

УДК 621.891

А.У.Стельмах

Национальный авиационный университет

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОГО МЕХАНИЗМА ТРЕНИЯ

*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: трибология, трибосистема, сила трения.

В основу трех базовых разделов современной трибологии положены несколько гипотез и представлений о природе трения [1-5], определяющие его виды.

Среди хорошо аргументированных теорий [5, 6], 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 ( $F_{адг}$ ):

$$F_{тр} = F_{деф} + F_{адг} \quad (1)$$

Изнашивание материалов поверхностей трения, как известно, является следствием их адгезионного взаимодействия (образования и разрушения «мостиков сварки» [6]), поэтому режим трения в условиях граничной смазки может рассматриваться, как процесс трибоадгезии.

Фундаментальные исследования пристенных слоёв смазочной среды Б.В. Дерягина, Ю.М. Поповского и Б.А. Алтоиза показали [7], что они являются гомеотропными эпитропными жидкокристаллическими (ЭЖК) слоями смазки. В работах профессора Б.А. Алтоиза, в частности [8], представлены экспериментальные данные о ЭЖК слоях ряда жидкостей, показывающие, что их вязкость превышает объёмную, а измеренная равновесная толщина составляет от 20 нм до микрометров.

Анализируя современное состояние трибологии, Ю.М. Лужнов [9] подчеркивает, что «ввиду сложности процессов, формирующих трение, в настоящее время нет пока единого мнения о его природе».

Результаты экспериментов и теоретические положения современной трибологии зачастую входят в противоречие. Поэтому во всем мире продолжается разработка новых гипотез и положений, устранивающих недостатки существующих представлений о природе трения.

В научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий Национального авиационного университета под руководством чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., профессора Аксёнова А.Ф. с целью объяснения природы трения постоянно ведутся исследования трибосистем в условиях граничной смазки, а также явлений и закономерностей при трении.

Выдвинутая в 2008 г. гипотеза компрессионно-вакуумной природы трения [10, 11], нашла экспериментальное подтверждение, но требует глубокого изучения для более широкого круга условий.

Для этого были разработаны оригинальные лабораторные машины трения одностороннего скольжения с оптически прозрачным линейным контактом (рис.1). В машине 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).

**Конструкция стенда.** В качестве вращающегося образца, моделирующего вал, использовался фторопластовый ролик (наружный диаметр – 80 мм, ширина ролика – 9 мм), а плоский неподвижный параллелепипед, моделирующий подшипник скольжения, то есть контртело, был изготовлен из оптически прозрачного материала (неориентированное органическое стекло).

В среде атмосферного воздуха поверхность образующей цилиндра ролика при сжатии вступает в контакт с плоской поверхностью прозрачного параллелепипеда, что визуализирует площадку контакта в форме узкого прямоугольника. Протяженность такого контакта соответствует ширине ролика 9 мм, а его ширина при осевой силе сжатия 4 Н - составляет 0,7 мм, и при 40 Н ~ 0,8 мм.

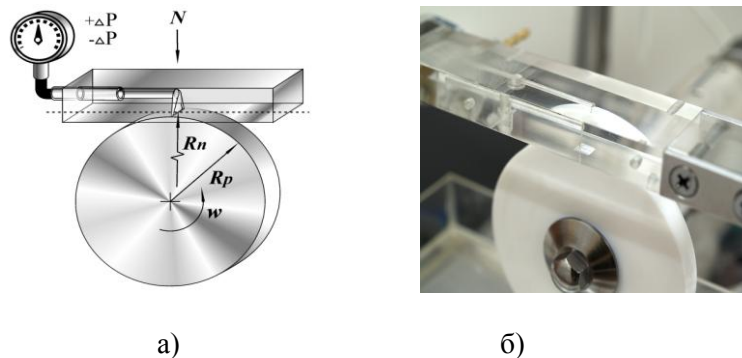


Рис.1. Машина трения скольжения с верхним положением контакта: схема (а); трибоузел (б)

В качестве основной модельной смазочной среды использовался авиационный керосин ТС. Линейная скорость скольжения варьировалась с плавным изменением от 0,2 до 0,9 м/с, осевая нагрузка изменялась в диапазоне от 4 до 200 Н. После установления линейного контакта вокруг него образовывалось симметричное относительно линии контакта пятно керосина за счет смачивания им поверхностей (рис.1).

