

УДК 621.891

А.Ф.Аксёнов, А.У.Стельмах, К.К.Бадир
Национальный авиационный университет**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ГИПОТЕЗЫ
КОМПРЕССИОННО- ВАКУУМНОГО МЕХАНИЗМА ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ**

В статье показано, что в зоне контакта модельной трибосистемы скольжения «вал – контртело» по обе стороны контакта возникают характерные области: на входе вала в контакт, т.е. в конфузорной области происходит повышение давления, а на выходе вала из контакта, т.е. в диффузорной его области - понижение давления относительно давления окружающей среды. Эти перепады давления приводят к возникновению вторичных струйных течений среды, направленных против направления вращения вала. Показано, что с повышением вязкости среды, увеличением скорости скольжения и осевой нагрузки возрастает степень сжатия и растяжения граничных слоев среды в соответствующих конфузорной и диффузорной областях контакта, к увеличению интенсивности вторичных обратных течений, что в свою очередь приводит к увеличению силы трения. Показано, что в диффузорных областях трибоконтактов возможно понижение местного давления в смазочной среде до значений, близких и меньших давлений порога кавитации, что приводит к кавитации и её следует рассматривать, как явление трибокавитации. Представленные результаты исследований компрессионно-вакуумного механизма трения позволяют по-новому подойти к решению проблем трения и изнашивания трибосистем.

Ключевые слова: трение, изнашивание, трибосистема, трибоконтакт, сила трения, диффузорная и конфузорная области, трибокавитация, компрессионно-вакуумный механизм, вторичные контактные течения.

Вступ. Современная трибология имеет три основных раздела, основу которых составили соответствующие гипотезы и представления о природе трения [1-7]:

1. Бесконтактное и практически безыносное гидродинамическое трение подшипников скольжения, представляемое в рамках известной теории смазки Н.П.Петрова и его последователей [1-3]. В этом режиме коэффициент трения скольжения имеет значения 0,01-0,001, иногда до 0,0001, а сила трения записывается в виде

$$F = \frac{\eta v S}{\varepsilon + \frac{\eta}{\lambda_1} + \frac{\eta}{\lambda_2}}, \quad (1)$$

где S – площадь поверхности трения, v – линейная скорость вращения вала, η – вязкость смазочного масла, ε – зазор между валом и подшипником, а λ_1 и λ_2 – коэффициенты. Полагая, что коэффициенты внешнего трения на границах смазочной плёнки и металлических поверхностей вала и подшипника λ_1 и λ_2 обычно велики, формула силы трения принимает вид,

$$F = \frac{\eta v S}{\varepsilon} \quad (2)$$

который широко используется на практике для подшипников скольжения при больших скоростях и малых нагрузках.

Использование формулы (2) имеет трудности в определении площади поверхностей трения и толщины смазочного слоя, так как они не имеют четкого очертания контура в плоскости трения. Кроме этого она не учитывает осевую нагрузку, при увеличении которой, как известно сопротивление движению возрастает. Влияние контактных течений граничных слоёв, вызванные градиентом давлений в контакте, не рассматривается. При увеличении силы сжатия поверхностей, трибосистема переходит в более нагруженный режим контактно-гидродинамического трения.

2. Контактное и теоретически безыносное эластогидродинамическое трение объясняют с позиций контактно-гидродинамической теории смазки А.И.Петрусевич, А.М.Эртель, А.Н.Грубин и др. [4-6]. Путём совместного решения гидродинамической и упругодеформационной задач взаимодействия среды и поверхностей трибоконтакта, с учетом реологических

термодинамических процессов, протекающих в среде, были получены формулы для силы трения и других параметров трибосистем. Эти зависимости оказались настолько громоздкими, что в практике конструкторско-инженерных расчетов они не используются. Коэффициент трения реальных трибосистем на один два порядка больше расчетных и достигают значений 0,01-0,1, что характерно для следующего еще более нагруженного режима - трение в условиях граничной смазки. При этом поверхности хоть и с очень малой интенсивностью, но изнашиваются, особенно в пуско-остановочных циклах эксплуатации машин.

3. Трение в условиях граничной смазки, сопровождающееся интенсивным изнашиванием поверхностей - самый распространённый в технике режим контактного взаимодействия поверхностей твёрдых тел, находящихся в относительном движении. Современная трибология граничной смазки основана на ряде законов, гипотез и теорий граничного трения, построенных на базе соответствующих предположений. Среди хорошо аргументированных теорий [7-8], наибольшего признания и распространения получила адгезионно-деформационная теория И.В.Крагельского, в соответствии с которой макросила трения ($F_{тр}$) включает в себя две основные составляющие: механическую, или деформационную ($F_{деф}$) и молекулярную, или адгезионную ($F_{адг}$):

$$F_{тр} = F_{деф} + F_{адг}. \quad (3)$$

Исследования соотношения адгезионной и деформационной составляющих силы трения показали, что в условиях граничной смазки отношение $F_{адг} / F_{деф}$ по Гарди В. [7] равно 10000, а по данным Крагельского И.В. [8], составляет 100. Поэтому считается, что доминирующим при трении в условиях граничной смазки является взаимодействие рабочих поверхностей на молекулярном уровне. Изнашивание материала поверхностей трения, как известно, есть следствием их адгезионного взаимодействия (образование и разрушение «мостиков сварки» [8]), поэтому режим трения в условиях граничной смазки следует определять, как процесс трибоадгезии. При этом контактные гидродинамические течения граничных слоёв смазки, которые могут приводить к дополнительному сопротивлению движению не учитывают, так как полагают, что граничные слои смазки между сжатыми поверхностями твёрдых тел представляют собой некое «третье тело», имеющее свойства стеклоподобного твёрдого тела. Поэтому течения граничных слоёв в контакте при трении в условиях граничной смазки не рассматривались в принципе.

Сравнительно недавние фундаментальные исследования пристенных слоёв смазочной среды привели Дерягина Б.В., Поповского Ю.М. и Алтоиза Б.А. к научному открытию [9], где доказано, что эти структуры являются гомеотропно высокоориентированными эпитропно-жидкокристаллическими (ЭЖК) слоями смазки. В цикле работ профессора Алтоиза Б.А., в частности в работе [10], представлены экспериментальные данные о ЭЖК слоях ряда углеводородных жидкостей, где показано, что их вязкость существенно превышает объёмную, а измеренная их равновесная толщина составляет от 20нм до микрометров.

Анализируя современное состояние трибологии, Ю.М.Лужнов в монографии [11] подчеркивает, что «ввиду сложности процессов, формирующих трение, в настоящее время нет пока единого мнения о его природе». На сегодняшний день трение и изнашивание рассматриваются с позиций разрозненных положений и представлений о самой природе трения.

Теоретические разработки в трибологии, результаты которых могли бы стать общими и объединяющими все разделы науки о трении и изнашивании отсутствуют. При этом экспериментальные исследования постоянно сопровождаются появлением нового фактического материала [12], который не находит объяснений с позиций известных теорий трения и изнашивания. Так, при трении скольжения поверхностей твёрдых тел трибосистем с линейным контактом:

- по направлению скольжения вала образование следов трибоадгезии материала в виде вырывов, каверн и кратеров, как правило, наблюдается в подшипнике или образце в области выхода вала из контакта, а в области его вхождения в контакт образуются лишь риски в виде царапин;

- частицы изношенного материала в основном скапливаются на неподвижной поверхности, в области входа вала в контакт, на небольшом удалении от него.

Обнаруживается противоречие: при кратковременном трении скольжения полированных поверхностей основной признак действия адгезионной составляющей силы трения – изнашивание

практически отсутствует, а коэффициент трения достигает значений 0,15, где, исходя из молекулярно-деформационной теории, её адгезионная составляющая в сто раз больше других слагаемых. То есть представление адгезионной составляющей макросилы трения в виде превалирующей (99% от всех потерь на трение в условиях граничной смазки), вызывает сомнение.

