

Тогда, для частиц диаметром  $0,1...10 \cdot 10^{-6}$  м в керосине (при  $20^\circ\text{C}$   $\mu = 12,8$ ;  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ) при  $U = 1,2$  м/с сила сопротивления подъему составит  $1,5 \cdot 10^{-5}...1,5 \cdot 10^{-3}$  Н. Следовательно, при определенном значении скорости  $v_{oz}$  (степени турбулизации потока) худшие условия для подъема в потоке будут для крупных и тяжелых частиц взвеси. При ламинарном течении жидкости ( $v'_{oz} = 0$ ) подъем частиц и удержание их в объеме во взвешенном состоянии сильно затруднено.

С учетом этого фактора гидродинамическая составляющая воздействующих сил примет вид

$$\vec{F}_{gидро} = \vec{F}_x + \vec{F}_y, \quad (5)$$

где  $\vec{F}_x$  и  $\vec{F}_y$  - векторные составляющие силы по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

Сложный профиль сепаратора и принудительное вращение подвижных элементов трибосистемы качения в процессе очистки способствуют образованию турбулентных течений, вместе с тем существенно снижают скорость переноса жидкости на рабочих поверхностях дорожек и тел качения, что ограничивает применение для очистки трибосистем качения от микро- и субмикрозагрязнений гидродинамическое воздействие в качестве основного действующего фактора.

Анализ литературных источников, а также результаты проведенных авторами экспериментов показали, что на границах доменов конструкционных материалов имеют место достаточно сильные магнитные поля, что вместе с остаточной намагниченностью деталей в значительной степени препятствует отрыву и удалению с их рабочих поверхностей частиц загрязнений ферромагнитной природы.

С учетом этого рассматриваемую систему можно представить совокупностей пар диполей (рис. 3).

Для частицы  $m_1$  загрязнения, на поверхности которого магнитная индукция  $B$  составляет 10 мТл (при допущении идентичности материала загрязнения и деталей подшипника), напряженность магнитного поля будет иметь вид:

$$H = \frac{B}{(\mu_0 \mu_m)} = 1,45 (A/m) \quad (6),$$

где  $\mu_m$  - магнитная проницаемость материала.

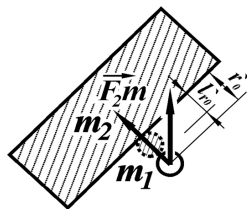


Рис. 3 Магнитное взаимодействие частицы загрязнения ферромагнитной природы с облоймой подшипника

Тогда намагниченность будет соответствовать

$$M_m = \frac{B}{\mu_0} - H = 7956,3 (A/m) \quad (7)$$

Для рассматриваемой частицы с объемом  $V_{m1}$  в диапазоне от  $5,24 \cdot 10^{-22}$  до  $5,24 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3$  и объема облоймы подшипника  $V_{m2} - 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  момент диполя равен

$$P = M_m \cdot V = ql \quad (8),$$

где  $V$  - объем частицы либо облоймы подшипника,  $q$  - заряд диполя,  $l$  - плечо диполя.

Магнитная сила взаимодействия частицы в поле внутреннего кольца подшипника составит

$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 H}{4\pi} \quad (9)$$

и для рассматриваемого случая будет принимать значения от  $2,9 \cdot 10^{-14}$  до  $2,9 \cdot 10^{-7}$  Н.

*Выводы*

1. Отрыв частиц загрязнений размером менее 5 мкм с деталей сложных и затененных рабочих поверхностей а также удержание их во взвеси моющего раствора крайне затруднено.

2. Причиной снижения эффективности очистки известными методами есть сложный профиль полостей трибосистем качения, затрудняющий удаление частиц микро-, субмикро- и наноуровня.