В первоначальных экспериментах [10] шероховатость рабочей поверхности ролика принималась  $R_a < 20$  нм. В дальнейших исследованиях [11], ввиду не принципиального влияния шероховатости на изучаемые процессы, использовались образцы с большими неровностями ( $R_a < 0,8$  мкм), что существенно легче реализовать на практике.

**Визуализация процессов в контактной зоне.** Наблюдение за поведением слоёв керосина, вносимых роликом в зону контакта, при трении о нижнюю грань прозрачного контртела, производилось через его боковую и верхнюю грани при определённом освещении (рис.2).

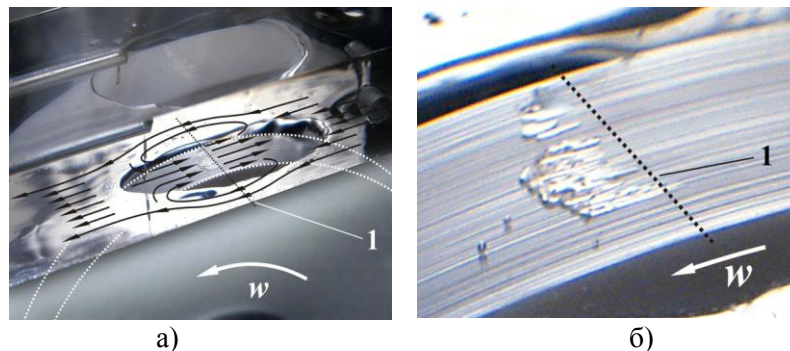


Рис.2. Линии тока жидкости в контактной зоне при трении скольжения ролика по плоской грани контртела (а) и образование кавитационных полостей и пузырьков в диффузорной области линейного контакта «ролик-контртело» (б) (1 – средняя линия контакта поверхностей)

Как видно из рис.2, слои керосина увлекаются роликом в зону контакта и частично обтекают её по краям. На поверхности контртела макропоток смыкаются за контактом. При этом всё пятно смачивания смещается в сторону, обратную направлению скольжения. После установившейся скорости вращения, при подсветке зоны контакта под определённым углом, наблюдается непрерывное интенсивное струйное истечение керосина из зоны контакта в направлении, обратном вращению. На выходе ролика из контакта визуально наблюдается непрерывное интенсивное течение керосина в направлении контакта, то есть также в направлении, обратном скольжению. Линии тока керосина, наблюдаемые при скольжении, показаны на рис.2, а.

Увеличение скорости скольжения ролика по поверхности параллелепипеда приводит к большему смещению контактного пятна керосина в сторону, обратную направлению вращения. Наблюдаемые при этом неоднородности течения керосина «из контакта» в области входа ролика в контакт и «в контакт» в области выхода ролика из контакта становятся более заметными. То же происходит и при увеличении нагрузки при постоянной скорости скольжения.

При плавном возрастании скорости скольжения до 0,3 м/с, в зоне выхода ролика из контакта в слоях керосина наблюдается появление газовых пузырьков, которые, перемещаясь в направлении скольжения, выносились движущейся поверхностью образующей ролика на расстояние 5 мм от контактного участка и затем исчезали. Движение образующихся газовых пузырьков (рис.2, б) около контакта происходило в направлении скольжения, но против струйного течения керосина, направленного обратно - «в контакт». Пузырьки зарождаются беспорядочно по всей ширине линейного контакта в системе «ролик-контртело» вследствие кавитации керосина. Для керосина ТС-1 при температуре 20<sup>0</sup>С давление паров, находящихся в состоянии динамического равновесия с жидкой фазой, 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 осевой нагрузке 4 Н, существенно и в этой области происходит вакуумирование граничных слоёв до давления 919,9 Па. Дальнейшее увеличение скорости скольжения приводит к интенсификации возникновения пузырьков, последующему их слиянию и возникновению парогазовых полостей. Последние, осциллируя в направлении скольжения, имеют вытянутую форму, похожую на «языки пламени» (рис.2, б) с основанием у середины области контакта.

При изменении направления скольжения потоки керосина в зоне контакта также изменяют своё направление в противоположную скольжению сторону. Изменение направления скольжения вызывает практически симметричное изменение направления контактных течений среды.