Гидродинамический эффект при трении в подшипниках скольжения и фундаментальная в трибологии граничной смазки закономерность образования оптимальной шероховатости, также трактуются по-разному.

Известные экспериментальные факты и теории современной трибологии часто входят в противоречие. Поэтому во всем мире продолжается разработка новых гипотез и положений, устраняющих недостатки существующих. В научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий национального авиационного университета под руководством чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., профессора Аксёнова А.Ф. с 1960 года ведутся исследования трибосистем в условиях граничной смазки и поиск явлений и закономерностей, способных по-новому объяснить феномен природы - трение. В 2008 году была выдвинута гипотеза о компрессионно-вакуумной природе трения [12], которая нашла своё первичное экспериментальное подтверждение и требовала более аргументированных доказательств, часть из которых представлена в работе [13].

Конструкция стенда. Были разработаны и созданы оригинальные лабораторные машины трения одностороннего скольжения с линейным контактом (рис.1), реализующие оптически прозрачный контакт. Предусмотрена возможность изменения скорости скольжения и осевой нагрузки сжатия трущихся поверхностей, что позволяет реализовывать основные режимы трения (гидро-, эластогидродинамический и трение в условиях граничной смазки).

В качестве вращающегося контртела, моделирующего вал, использовался фторопластовый ролик (наружный диаметр – 80мм, ширина ролика – 9 мм), а плоский неподвижный параллелепипед был изготовлен из оптически прозрачного материала (неориентированное органическое стекло).

В среде атмосферного воздуха, без смазки, при сжатии поверхность образующей цилиндр ролика с плоской гранью прозрачного параллелепипеда образует линейный контакт в форме узкого прямоугольника. Длина зоны такого контакта соответствует ширине ролика 9мм, а её ширина при осевой силе сжатия 4 Н около 0,7 мм, и при 40 Н - около 0,8 мм.

В качестве основной модельной смазочной среды использовался авиационный керосин ТС-1, как прозрачная, маловязкая среда, исключаяющая при трении скольжения на малых скоростях (0,2...0,8м/с) и малых нагрузках (1...10Н) возникновение режима гидродинамического бесконтактного трения.

Условия экспериментов варьировались: линейные скорости скольжения плавно изменялись от 0,2 до 0,9 м/с, осевая нагрузка изменялась в диапазоне от 4 до 200 Н. После установления линейного контакта вокруг него образовалось симметричное относительно линии контакта пятно керосина за счет смачивания им поверхностей (рис.1).

Шероховатость рабочей поверхности ролика в первых поисковых [12] экспериментах составляла нанометровые величины ($R_a < 20\text{нм}$). В последующих опытах, в силу принципиального влияния шероховатости на изучаемые процессы [13], она формировалась в более широком и технически реализуемом в промышленности, диапазоне ($R_a < 0,8\text{мкм}$).

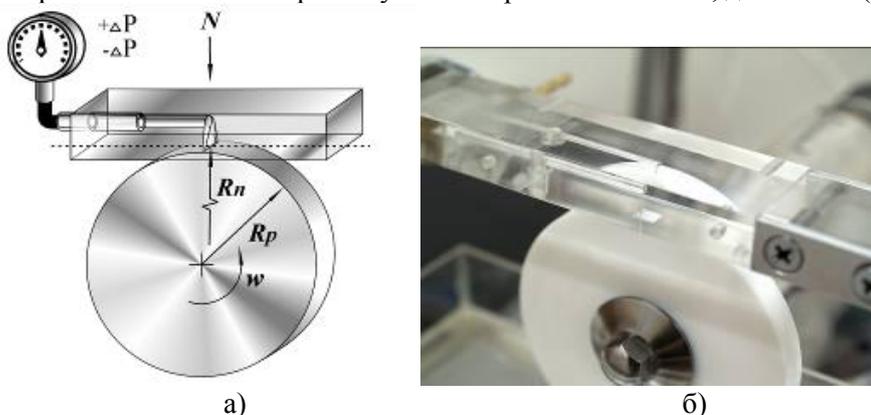


Рис.1. Схема машины трения скольжения с верхним положением контакта (а) и возникновение линейного контакта, смазанного керосином, видимое через боковую грань параллелепипеда (б)

Визуальные явления. При включении привода, ролик приводился во вращение. Поверхность цилиндра при трении скольжения по нижней плоской грани прозрачного параллелепипеда ориентирована в перпендикулярном линейному контакту направлении. Наблюдение за поведением керосина, вносимого роликом в зону контакта, при определённом освещении, позволило выявить регулярное и закономерное поведение слоя керосина одновременно в двух направлениях: через боковую и верхнюю грани прозрачного параллелепипеда (рис.2).

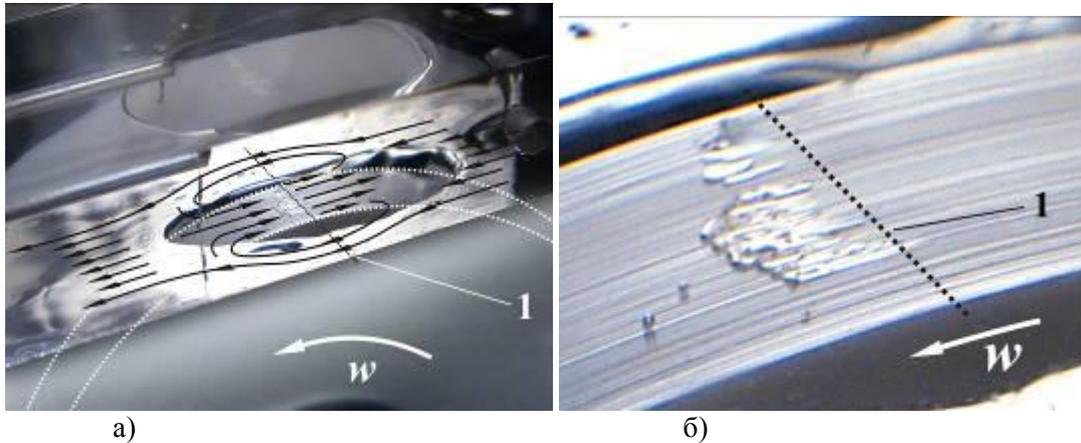


Рис.2. Линии тока жидкости в контактной зоне при трении скольжения ролика по плоской грани параллелепипеда (а) и образование кавитационных полостей и пузырей в диффузорной области линейного контакта (б), где 1 – средняя линия контакта поверхностей

Подхватываемые роликом достаточно толстые слои керосина доставлялись в зону контакта, по краям его начиналось обтекание препятствия, образованного собственно контактом, затем на поверхности неподвижной призмы эти макротоки смыкались за контактом. При этом одновременно наблюдалось смещение всего пятна смачивания в сторону, обратную направлению скольжения. После установления постоянной скорости вращения, при подсветке зоны контакта под определённым углом, визуально наблюдалось весьма интенсивное непрерывное струйное истечение керосина из зоны контакта в области входа ролика в контакт с нижней поверхностью параллелепипеда в направлении обратном вращению. На выходе же рабочей поверхности ролика из контакта визуально наблюдалось также интенсивное и непрерывное течение керосина из смачивающей поверхность призмы объёма керосина - в контакт, то есть также в обратном скольжению направлении. Линии тока керосина при скольжении показаны на рис.2, а.

Увеличение скорости скольжения ролика по поверхности параллелепипеда приводило к большему смещению контактного пятна керосина в сторону, обратную направлению вращения. При этом наблюдаемые неоднородности течения керосина «из контакта» в области входа ролика в контакт, и «в контакт» в области выхода ролика из контакта становились более интенсивными. То же происходило и при увеличении нагрузки при постоянной скорости скольжения.

