

**Стельмах А.У.**

Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина

**АДГЕЗИОННО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ  
И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ. СООБЩЕНИЕ III.  
ВЗАИМОСВЯЗЬ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ (ДПГС)  
РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ  
С ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ,  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ  
И МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ  
ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ**

## **1. Введение**

Для управления работоспособностью трибосистем с граничным трением первостепенное значение имеет понимание ее взаимосвязи с физико-химическими, физико-механическими и теплофизическими закономерностями, проявляющимися на рабочих поверхностях трибоконтакта и в смазочной среде. Знание доминирующих процессов, вызывающих разрушение трибосистем во время эксплуатации, могут быть получены лишь на основе достоверных экспериментальных данных о тепловых, силовых и фазовых параметрах поверхностей и среды во время трения, то есть в динамике. Получение качественных закономерностей поведения множества взаимосвязанных различных динамических параметров, характеризующих один процесс – трение, необходимо для построения физической модели процесса граничного трения и на ее основе разработки эффективных методов управления работоспособностью трибосистемы. До настоящего времени построение такой модели сдерживалось противоречивостью существующих подходов к проблеме граничного трения: 1 – традиционного адгезионно-деформационного [1, 2, 3], в котором давление в граничном слое, отождествляемое с герцевскими контактными напряжениями, считается всегда выше давления окружающей среды, а динамические процессы в граничном слое полностью игнорируются; 2 – более раннего, эластогидродинамического (ЭГД) подхода, где на основе динамических процессов в тонком смазочном слое рассматривается лишь эпюра избыточного давления относительно давления окружающей среды, но игнорируются адсорбционно-деформационные взаимодействия поверхностей [4, 5, 6]. Для разрешения этого противоречия необходим компромиссный подход, учитывающий динамические процессы в граничном слое наряду с адгезионно-деформационными взаимодействиями рабочих поверхностей.

Для модельных трибосистем с линейным контактом в условиях граничного трения скольжения было установлено повышение износостойкости с ростом мгновенных контактных напряжений, асимметрия профилей износа дорожек скольжения, возникновение первичных узлов адгезионного взаимодействия в диффузорной области (ДО) и оседание продуктов изнашивания в конфузорной области (КО) [7]. Полученные закономерности не находят однозначного объяснения в рамках традиционных представлений, основанных на адгезионно-деформационной теории граничной смазки [1 - 3]. Для объяснения этих результатов была выдвинута гипотеза [8] о возникновении в граничном слое трибоконтакта двух разнополярных процессов, инициированных микротечениями в смазочной среде, которые приводят к появлению областей разряжения в ДО и сжатия – в КО. Для подтверждения этой гипотезы необходимы исследования динамических процессов в их взаимосвязи с физическими и тепловыми процессами в диффузорной и конфузорной областях трибоконтакта.

В связи с изложенным, цель настоящей работы – на базе разработанного специального аппаратно-методического комплекса [9] провести систематические исследования взаимосвязи ДПГС радиально-го подшипника скольжения с параметрами трения (скорость, нагрузка, вязкость среды и ее фазовый состав, давление, геометрия контакта) с фактическим напряженным состоянием поверхностей, термоэффектом, трибокавитацией, силой трения и предложить механизм возникновения вторичных течений.

## **2. Методы и материалы**

Для исследования динамических и теплофизических процессов в граничных слоях напряженного состояния поверхностей трения использовался комплекс методов и аппаратуры, описанных в работе [9]. Это приборы:

- изучения ДПГС и распределения давления в граничных слоях (АСБ-01, АСБ-02);
- изучения теплового распределения в смазочных слоях в динамике (АСБ-02Т, тепловизор ThermoCAM<sup>TM</sup>65);
- распределения давления в граничных слоях с определенным зазором (АСБ-03).

Опико-поляризационным методом исследовали распределение напряжений в модельном подшипнике скольжения как в статических условиях нагружения, так и при трении. Влияние скорости

скольжения, направления сканирования, величины осевой нагрузки и вязкости смазки на распределение давлений в ее граничных слоях линейного трибоконтакта изучали с использованием модернизированных современными цифровыми и программными продуктами приборах АСБ-01 и АСБ-02.

Динамические и тепловые процессы в граничных слоях изучены в широком диапазоне осевых нагрузок (от 1 до 150 Н) и линейных скоростей скольжения от 0,01 до 2,0 м/с в среде различных классов смазочных материалов: авиационный керосин ТС-1, авиационные моторные масла: минеральное МС-20 и синтетическое ИПМ-10, авиационное гидравлическое мало АМГ-10, холодильное масло ХФ-12-16, глицерин ХЧ, вакуумное масло ВМ-6, диалкилбензолное синтетическое масло, дистиллированная вода и др.

### 3. Результаты и обсуждение экспериментальных исследований

#### 3.1. Распределение давления в граничных слоях

Путем сканирования распределения давления в граничных слоях приемным устройством, расположенным на рабочей неподвижной поверхности модельной трибосистемы, получены экспериментальные эпюры давления в нормальных условиях (рис. 1), свидетельствующие о возникновении по обе стороны контакта симметричных относительно середины контакта, но разно-полярных процессов: сжатия – в области входа вала в контакт, и разрежения – в области выхода из контакта.

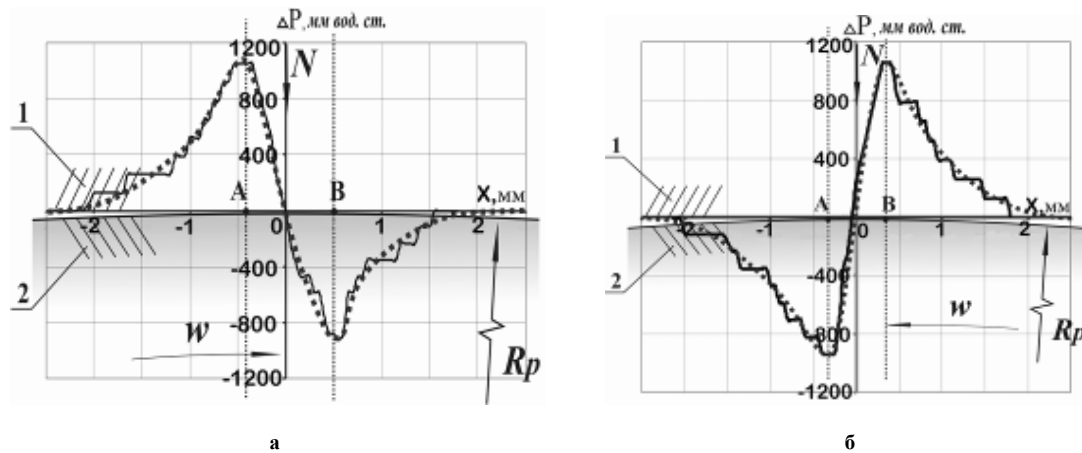


Рис. 1 – Распределение перепада давления  $\Delta P$  в граничных слоях керосина ТС-1 относительно атмосферного по координате сканирования  $X$  перпендикулярно контакту скольжения: а – вращение по часовой стрелке; б – вращение против часовой стрелки;  $[AB]$  – ширина линейного контакта контртела 1 и ролика 2 с радиусом  $R_p$  (45 мм);  $\omega$  – частота вращения  $100 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N$  – осевая нагрузка (4 Н)