**Определение распределения давления в контакте.** Для исследования распределения давления в контактной области внутри контртела были проделаны каналы с выходом на контактирующей поверхности в виде отверстий или щели, являющихся зондом измерителя давления в смазочном слое. К боковой грани контртела через штуцер подключен манометр измерения давления в контактной и околоконтактной областях. Предусмотрено сканирование контакта соответствующим зондом.

Измерение давления в слое керосина производилось в средней части контактной зоны по нормали к его средней линии с помощью резистивных датчиков давления МДД-ТЕ 0-1. Шаг зондирования в плоскости контактной зоны - 0,05 мм.

Результаты измерений (рис.3 а) показали, что давление керосина в области входа ролика в контакт начинает возрастать за 2 мм до начала контакта контртела с вращающимся роликом. У передней кромки контакта на входе, достигнув максимума более 1000 мм водного столба, давление стремительно падает и вблизи середины контакта снижается до атмосферного. Далее в зоне выхода ролика из контакта имеет место разрежение с экстремальным давлением ниже атмосферного (около 1000 мм водного столба), и также на самом краю контакта, в области выхода ролика. На расстоянии около 2 мм от контакта давление керосина плавно повышается и выравнивается до атмосферного.

Аналогичные измерения, проведенные при прочих равных условиях, но в противоположном направлении скольжения (рис.3, б), дали практически симметричную инверсию параметров, что свидетельствует о закономерной связи контактных течений граничных слоёв с направлением скольжения. То есть, на входе в контакт происходило повышение давления керосина, а на выходе из него – понижение относительно атмосферного.

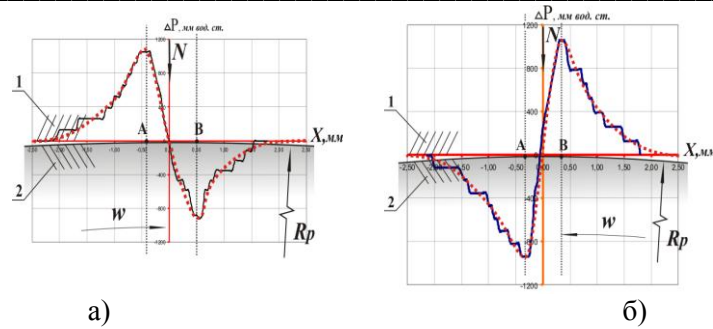


Рис.3. Распределение перепада давления  $\Delta P$  в граничных слоях керосина ТС-1 по координате сканирования  $X$  перпендикулярно контакту при скольжении:  
 а) вращение по часовой стрелке; б) вращение против часовой стрелки

На рис.3.  $[AB]$  – ширина линейного контакта контртела 1 и ролика 2 с радиусом  $R_p$ ,  $\omega$  – частота вращения,  $N$  – осевая сила сжатия,  $X$  – координаты сканирования. Перемена направления скольжения, при прочих равных условиях, сопровождается изменением знака перепада давления граничных слоев керосина  $\Delta P$ , который по величине практически не изменяется относительно середины контакта системы «ролик-контртело» (рис.3, б). Визуально наблюдаемые линии тока также изменяют свои направления в противоположную сторону. В области входа ролика в контакт с контртелом давление керосина увеличивается и у самой кромки контакта достигает своего максимума, а в средней части – резко уменьшается до атмосферного. Затем также скачкообразно происходит понижение давления сканируемых слоев керосина до минимума, и также в области выхода ролика из контакта, по мере удаления зонда от него, начинается плавная нормализация измеряемого давления до давления окружающей среды.

Показанное выше понижение давления среды, происходящее в диффузорной области контакта трибосистемы скольжения, может достигать значений давления насыщенных паров, что приведёт к частичной или полной деструкции граничных слоёв смазки в пристенных граничных слоях. Такая вакуумная деструкция, вероятно, и есть основной причиной образования участков практически сухого трения, что приводит к возникновению «мостиков схватывания» поверхностей трения. Можно предположить, что молекулярная или адгезионная составляющая силы трения (99% от суммарной силы трения), возникающая на трибоконтакте с граничной смазкой, является следствием понижения давления среды между поверхностями, движущимися в направлении диффузорной части контактной зоны. В результате этого возникает недостаток среды в зазоре между трущимися поверхностями, что обуславливает интенсификацию процессов изнашивания поверхностей трения. При исключении понижения давления среды между поверхностями трения в условиях граничной смазки трибосистема скольжения становится практически безысходной.