При плавном доведении скорости скольжения до 0,3 м/с, в зоне выхода ролика из контакта в слоях керосина наблюдалось появление газовых пузырьков, которые двигались в направлении скольжения, они выносились движущейся поверхностью образующей ролика, на расстояние порядка 5 мм от контакта и затем исчезали. Движение образующихся газовых пузырьков (рис.2, б) около контакта происходило против струйного течения керосина, направленного «в контакт» против движения ролика. Эти пузырьки зарождались беспорядочно по всей ширине линейного контакта вследствие кавитации керосина. Для керосина ТС-1 при температуре 20⁰С, давление паров, находящихся в состоянии динамического равновесия с жидкой фазой, составляет 919,9 Па при отношении объёма жидкости к объёму пара 4:1. Следовательно, разрежение в зоне выхода ролика из контакта, уже при скорости 0,3 м/с и незначительной осевой нагрузке 4 Н, было существенным. То есть в этой области происходило вакуумирование граничных слоёв до давления ниже 919,9 Па. Дальнейшее увеличение скорости скольжения приводило к увеличению интенсивности возникновения и количества этих пузырьков, с последующим их слиянием и возникновением парогазовых полостей. Последние имели вытянутую форму, похожую на «языки

пламени» (рис.2, б) с основанием у середины области контакта, осциллирующие в направлении скольжения в области выхода ролика из контакта.

При изменении направления скольжения, наблюдаемые потоки керосина в контакте, также изменяли своё направление в противоположную скольжению сторону – «из контакта» в области входа ролика в контакт с поверхностью параллелепипеда и «в контакт» в области выхода трущейся поверхности ролика из него. Изменение направления скольжения вызвало практически симметричное изменение направления контактных течений среды.

Таким образом, визуально наблюдалось возникновение регулярных обратных направлению трения скольжения течений керосина в околосеконтактной зоне. Возникновение таких течений вызвано повышением давления в образующемся конфузоре канале в направлении вращения цилиндра и симметричное относительно минимального зазора разрежение - в диффузоре канале, то есть трение происходит вследствие сопротивления среды деформации (компрессии или сжатию и вакуумированию или растяжению).

Измерение распределения давления в контакте. Для измерения распределения давления в контактной области, внутри параллелепипеда были сделаны каналы, которые на контактирующей поверхности выходили наружу в виде отверстия или в виде щели, являющиеся зондом (приемное устройство) измерителя давления в смазочном слое. К боковой нерабочей грани параллелепипеда через штуцер присоединялся манометр для измерения величины статического давления в контактной и околосеконтактной областях, путём сканирования контакта соответствующим зондом.

Измерения давления в слоях керосина околосеконтактной зоны производились в средней области контакта по нормали к его средней линии с помощью резистивных датчиков давления МДД-ТЕ 0-1. Зондирование производилось с шагом 0,05 мм.

Результаты измерений (рис.3 а) показали, что давление в керосине в области входа ролика в контакт начинает возрастать за 2 мм до контакта параллелепипеда с вращающимся роликом. Затем у передней кромки контакта на входе, достигнув максимума более 1000 мм водного столба, давление стремительно падало и около середины контакта снижалось до атмосферного. Дальнейшее перемещение отверстия в зону выхода ролика из контакта приводило к разрежению, давление достигало экстремума (около 1000 мм водного столба), но теперь ниже атмосферного и также на самом краю контакта, в районе выхода ролика из него. При дальнейшем перемещении зонда от контакта давление керосина, оставаясь ниже атмосферного достоверно, начинало плавно повышаться и выравниваться до атмосферного также на расстояние около 2 мм.

Проведенные аналогичные измерения при прочих равных условиях, но в противоположном направлении скольжения (рис.3, б) имели практически симметричную инверсию данных, что свидетельствует о закономерной связи контактных течений граничных слоёв относительно направления скольжения. То есть, также на входе в контакт происходило повышение давления керосина, а на выходе из него – понижение относительно атмосферного.

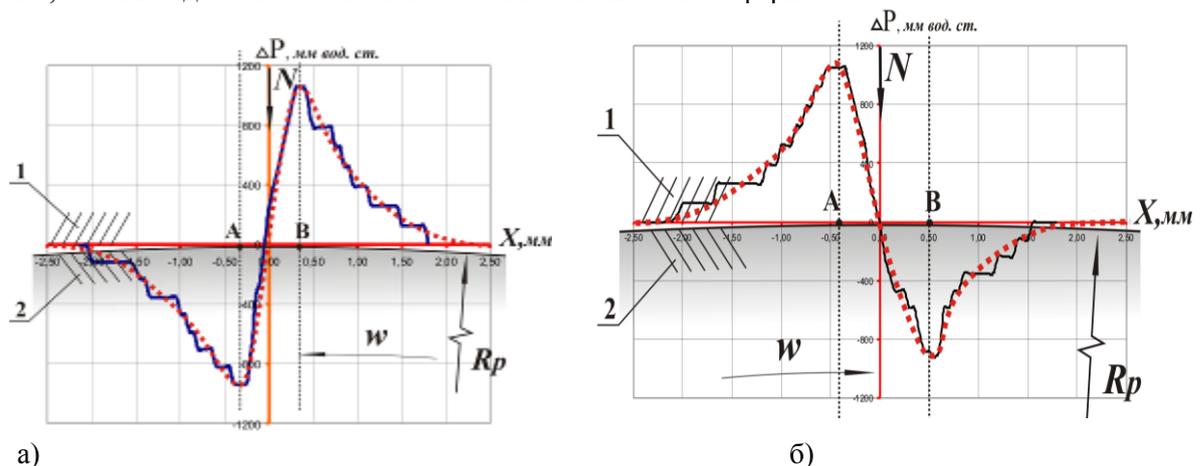


Рис.3. Распределение перепада давления ΔP в граничных слоях керосина ТС-1 в зависимости от координаты сканирования X перпендикулярно контакту при скольжении, где [AB] – ширина линейного контакта параллелепипеда 1 и ролика 2 с радиусом R_p , ω - частота вращения, N – осевая сила сжатия, X – ось сканирования а) вращение по часовой стрелке; б) вращение против часовой стрелки

При изменении направления скольжения при прочих равных условиях величина давления в граничных слоях керосина ТС-1 изменялись относительно середины контакта также как и визуально наблюдаемые линии тока (рис.3,б). В области входа ролика в контакт с параллелепипедом давление в керосине увеличивалось, у самой кромки контакта достигало своего максимума, а около середины контакта резко уменьшалось до атмосферного. Затем также скачкообразно происходило понижение давления в сканируемых слоях керосина до минимума, и в области выхода ролика из контакта, по мере удаления зонда от него, начиналось плавное увеличение измеряемого давления до давления окружающей среды.

Кавитация также наблюдалась и при трении скольжения в среде вакуумного масла ВМ-6, (давление насыщенных паров $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) и в других исследованных жидких средах (вода, масло АМГ-10, моторные масла и пр.). Следовательно, понижение давления среды, происходящее в диффузорной области контакта трибосистемы скольжения может достигать значений ниже давления насыщенных паров, что может привести к частичной или полной деструкции граничных ЭЖК слоёв смазки в пристенных эпиторпных слоях. Такая вакуумная деструкция, вероятно и есть основной причиной появления участков практически сухого трения поверхностей без ЭЖК слоев смазки, и приводит к возникновению «мостиков схватывания» между поверхностями трения. Следовательно, молекулярная или адгезионная составляющая силы трения (99% от суммарной силы трения), возникающая на трибоконтакте с граничной смазкой, является следствием понижения давления в среде между поверхностями, движущимися в направлении диффузорной части контакта. Вакуумирование среды между трущимися поверхностями возможно является одним из основных физических процессов, вызывающих изнашивание поверхностей трения. Предотвратив понижение давления среды между поверхностями трения в условиях граничной смазки, различными приёмами, например приведенными в работе [13], трибосистема скольжения может стать практически безыносной.