Избыточное давление смещается в сторону области разрежения относительно оси симметрии контакта. Это свидетельствует о том, что фактический контакт при скольжении является подвижной динамически изменяемой системой поверхность-среда-поверхность. Такое смещение вызвано перераспределением контактных напряжений в поверхностях в соответствии с контактными трибогидродинамическими процессами сжатия и разрежения граничных слоев. Минимальную толщину смазочного слоя в трибоконтакте без учета его разрежения не следует рассматривать, как однозначный критерий нагруженности подшипников скольжения. Контактные течения граничных слоев смазки, а также возникающие околосконтактные зоны сжатия и разрежения граничных слоев среды полностью определяются условиями трения (осевая нагрузка и скорость). Прямыми экспериментальными измерениями интегрального давления в контактной и околосконтактной зонах установлено градиентное изменение давления на обеих границах переходной области: с максимумом со стороны конфузорной и с минимумом – в диффузорной. Эта же закономерность сохраняется для разных скоростей скольжения от малых до умеренных (0,001 ... 0,8 м/с) в разных средах (рис. 2, 3).

Экспериментально установлено (рис. 2), что сила трения скольжения, определяемая мощностью, потребляемой электроприводом, возрастает пропорционально увеличению избыточного давления среды в конфузорной области контакта, которое, в свою очередь, возрастает с увеличением вязкости среды, осевой нагрузки и линейной скорости скольжения. Следовательно, сила трения скольжения является отражением деформационных и адгезионных процессов, протекающих в граничных слоях смазки в конфузорно-диффузорных областях контакта. При этом в диффузорной области контакта  $B$  (рис. 2), то есть в области понижения давления, характер распределения давления существенно отклоняется от симметричного (пунктир), как это имело место в авиакеросине (рис. 1). Объясняется это особенностями поведения

жидкости в условиях пониженного относительно окружающей среды давления, когда она «вскипает» и переходит в двухфазное состояние, а также техническими трудностями при измерении разрежения в реальных жидкостях.

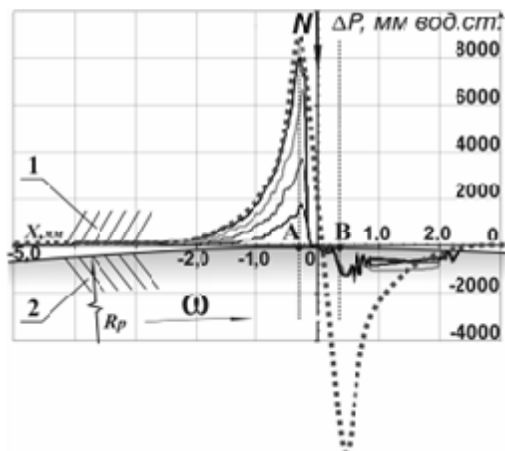


Рис. 2 – Распределение перепада давления  $\Delta P$  в граничных слоях диалкилбензольного масла относительно атмосферного по координате сканирования  $X$  перпендикулярно контакту при разных скоростях скольжения (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 м/с).

$[AB]$  – ширина линейного контакта на воздухе контртела 1 и ролика 2 с радиусом  $R_p$  (45 мм);

$\omega$  – частота вращения;  $N$  – осевая сила сжатия (4 Н).

Пунктирная линия – предполагаемое реальное распределение давления в граничных слоях

Распределение давления в граничных слоях (масло ИПМ-10) при различных нагрузочно-скоростных параметрах (рис. 3) показывает повышение интенсивности динамических процессов как в конфузурной, так и в диффузорной областях трибоконтакта скольжения с увеличением линейной скорости  $v$  и осевой нагрузки  $N$ . При осевой нагрузке 2 Н, линейной скорости 0,02 м/с и площади контакта 4 мм<sup>2</sup> степень разрежения достигала 50 кПа.

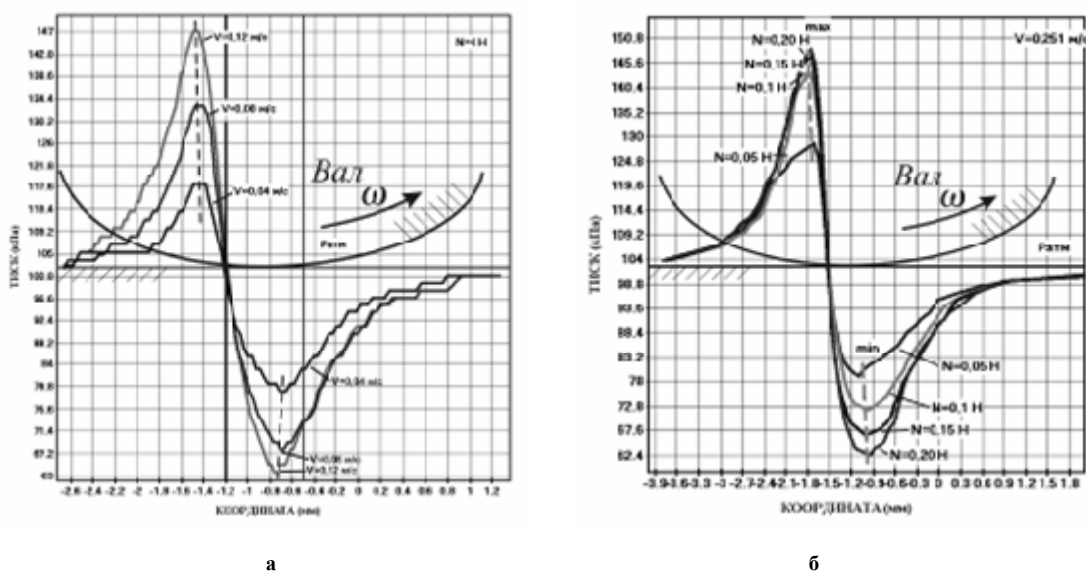


Рис. 3 – Распределение давления в контактной и околоконтактной областях:

а –  $V = 0,044$  м/с;  $N = 1Н; 2Н; 3Н; 4Н; 5Н; 6 Н;$

б –  $N = 2 Н$  и  $V = 0,04; 0,08$  и  $0,12$  м/с

Таким образом, анализ зависимостей (рис. 1 - 3) показывает, что величина осевой нагрузки и скорости скольжения трибоконтакта полностью определяют интенсивность ДПГС, то есть вторичных течений, которые в свою очередь приводят к возникновению разнополярных градиентов давления по обе стороны контакта.