Следует отметить, что наблюдаемые течения смазки и распределение давления (симметричное повышение и понижение относительно минимального зазора) наблюдаются как в жидких средах, так и в среде задымлённого или чистого воздуха. Они реализуются при наличии нано- и микронеровностей на поверхностях вала и контртела, находящихся в контакте или расположенных с некоторым зазором, то есть без контакта.

Таким образом, возникновение вторичного течения среды, направленного обратно направлению трения, вызвано повышением давления в образующемся в направлении вращения ролика конфузормом канале и симметричным относительно минимального зазора или середины контакта разрежением в диффузорном канале. В этом случае трение в контакте происходит вследствие сопротивления окружающей среды деформациям – компрессии или сжатию и вакуумированию или растяжению.

Контактные и бесконтактные вторичные течения и распределение давления в граничных слоях среды (рис.3) наблюдались в воде, в средах авиакеросина ТС-1, диалкилбензолного масла, вакуумного масла ВМ-6, в моторных, трансмиссионных и других технических маслах [11].

В качестве примера на рис. 4 представлены зависимости распределения давления в граничных слоях диалкилбензолного масла при разных скоростях скольжения. В области входа ролика в контакт А, с увеличением линейных скоростей скольжения (от 0,2 до 0,8 м/с), сила трения возрастает и повышение давления слоя масла также увеличивается, а максимум его

достигает одной атмосферы, то есть на порядок больше, чем в среде керосина. Заметим, что и вязкость этого масла также на порядок больше, чем у керосина. При постоянной линейной скорости ролика 0,86 м/с и увеличении осевой нагрузки в 2,5 раза (с 4 до 10 Н) сила трения увеличивается и давление в керосине, в конфузурной области контакта, возрастает с 1400 до 3700 мм вод. ст., то есть также  $\sim$  в 2,5 раза. Сила трения скольжения пропорционально возрастает с увеличением избыточного давления среды в конфузурной области контакта по направлению движения вала, которое, в свою очередь, растет с увеличением вязкости среды, осевой нагрузки и линейной скорости скольжения. Следовательно, сила трения скольжения является интегральным результатом процессов, протекающих в граничных слоях смазки в конфузурно-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 имело место в керосине (рис. 3). Объясняется это особенностями поведения жидкостей в условиях пониженного относительно окружающей среды давления, когда она вскипает и переходит в двухфазное состояние, а также несовершенством техники измерений в рассматриваемых экспериментах.

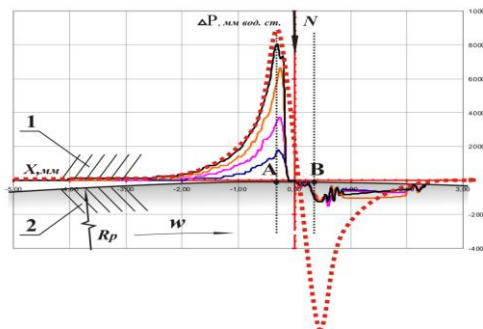


Рис.4. Зависимость распределения давлений в граничных слоях диалкилбензолного масла при разных скоростях скольжения

На рис.4. [AB] – ширина линейного контакта контртела 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)

На основе полученных экспериментальных результатов исследований и выдвинутой гипотезы компрессионно-вакуумной природы трения [10, 11] контактные процессы, протекающие при трении подшипника скольжения, в среде представляются следующими.

При медленном сближении вращающегося ролика с неподвижной поверхностью плоского контртела, в момент образования механического контакта, происходит резкое повышение силы трения и давления в конфузурной зоне, а также понижение давления в диффузорной области контакта. При этом разрушение контактных поверхностей не происходит - в момент образования упругого трибоконтакта резкое повышение силы трения вызвано скачкообразным повышением величины избыточного давления у самой кромки контакта в конфузурной области и симметричным понижением – в диффузорной. Визуально наблюдается также скачкообразное ускорение потоков среды (по направлению вращения): из зоны на входе ролика в контактную область из нее – в зону выхода ролика.

