле

$$f = \frac{1}{q} \int_{-8}^{+8} \tau dx, \quad (15)$$

где q - нагрузка на единицу длины контакта.

Трение скольжения по приведенной методике рассчитывали на ЭМ. Зависимость вязкости от давления и температуры принимали по формуле Роландса, дающей значительное повышение точности расчета вязкости в широком диапазоне температур и давлений. Получено хорошее согласие расчетных величин коэффициента трения скольжения с экспериментальными значениями, полученными различными исследователями на роликовых машинах трения в широком диапазоне скоростей качения и скольжения.

Проведен анализ величины касательного напряжения смазочного материала в зоне упругогидродинамических контактов. Установлено, что при больших контактных давлениях по Герцу (свыше 10^2 МПа) и начиная со скорости скольжения соответствующей области максимального коэффициента трения, напряжения сдвига достигают предельного значения почти на всей площади контакта. Таким образом в тяжелонагруженном упругогидродинамическом контакте коэффициент трения скольжения определяется величиной предельного напряжения сдвига смазочного материала. Этот вывод особенно важен при выборе и разработке новых масел для фрикционных бесступенчатых передач, где величина предельного напряжения сдвига смазочного материала определяет тяговое усилие в контакте. Поэтому для смазки фрикционных передач следует отдавать предпочтение маслу с наибольшим предельным напряжением сдвига.

Получена формула для расчета коэффициента трения скольжения в тяжелонагруженном линейном упругогидродинамическом контакте, учитывающая величину предельного напряжения сдвига смазочного материала и тепловые процессы в контакте

$$f = \frac{1,27 \bar{\tau}_{LPO}}{p_0 \cdot ch \sqrt{\bar{\tau}_{LPO} \cdot \varepsilon \cdot u_{CK} \cdot h_0 / 4K}}, \quad (16)$$

где $\bar{\tau}_{LPO}$ - предельное напряжение сдвига смазочного материала при среднем герцевском давлении $p = \pi p_0 / 4$ и температуре T_0 ; p_0 - максимальное давление по Герцу. Формула применима при

больших контактных давлениях (свыше 10^2 МПа по Герцу) и скоростях скольжения, больших соответствующих максимальному значению коэффициента трения. Результаты расчета коэффициента трения скольжения для минеральных масел по полученной формуле хорошо согласуются с расчетами по экспериментальной зависимости Ю.Н.Дроздова.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментальная установка и методика определения величины предельного напряжения сдвига масел — одного из важных малоизученных свойств смазочных материалов. Установлено, что величина предельного напряжения сдвига масел уменьшается линейно с увеличением температуры. На основании экспериментальных данных получена зависимость величины предельного напряжения сдвига смазочных материалов от давления и температуры.

2. На основании решения линейной упругогидродинамической задачи разработана методика неизотермического анализа толщины смазочного слоя с учетом предельного напряжения сдвига масел. Изучено влияние величины предельного напряжения сдвига на толщину масляной пленки. Установлено, что при снижении предельного напряжения сдвига ниже определенной величины, зависящей от типа масла, кинематических и силовых условий нагружения, происходит снижение толщины смазочного слоя. Показана ограниченность применения полиэтилсилоксановых жидкостей для смазки тяжелонагруженных контактов деталей машин, так как вследствие их чрезвычайно низкого предельного напряжения сдвига смазочный материал не может войти в зону контакта, чтобы обеспечить формирование смазочного слоя достаточной толщины.

3. Установлено, что при смазке тяжелонагруженных контактов деталей машин обычно применяемых на практике маслами (на примере минеральных и синтетических масел МС-20, МТ-16п, ТСЗп-8, Б-3В) толщина смазочного слоя формируется во входной зоне упругогидродинамического контакта за счет ньютоновских свойств масел. Величина предельного напряжения сдвига этих масел во входной зоне контакта практически не влияет на формирование толщины смазочного слоя.

4. Дан анализ уравнений упругогидродинамической теории смазки для определения сил трения в линейном контакте. Предложена формула для расчета силы трения скольжения в линейном упругогидродинамическом контакте качения со скольжением с учетом тепловых процессов и предельного напряжения сдвига смазочного материала. Теоретические значения коэффициентов трения скольжения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

5. Установлено, что сила трения скольжения при больших контактных давлениях определяется величиной предельного напряжения сдвига смазочного материала. Таким образом, для бесступенчатых фрикционных передач, где требуется наибольший коэффициент трения, следует применять масло с наибольшим предельным напряжением сдвига.

6. Даны рекомендации по выбору смазочных материалов для смазки тяжело нагруженных контактов качения со скольжением в зависимости от величины предельного напряжения сдвига, необходимые при расчете на трение и работоспособность зубчатых и фрикционных передач, подшипников качения, кулачковых механизмов и других тяжело нагруженных узлов трения.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Решетов Д.Н., Грязин С.В. Исследование предельных напряжений сдвига смазочных материалов при импульсном нагружении высоким давлением // Известия высших учебных заведений СССР. Машиностроение. - 1990. - № 1. - С. 30-34.

2. Решетов Д.Н., Грязин С.В. Оценка сил трения с учетом предельного напряжения сдвига в смазочном материале // Вестник машиностроения. - 1990. - № 3. - С. 8-10.

