

УДК 621.891:539.375(043.2)

И.Ф. Кравченко, В.Г. Ананьев, П.А. Колесник, Единович А.Б., А.Ф. Аксёнов, А.У. Стельмах  
ГП «Ивченко-Прогресс», Национальный авиационный университет.**ФИЗИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ГЕТЕРОФАЗНОЙ СМАЗКИ РЕДУКТОРОВ ГТД**

*Стендовые испытания двигателей ТВ3-117ВМА-СБМ1 в условиях обильного смазывания радиальных подшипников передних редукторов показали, что выкрашивание осей сателлитов происходит после 1000 часов, а эксплуатация восьми двигателей с доработками по организации двухфазной масло-воздушной смазки редукторов свидетельствует об отсутствии признаков выкрашивания осей при суммарной наработке более 5000 моточасов. Ключевые слова: смазочные материалы, трение и износ, гетерофазная смазка, газо-турбинные двигатели, подшипники.*

**Постановка проблемы.** Разработка, конструирование и организация производства новых серийных авиационных летательных аппаратов требует значительных материальных затрат. Поэтому при создании нового летательного аппарата всегда рассматривается возможность использования в его составе серийно выпускаемых агрегатов, которые хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации и по техническим характеристикам соответствуют предъявляемым требованиям в составе нового изделия. При создании новых типов самолётов Ан-140, Ан-148 и Ан-158 в КБ «Ивченко-Прогресс» разрабатывались двигатели ГТД ТВ3-117ВМА-СБМ1 и Д-436-148 на базе существующих ТВ3-117ВМА и Д-436.

Для обеспечения необходимого для подшипников качения роторов и редукторов ГТД и ВСУ теплового режима [1] применяется система смазки и охлаждения с прокачкой десятков и сотен литров в минуту, в то время как для обеспечения смазки поверхностей трения без учета теплонапряженности требуются всего миллилитры [2]. В работах [3,4] указывается, что потери на трение в подшипниках с масловоздушным смазыванием смазкой масляным туманом существенно снижаются (до трех раз), хотя интенсивность теплоотвода в воздушно-масляную фазу также уменьшается. Из этого следует, что охлаждающая жидкая (однофазная) среда в трибоконтакте, обеспечивая теплоотвод от него, в это же время является причиной увеличенного тепловыделения.

Повышение износостойкости и ресурса высокооборотных трибосистем качения при уменьшении количества смазочного материала, подаваемого в зону контакта в виде масловоздушной смеси, не находит своего однозначного объяснения с позиции известных теорий, гипотез и положений о трении и изнашивании. Общеизвестная эластогидродинамическая (ЭГД) теория смазки [5...8] включает в себя ряд положений, исходя из которых, для повышения ресурса трибосистем необходимо реализовывать обильное смазывание контакта и избегать возможности возникновения условий масляного голодания. Тем не менее, практика высокоскоростных трибосистем качения и скольжения показала, что в ряде случаев обильное смазывание ЭГД-контакта приводит к интенсивному изнашиванию поверхностей, их выкрашиванию или термическому разрушению. Увеличение расхода смазочного материала для обеспечения интенсивного теплоотвода от ЭГД-контакта оказалось малоэффективным.

**Результаты экспериментальных исследований.** В 2007 году была выдвинута гипотеза о компрессионно-вакуумной природе трения [9,10], исходя из которой, в ЭГД-контакте протекают значительно более сложные процессы, чем взятые за основу в эластогидродинамической теории смазки. В работах [9, 10] представлены экспериментальные данные, которые легли в основу компрессионно-вакуумной гипотезы о природе трения и трибокавитационном механизме изнашивания. Основным положением этой гипотезы является самопроизвольное возникновение относительно минимального зазора каждого элементарного трибоконтакта двух характерных областей. В области уменьшения зазора по направлению скольжения и/или качения, т.е. конфузорной, происходит повышение давления в граничных слоях смазки и возникновение вторичного течения, противоположного направлению вращения. В этой области при высоких скоростях трение происходит между набегающими с движущейся поверхности слоями граничной смазки и слоями вторичного обратного течения, вызванного градиентом давлений в сужающейся зоне трибоконтакта.