Указанное объясняется тем, что при упругом деформировании поверхностей трения, разделённых граничными слоями смазки, в конфузурном участке контактной области по направлению вращения ролика COF происходит упруго-контактное сжатие и ускорение вторичного течения граничных слоёв смазки в направлении, обратном движению ролика (рис. 5). Такое ускорение вызвано положительным градиентом давления в смазочном слое от атмосферного до величины максимального контактного давления, которое соответствует максимальным контактным напряжениям на поверхностях элементов трибопары. За область максимальных напряжений  $OO_1$  в диффузорном участке выхода ролика из контакта ODE происходит упруго-контактное расширение обеднённых граничных слоёв предшествующим выдавливанием на участке COF и ускоренное вторичное течение молекул жидкости из объёма среды в контакт.

Перед входом вала в контакт (рис. 5) в области CFAC, то есть в конфузурной части контакта граничных слоёв жидкой среды от сечения AA до сечения OO, образуются вторичные гидравлические течения среды, направленные в сторону, обратную движению вала. Они вызваны



компрессиєю набегающих адсорбированных на поверхности ролика слоёв смазки, которые движутся вместе с ним в направлении контактной зоны с максимальной скоростью, равной линейной скорости скольжения вращающейся поверхности образующей цилиндра ролика. Вторичное гидродинамическое течение, обратное движению ролика, возникает на значительном расстоянии до контактной зоны. Оно образуется под действием упругих деформаций граничных слоёв, то есть сжатия в конфузурной приконтактной области СФАС, вызванного геометрическим сужением канала, направлено в сторону, обратную движению ролика со скоростью. Экспериментально это наблюдается и фиксируется с помощью измерительного зонда давления при вращении вала вблизи плоской поверхности контртела как в жидкой, так и в газообразной среде.

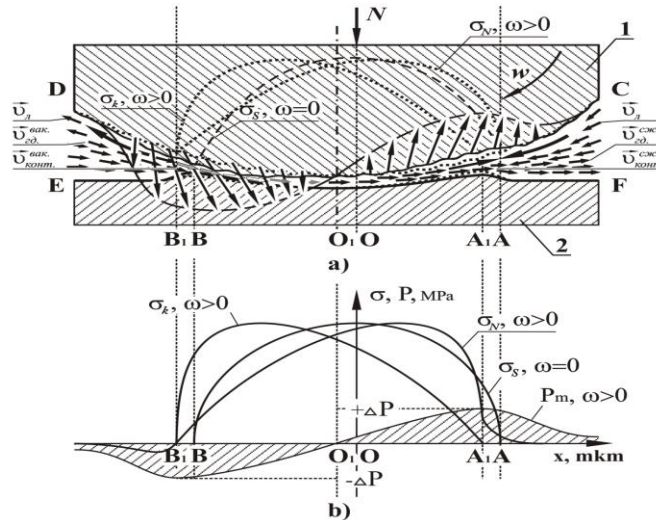


Рис. 5. Схема образования контактных встречных компрессионных и вакуумных течений граничных слоёв смазки:

- а) - в трибосистеме скольжения «ролик 1 – контртело 2», направленных обратно скольжению, и смещение неподвижного контакта АОВ в направлении скольжения в зону А<sub>1</sub>О<sub>1</sub>В<sub>1</sub>;
- б) распределение контактных напряжений на поверхностях трения  $\sigma_s$  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  $\sigma_k$  при трении ( $\omega>0$ ); суммарное поле реактивных напряжений, действующих нормально только на поверхность движущегося ролика  $\sigma_R$  при трении ( $\omega>0$ ).

При приложении осевой нагрузки  $N$  к вращающемуся валу, возникает механический упругий контакт АВ с граничными слоями среды между сжимаемыми поверхностями (рис. 5). В конфузурной части контакта АО возникнет еще одно обратное течение граничных слоев среды из области минимального зазора ОО<sub>1</sub> и, соответственно, максимального одноосного давления сжатия  $\sigma_{max}$ , до кромки входа вала в контакт АА<sub>1</sub>, где давление превышает атмосферное на величину степени сжатия граничных слоёв в приконтактной конфузурной области СФАС.