3. Сопоставление сил удержания частиц загрязнений на поверхностях трибосистем качения подтвердило необходимость особого рассмотрения магнитного взаимодействия исследуемых объектов на доменном уровне.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ И КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОЙ ГИПОТЕЗ ТРЕНИЯ

*Стельмах А.У., Бадир К.К., Ибраимов Т.Т., Стельмах Д.А.*  
Национальный авиационный университет

Во второй половине XX века проводились исследования по поиску научно-обоснованных методов, позволяющих повысить несущую способность подшипника, в котором реализовывался эффект «масляного клина», используемого в гидродинамической теории смазки (ГДТС), где трибосистемы и теоретически и практически безызносны. В ходе этих работ было выдвинуто

положение, основанное на учете упругих деформаций реальных конструктивных материалов, рассчитываемых по формулам Герца, что теоретически позволяло несколько увеличить осевые нагрузки в подшипниках, так как площадь контакта при этом увеличивалась. Контактнo-упруго- или эластогидродинамическая (ЭГД) теория трения А.И.Петрусевича, А.М.Эртеля, А.Н.Грубина и др., как и ГДТС предполагает работу ЭГД-трибосистемы при более высоких нагрузках теоретически безызносно. На основе совместного решения гидродинамической и упругодеформационной задач взаимодействия среды и поверхностей трибоконтакта, с учетом протекающих в смазке реологических термодинамических процессов, получены зависимости для оценки силы трения и других параметров трибосистем. Однако на практике коэффициент трения реальных трибосистем на один два порядка больше расчетных, а его значение достигает 0,01-0,10, что характерно для следующего еще более нагруженного режима - трение в условиях граничной смазки. При этом рассчитанные по формулам ЭГДТС трибосистемы, хоть и с малой интенсивностью, но изнашивались, что поясняют пуско-остановочными циклами эксплуатации узлов, на которых, полагают, что трение протекает в условиях граничной смазки.

В соответствии с ЭГД-теорией возникающие гидродинамические давления, действуя на упругие трущиеся поверхности, вызывают их деформации. Величины деформаций определяются величинами и распределением давлений по поверхности, то есть эпюрой давления. Исходя из такого базового суждения, решались, и по сей день, решаются задачи, связанные с гидродинамикой движущейся жидкости, ограниченной двумя трущимися поверхностями. «При этом жидкость движется стесненно, толщина смазочного слоя весьма мала» [1]. То есть, проблему трибологии в рамках ЭГД решали, исходя из двух основных положений: жидкость в контакте трибосистемы находится под высоким давлением, а несущая способность смазочных материалов определяется толщиной смазочного слоя в контакте. Классическая графическая интерпретация гидродинамического эффекта в радиальном подшипнике скольжения с ЭГД-контактом представлена на рис. 1, где эпюра давлений внутри смазочного слоя отождествляется с распределением контактных напряжений, возникающих в поверхностях шипа и подшипника.

В этих работах трение рассматривается, как сопротивление движению адсорбированных на движущихся поверхностях вала слоёв жидкой среды смазки, которые неподвижны относительно движущейся поверхности вала. Их движению препятствуют другие близлежащие молекулярные слои среды, которые вовлекаются в движение, передают импульс другим и так далее. По мере удаления от поверхности движение слоёв среды затухает, и на некотором удалении от перемещающейся поверхности среда будет находиться в объёмном состоянии относительного покоя.

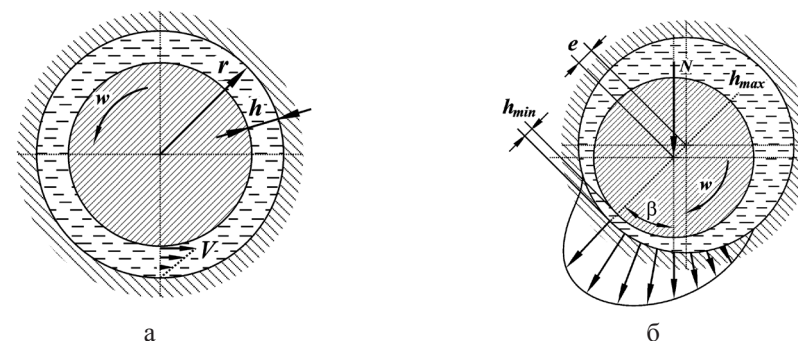


Рис. 1. Классическая схема возникновения давления в смазочном слое, которое отождествляется с контактными напряжениями в рамках ЭГД-теории смазки, где  $V$  – скорость в граничных слоях ньютоновской жидкости,  $h$  – толщина смазочного слоя,  $e$  – эксцентриситет,  $\omega$  – угловая скорость