Применительно к трению качения, гидродинамические процессы в граничных слоях протекают аналогично трению скольжения. На рис.1 показана схема возникновения области повышенного  $+\Delta P$  и пониженного  $-\Delta P$  давления в граничных слоях смазки (ось  $P_{ос.}$ ) и векторы вторичных течений смазки: компрессионных  $v^{компр}$  и вакуумных  $v_{вак.}$ , направленных

противоположно набегающим смазочным слоям при давлении окружающей среды равному атмосферному  $P_{атм.}$  (пересечение осей  $x$  и  $P_{ос.}$ ) и распределение давлений смазочного слоя на поверхности ролика. Пунктиром показано распределение упругих контактных напряжений по Г.Герцу без смазки, в среде воздуха (зазор – условный).

Если наблюдать за качением ролика по кольцу по схеме, представленной на рис.1, когда контакт относительно наблюдателя неподвижен, то в конфузорной области набегающие с движущимися поверхностями ролика и дорожки кольца потоки по мере приближения к минимальному зазору будут встречать сопротивление вторичных течений, направленных противоположно движению. При этом через минимальный зазор в соответствии с физическим законом сохранения количества вещества, смазка пройдет в количестве не превышающем имеющегося вещества в зоне максимальных контактных напряжений, где граничные слои максимально упруго деформированы. В диффузорной области контакта будет происходить разрежение прошедших через минимальный зазор слоев смазки, понижение в них давления относительно давления окружающей среды, например атмосферного. Как следствие, здесь вторичные вакуумные течения будут направлены из среды в контакт и также против движения. Соответственно на ролик будут действовать давления сжатых и разреженных слоев смазки, как показано на рис.1 в виде эпюры давлений.

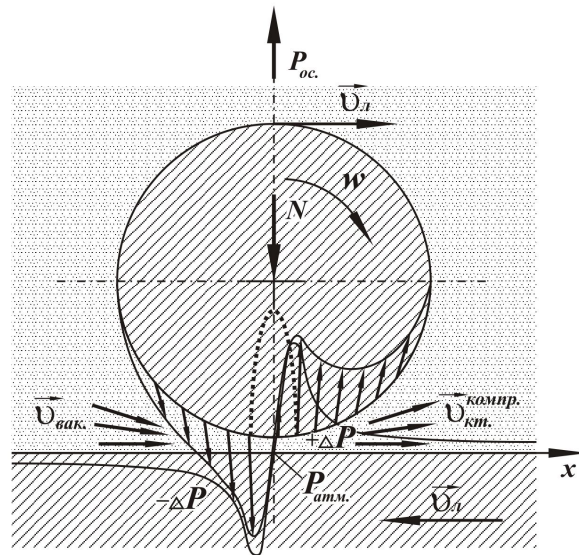


Рис.1. Схематическое возникновение компрессионных и вакуумных гидродинамических процессов в граничных слоях смазки при трении качения ролика по кольцу

Результаты лабораторных исследований, а также основные положения компрессионно-вакуумной гипотезы процесса трения были использованы при выборе режима подачи смазочного материала в роликовые подшипники сателлитов переднего редуктора двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1, который является маршевым для самолетов Ан-140. Стендовые испытания опытных двигателей подтвердили необходимость доработки главного редуктора двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1 с целью повышения его ресурса и надежности, так как наблюдалось повреждение осей подшипника-сателлита по дефекту выкрашивания. После испытаний и разборки редукторов было установлено, что поверхность рабочего сектора качения роликов была значительно меньше (в 2 раза) расчетной. Конструкторами было принято решение уменьшить радиальный зазор подшипников сателлитов с 0,015...0,035 мм до 0,005...0,025 мм, что позволило уменьшить сектор бесконтактного торможения роликов смазкой и сепаратором в нерабочей и бесконтактной с осью области, где ролики находились в состоянии инерционного вращения. При этом подвод смазки оставался прежним – через те же 2 отверстия на беговой дорожке и с тем же расходом (рис. 2,а), то есть смазывание трибоконтактов осуществлялось более обильно, чем ранее - с большим зазором.