Это вторичное контактное течение реализуется принудительно, начинаясь от зоны входа ролика в контакт АА<sub>1</sub>, то есть от кромки касания деталей с граничными слоями среды, до зоны ОО<sub>1</sub> с максимальными контактными напряжениями  $\sigma_{max}$ , то есть из области минимального зазора пристенных граничных слоёв смазки.

Отмеченные течения обратной компрессионной струи ОА и набегающих адсорбированных слоёв смазки СА у передней кромки контакта А<sub>1</sub>А входят в столкновение. Происходит процесс, подобный известному в гидродинамике гидравлическому тарану, но в отличие от классического - однократного, гидротаран в рассматриваемом случае - непрерывный.

На выходе ролика из контакта по направлению скольжения в области ВВ<sub>1</sub> также возникают противоположные гидродинамические и контактно-гидродинамические течения, но с вакуумированием или растяжением граничных слоев. Адсорбированные слои на трущейся поверхности ролика с остаточными фрагментами смазки в минимальном зазоре движутся вместе с поверхностью ролика из области от минимального зазора ОО<sub>1</sub> в область выхода из контакта ВВ<sub>1</sub> со скоростью  $v_{л.}$ . Этот обеднённый предшествующим выдавливанием граничный слой оказывается в расширяющемся диффузурном канале, проходя путь от зоны ОО<sub>1</sub> до ВВ<sub>1</sub>, где по пути движения

происходит его разрежение, то есть вакуумирование. Вторичное диффузорное обратное течение формируется из среды, находящейся в объёме  $DBB_1E$  вблизи зазора  $BB_1$  с давлением окружающей среды  $P_{атм}$ . У самой кромки выхода ролика из контакта с плоскостью  $BB_1$  фрагменты среды устремляются из области  $B_1E$  в зону пониженного давления граничных слоёв  $BB_1$  со скоростью, откуда поверхностью ролика выносятся разреженные фрагменты среды, которые, в свою очередь, пройдя путь от зоны  $OO_1$  до  $BB_1$ , под действием отрицательного градиента давлений оказались в диффузорном канале. Контактная «вакуумная» струя возникает из относительно покоящихся фрагментов среды, которые под воздействием атмосферного давления втекают в зазор тангенциально к поверхности ролика, выходящего из контакта с контртелом в зоне  $BB_1$ . При этом сильноразреженный, возможно даже мономолекулярный слой смазки на ролике у самой кромки выхода из контакта, движется с поверхностью ролика в направлении скольжения по пути от зоны  $OO_1$  до  $BB_1$ , образуя второе течение среды. Эти два течения, где преимущественным является течение из объёма в зазор у выходной кромки контакта  $BB_1$ , направлены практически тангенциально к поверхности вала. При встрече они приводят к понижению степени разрежения смазочных поверхностных слоёв в зоне  $BB_1$  до давления окружающей среды. По сути происходит нечто подобное процессу гидравлического тарана адсорбированных и вакуумированных слоёв смазки - выходящего из контактной зоны рабочей поверхности ролика и перетекающего из среды в контактную зону. В отличие от эффекта классического гидротарана, для которого характерна однократность, в рассматриваемом случае происходит непрерывное столкновение разреженных фрагментов среды.

Например, под действием высокого контактного градиента давлений  $(\sigma_{max} - P_{атм}) = 1,1$  МПа на расстоянии полуширины контакта 0,4 мм возникает истечение фрагментов среды из контактной зоны со скоростью. Эта скорость по приблизительным расчетам для керосина при нагрузке 4 Н и скорости скольжения 1 м/с составляет 16 м/с. Если учесть, что скорость набегающих слоёв керосина  $\sim 1$  м/с, то у кромки контакта происходит столкновение двух обратно направленных потоков среды с относительной скоростью 17 м/с. Этот эффект определяет силу трения скольжения, которая лавинообразно возникает при медленном нагружении контакта. Из представленного видно, что в поле высоких градиентов давления жидкокристаллические граничные слои смазки ведут себя, как жидкость.

Лавинообразное уменьшение скорости вращения вала, сопровождающееся характерным изменением шума электроприводов при плавном создании контакта смазанных поверхностей путем медленного нагружения, наблюдается всегда. Это вызвано возникновением контактного упруго-деформационного истечения граничных слоёв смазки из контакта под действием возрастающего в направлении движения избыточного давления на входе в контакт. А на выходе из него течение среды из объёма в разреженные слои контактной диффузорной области происходит под действием атмосферного давления. Такое совместное воздействие этих течений на граничные слои трущейся поверхности в обратном направлении вращения ролика и является причиной его интенсивного торможения, а не действие адгезионной составляющей силы трения, так как при первичном контактировании признаки поверхностного схватывания не наблюдаются.