Следует отметить, что наблюдаемые течения смазки и распределения давления (симметричное повышение и понижение относительно минимума зазора) наблюдается как в жидких средах, так и в среде задымленного или чистого воздуха, то есть являются характерными для жидкостей и газов. Они наблюдались при различных шероховатостях поверхностей вала и плоского образца (от нано- до микронного уровня), которые находились в контакте или без контакта с малым зазором.

Аналогичные контактные и бесконтактные течения и распределение давления в граничных слоях среды (рис.3) наблюдались и измерялись во всех исследуемых средах (авиакеросин ТС-1, диалкилбензольное масло (аналог АМГ-10), вакуумное масло ВМ-6, вода, моторные, трансмиссионные и другие технические товарные масла) [13.]

В качестве примера, на рис. 4 представлены зависимости распределения давлений в граничных слоях диалкилбензольного масла при разных скоростях скольжения. В области входа ролика в контакт А, с увеличением линейных скоростей скольжения (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 м/с) сила трения возрастала и повышение давления в слое масла также увеличивалось, а максимум его достигал 1 атмосферы, то есть на порядок больше, чем в среде керосина. Заметим, что вязкость этого масла также на порядок больше чем у керосина. В этой же области входа ролика в контакт, при постоянной линейной скорости ролика 0,86 м/с и увеличении осевой нагрузки с 4 до 10Н, то есть в 2,5 раза, увеличивалась сила трения и давление в керосине со щелевым конфузорным каналом возрастало с 1400 до 3700 мм вод. ст., то есть также приблизительно в 2,5 раза. Сила трения скольжения пропорционально возрастает с увеличением избыточного давления среды в конфузорной области контакта по направлению движения вала, которое, в свою очередь, возрастает с увеличением вязкости среды, осевой нагрузки и линейной скорости скольжения. Следовательно, сила трения скольжения является интегральным результатом процессов, протекающих в граничных слоях смазки в конфузорно-диффузорных полостях контакта. При этом в диффузорной области контакта В (рис.4), то есть в области понижения давления, характер распределения давления существенно отклоняется от симметричного (пунктир), как это происходило в керосине (рис.3). Объясняется это особенностями поведения жидкостей в условиях пониженного относительно атмосферного давления, когда жидкость вскипает и переходит в двухфазное состояние, а также несовершенством техники измерений в этих условиях.

На основе полученных экспериментальных результатов исследований и выдвинутой гипотезы компрессионно-вакуумной природы трения [12, 13] физика процесса трения представляется следующим образом.

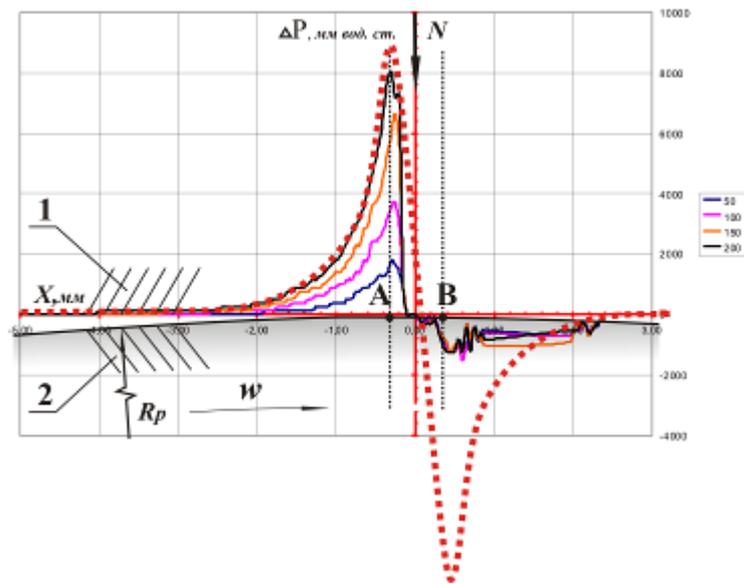


Рис.4. Зависимость распределения давлений в граничных слоях диалкилбензольного масла при разных скоростях скольжения, где [AB] – ширина линейного контакта параллелепипеда 1 и ролика 2 на воздухе. В области входа ролика в контакт А максимум избыточного давления увеличивается с увеличением линейной скорости скольжения (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 м/с)

При медленном сближении вращающегося ролика с неподвижной поверхностью плоского параллелепипеда, в момент соприкосновения поверхностей, происходит резкое повышение силы трения и резкое повышение давления в конфузурной и понижение давления в диффузорной областях контакта. При этом разрушения поверхностей не происходило. То есть в момент образования упругого трибоконтакта резкое повышение силы трения вызвано скачкообразным повышением величины избыточного давления у самой кромки контакта в конфузурной области контакта и симметричным понижением – в диффузорной. Визуально наблюдается также скачкообразное ускорение потоков среды (по направлению вращения): из контакта на входе ролика в контакт и в контакт – на выходе ролика из него.

Это может объясняться лишь тем, что при упругом деформировании поверхностей трения разделённых граничными слоями смазки в конфузурном участке линейного контакта по направлению вращения ролика происходит упруго-контактное сжатие и ускорение вторичного течения молекул эпитропных ЭЖК граничных слоёв смазки в обратном движению ролика направлении. Такое ускорение вызвано положительным градиентом давления в смазочном слое от атмосферного до величины максимального контактного давления, которое соответствует максимальным контактным напряжениям в поверхностях. За область максимальных напряжений в диффузорном участке выхода ролика из контакта происходит упруго-контактное расширение обеднённых молекулами ЭЖК граничных слоёв и ускоренное вторичное течение молекул жидкости из объёма в контакт.

Само понятие контакт двух сжатых поверхностей в жидкой среде с учетом упругих свойств её эпитропных жидко-кристаллических ЭЖК слоёв [10, 11], близких к алмазу [4, 7], следует понимать, как контакт двух ориентированных полями поверхностей ЭЖК слоёв жидкости, одноосно сжатых и стеснённых. Молекулы такой би-эпитропной субстанции при сжатии уплотняются, перестраиваются и переориентируются, перераспределяя напряжения в поверхностях. Поэтому расчетные контактные напряжения по Г.Герцу, которые производятся без учета среды, всегда будут больше, чем фактически возникающие в поверхностях, смазанных жидкостью, что показано на схеме (рис.5). Так при расчете нашей модельной пары фторопластовый ролик - оргстеллянный параллелепипед при осевой нагрузке 4Н максимальные расчетные давления составляют 1,2МПа, а расчетная ширина контакта составляет менее 0,8 мм. На

воздухе мы измерили ширину, и она оказалась практически равной расчетной. Однако после приложения такой же нагрузки после предварительного смачивания поверхностей керосином, маслами или водой, ширина фактически образованного контакта была в 3..5 раз больше. Это объясняется наблюдаемым нами эффектом оптической иммерсии света (рис.1), то есть его физической сущностью, которая заключается в четкой ориентации ЭЖК слоёв среды на сжимаемых поверхностях с соответствующими параметрами ближнего и дальнего порядка. Поэтому измеренная ширина смоченного керосином ТС-1 контакта составляла 5мм, а при той же осевой нагрузке на воздухе – 0,8мм. Следовательно, фактические максимальные контактные напряжения в поверхностях будут существенно меньше, чем рассчитываемые без учета упругих жидкокристаллических свойств эпитропных слоёв среды, а контакт поверхностей в жидкой среде по сути является эпитропным жидкокристаллическим ЭЖК контактом.