Необходимо отметить разницу в явлении разнополярного градиента давления, возникающего в контактной области в граничном слое смазки и в твердом теле при его нагружении перемещающимся индентором. Общеизвестно [10], что «даже при однократном взаимодействии истираемая поверхность

последовательно подвергается действию сжимающих и растягивающих напряжений, так как каждый выступ поверхности гонит перед собой волну напряжений, сжимая материал впереди и растягивая позади». Эффект разнополярного градиента давления на обоих фронтах перемещения нагруженного индентора по поверхности твердого тела, обнаруженный при качении и скольжении в работах [2, 11], обусловлен не гидродинамическими процессами, а движением дислокаций в твердом теле (общепринято, что при трении положительный градиент напряжений в поверхностях возникает при сжатии, а отрицательный - при растяжении). Поэтому природа обоих внешне схожих эффектов градиента давлений в жидкой среде и в твердом теле различна и, следовательно, они не могут быть сопоставимы.

### 3.2. Схема образования разнополярных градиентов давления в граничных слоях

На рис. 4 показана схема возникновения вторичных течений граничных слоев смазки в конфузорных и диффузорных областях при трении скольжения вала 1 по модельному плоскому подшипнику 2 в упругодеформированных участках АОВ и в бесконтактных зонах FАС и ВЕD. При скорости набегающих с валом граничных слоев  $U_l$  в конфузорной области FА возникает обратное движению вала гидродинамическое течение  $U_{20}$  и на участке АО – контактно-гидродинамическое течение  $U_{конт}$ . Трение этих течений с фрагментами граничных слоев, набегающих с валом, приводит к увеличению давления в конфузорной области контакта. На диффузорном контактном участке ОВ происходит понижение давления упругодеформированных и, следовательно, с минимальным количеством фрагментов ЭЖК-слоев, прошедших область максимальных напряжений  $ОО_1$ . Поэтому под действием давления окружающей среды в зазор на участке ОВ будут стремиться фрагменты смазки из кромки диффузорного зазора ВВ<sub>1</sub> со скоростью  $U_{конт}$ . Также под действием давления окружающей среды в области DВE возникает гидродинамическое течение со скоростью  $U_{20}$  из объема смазки в контакт.

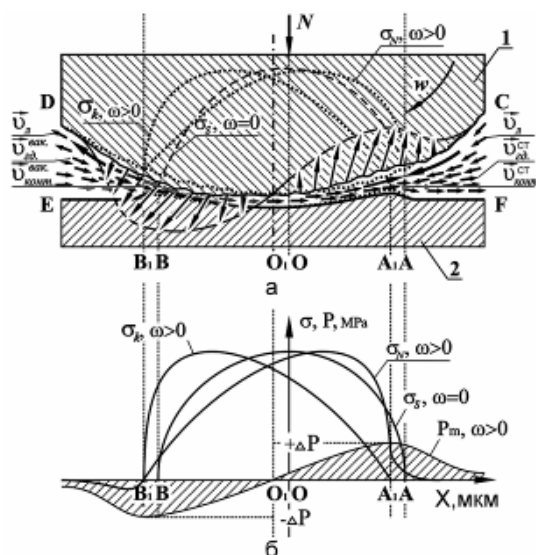


Рис. 4 – Схема возникновения вторичных течений, инициирующих возникновение разно-полярных градиентов давления в граничных слоях (а) и соответствующие им распределения контактных напряжений  $\sigma$  в поверхностях трения и давления  $P_m$  в граничных слоях смазки (б):

$\sigma_s$  – без трения ( $\omega = 0$ );  $\sigma_k$  – суммарное контактно-гидродинамическое давление при трении ( $\omega > 0$ );  $\sigma_N$  – суммарное поле контактных реактивных напряжений при трении ( $\omega > 0$ )

Учитывая разнополярность давления  $P_m$ , возникающего при трении в граничных слоях, контактные напряжения  $\sigma_k$  определяются как разница герцевских контактных напряжений в статике  $\sigma_s$  и давления  $P_m$ . Суммарные реактивные напряжения  $\sigma_N$ , действующие на поверхность вала при трении, включают в себя сумму давления граничных слоев  $P_m$  и напряжения  $\sigma_s$ . Таким образом, контактные напряжения увеличиваются в области выхода вала из контакта и уменьшаются – в области входа. При этом сопротивление движению вала создается не только деформационно-адгезионным взаимодействием поверхностей, но и ДПГС, вызванными градиентами давления. Перепад давления в граничных слоях при трении (рис. 1) указывает на то, что статические напряжения в поверхности модельного вала при его движении смещаются в направлении, противоположном движению, а контактные напряжения – в направлении выхода вала из контакта, где возникает разрежение смазочной среды. Это подтверждается поляризационно-оптическими исследованиями трения в динамике (рис. 5).

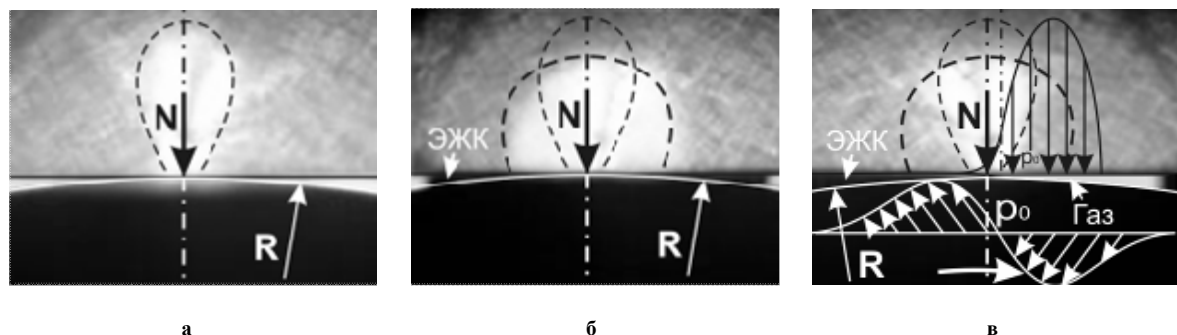


Рис. 5 – Контактные напряжения в изотропном кристалле (поляризованный свет) при сжатии нагрузкой  $N$ : а – на воздухе в статике; б – смоченный маслом (ЭЖК-слоями) в статике; в – то же при трении по часовой стрелке

Экспериментальное перераспределение контактных напряжений сухих и смоченных ЭЖК-слоями поверхностей (рис. 5, а) можно представить схематически (рис. 6). Образование линейного контакта  $A_a B_a$  шириной  $b_a$  поверхности вала 1 и поверхности плоского подшипника 2 происходит под действием осевой силы  $N_g$ , когда в поверхностях возникают контактные напряжения  $\sigma_a$  на воздухе. Его расширение до  $A_d B_d$  с шириной  $b_d$  и соответствующим их уменьшением до  $\sigma_d$  с учетом наличия на них ЭЖК-слоев толщиной  $d$  связано с жидкокристаллической природой граничных слоев. Таким образом, представленный механизм возникновения линейного контакта ЭЖК-слоями заключается в анизотропии свойств граничных слоев, адсорбированных на рабочих поверхностях, что приводит к уменьшению максимальных расчетных контактных напряжений вследствие увеличения фактической площади их действия упругодеформированными ЭЖК-слоями (рис. 6).