Главным критерием реализации гидродинамического и эластогидродинамического режимов трения является минимальная толщина смазочного слоя, которая, экспериментально в динамике определялась не прямыми измерениями, а косвенными. Так, её оценку производят по электрической ёмкости системы поверхность-смазочная плёнка-поверхность и интерференционно-оптическим методом по интерференции света В статике, то есть при сжатии поверхностей без трения, точные измерения производили рентгеновским методом по ширине рентгеновского пучка, проходящего, через контактный зазор. При этом давления, развиваемые в смазочных слоях смазки, во время трения, в динамике не измерялись, они отождествлялись с контактными напряжениями, рассчитываемыми по Г.Герцу.

Серийные конструкционные материалы, например, стальные имеют модуль упругости 212000 МПа. При статическом сжатии осевой модуль упругости метиленовых цепей молекул углеводородных жидкостей, адсорбированных на поверхности твёрдой подложки, оказался равным модулю упругости алмаза. При трении, по данным 15 групп ученых [1] смазочный слой не теряет несущую способность до максимальных герцевских напряжений 3000 МПа. Следовательно, в статических условиях сжатия конструкционные и смазочные материалы обладают гигантской упругостью и прочностью, а экстремальными условиями работы трибосистем из этих материалов считаются: при трении качении 500 МПа и 40 МПа - при скольжении. То есть, конструкционный материал способен выдерживать нагрузки при сжатии на 2-3 порядка выше конструкторских расчетных нагрузок, при которых эксплуатируются детали узлов трения, смазочный слой обладает ещё боль-

шей прочностью, а при трении слой разрушается и происходит изнашивание поверхностей. Следовательно, в контакте происходят такие физические процессы, которые приводят к разрушению не только смазочного слоя, но и адсорбированных мономолекулярных граничных слоёв смазки.

Если бы удалось увеличить контактные удельные давления в узлах трения хотя бы на порядок, то габариты, например, трансмиссий уменьшились бы в три раза. Но непреодолимым препятствием на пути использования высокой теоретической несущей способности материалов в трибосистемах и уменьшения их энерго- и металлоёмкости остаются проблемы трения и изнашивания.

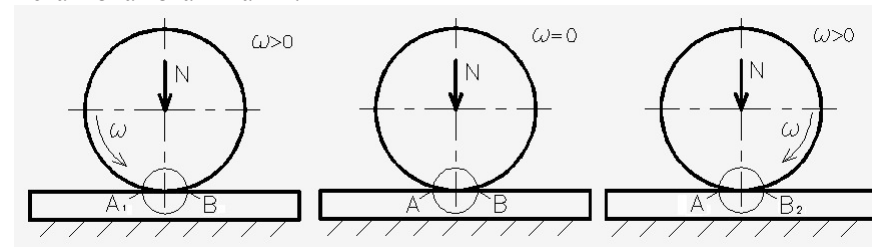
Самая распространённая и теоретически обоснованная эластогидродинамическая теория смазки включает в себя ряд известных основных положений (табл.1). Обращает на себя внимание тот факт, что путем измерения толщины смазочного слоя судят о давлении, возникающей в нем при трении. Как показали прямые измерения давления в граничных слоях ЭГД-контакта, в них возникает характерное конфуззорное сжатие и диффузорное разрежение, что легло в основу компрессионно-вакуумной гипотезы трения, основные положения которой не согласуются с ЭГД-теорией.