На рис. 5 ось  $OO$ , проходящая через центр вращения ролика, по которой приложена сила сжатия  $N$  вала 1 и контртела 2, является геометрической осью симметрии контакта  $AB$ , возникающего в статических условиях без движения ( $\omega = 0$ ). При вращении вала ( $\omega > 0$ ) возникают области повышенного давления на входе вала в контакт и разрежения среды на его выходе из контакта. В этих областях создаются перепады давления ( $+\Delta P$  и  $-\Delta P$ ) относительно давления окружающей среды, поэтому основание эпюр контактных напряжений и напряжений сил трения смещается в сторону направления движения вала (влево на рис. 5). При этом контактные напряжения, развиваемые на поверхностях элементов трибопары  $\sigma_k$  при наличии силы сжатия  $N$ , будут представлять собой разницу контактных напряжений, возникающих в эпитропных слоях смазки и на поверхностях в статических условиях (без движения вала)  $\sigma_s$ , и перепадов давления  $\Delta P$ , возникающих в слоях смазки при движении вала:

$$\sigma_k = \sigma_s - \Delta P \quad (2)$$

Таким образом, контактные напряжения  $\sigma_k$  при трении скольжения будут смещаться в сторону направления движения вала, то есть в область пониженного давления, как показано на рис. 5.

Силы трения при этом будут определяться нормальной и тангенциальной проекциями развиваемых на поверхностях элементарных реакционных напряжений  $\sigma_N$ , которые в свою

очередь представляют собой сумму контактных поверхностных напряжений  $\sigma_s$  и перепадов давления  $\Delta P$ , возникающих в этих слоях при движении вала:

$$\sigma_N = \sigma_s + \Delta P. \quad (3)$$

При этом основание эпюры  $A_1B_1$  напряжений от действия сил трения  $\sigma_N$  совпадает с основанием  $A_1B_1$  контактных напряжений  $\sigma_s$ , но сама эпюра будет наклонена в обратную вращению вала сторону, как показано на рис. 5.

Как видно из формул (2) и (3), в случае полного разделения поверхностей граничными слоями смазки, контактные напряжения  $\sigma_k$  и напряжения от действия реакционных сил  $\sigma_N$ , возникающие симметрично на поверхностях трения, как вала, так и контртела, при проецировании их на вертикальную ось интегрально будут равны напряжениям, возникающим на рабочих поверхностях, когда те находятся в покое, уравнивая действие внешней силы сжатия  $N$ . Эпюры контактных напряжений  $\sigma_k$  и напряжений воздействия реакционных сил  $\sigma_N$  наклонены в разные стороны. То есть, поверхности в области разрежения ЭЖК слоёв будут сильнее нагружены, чем в области повышенного давления.

Учитывая всеобщий закон физики аддитивного сложения первичных сил, сила трения скольжения между валом и контртелом включает в себя следующие составляющие:

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

и связывает силу внутреннего трения  $F_x$ , действующую на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкой среды (газа, жидкости) с градиентом скорости посредством коэффициента динамической вязкости среды. То есть молекулярный слой смазки, движущийся со скоростью, преодолевает сопротивление относительно покоящихся слоев среды тангенциальной деформации. Сила внутреннего трения, возникающая при движении тела в среде с неограниченным объёмом, то есть без каких-либо препятствий, во многом определяется 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 учитывается форма тела, объёмная вязкость среды  $\eta_0$  и скорости движения каждого фрагмента поверхности вала  $S_\Sigma$ . Силы внутреннего трения, по сути, являются гидромеханическими силами, вызванными лишь сопротивлением среды деформации от движения в ней твёрдого тела.

Гидродинамическая составляющая силы трения 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  $v$ , истекающих из конфузорного зазора и движущихся в обратную сторону относительно вызванных гидродинамической конфузорной деформацией сжатия течений со скоростью  $v$ . В диффузорной части зазора, по направлению движения поверхности, происходит скольжение выходящих из зазора разреженных граничных слоёв смазки по слоям смазки, втекающим в него со скоростью под действием внешнего давления окружающей среды.