При стендовых испытаниях обнаружено, что выкрашивание поверхностей качения при прочих равных условиях и уменьшении зазора, происходит менее интенсивное, чем при больших зазорах. В ходе анализа результатов мнения специалистов относительно возникшей проблемы разделились: с позиций эластогидродинамической теории смазки требуется увеличить расход масла для более обильного смазывания и снижения теплонапряженности трибоконтактов путем

более интенсивного отвода тепла. С позиций компрессионно-вакуумной гипотезы трения [9,10], необходимо снижать вязкость смазочной среды, например, путем перевода ее в двухфазное состояние.

Исходя из основных положений компрессионно-вакуумной гипотезы трения, аргументация использования масловоздушной смазочной среды в высокоскоростных редукторах заключалась в следующем. Основным источником выделения тепла является трение интенсивных набегающих граничных и вторичных течений смазочных слоев в конфузурных областях трибоконтактов. Для улучшения теплового режима зоны контакта необходимо отказаться от обильного смазывания и применить масловоздушную смесь, объемная вязкость и плотность которой существенно (на порядок) меньше, чем у базового масла. Использование двухфазной смазочной среды обеспечит уменьшение степени разрежения и снижение интенсивности трибокавитации, которая также является источником теплоты и причиной кавитационного разрушения поверхностей.

Проанализировав основные положения ЭГД-теории и компрессионно-вакуумной гипотезы трения, было принято решение в пользу последней и реализована смазка двухфазной средой подшипников сателлитов переднего редуктора двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1. Для этого была произведена конструкторская доработка (рис.2б) роликовых подшипников сателлитов, а именно: масло, с тем же расходом, подавалось не на дорожки качения, а через каналы на торцы роликов. При этом на больших частотах вращения роликов (4000 об/мин) образуется двухфазная смазочная среда в виде масловоздушной смеси.

Стендовые испытания на ОАО «Мотор Сич» проводились на двигателях с серийными номерами 317001 и 317013 в течение 2007-2009 гг. и подтверждают существенное повышение ресурса главных редукторов без признаков усталостного выкрашивания поверхностей качения осей сателлитов. Такая конструктивная доработка была внедрена на восьми двигателях ТВЗ-117ВМА-СБМ1, которые в настоящее время находятся в эксплуатации. На протяжении более одного года при суммарной наработке более 5000 ч съёмов редукторов по дефекту выкрашивания осей сателлита не происходило.

**Вывод.** Использование масловоздушной смазывающей среды – эффективный путь снижения потерь на трение и теплонапряженности высокоскоростных трибосистем опор и редукторов ГТД. Экспериментально подтверждается, что трение набегающих граничных слоев смазки с движущейся поверхностью и слоев смазки вторичных течений, возникающих в диффузорной области контакта, а также кавитация в конфузурной являются основными причинами разогрева высокоскоростных трибосистем с ЭГД-контактами. Выделению из смазочной среды масловоздушной фазы, наряду с барботажем, способствуют процессы разрежения смазки в диффузорных областях контакта, то есть трибокавитация, когда степень разрежения достигает значений меньше давления насыщенных паров масла. Стендовые испытания ТВЗ-117ВМА-СБМ1 на ОАО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко-Прогресс» показали, что при уменьшении зазоров в роликовом подшипнике и при том же расходе масла на дорожках качения ресурс передних редукторов двигателя несколько увеличивался, однако выкрашивание не прекращалось. При использовании масловоздушной смазки, вместо струйной подачи масла на беговую дорожку признаков разрушения поверхностей обнаружено не было.