Таблица 1. Сравнение основных положений эластогидродинамической и компрессионно-вакуумной гипотез трения

№ пп	Положения эластогидродинамической теории смазки	Положения компрессионно-вакуумной гипотезы трения
1	Ресурс областей ЭГД-контакта определяется предельно допустимой толщиной смазочного слоя, которая должна превышать сумму высот микронеровностей контактирующих поверхностей.	Толщина смазочного слоя в ЭГД-контакте не отражает его трибологические свойства, так как в диффузорных областях даже при малых скоростях скольжения происходит разрежение смазочной среды, что приводит к ее фазовому переходу из жидкого с масло-воздушное состояние.
2	Считается, что смазочная пленка в контакте, образованная жидкой средой, является однофазной ньютоновской жидкостью на протяжении всего контакта.	Смазочная пленка в ЭГД-контакте, а именно в его диффузорной области, не является однофазной ньютоновской средой, а представляет собой масло-воздушную субстанцию (два граничных слоя трущихся поверхностей с паровоздушным вакууми-рованным пространством между ними).
3	Пленка смазки в ЭГД-контакте практически параллельна в его центральной части и сужается в районе выхода движущейся поверхности из него.	Пленка ЭГД-контакта, образованного криво-линейными поверхностями при сжатии, не параллельна в его центральной части, а является адекватным отражением гуксовской упругой деформации граничных слоев.

4	Напряжения в поверхностях ЭГД-контакта, рассчитываемые по Г.Герцу, равны давлению в смазочном слое при трении.	Давление в смазочном слое в конфуззорной области контакта увеличивается, а в диффузорной – уменьшаются относительно давления окружающей среды и не равны контактным напряжениям.
5	Контактные напряжения в поверхностях соответствуют расчетным значениям по Г.Герцу и отмечается наличие второго максимума давления (так называемый пик Петрусевича) в области выхода подвижного элемента трибосистемы из ЭГД-контакта.	Так как давление в смазочном слое не тождественно поверхностным контактным напряжениям, определяемым по Г.Герцу, то «контактные напряжения», «давление в смазочном слое» и «давления на трущихся поверхностях» являются разными параметрами.
6	Считается, что толщина слоя смазочного материала в ЭГД-контакте, как определяющий критерий работоспособности узлов трения, находится в диапазоне 0,1...1 мкм при герцевском давлении 1 ГПа, а время прохождения смазки через контакт составляет $10^{-3}$ ... $10^{-5}$ с.	В отличие от ЭГД-теории, в рамках компрессионно-вакуумной гипотезы трения через ЭГД-контакт смазочная среда поступает из конфуззорной в диффузорную область ровно в том количестве, сколько его находится в минимальном зазоре, в том числе и в упруго-напряженном состоянии сжатия.

Экспериментально доказано [2], что при трении в смазочном слое относительно его минимального зазора самопроизвольно возникает сжатие смазочных слоев в конфуззорной и их растяжение – в диффузорной областях ЭГД-контакта. Таким образом, давление в смазочном слое не тождественно поверхностным контактным напряжениям, определяемым по Г.Герцу (рис.2). Это значит, что понятия «контактные напряжения», «давление в смазочном слое» и «давления на трущихся поверхностях» нуждаются в коррекции в соответствии с экспериментальными данными, положенными в основу компрессионно-вакуумной гипотезы трения и трибокавитационного механизма изнашивания.



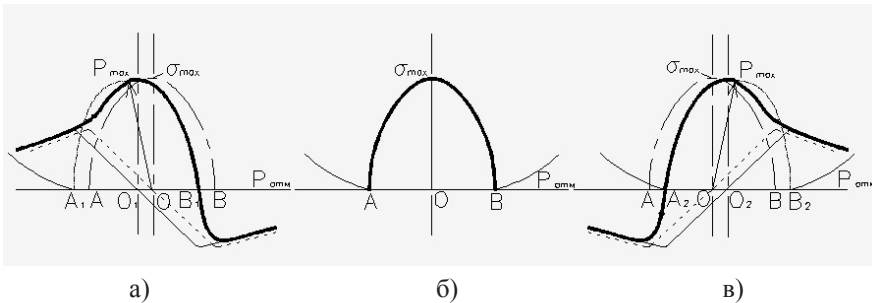


Рис.2. Схемы скольжения вала по плоскому подшипнику: против часовой стрелки (а), в статике без трения (б) по часовой стрелке (в) с контактом АВ, под нагрузкой  $N$ , скоростью вращения вала  $\omega$  и схемы распределения (внизу соответственно) «контактных» напряжений  $\sigma$ , а также их смещения; давления в смазочном слое  $p$  и давления, возникающего на поверхности вала, с учетом давлений в смазочном слое при атмосферном давлении  $P_{атм}$