Исходя из результатов экспериментальных исследований молекулярной физики граничного трения [4, 7], эпитропные слои жидкой среды, которые образуются на лиофильных поверхностях твёрдых тел при их статическом сжатии, разрушить невозможно, вплоть до контактных напряжений упругости самых прочных сталей, даже алмаза. В таком случае при их относительном перемещении разрушение граничных слоёв связано с физическим процессом возникновения условий деструкции молекул эпитропных слоёв в диффузорных участках контактов, а именно с наблюдаемым вакуумированием среды, как самым эффективным и широко используемым для очистки поверхностей твёрдых тел от молекул жидкой среды.

На рис.5 показана схема уменьшения максимальных контактных напряжений в поверхностях за счет наличия на них эпитропных ЭЖК слоёв смазочной среды путем увеличения площади и соответствующего уменьшения и перераспределения контактных поверхностных напряжений.

В поперечном сечении контакт бесконечно длинного вала 1 с поверхностью неподвижного подшипника скольжения 2 находится в покое при атмосферном давлении окружающей среды $P_{oc}=0,1\text{МПа}$. В среде воздуха под действием силы N_g поверхности упруго деформируются, создают линейный контакт A_aB_a с шириной b_a и в них возникают контактные напряжения σ_a , с распределением по Г.Герцу (рис.5). Когда лиофильные поверхности смочены смазочной средой и также сжаты силой N_g , то они упруго деформируются посредством одноосно сжатых эпитропных граничных слоев смазки, которые, имеют некоторую толщину d [10]. В этих слоях развиваются давления равные поверхностным напряжениям σ_a , они уменьшают напряжения возникающие в поверхностях на воздухе, и перераспределяются так же симметрично относительно оси приложенной нагрузки N_g , как и в поверхностях σ_a , что приводит к расширению контакта A_aB_a с шириной b_a до A_dB_d с шириной b_d . То есть сжатые поверхностями ЭЖК молекулярные слои жидкости воспринимают лишь осевые сжимающие давления, а их толщина тем меньше, чем выше контактные напряжения. ЭЖК слои, как кристаллическая субстанция при деформировании подчиняется закону Гука. При этом у кромок ЭЖК контакта A_dB_d , контактные напряжения будут соответствовать давлению окружающей среды, например атмосферному, а толщина ЭЖК граничных слоёв будет максимальной и равной $2d$. Следовательно, контакт сжатых поверхностей с ЭЖК слоями смазки A_dB_d представляет собой зазор, симметрично сужающийся от кромок A_d и B_d до середины, где давление ЭЖК слоёв и контактные напряжения поверхностей максимальны.

Взяв вышеприведенные начальные условия формирования упругого контакта поверхности образующей цилиндр ролика и плоской грани параллелепипеда, которые разделены также упруго одноосно-напряженными двумя ЭЖК граничными слоями толщиной d за основу, процесс трения скольжения вала вращающегося вокруг своей оси в жидкой среде представляется следующим образом.

Рассмотрим вращение вала 1 (рис. 6) вокруг своей оси со скоростью ω в жидкой среде в нормальных атмосферных условиях с давлением окружающей среды $P_{oc}=0,1\text{МПа}$. В случае отсутствия какого-либо препятствия около поверхности образующей цилиндр вала, эпюры скоростей граничных слоёв смазочной среды будут иметь вид, характерный, например Ньютоновской жидкости в виде прямоугольника (рис.6). Максимальную линейную скорость \vec{v}_e будут развивать ЭЖК-слои, которые имеют некоторую толщину d , так как они характеризуются свойствами анизотропных кристаллических структур [11]. В начале движения ЭЖК слоёв начинается их трение по слоям покоящейся в объёме изотропной жидкости.

Близлежащие к ЭЖК слоям молекулы среды также начинают перемещаться, но с меньшей скоростью. По мере удаления сенсора давления от поверхности при определённой их линейной скорости \vec{V}_g (примем малые скорости до 0,5 м/с) на некотором расстоянии $h_{сч}$ движение молекул среды будет крайне мало, а датчики давления на этом расстоянии указывают на практическое отсутствие течения жидкости.

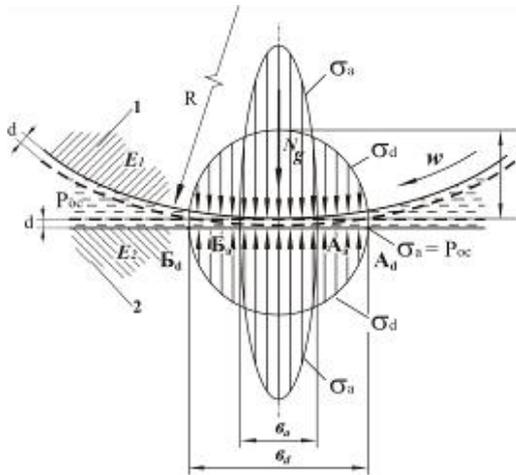


Рис.5 Схема образования линейного контакта $A_a B_a$ шириной b_a поверхности образующей цилиндр ролика 1 и поверхности плоской грани параллелепипеда 2 под действием осевой силы N_g и возникновение в них контактных напряжений σ_a на воздухе и его расширение до $A_d B_d$ с шириной b_d и соответствующим уменьшением контактных напряжений до σ_d с учетом наличия на поверхностях эпитропных жидкокристаллических слоёв толщиной d

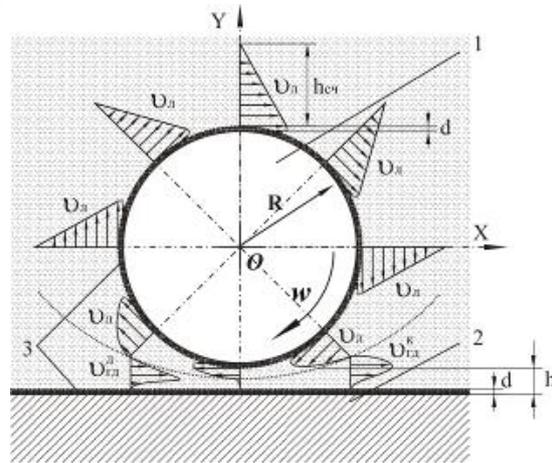


Рис. 6. Схема возникновения вторичных гидродинамических течений (конфузорного $\vec{V}_{\vec{a}\vec{i}}^e$ и диффузорного $\vec{V}_{\vec{a}\vec{i}}^e$) в зазоре h между вращающимся роликом 1 и плоской гранью параллелепипеда 2 с ЭЖК слоями 3 толщиной d , над которыми на высоте $h_{сч}$ структурно-чувствительные граничные слои жидкости имеют пренебрежимо малую скорость

То есть движущиеся с поверхностью структурно-чувствительные граничные слои смазки в бесконечном объёме жидкой среды, характеризуются некоторой высотой эпюры скоростей. На этой высоте $h_{сч}$ по нормали к поверхности образующей цилиндр вала чувствительность сенсоров к движению фрагментов среды снижается до 1мм вод.ст. и теоретически можно предположить, что на расстоянии $h_{сч}$ скорость движения молекул жидкой среды практически равна нулю. В наших экспериментах с помощью датчиков давления в среде моторных, гидравлических и других технических масел измеренная высота структурной чувствительности граничных слоёв $h_{сч}$ не превышала 2 мм. Это значит, что движение самых дальних слоёв масла от поверхности становилось не существенным уже на расстоянии до 1мм при малых скоростях. На больших расстояниях от поверхности жидкость оставалась однофазной сплошной средой и без воздушной фазы.