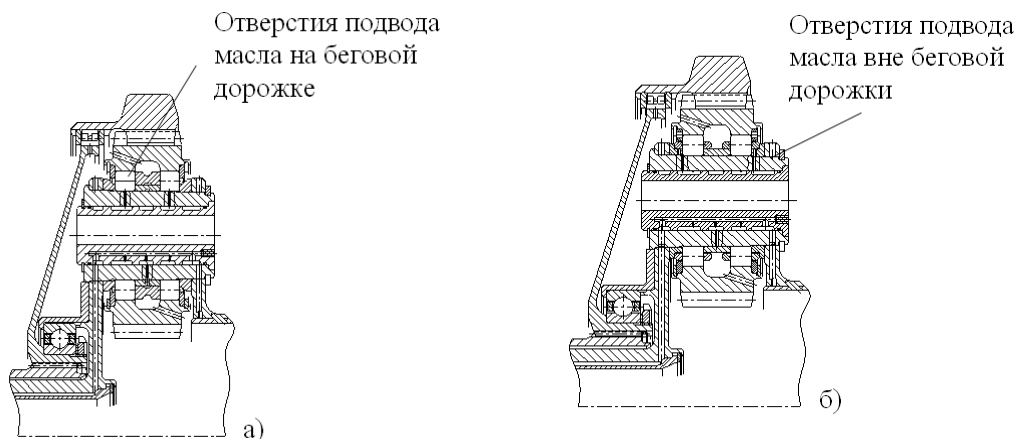


Рис. 2. Схема подвода смазки в подшипники главного редуктора двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1: а) исходная конструкция; б) доработанная конструкция подшипника сателлита

Эксплуатация восьми двигателей с конструкторскими доработками по организации смазки масловоздушной смесью показала, что при увеличении ресурса осей сателлитов передних редукторов двигателей ТВЗ-117ВМА-СБМ1 более чем в 5 раз, признаки их выкрашивания не обнаружены, а редуктора работают надёжно и устойчиво. Приведенные результаты исследований подтверждают справедливость компрессионно-вакуумной гипотезы трения и трибокавитационного механизма изнашивания, свидетельствуют об их научно-технической состоятельности, в частности применительно к термонагруженным и высокоскоростным трибосистемам современных ГТД, а также перспективность их использования при проектировании трибосистем авиационного двигателестроения.

1. Ковеза Ю.В., Никитин С.В., Пшеничных С.И. О решении тепловой задачи применительно к обычным и гибридным подшипникам качения газотурбинных двигателей. Ж. «Авиационно-космическая техника и технология», 2008, №10 (57). – С.132-135.
2. Демидович В.М. Исследование теплового режима подшипников ГТД.- М.: Машиностроение, 1978.- 172 с.
3. Основы теплопередачи в авиационной технике /Под ред. Кошкина В.К. – М.: Оборонгиз, 1960. – 389с.
4. Ли Сейрег. Расчет коэффициента трения в контактах скольжения и качения // Современное машиностроение. – 1989. – Серия Б, №12.- С.148-152.
5. Kenneth C Luderma, Arbor A. Friction, wear, lubrication. A Textbook in Tribology. – CRC Press, Inc. - Boca Raton, New York, London, Tokyo. – 1996. – 257 p.
6. Грубин А.Н. Основы гидродинамической теории смазки тяжелоагруженных криволинейных поверхностей. – М.: Машгиз., 1949. – 150 с.
7. Петрусевич А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки // Изв. АН СССР ОТН. – 1951, №2. – С.209-223.
8. Сомов В.А. Смазка машин и механизмов (Особенности смазки деталей дизелей) // Трение, износ, смазка. Том 11, №1, март 2009г. с.17.
9. Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания. – Деп. в ГНТБ Украины. - 07.07.2008, №109 – Ук 2008. – 28 с.
10. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. – Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009г. – 43 с.