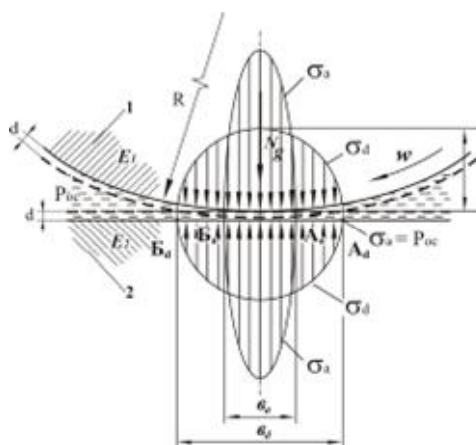


Рис. 6 – Схема образования линейного контакта  $A_a B_a$  шириной  $b_a$  поверхности вала 1 и поверхности плоского подшипника 2 под действием осевой силы  $N_g$  и возникновения в них контактных напряжений  $\sigma_a$  на воздухе и его расширение до  $A_d B_d$  с шириной  $b_d$  и соответствующим их уменьшением до  $\sigma_d$  с учетом наличия на них ЭЖК-слоев толщиной  $d$

Таким образом, реально протекающие динамические процессы в граничных слоях (ДПГС) полностью определяют фактическое напряженное состояние поверхностей трибоконтакта.

### 3.3. Распределение давления в граничных слоях при их трении скольжения в зависимости от зазора между поверхностями трибосистемы

Представленные выше результаты указывают на протекание динамических процессов в граничных слоях смазочной среды в модельном подшипнике скольжения не только при его осевом нагружении, но и при бесконтактном вращении вала. Поэтому представляют интерес исследования динамики возникновения вторичных течений в граничных слоях смазочной среды в модельном подшипнике скольжения с изменяемым зазором между поверхностями. На первом этапе изучалось влияние степени погружения вращающегося вала в смазочную среду на потребляемую электроприводом мощность, то есть на величину трения граничных слоев с покоящейся смазочной средой в объеме при отсутствии преград в виде других поверхностей (рис. 7). При постепенном погружении вращающегося модельного вала в смазочную среду и отсутствии преград в виде других поверхностей, то есть путем постепенного погружения вала в

жидкость, существенно увеличиваются силы гидромеханического сопротивления, которые определены по изменению мощности  $W$ , потребляемой электроприводом. При этом с увеличением частоты вращения вала и глубины погружения его в среду потребляемая мощность возрастает. Очевидно, что увеличение вязкости смазочной среды при прочих равных условиях приведет к увеличению потерь энергии на ее перемешивание вследствие гидромеханического трения набегающих граничных и покоящихся слоев. Полученные результаты (рис. 7) показывают, что наряду с уменьшением вязкости смазочной среды к экономии энергии также приводит уменьшение смазываемой площади деталей трибосистем, погруженной в данную среду.

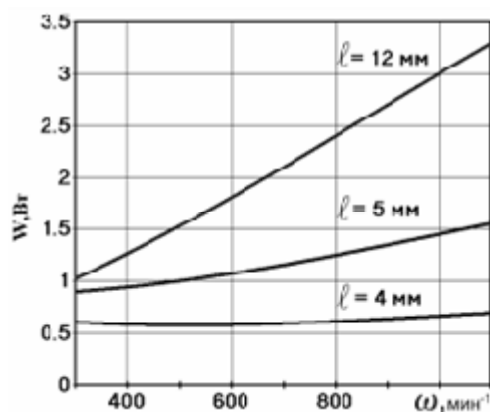


Рис. 7 – Зависимость мощности двигателя  $W$  от частоты вращения  $\omega$  и глубины погружения  $l$  модельного вала в смазочную среду (вакуумное масло VM-6)

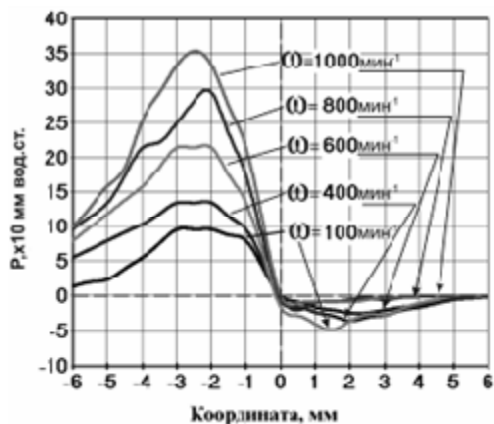
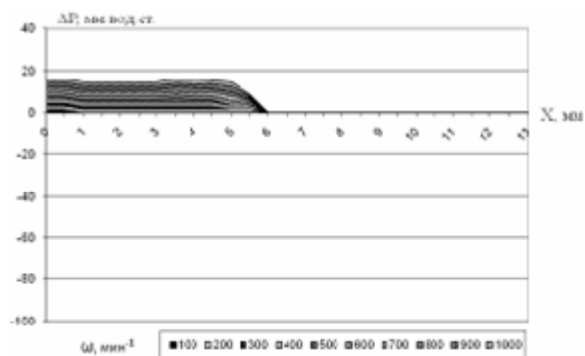


Рис. 8 – Распределение перепада давления  $P$  в граничных слоях вакуумного масла VM-6 от частоты вращения  $\omega$  при минимальном зазоре 0,5 мм в координате 0

При наличии плоской неподвижной поверхности на некотором расстоянии от рабочей поверхности модельного вала по обе стороны минимального геометрического зазора обнаружены две характерные области в направлении вращения вала (рис. 8). На входе в зазор давление повышается и возникают вторичные обратные течения; на выходе из зазора происходит разрежение среды, и возникают соответствующие течения из среды в зазор, что наблюдается визуально.



Зазор = 1 мм

Зазор = 0,75 мм

Зазор = 0,5 мм

Зазор = 0,25 мм

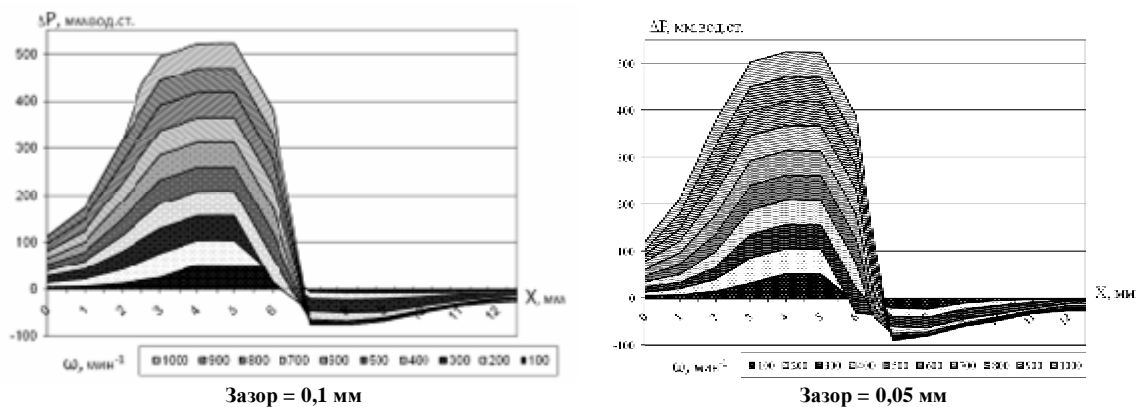


Рис. 9 – Распределение перепада давления в граничных слоях вакуумного масла ( $+\Delta P$  та  $-\Delta P$ ) по координате  $X$  относительно минимального зазора ( $6 \text{ мм}$ ) при разных скоростях вращения вала  $\omega$  и минимального зазора определенной величины ( $1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 \text{ мм}$ ) между поверхностью вала и неподвижной плоской стенкой. Глубина погружения минимального зазора в масло  $14 \text{ мм}$

