

УДК 621.891(045)

А.У. Стельмах, К.К. Бадир, Т.Т.Ибраимов, Д.А.Стельмах

Национальный авиационный университет, Украина

РЕОЛОГИЯ ГИДРОДИНАМИКИ СМАЗЫВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

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. Ключевые слова: трение, смазка, гидродинамика, компрессионно-вакуумная гипотеза, граничные слои, трибология.

Введение. 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. Контактно-упруго- или эласто- гидродинамическая (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.

Постановка проблемы. 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 адсорби-рованных 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.

Изложение основного материала. 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.

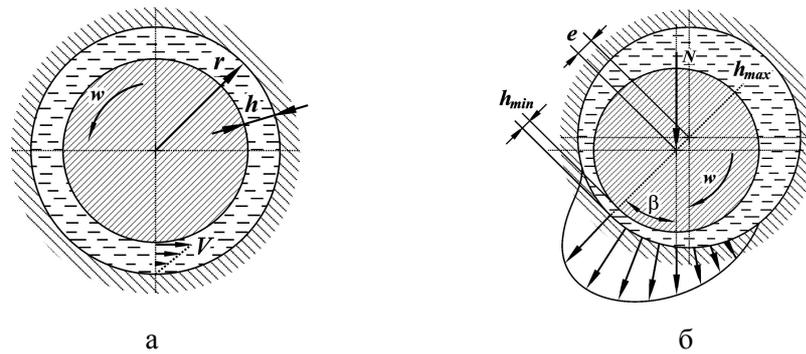


Рис. 1. Классическая схема возникновения давления в смазочном слое, которое отождествляется с контактными напряжениями в рамках ЭГД-теории смазки, где V – скорость в граничных слоях ньютоновской жидкости, h – толщина смазочного слоя, e – эксцентриситет, ω – угловая скорость

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 большей 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 конфузорное сжатие и диффузорное разрежение, что легло в основу компрессионно-вакуумной гипотезы трения, основные положения которой не согласуются с ЭГД-теорией.

Экспериментально доказано [2], что при трении в смазочном слое относительно его минимального зазора самопроизвольно возникает сжатие смазочных слоев в конфузурной и их растяжение – в диффузорной областях ЭГД-контакта.

Таким образом, давление в смазочном слое не тождественно поверхностным контактными 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.

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 масловоздушное 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 масловоздушную 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 гуконской 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 конфузорной области контакта увеличивается, а в диффузорной – уменьшаются относительно давления окружающей среды и не равны контактными 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 контактными 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 конфузорной в диффузорную область ровно в том количестве, сколько его находится в минимальном зазоре, в том числе и в упруго-напряженном состоянии сжатия.

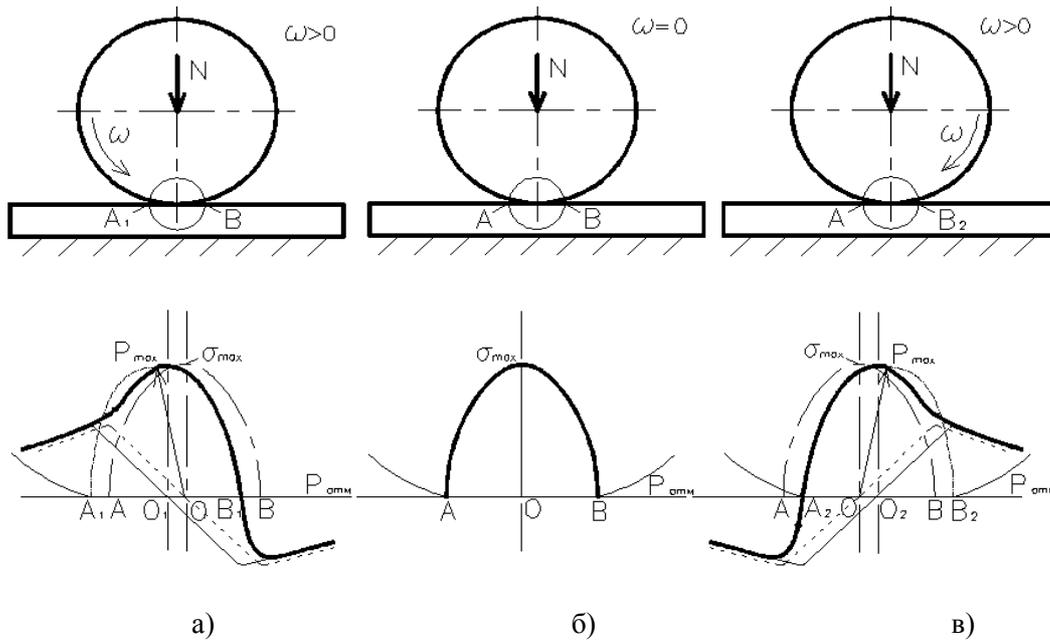


Рис.2. Схемы скольжения вала по плоскому подшипнику: против часовой стрелки (а), в статике без трения (б) по часовой стрелке (в) с контактом АВ, под нагрузкой N, скоростью вращения вала ω и схемы распределения (внизу соответственно) «контактных» напряжений σ , а также их смещения; давления в смазочном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

Вывод. 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 конфузурном канале смазки, но и ещё одна сила всасывающая вал разреженной средой в диффузурном 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.

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

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.

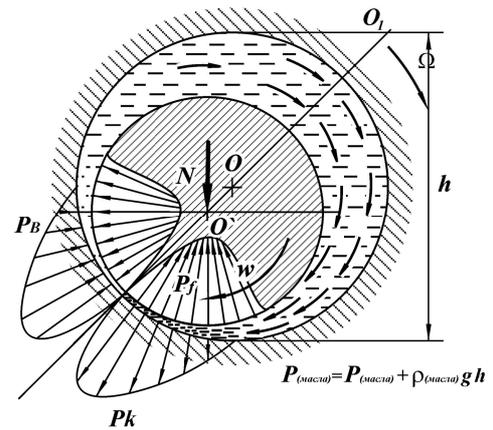


Рис.3. Схема возникновения гидродинамического эффекта с позиций компрессионно-вакуумной гипотезы природы трения