При приближении препятствия к поверхности образующей цилиндр вращающегося вала, в том числе и измерительного зонда, например на плоской поверхности параллелепипеда, до расстояния меньше двух высот структурной чувствительности граничных слоёв среды $h_{сч}$ возникают вторичные течения среды (рис.6). В сужающемся по направлению движения вала зазоре, то есть в конфузорной его области, происходит истечение среды из него в обратную движению вала сторону со скоростью $\vec{V}_{\vec{a}\vec{i}}^e$. В расширяющейся части зазора, то есть в диффузорной области, происходит втекание жидкости в зазор со скоростью $\vec{V}_{\vec{a}\vec{i}}^e$ из объёма. Эти течения возникают в силу повышения давления в конфузорной области зазора, до минимального его расстояния, где оно резко уменьшается до атмосферного, после чего в диффузорной части зазора происходит разрежения среды соответственно. Сжатие и разрежение среды, а также возникающие

соответствующие вторичные течения из зазора и в зазор, направленные обратно вращению вала, приводят к росту потерь мощности электропривода, что подтверждается экспериментально.

Если продолжать перемещать плоскую преграду к ролику и приложить внешнюю нагрузку сжатия, то начнется контактное трение ЭЖК слоёв вала с ЭЖК слоями плоской поверхности. На рис.7 представлена схема такого трения с распределением давлений в граничных слоях и возникновением контактных конфузурных и диффузорных течений, обратных направлению движения вала. Перед входом вала в контакт в области CFAC, то есть в конфузурной части контакта ЭЖК слоёв жидкой среды от сечения AA до сечения OO образуются вторичные гидравлические течения среды, направленные в сторону, обратную движению вала. Они вызваны компрессией, набегающих адсорбированных на поверхности вала слоёв смазки, которые движутся вместе с ней в контакт с максимальной скоростью равной линейной скорости скольжения \vec{U}_e вращающейся поверхности. Первое обратное движению вала вторичное гидродинамическое течение возникает задолго до контакта. Оно образуется за счет упругих деформаций граничных слоёв, путем принудительного уплотнения молекул, то есть их сжатия в конфузурной приконтактной области CFAC, и направлено в обратную движению вала сторону со скоростью $\vec{U}_{\text{аи}}^{\text{не}}$, за счет геометрического сужения канала, как показано ранее на рис.6. Экспериментально это наблюдается и фиксируется с помощью измерительного зонда давления при вращении вала вблизи (на некотором измеряемом расстоянии между валом и плоской поверхностью) как в жидкой, так и в газообразной среде.

Если, не останавливая вращение вала, приложить осевую нагрузку и создать упругий контакт AB эпитропными слоями смазки (рис.7), то в конфузурной части контакта AO возникнет второе дополнительное обратное течение молекул граничных слоев от области минимального зазора OO₁ и максимального одноосного давления сжатия, равного σ_{max} до кромки входа вала в контакт AA₁, где давление превышает атмосферное на величину степени сжатия граничных слоёв в приконтактной конфузурной области CFAC. Это вторичное контактное течение начинается из зоны входа ролика в контакт AA₁, то есть из самой кромки касания деталей с граничными слоями среды до зоны OO₁ с максимальными контактными напряжениями σ_{max} , то есть из области минимального зазора ЭЖК граничных слоёв смазки и протекает принудительно. Оба течения обратной компрессионной струи OA и набегающих адсорбированных слоёв смазки CA у самой передней кромки контакта A₁A входят практически в лобовое столкновение. То есть, происходит процесс подобный известному в гидродинамике гидравлическому тарану, но в отличие от классического - однократного, гидротаран в случае подшипника скольжения - непрерывный.

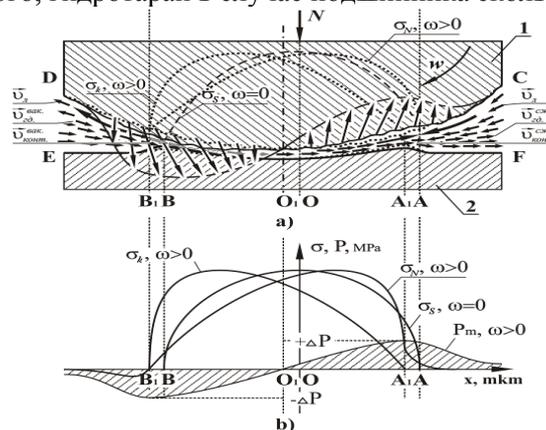


Рис. 7. Схема образования контактных встречных компрессионных и вакуумных течений граничных слоёв смазки:

- a) - в трибосистеме скольжения «ролик 1 – подшипник 2», направленных обратно скольжению и смещение неподвижного контакта АОВ в направлении скольжения в зону $A_1O_1B_1$; b) распределение контактных напряжений в поверхностях трения σ_s без движения ($\omega=0$); распределение давлений в граничных слоях смазки P_m при трении ($\omega>0$); суммарное гидродинамическое давление граничной смазки и контактных напряжений, возникающих между контактирующими поверхностями σ_r при трении ($\omega>0$); суммарное поле реактивных напряжений, действующих нормально только на поверхность движущегося ролика σ_r при трении ($\omega>0$)

На выходе ролика из контакта по направлению скольжения в области $ВВ_1$ возбуждаются также два противоположных течения, но вакуумированием или растяжением ЭЖК слоев. Одно из них представляет собой адсорбированные молекулярные слои на поверхностях, в том числе ролика, с остаточными фрагментами смазки в минимальном зазоре, которые движутся вместе с поверхностью ролика из области от минимального зазора $ОО_1$ в область выхода его из контакта $ВВ_1$ со скоростью $v_{л.}$. Этот граничный слой оказывается в расширяющемся диффузорном канале, проходя путь от зоны $ОО_1$ до $ВВ_1$, где по пути движения происходит разрежение среды, то есть вакуумирование. Второй поток формируется из молекул среды, находящихся вблизи зазора $ВВ_1$ в объеме с давлением окружающей среды $P_{атм.}$. У самой кромки выхода ролика из контакта с плоскостью $ВВ_1$ объемные фрагменты среды устремляются из области $В_1Е$ в зону пониженного давления граничных слоёв $ВВ_1$ со скоростью $\vec{V}_{\text{еііо}}^{\text{не}}$, откуда поверхностью ролика выносятся разреженные фрагменты среды, которые, в свою очередь, пройдя путь от зоны $ОО_1$ до $ВВ_1$ под действием отрицательного градиента давлений оказались в диффузорном канале. Одна «вакуумная» струя возникает из относительно покоящихся объемных фрагментов среды, которые под воздействием атмосферного давления текут в зазор тангенциально поверхности ролика, выходящего из контакта в зоне $ВВ_1$ с остатками вакуумированных фрагментов среды. При этом сильно разреженный, возможно даже мономолекулярный слой смазки на ролике у самой кромки выхода вала из контакта, но такой граничный слой течет с поверхностью ролика в направлении скольжения по пути от зоны $ОО_1$ до $ВВ_1$, образуя вторую струю. Эти два течения, где преимущественным является течение из объема в зазор выходной кромки контакта $ВВ_1$ направлены практически тангенциально к поверхности вала. При встрече они приводят к повышению давления выходящих на встречу сильно разреженных смазочных поверхностных слоёв вала до давления окружающей среды. По сути, происходит нечто подобное процессу гидравлического тарана адсорбированных и вакуумированных слоёв смазки, выходящих из контакта рабочей поверхности ролика и струи, истекающей из объема в контакт. В отличие от эффекта классического гидротарана, которому характерна однократность, в случае трения скольжения происходит непрерывный гидравлический таран фрагментов среды, выходящих с поверхностью вала из контакта и струи, образующейся из объема.

Например, под действием высокого контактного градиента давлений $(\sigma_{\text{max}} - P_{\text{атм}}) = 1,1 \text{ МПа}$ на расстоянии полуширины контакта $0,4 \text{ мм}$ возникнет истечение молекул из эпитропных слоёв контакта со скоростью $\vec{V}_{\text{еііо}}^{\text{не}}$ под действием упругих деформаций поверхностей. Эта скорость по приблизительным расчетам для керосина при нагрузке 4 Н и скорости скольжения 1 м/с будет составлять 16 м/с . Если учесть, что скорость набегающих слоёв керосина 1 м/с , то у самой кромки контакта произойдёт скольжение двух стеснённых и обратно направленных молекулярных течений с относительной скоростью 17 м/с . Такое скольжение эпитропных слоёв смазки и есть основной составляющей силы трения скольжения, которая возникает лавинообразно при медленном нагружении контакта. Следовательно, в поле высоких градиентов давления эпитропно жидкокристаллические слои смазки ведут себя, как жидкость.