Этот эффект подтверждается множественными экспериментами в различных смазочных средах, в частности, в вакуумном масле ВМ-6 (рис. 9). При этом с увеличением частоты вращения вала в указанном диапазоне (рис. 8, 9) градиенты давления относительно области минимального зазора возрастают практически линейно.

Представленные зависимости потерь мощности привода на трение и максимального перепада давления (рис. 8, 9) от частоты вращения и фиксированного зазора между рабочими поверхностями модельной трибосистемы указывают на их тесную взаимосвязь. Аппроксимация полученных экспериментальных данных (рис. 10, а) позволяет предположить, что при трении граничных слоев в микрометровом и нанометровом зазоре перепад давления  $\Delta P$  возрастет на порядки, что вызвано соответствующим на порядки ростом градиентов давления (рис. 10, б). Это предположение составило основу разработки и создания насосов нового типа и микро- наноразмерную триботехнику [12, 13]. При больших минимальных зазорах ( $h_{\min} > 0,5 \text{ мм}$ ) и малых скоростях вращения  $\omega$  ( $\omega < 300 \text{ мин}^{-1}$ ) давление в граничных слоях будет близким к атмосферному, что свидетельствует о малых скоростях вторичных возвратных течений в конфузорной области и приводит к излому зависимостей  $\Delta P(h_{\min})$ . Увеличение скорости вращения вала интенсифицирует динамические процессы трения набегających и вторичных течений, что соответственно приводит к росту градиентов давления.

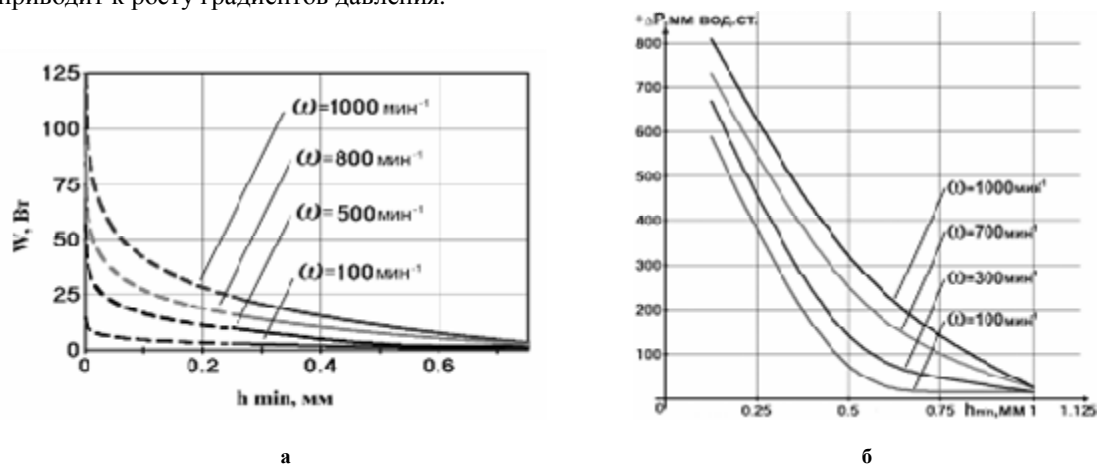


Рис. 10 – Зависимости потери мощности привода на трение  $W$  (а) и максимального перепада избыточного давления  $P_{\max}$  (б) от скорости вращения модельного вала и величины зазора ( $h_{\min}$ )

Таким образом, сила сопротивления, возникающая при трении приповерхностных граничных слоев, как контактного (без зазора под осевой нагрузкой), так и бесконтактного (с определенным зазором), имеет одинаковую трибо-гидродинамическую природу.

Известно [14], что граничные слои большинства смазочных материалов формируют на металлических поверхностях эпитропные жидкокристаллические (ЭЖК) структуры. Это составляет основу предложенного механизма возникновения вторичных гидродинамических течений в зазорах, меньших высоты структурно-чувствительных ЭЖК-слоев (рис. 11).

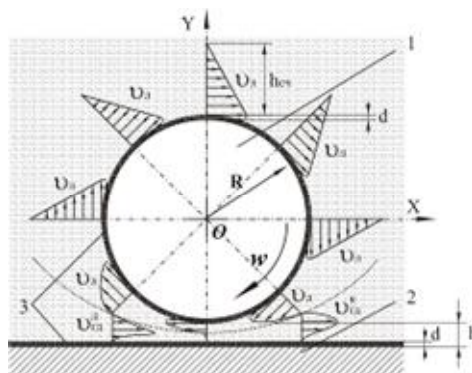


Рис. 11 – Схема возникновения вторичных гидро-динамических течений в зазоре  $h$  между модельным валом 1 и плоским подшипником скольжения 2 с ЭЖК-слоями 3 толщиной  $d$ , над которыми на высоте  $h_{cx}$  граничные структурно-чувствительные слои жидкости практически неподвижны

Вращение вала 1 вокруг своей оси со скоростью  $\omega$  в жидкой среде в нормальных атмосферных условиях с давлением окружающей среды  $P_{oc} = 0,1 \text{ МПа}$  схематически представлено на рис. 11. В случае отсутствия какого-либо препятствия около поверхности, образующей цилиндр вала, эпюры скоростей граничных слоёв смазочной среды можно упрощенно представить в виде треугольника, что характерно для Ньютоновской жидкости. Максимальную линейную скорость  $U_{\Delta}$  развивают ЭЖК-слои, имеющие некоторую толщину  $d$ , так как они характеризуются свойствами анизотропных кристаллических структур [3]. 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 линейной скорости  $U_{\Delta}$  поверхности вала (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 будут указывать на практическое отсутствие изменения давления и течения жидкости. 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 1 мм водяного столба, 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 1 мм при малых скоростях. На больших расстояниях от поверхности жидкость оставалась однофазной сплошной средой 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 (рис. 11). В сужающемся по направлению движения вала зазоре, то есть в конфузурной его области, происходит истечение среды из него в обратную движению вала сторону со скоростью  $U_{\Delta}^k$ . В расширяющейся части зазора, то есть в диффузурной области, жидкость втекает в зазор из объёма со скоростью  $U_{\Delta}^o$ . Эти течения возникают вследствие повышения давления в конфузурной области зазора, до его минимальной величины, где оно резко уменьшается до атмосферного. Это сопровождается соответствующим разрежением среды в диффузурной части зазора. 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.