Таким образом, в ЭГД-контакте одновременно возникает две области давлений около зоны с минимальной толщиной смазочного слоя: повышенного – в зоне сужающегося контакта до минимальной толщины смазки, и разрежения – в зоне расширяющегося зазора. Эти давления порождают соответствующие силы, действующие на вал в зоне минимальной толщины смазочного слоя, которые направлены в сторону скольжения и таким образом создаётся не только так называемая гидродинамическая подъёмная сила, приподнимающая вал (рис.1) в конфузормом канале смазки, но и ещё одна сила всасывающая вал разреженной средой в диффузормом канале радиального подшипника скольжения (рис.3).

Сравнение основных положений ЭГД-теории и компрессионно-вакуумной гипотезы трения указывает на существенные отличия представлений о физике процессов и явлений, протекающих в граничных слоях, что подтверждено экспериментально и свидетельствует о необходимости пересмотра ряда понятий и определений в трибологии.

Использованная литература

1. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.

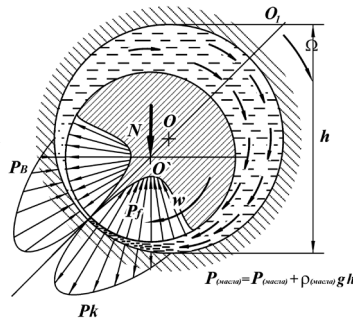


Рис.3. Схема возникновения гидродинамического эффекта с позиций компрессионно-вакуумной гипотезы природы трения

2. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. Нац. авиац. ун-т. – Киев, 2009. – Рус. Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009. – 43 с.

*Диха О.В., Посонський С.Ф., Диха М.О., Вичавка А.А.  
Хмельницький національний університет, Україна*

### ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗНОСОСТІЙКИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

На основі традиційних методів фінішної обробки (шліфування, хонінгування, доведення) досягається необхідна форма деталей із заданою точністю, але не завжди забезпечуються необхідні властивості поверхневого шару. Тому одним з головних завдань досліджень в галузі машинобудування є розробка прогресивних технологічних процесів на основі використання нових фізичних явищ, що забезпечують підвищення якості оброблюваних поверхонь. Електрфізичні способи обробки трибологічних поверхонь характеризується одночасною термічною і силовою дією на поверхню оброблюваної деталі і можуть проводитись в режимі поверхневої пластичної деформації, при якій досягається зміцнення і вигладжування мікронерівностей. Сутність електрофізичних способів нагріву зони контакту полягає в локальному нагрів місця взаємодії інструменту та заготовки, які ввімкнуті в електричний ланцюг як електроди з невеликою різницею потенціалів та великим струмом.

Одним з нових перспективних напрямків поверхневого зміцнення є створення на поверхні дискретних зміцнених зон. При формуванні дискретних поверхонь використовують різні технології і способи: механічні, високоенергетичні, електрохімічні, комбіновані та ін. Обробка дискретної поверхні за допомогою ППД разом із зміцненням дозволяє утворити на поверхні заглиблення, які сприяють утриманню мастила і накопичують продукти зношування, що вважається одним з факторів зменшення зносу.

Електромеханічна обробка (ЕМО) характеризується одночасною термічною і силовою дією на поверхню оброблюваної деталі і може проводитись в режимі поверхневої пластичної деформації, при якій досягається зміцнення і вигладжування мікронерівностей. При цьому можна значно знизити шорсткість оброблюваної поверхні деталей, що дозволяє використовувати електромеханічну обробку як чистову взамін, наприклад, шліфування, яке є менш продуктивним ніж ЕМО.

Одночасно із підвищенням якості обробки при ЕМО в поверхнево-му шарі утворюються шари зміцнених гартівних структур з будовою