Лавинообразное уменьшение частоты вращения вала и изменение звука электроприводов при плавном создании контакта смазанных поверхностей путем медленного нагружения наблюдается всегда. Оно вызвано возникновением контактного упруго деформационного истечения молекул эпитропных слоёв смазки из контакта в обратном вращению вала направлении, а не адгезионной составляющей силы трения, так как даже признаки поверхностного схватывания при первичном контактировании в виде узлов схватывания не наблюдаются.

На рис. 7 ось $ОО$, проходящая через центр вращения вала, по которой приложена сила сжатия N вала 1 и подшипника 2, является геометрической осью симметрии контакта $АВ$, возникающего в статических условиях без движения, когда $\omega=0$. При вращении вала (когда $\omega>0$) возникают области повышенного давления на входе вала в контакт и разрежения среды на выходе из контакта. В этих областях создаётся соответствующий перепад давления ($+\Delta P$ и $-\Delta P$) относительно давления окружающей среды, поэтому основание эпюр контактных напряжений и напряжений сил трения сместится в сторону направления движения вала (влево на рис. 7). При этом контактные напряжения, развиваемые в поверхностях σ_k и взаимно компенсирующие нагрузку сжатия N , будут представлять собой разницу контактных напряжений возникающих в

эпитропных слоях смазки и в поверхностях в статических условиях (без движения вала) σ_s и перепадов давления возникающих в этих слоях при движении вала ΔP .

$$\sigma_k = \sigma_s - \Delta P \quad (4)$$

Таким образом, контактные напряжения σ_k при трении скольжения будут смещаться в сторону направления движения вала, то есть в область пониженного давления, как показано на рис. 7.

Силы трения при этом будут представлять собой нормальные и тангенциальные проекции развиваемых в поверхностях элементарных реакционных напряжений σ_N , которые в свою очередь представляют собой сумму контактных поверхностных напряжений σ_s и перепадов давления возникающих в этих слоях при движении вала ΔP .

$$\sigma_N = \sigma_s + \Delta P \quad (5)$$

При этом основание эпюры A_1B_1 напряжений от действия сил трения σ_N будет совпадать с основанием A_1B_1 контактных напряжений σ_s , но сама эпюра будет наклонена в обратную вращению вала сторону, как показано на рис.7.

Как видно из формул (4) и (5) в случае полного разделения поверхностей ЭЖК слоями смазки контактные напряжения σ_k , и напряжения сил реакционных σ_N , возникающие симметрично в поверхностях трения, как вала 1, так и подшипника 2, при проецировании их на вертикальную ось интегрально будут равны напряжениям, возникающим в поверхностях, когда те находятся в покое и полностью уравновешивать действие внешней силы сжатия N . При этом эпюры контактных напряжений σ_k , и напряжений сил реакционных σ_N наклонены в разные стороны. То есть, поверхности в области разрежения ЭЖК слоёв будут сильнее нагружены, чем в области повышенного давления.

Таким образом, в соответствии со всеобщим законом физики аддитивного сложения первичных сил, взяв за основу формулу Н.П.Петрова сила трения скольжения вала в подшипнике скольжения включает в себя следующие составляющие.

Гидромеханическая составляющая силы трения или сила внутреннего трения, которая описывается соотношением Ньютона

$$F_x = -\eta_{xy} \nabla v_y, \quad (6)$$

и связывает силу внутреннего трения F_x , действующую на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкой среды (газа, жидкости) с градиентом скорости ∇v_y посредством коэффициента динамической вязкости среды η_{xy} . То есть эпитропный мономолекулярный слой смазки, движущийся со скоростью \vec{v}_e , воспринимает сопротивление покоящихся слоев среды ($\vec{v}_\infty = 0$) тангенциальной деформации. Силы внутреннего трения, возникающие при движении тела в среде с неограниченным объёмом, то есть без каких-либо препятствий, во многом определяются высотой структурно чувствительных граничных слоёв среды $h_{сч}$. Эта высота определяется расстоянием по нормали от поверхности до тех слоёв среды, в которых движение практически не происходит. При этом учитывают форму тела, объёмную вязкость среды η_0 и скорости движения каждого фрагмента поверхности S_Σ . Силы внутреннего трения, по сути, являются гидромеханическими силами, вызванными лишь сопротивлением среды деформации от движения в ней твёрдого тела.

Гидродинамическая составляющая возникает даже при отсутствии непосредственного контакта, но при наличии вблизи движущейся поверхности вала некоторой поверхности, например неподвижной плоской поверхности или подшипника скольжения. Она возникает за счет торможения набегающих с валом граничных слоёв среды со скоростью \vec{v}_e истекающими из конфузурного зазора и движущимся в обратную сторону молекулярных течений со скоростью $\vec{v}_{\vec{a}\vec{i}}^{\vec{n}\vec{e}}$, вызванных гидродинамической конфузурной деформацией сжатия. В диффузорной части зазора по направлению движения поверхности происходит скольжение выходящих из зазора разреженных ЭЖК слоёв по слоям жидкости, втекающим в него со скоростью $\vec{v}_{\vec{a}\vec{i}}^{\vec{a}\vec{a}\vec{e}}$ под действием внешнего давления окружающей среды.

Контактно-гидродинамическая составляющая силы трения скольжения возникает от действия контактной упругой деформации эпитропных граничных слоёв, вызванной высоким положительным градиентом давлений, возникающих в них от упругодеформационного сжатия

соответственно упруго деформированными поверхностями на участке ОА (рис.7). Такое деформационное воздействие на вносимые в контакт эпитропные слои среды приводит к ускорению молекул в конфузорной части ЭЖК контакта от сечения O_1O , до кромки входа вала в контакт в сечении A_1A , где ЭЖК слои двух поверхностей выходят из контактного взаимодействия, а скорость такого вторичного течения молекул ЭЖК слоёв $\vec{v}_{ei\delta}^{nac}$ максимальна. Давление в сечении A_1A соответствует степени сжатия от предыдущих гидродинамических предконтактных конфузорных деформаций сжатия граничных структурно-чувствительных слоёв с суммарной скоростью $\vec{v}_e + \vec{v}_{ai}^{nac}$. В диффузорной части также возникает дополнительное, вызванное вакуумированием ЭЖК слоёв, вторичное течение также направленное в обратную движению вала сторону, но из среды в контакт и со скоростью $\vec{v}_{ei\delta}^{aac}$.

Если степень разрежения ЭЖК слоёв не превышает порогового давления, вызывающего кавитацию в среде смазки, то сила трения $F_{тр}$ или сопротивления вращению вала может быть определена в виде трех составляющих. Первая – гидромеханическая $f_{гм}$, возникающая от сопротивления деформированию среды при вынужденном перемещении ЭЖК слоями одних слоёв среды относительно других в неограниченном каким-либо препятствием объёме. Вторая составляющая силы трения – гидродинамическая $f_{гд}$. Она возникает при появлении вблизи одной из движущихся поверхностей, например, вращающейся поверхности, образующей цилиндр вала, другой поверхности, например, неподвижной плоской стенки на некотором расстоянии $h_{гд}$. Опыт показывает, что относительно минимального зазора или линии контакта возникает два обратных движению вала вторичных течения: в конфузорной области от процессов сжатия среды и в диффузорной области от процессов растяжения среды. Эти процессы приводят к возникновению соответствующих составляющих гидродинамических сил трения $f_{гд} = f_{ai}^e + f_{ai}^a$. Третья контактно-гидродинамическая $f_{кгд}$ составляющая силы трения возникает в контакте упруго деформированных ЭЖК слоёв, которые находятся в одноосно-напряженном состоянии под действием осевой силы сжатия. При относительном перемещении одних ЭЖК слоёв одной поверхности по другим ЭЖК слоям другой поверхности, также в конфузорной и в диффузорной областях их контакта возникают соответствующие области сжатия и разрежения среды, создаваемые напряжениями упругой деформации материалов. Под действием высокоградиентных контактных напряжений материалов возникают соответствующие обратные движению контактно-гидродинамические вторичные течения. Поэтому третья контактно-гидродинамическая сила трения также имеет две составляющие, возникающие в контакте упруго-деформированных ЭЖК слоёв и также в соответствующих конфузорной и диффузорной областях контакта ЭЖК-слоёв $f_{кгд} = f_{eai}^e + f_{eai}^a$.