Полученные в данном разделе результаты указывают на взаимосвязь потерь мощности привода модельного вала подшипника скольжения, то есть силы трения, с условиями трения: вязкостью среды, осевой нагрузкой, скоростью скольжения, геометрией контакта, величиной зазора, площадью смазываемой поверхности. В совокупности эти параметры определяют распределение градиента давления в граничных слоях смазочной среды относительно их минимальной толщины: положительный – в конфузурной области контакта, отрицательный – в диффузурной. Предложен механизм возникновения вторичных течений, согласующийся с гипотезой динамических процессов в граничных слоях, который состоит в их деформации сжатия и растяжения в соответствующих конфузурной и диффузурной областях трибоконтакта.



### 3.4. Тепловые процессы в граничных слоях при трении скольжения

После тщательной юстировки машины трения АСБ-03ТН и фокусировки тепловизора ThermaCAM™ R65 контроробразец путем медленного нагружения поднимался до соприкосновения с поверхностью, образующей цилиндр фторопластового ролика и создавался линейный контакт. При этом видеокамера фиксировала повышение температуры в образце на  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительно температуры окружающей среды. При осевой силе сжатия  $40\text{ Н}$  образовывался контакт шириной около  $2,8\text{ мм}$ . Плавное снятие нагрузки и вывод из контакта германиевого контроробразца приводили к выравниванию температуры через несколько минут, т.е. тепловой след от созданного разовым сжатием контакта является следствием упругой деформации сжатия граничных слоев (рис. 12).

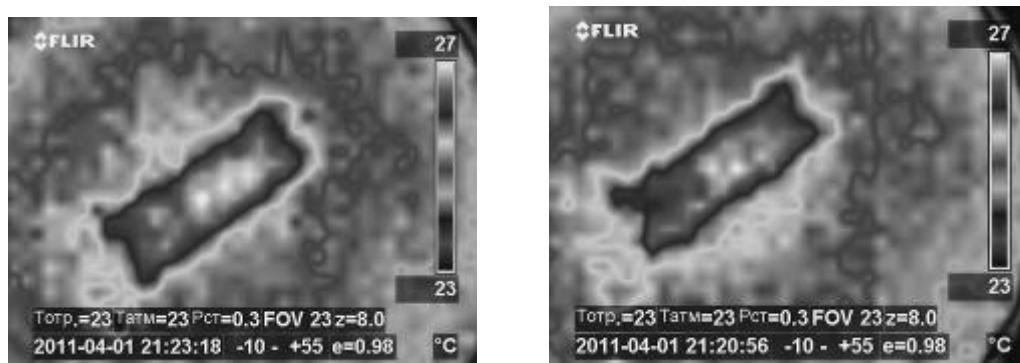


Рис. 12 – Распределение температуры в контактной области при сжатии поверхности, образующей цилиндр ролика, с германиевым плоским стеклом в вазелиновом масле (а) и то же – после снятия нагрузки и создания зазора между поверхностями  $1\text{ мм}$  через  $1\text{ мин}$

Распределение температуры исследовали как непосредственно в области трибоконтакта, так и в околоконтактной зоне. На рис. 13 представлено распределение температуры относительно контакта и направления скольжения модельного вала при трении в динамике: максимальная температура развивается перед контактом, а торцевое повышение температуры свидетельствует о перетекании граничных слоев из конфузорной области контакта в диффузорную.

Ранее экспериментально было установлено для трибоконтакта качения [5], что самое интенсивное теплообразование происходит не на выходе вала из контакта, а на входе в него (перед ним). Этот термоэффект с позиций ЭГД-теории смазки не нашел однозначного объяснения. В рамках гипотезы ДПГС повышение температуры перед входом вала в контакт при трении скольжения объясняется молекулярным трением набегающих и противоположно направленных вторичных течений граничных слоев смазки в конфузорной области трибоконтакта.

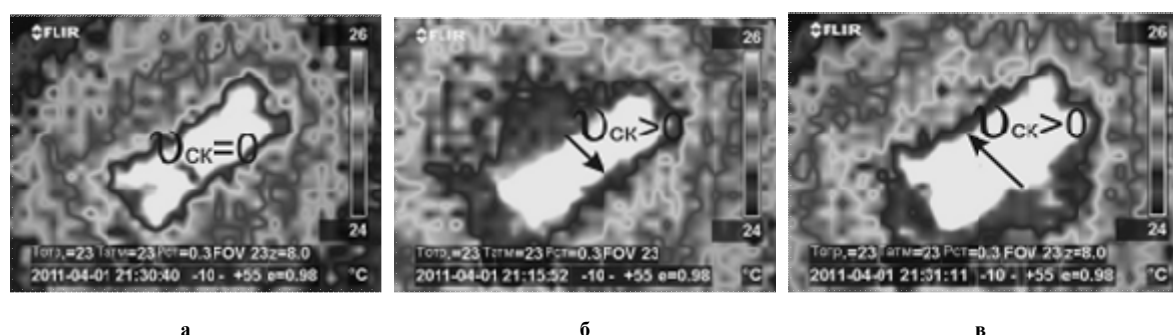


Рис. 13 – Распределение температуры в околоконтактных областях в статических условиях (а) и при трении скольжения в разных направлениях, указанных стрелками (б, в)

В области входа вала в контакт с подшипником скольжения молекулярное трение набегающих и вторичных истекающих течений граничных слоев смазки, имеющих противоположное направление, приводит не только к повышению давления, но и к повышению температуры. В то же время в диффузорной области ожидается понижение температуры, вызванное локальным разрежением граничных слоев, вплоть до образования газо-воздушного пространства между поверхностями модельной трибосистемы скольжения и возникновения трибокавитации. Однако с использованием имеющейся аппаратуры вероятное понижение температуры в диффузорной области контакт установить пока не удалось.

Таким образом, тепловой эффект в конфузурной области трибоконтакта скольжения является следствием трения набегающих и вторичных возвратных течений граничных слоев. Термоэффект, с одной стороны, приводит к повышению тепловой напряженности трибосистемы, а с другой - интенсифицирует упруго-динамические и термодиффузионные микропроцессы тепломассопереноса, смешения и турбулентности смазки в конфузурной области. Очевидно, что с увеличением вязкости среды термонапряженность контакта в конфузурной области возрастает вместе с увеличением силы трения и одновременным уменьшением теплоотдачи смазки.

### 3.5. Влияние агрегатного состояния смазочной среды на характеристики трибоконтакта скольжения

С увеличением частоты вращения гидромеханическое сопротивление уменьшается, что обусловлено практическим отсутствием разрежения в диффузорной области контакта. При скоростях  $> 3$  м/с для данной модельной трибосистемы в масле МС-20 возникает интенсивный барботаж и насыщение масла микропузырьками воздуха. Это объясняет снижение степени разрежения смазочной жидкости, так как масловоздушная суспензия в условиях всестороннего растяжения характеризуется на порядки меньшим модулем упругости.