Контактно-гидродинамическая составляющая силы трения скольжения возникает от действия контактной нагрузки, вызывающей упругую деформацию граничных слоёв, связанной с высоким положительным градиентом давлений, возникающих в них от сжатия на уровне упругой деформации поверхностей на участке  $OA$  (рис. 5). Такое деформационное воздействие на вносимые в контакт граничные слои среды приводит к их ускорению в конфузорной части контакта от сечения  $O_1O$  до кромки входа вала в контакт в сечении  $A_1A$ , где граничные слои поверхностей трения выходят из контактного взаимодействия, а скорость вторичного течения молекул ЭЖК слоёв максимальна. Давление в сечении  $A_1A$  связано со сжатием от предыдущих гидродинамических предконтактных конфузорных деформаций граничных структурно-чувствительных слоёв с суммарной скоростью. В диффузорной части также возникает дополнительное, вызванное вакуумированием ЭЖК слоёв, вторичное течение.

Если разрежение в граничных слоях не превышает порогового давления, вызывающего кавитацию в среде смазки, то сила трения  $F_{mp}$  или сопротивления вращению вала может быть определена в виде трех составляющих. Первая – гидромеханическая  $f_{эм}$ , возникающая от сопротивления деформированию среды при вынужденном её перемещении приповерхностными граничными слоями, которому сопротивляются близлежащие покоящиеся слои, чем в свою очередь препятствуют последующие слои и т.д. в неограниченном каким-либо препятствием объёме.



Вторая составляющая силы трения – гидродинамическая  $f_{zd}$ . 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 возникают 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  $f_{zd}$ .

Третья контактно-гидродинамическая  $f_{кгд}$  составляющая силы трения возникает в контакте граничных слоёв, которые находятся в упруго-деформационном одноосном напряженном состоянии под действием осевой силы сжатия. При относительном перемещении граничных слоёв одной поверхности по граничным слоям другой поверхности, также в конфузорной и в диффузорной областях их контакта, возникают соответствующие области сжатия и разрежения среды, создаваемые напряжениями, обусловленными упругой деформацией материалов. Под действием высокоградиентных контактных напряжений в материалах возникают соответствующие обратные движению вала контактно-гидродинамические вторичные течения. Поэтому третья контактно-гидродинамическая сила трения имеет две составляющие, возникающие в контакте упруго-деформированных ЭЖК слоёв и соответствующих конфузорной и диффузорной областям контакта ЭЖК-слоёв  $f_{кгд}$ .

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

$$F_{mp} = f_{zm} + f_{zd} + f_{кгд}, \quad (7).$$

## ВЫВОДЫ

1. Установлено возникновение градиента давления в среде по обе стороны контакта трибосистемы скольжения типа «вал – контртело», 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. Отмеченная 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, где давление среды меньше или соответствует давлению 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 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 повышенного и пониженного давления в конфузорной и диффузорной областях контакта.

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

9. Показано, что условия контактирования двух смазанных поверхностей, сжатых с некоторой осевой силой, определяются упругой деформацией граничных слоев жидкости. Установлено, что в таком контакте смазочный слой в статических условиях нагружения ведёт себя, как упругое твёрдое тело, а в условиях высоких контактных градиентов давления и скоростей - как жидкость.

10. Экспериментально подтверждена гипотеза компрессионно-вакуумной природы трения и изнашивания, которая может стать объединяющей для трёх разделов 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. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М., «Машиностроение», 1976, с. 304.
4. Справочник по триботехнике / Под общ.ред. М.Хебды,, А.В.Чечиинадзе. В 3-х т. Т.1 Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400с.: ил.
5. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.:Физматгиз, 1963. – 472с.
6. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на тертя и износ.- М.:Машиностроение. – 1977. – 526с.
7. 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
8. 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.
9. Лужнов Ю.М. Нанотриботехнология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. М.: Интекст, 2009, 176 с.
10. Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания. –28 с. – Деп. в ГНТБ Украины. - 07.07.2008, №109-Ук 2008.
11. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. Нац. Авиаци. ун-т. – Киев, 2009. – 43с.: ил. – Библиогр.: 14 назв. – Рус. Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009.