Таким образом, в соответствии с всеобщим законом физики аддитивного сложения первичных сил, в обобщенном виде суммарная сила трения при скольжении вала по плоской стенке подшипника представляется, как сумма первичных сил гидро-механического, гидродинамического и контактно-гидродинамического сопротивления деформированию среды и её можно представить, как:

$$F_{тр} = f_{гм} + f_{гд} + f_{кгд}, \quad (7)$$

или, как

$$F_{тр} = f_{гм} + \{ f_{ai}^e + f_{ai}^a \} + \{ f_{eai}^e + f_{eai}^a \} \quad (8)$$

Учитывая протекающие вышеописанные динамические процессы деформации среды в конфузорно-диффузорных участках контакта, и, взяв за основу формулу Н.П.Петрова, суммарная сила трения в первом приближении, может быть описана следующим образом:

$$F_{тр} = \eta_{id} \cdot \frac{v_e}{h_{cx}} \cdot S_{\Sigma} + \eta_{ai} \cdot \frac{(v_e + v_{ai})}{h_{min}} \cdot \frac{S_{i\delta}}{2} + \eta_{y\bar{n}} \cdot \frac{(v_e + \sqrt{2\sigma_{max}})}{b} \cdot S_{y\bar{n}}^{a\delta\delta}, \quad (9)$$

В случае достижения давления в диффузорной части ЭЖК контакта давления порога кавитации смазочной среды, возникнут необходимые и достаточные условия для активного адгезионного взаимодействия поверхностей, что неизбежно приведёт к их изнашиванию, схватыванию и даже к заеданию. Наряду с известными гидродинамической и акустической кавитацией, возникновение кавитации ГСМ и спецжидкостей в диффузорных областях

трибосистем, следует выделять и рассматривать, как процесс трибокавитации. Это позволит определять причину и источник возникновения кавитации в гидравлических системах. Одним из эффективных способов уменьшения износа трибосистем в жидких средах является понижение степени разрежения среды в бесконтактных геометрически диффузорных зазорах, образующихся в направлении движения поверхностей, и в упругодеформированных диффузорных областях трибоконтактов, то есть в вакуумированных областях подвижных элементов трибосистем. Определены области разрежения в трибосистемах, применив один из конструкторско-технологических приёмов, трибосистема может стать практически безызнасной, как показано в работе [13].

Выводы.

1. Установлено возникновение градиента давлений в среде по обе стороны контакта трибосистемы скольжения типа «вал – втулка», причем, при вхождении вала в контакт давление возрастает, а при его выходе – падает относительно атмосферного давления. Эти перепады давления приводят к возникновению струйных течений среды против направления вращения вала.

2. Показано, что с увеличением осевой нагрузки, скорости скольжения и вязкости среды возрастает степень сжатия среды «на входе в контакт» и степень её разрежения «на выходе из контакта». Эти области повышенного и пониженного давления жидкой среды симметричны относительно максимальных контактных напряжений, которые превышают протяженность контакта в несколько раз. Симметрия сильно нарушается после превышения определённых контактных напряжений и/или скорости скольжения, когда давление в области разрежения достигает давления порога кавитации в данной среде.

3. Показано, что с повышением вязкости среды возрастает степень компрессии в области входа вала в зону контакта и соответственно увеличивается степень разрежения среды в области выхода вала из него.

4. Показано, что гидродинамические эффекты трения в режиме граничной смазки обусловлены образованием областей, как с повышенным, так и с пониженным давлением в смазочном слое.

5. Показано, что в условиях граничной смазки происходит перераспределение контактной нагрузки, вызванное деформациями сжатия и растяжения граничных слоёв смазки в соответствующих областях контакта. Изнашивание происходит в основном в области низкого давления среды близкого и меньше давления насыщенных паров, что позволяет по-новому подойти к проблеме изнашивания трибосистем на стадии их проектирования.

6. Показано, что сила трения состоит из суммы всех первичных нормальных и тангенциальных сил сопротивления среды деформированию, которые имеют общую природу, как при бесконтактном, так и при контактном трении поверхностей в условиях граничной смазки.

7. Обоснованы перемещения зоны контакта трибосистемы скольжения, вызванные перераспределением давления в соответствующих конфузорной и диффузорной областях повышенного и пониженного давления контакта.

8. На примере трибосистемы скольжения с линейным контактом показано, что в топливных, масляных и других гидравлических системах наряду с гидравлической и акустической кавитацией, может возникать «трибокавитация», как процесс, протекающий в диффузорных областях узлов трения и приводящий к понижению местных давлений в среде до значений близких и меньших давления порога кавитации.

9. Показано, что контактом двух смазанных поверхностей, сжатых с некоторой осевой силой являются упруго деформированные эпиторпные жидко-кристаллические слои жидкости [10]. Показано, что в ЭЖК контакте смазочный слой в статических условиях нагружения ведёт себя, как высокопрочное и высокоупругое твёрдое тело, а в условиях высоких контактных градиентов давлений и скоростей ведёт себя как жидкость.

10. Экспериментально подтверждена гипотеза компрессионно-вакуумной природы трения и изнашивания, которая может быть объединяющей три раздела трибологии гидродинамическое, эластогидродинамическое и трение в условиях граничной смазки.

1. М.П.Воларович «Н.П.Петров - основоположник гидродинамической теории смазки машин». Трение и износ в машинах. Труды второй всесоюзной конференции по трению и износу в машинах Т.Ш., 1949.
2. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости. Инж. журн., т. 27, №1; №2, 227; №3, 337; №4, 535, 1883. Отдельное издание.- СПб.- 1883.- 212 стр.
3. Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроухов Б.И. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме. – М.: Наука, 1981.
4. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин.- М.: Машиностроение, 1976.- С. 304.
5. Основы трибологии: Учебник для технических вузов/ Под.ред. А.В.Чичинадзе. – М.:Машиностроение, 2001. - С. 277-351.
6. Справочник по триботехнике / Под общ.ред. М.Хебды,, А.В.Чичинадзе. В 3-х т. Т.1 Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400с.: ил.
7. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.:Физматгиз, 1963. – 472с.
8. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на тертя и износ.- М.:Машиностроение. – 1977. – 526с.
9. Дерягин Б.В., Поповский Ю.М., Алтоиз Б.А. Открытие СССР «Явление образования гомогенной граничной жидкокристаллической фазы немезогенной жидкости». Диплом №388.// Открытия и изобретения 1991. -№12.- С.1
- 10.Алтоиз Б.А., Дейнека В.Т. Измерение параметров граничного слоя жидкости теплоносителя влияющих на интенсивность теплообмена. // Научно-технический сборник «Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры». – Одесса, 2003. - Вып.1.- С. 29-33.
- 11.Лужнов Ю.М. Нанотриботехнология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. - М.: Интекст.- 2009, 176 с.
- 12.Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания. –28 с. – Деп. в ГНТБ Украины. - 07.07.2008, №109-Ук 2008.