Зависимости силы трения  $F_{тр}$  и перепада давления  $\Delta P$  в слоях смазки (МС-20) от скорости скольжения через 1 минуту после выхода трибосистемы на установившийся режим линейной скорости  $U$  представлены на рис. 14, а. Аналогичные зависимости были получены при тех же скоростях, но через 10 минут трения (рис. 14, б), когда количество микропузырьков возросло, обуславливая уменьшение перепада давления и, как следствие – силы трения. При трении в режиме жидкостной смазки с увеличением скорости от 0,1 до 0,6 м/с сила трения и давление в конфузурной области контакта изменяются согласованно (рис. 14). Визуально установлено, что с увеличением скорости в прозрачном масле МС-20 возникают воздушные пузырьки, количество которых и интенсивность образования со временем возрастает. С увеличением скорости скольжения до значения 0,6 м/с масло теряет прозрачность, а при дальнейшем ее увеличении в контактной зоне формируется непрозрачная однородная масловоздушная смесь в виде суспензии серого цвета.

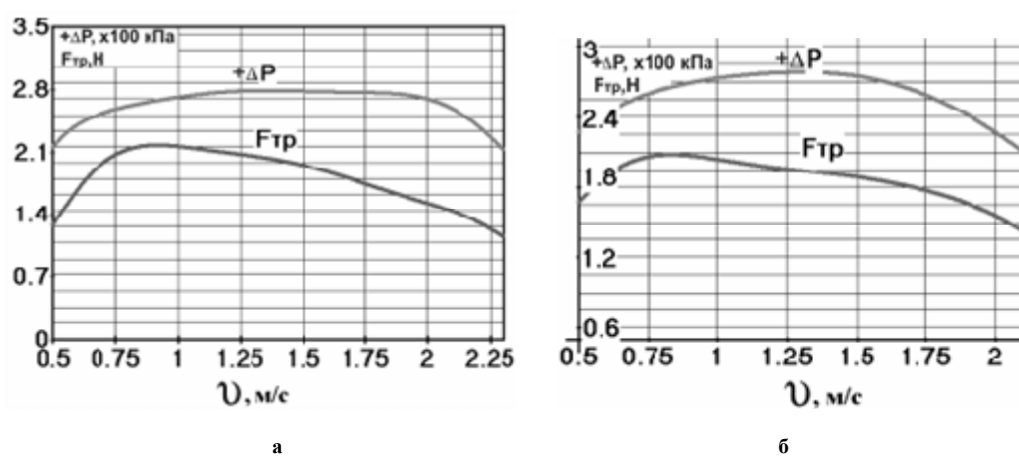


Рис. 14 – Зависимость силы трения  $F_{тр}$  и максимального избыточного давления  $\Delta P$  от скорости линейного скольжения  $U$  при осевой нагрузке 4 Н через 1 мин (а) и через 10 мин (б) после выхода на установившийся режим

Таким образом, впервые экспериментально показано, что причиной экстремального изменения силы трения при увеличении скорости скольжения трибоконтакта в моторном масле МС-20, является его переход из гомогенного жидкого состояния в многофазную масло-паровоздушную суспензию. Образование масло-паровоздушной суспензии, вызванное увеличением скорости вращения вала, приводит к увеличению коэффициентов сжатия и расширения исходно однородной жидкой смазочной среды. Уменьшение сопротивления сжатию смазочных слоев в конфузурной области контакта и разрежения - в диффузорной приводят к снижению интегральной вязкости, скорости вторичных обратных течений, температуры и силы трения. Фактическое фазовое состояние смазочной среды является важным фактором, существенно влияющим на результаты трибологических испытаний при оценке эффективности смазок с различными реологическими свойствами. Таким образом, замена гомогенной однофазной жидкой смазки на масловоздушную смесь позволяет повысить работоспособность и эффективность трибосистем. Процесс расслоения смазки ИПМ-10 в конфузурной области контакта и возникновения устойчивой газовой полости в диффузорной наблюдается визуально (рис. 15).

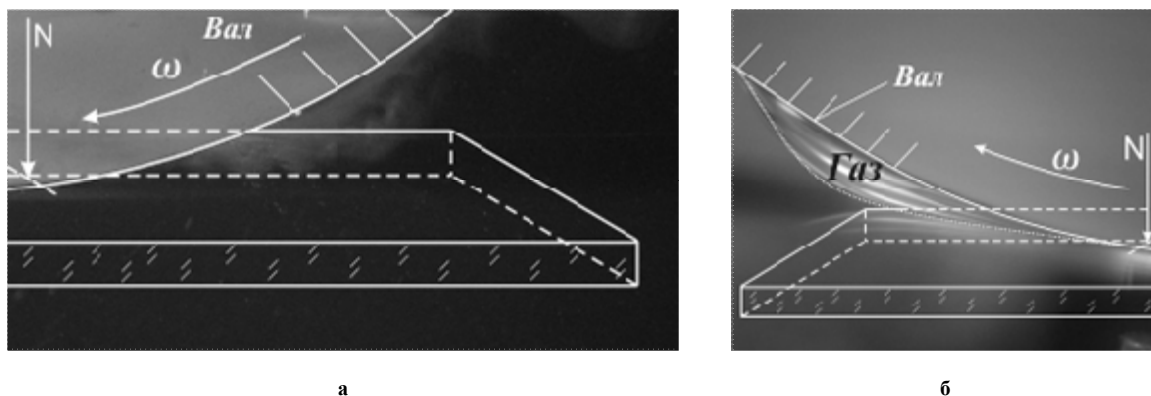


Рис. 15 – Расслоение граничных слоев в конфузурной области контакта (а) и газо-паровоздушная полость (б) при трении скольжения

Процессы фазового перехода граничных слоев в области их разрежения, где возникают условия для интенсивного трибоадгезионного взаимодействия поверхностей, подтверждают десорбционно-адгезионный механизм изнашивания трибосистем [7]. Эксперимент показал, что разрежение в диффузорной области трибоконтакта в среде вакуумного масла VM-6 при малых максимальных расчетных контактных напряжениях (1 МПа) и скорости скольжения 0,3 м/с достигает порога его кавитации –  $3 \cdot 10^{-6}$  мм ртутного столба. При таком низком давлении происходит десорбция граничных слоев, и некоторые участки поверхностей вступают в непосредственный контакт, реализуя адгезионное взаимодействие в условиях квазисухого трения. В результате образования мостиков схватывания, некоторые фрагменты подшипника скольжения будут налипать на поверхность вала и вместе с ним двигаться в конфузурную область зазора. Часть фрагментов, имеющих высокую степень связи с валом, становится микрорезцами для подшипника, другие подрезаются на входе в вал и выносятся в виде продуктов изнашивания. Об этом свидетельствует наблюдаемое закономерное адгезионное изнашивание поверхностей трения в диффузорных областях трибосистем в условиях граничной смазки. Оно всегда происходит в зоне выхода вала из контакта с характерными вырывами материала вследствие образования и разрушения адгезионных мостиков сваривания, чего никогда не наблюдается на входе [7]. Таким образом, именно диффузорная область трибоконтакта, где происходит разрежение, ответственна за работоспособность трибосистем.

Таким образом, процессы разрежения смазки в диффузорных областях контакта и трибокавитация, наряду с барботажем, способствующие выделению из смазочной среды газо-воздушной составляющей в условиях высокой степени разрежения в граничных слоях при локальном давлении, близком к давлению насыщенных паров масла, определяют условия квазисухого трения в ДО.

## Выводы

1. Впервые установлена взаимосвязь возвратных (реверсивных) течений смазочной среды с основными ее физико-механическими, теплофизическими свойствами, триботехническими характеристиками системы и выявлен механизм их возникновения.

2. Предложены механизмы возникновения вторичных течений, согласующиеся с гипотезой динамических процессов в граничных слоях в условиях бесконтактного трения (с определенным минимальным зазором между модельными валом и подшипником) и при граничном трении. Он заключается в деформировании граничных слоев (трение с зазором) и/или ЭЖК-слоев (граничное трение) путем сжатия в конфузурных областях и растяжения – в диффузорных, что приводит к возникновению соответствующих вторичных течений: в КО – из контакта в среду, а в ДО – из среды в контакт. В соответствии с этим механизмом находит свое объяснение известный термоэффект [5]: повышение температуры перед контактом, в его конфузурной области, происходит вследствие интенсивного трения набегающих с поверхностью вала граничных слоев и истекающих из контакта вторичных течений смазки.

3. Величина осевой нагрузки и скорость скольжения трибоконтакта полностью определяют интенсивность ДПГС, то есть вторичных (обратных) течений, которые в свою очередь приводят к возникновению разнополярных градиентов давления по обе стороны контакта.

4. Установлена взаимосвязь потерь мощности привода модельного вала подшипника скольжения, то есть силы трения, с условиями трения: вязкостью среды, осевой нагрузкой, скоростью скольжения, геометрией контакта, величиной зазора, площадью смазываемой поверхности. В совокупности эти параметры определяют распределение градиента давления в граничных слоях смазочной среды относительно их минимальной толщины: положительный - в конфузурной области контакта, отрицательный - в диффузорной.

5. Реально протікаючі динамічні процеси в граничних шарах повністю визначають на фактичне напружене стання поверхностей трибоконтакта.

6. Процеси розриву мази в дифузійних областях контакту та трибокавітація, наряду з барботажем, сприяють виділенню з мазочної середою газо-воздушною складовою в умовах високої степені розриву в граничних шарах при локальному тиску, близькому до тиску насичених парів мази.

7. Причиною екстремального зниження сили тертя з збільшенням швидкості сколювання трибоконтакта, обильно смазанного моторним маслом, являється його перехід з гомогенного прозорого жидкого стання в гетерогенну мазо-паровоздушну суспензію. Її утворення при підвищеній швидкості обертання вала призводить до збільшення на порядок коефіцієнтів стиснення та розтягнення початкової жидкої мазочної середою. Зменшення сил стиснення мазочних шарів такої суспензії в конфузійній області контакту та розриву - в дифузійній знижує інтегральну в'язкість, швидкість вторинних обернених течій, температуру та, як наслідок - силу тертя. Фазове стання мазочних матеріалів може суттєво впливати на результати оцінки їх ефективності. Тому при випробуваннях мазочних матеріалів різних класів на середніх та великих швидкостях рекомендується враховувати фактичне фазове стання мазочної середою.

8. Проведені дослідження трибосистем з визначеним мінімальним зазором між поверхнею вала та радіальним підшипником дозволили запропонувати нові способи та пристрої нагнітання та розриву середою шляхом реалізації безконтактного тертя поверхностей з граничними шарами та використання ефектів їх стиснення в конфузійних областях та розриву - в дифузійних [12, 13].

Автор виражає вдячність колективу лабораторії нанотриботехнологій НДЧ НАУ, за непряме участь в розробці пристроїв, макетів та експериментальних дослідженнях.

### Література

1. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М.; К: Машгиз, 1950. – 168 с.
2. Крагельский И. В. Основы расчетов на тертя и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Чихос Х. Системный анализ в трибонике / Х. Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
5. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
6. Dowson D. and Taylor, C.M., 1974, "Fundamental Aspects of Cavitation in Bearings," Cavitation and Related Phenomena in Lubrication, ImechE, England, pp. 15-26.
7. Стельмах А.У. Адгезивно-деформаційні та динамічні процеси в граничних шарах. Сповідання 1. Закономерности процесса изнашивания при трении в условиях граничной мази // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2012. – № 1. – С. 106-112.
8. Компресійно-вакуумна складова сили тертя в умовах граничного змащування / О.У. Стельмах // Вісн. Нац. авіац. ун-ту. – 2008. – N 4. – С. 74-81. – Бібліогр.: 14 назв. – укр.
9. Стельмах А.У. Адгезивно-деформаційні та динамічні процеси в граничних шарах. Сповідання 2. Нові пристрої та методи дослідження граничних шарів трибосистем // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2012. – №2. – С. 96-107.
10. Словарь-справочник по трению, износу и мази деталей машин / В.Д.Зозуля, Е.Л.Шведков, Д.Я.Ровинский, Э.Д.Браун; Отв. ред. И.М.Федорченко. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. – 2-е изд., перераб. и доп.- К.: Наук думка, 1990. – 264 с.
11. Запорожец В.В. Диагностика узлов трения авиационной техники / В.В. Запорожец, В.А. Бердинских. – К.: КИИГА, 1987. – 164 с.
12. Патент на корисну модель №65839 Україна, (51) МПК (2011.01) F04B 19/00, F04C 25/00. Спосіб нагнітання і створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/газоподібному/високодисперсному, твердому або багатофазовому стані /Стельмах О.У., Аксьонов О.Ф., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф., Запорожець О.І., Бадір К.К., Бондар В.С., Стельмах Д.О., Ібраїмов Т.Т., Хуссейн Д.Д., Аль-Тамімі Р.К.; – № U 2011 09336; заявл. 26.07.2011; опубл. 12.12.2011. Бюл. №23, 2011 р. – 22 с.
13. Патент на корисну модель №65840 Україна, (51) МПК (2011.01) F04C 2/00. Пристрій для нагнітання і створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/газоподібному/високодисперсному твердому або багатофазовому стані /Стельмах О.У., Аксьонов О.Ф., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф., Запорожець О.І., Бадір К.К., Бондар В.С., Стельмах Д.О., Ібраїмов Т.Т., Хуссейн Д.Д., Аль-Тамімі Р.К.; – № U 2011 09337; заявл. 26.07.2011; опубл. 12.12.2011. Бюл. №23, 2011 р. – 32 с.