

УДК 621.891.539.375

А.У. Стельмах, к.т.н.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И СИЛ ТРЕНИЯ С ПОЗИЦИЙ КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОЙ ГИПОТЕЗЫ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ

Национальный авиационный университет, stelmah@nau.edu.ua

Нелинейное увеличение до максимума, а затем уменьшение силы трения при увеличении скорости скольжения в ЭГД-контакте, обильно смазанном маслом, вызвано его переходом из гомогенного прозрачного жидкого состояния в мезогенное - масло-воздушную суспензию, что наблюдается визуально. Образование масло-воздушной суспензии, вызванное увеличением скорости вращения вала, приводит к увеличению на порядок коэффициентов сжатия и растяжения исходно жидкой смазочной среды. Уменьшение степени сжатия смазочных слоёв в конфузальной области контакта и понижение степени их разрежения в диффузорной приводит к снижению интегральной вязкости, скорости вторичных обратных течений, температуры и силы трения.

Ключевые слова: трибосистема, эласто-гидродинамический (ЭГД) контакт, компрессионно-вакуумная (КВ) гипотеза трения, сила трения, скорость скольжения, масло-воздушная суспензия

Введение

Зависимость сил трения от скорости скольжения является одной из главных характеристик трибоконтакта. В трибологии ее принято называть «характеристикой трения» [1] и рекомендуется учитывать при конструировании трибосистем. Экспериментальные данные, полученные в различных лабораториях, свидетельствуют о вариациях силы трения при увеличении скорости скольжения в зависимости от условий. В одних случаях она практически не изменяется, в других – возрастает, в-третьих – уменьшается, а в условиях жидкостного трения при обильном смазывании контакта с увеличением скорости скольжения, как правило, наблюдается увеличение коэффициента трения до некоторого максимального значения, после которого сила трения уменьшается. При достижении критической скорости сила трения начинает возрастать, вплоть до схватывания поверхностей [2-4].

Анализ исследований и публикаций

Влияние скорости скольжения v на изменение силы трения видно из диаграммы Герси-Штрибека (рис.1), представляемой в виде зависимости коэффициента трения μ от характеристики подшипника, то есть от безразмерной величины $\lambda = \eta v / p$, где η - вязкость, p – осевая нагрузка. Эта характеристика по своей сути [2] отражает толщину смазочного слоя. При значении $\lambda = \lambda^*$, соответствующем минимуму коэффициента трения μ , происходит переход от граничного трения к жидкостному. Кривая интенсивности изнашивания I показывает, что при $\lambda > \lambda^*$ контакт деталей размыкается, и износ теоретически исчезает [2].

После страгивания с места вала подшипника скольжения, когда сила трения максимальна, увеличение частоты его вращения приводит к стремительному уменьшению силы трения до минимума [2]. Этот участок сверхмалых и малых скоростей характеризует режим трения в условиях граничной смазки, при котором трение сопровождается изнашиванием поверхностей. Область минимальных значений силы трения относят к режиму трения с жидкостной и/или полужидкостной смазкой. Дальнейшее повышение скорости скольжения приводит к плавному увеличению силы трения, что определяет гидродинамический бесконтактный режим трения в условиях жидкостной смазки. Эту область трения описывает эластогидродинамическая теория. Многочисленные экспериментальные данные об ЭГД-контакте со смазкой жидкими маслами свидетельствуют о нелинейной зависимости силы трения от скорости скольжения: в области малых и средних скоростей сила трения возрастает до максимума, а с дальнейшим повышением скорости она уменьшается [3,4]. Такое изменение силы трения в ЭГД-теории противоречиво. При повышении скорости скольжения в несущем смазочном слое ЭГД-контакта давление возрастает, что приводит к увеличению его толщины, вязкости и силы трения. При увеличении скорости температура смазки повышается, толщина ее слоя и несущая способность уменьшаются, чем и объясняют некоторое увеличение силы трения до максимума (рис.2) и повышение силы трения в области средних скоростей скольжения (0,2...0,5 м/с).

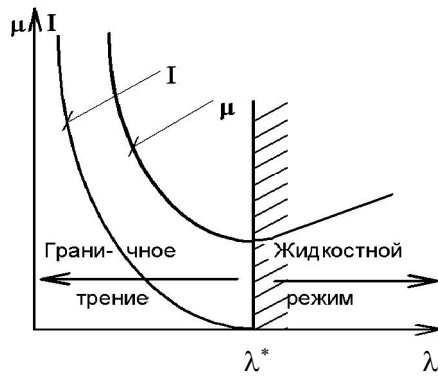
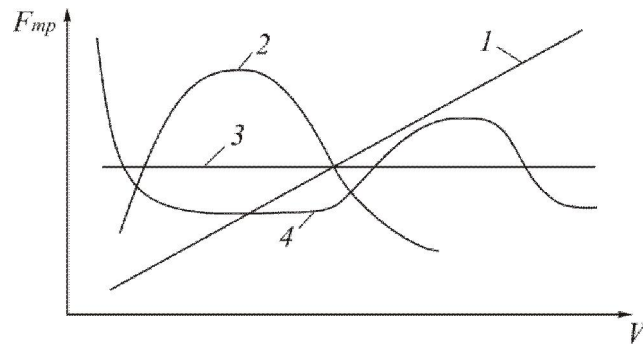


Рис.1. Диаграмма Герси-Штрибека

Рис.2. Графики зависимости коэффициента трения μ от скорости скольжения v в моторных маслах:

1 — линия Н.П.Петрова [8]; 2 — по Д.С.Кодниру [4];
3 — адгезионно-деформационная теория граничного трения [3]; 4 — по Б.И.Костецкому [8]

Дальнейшее повышение скорости скольжения, исходя из ЭГД-теории, приводит к более интенсивному локальному росту температуры и понижению вязкости масла, чем и объясняют снижение силы трения. Однако такое видение экспериментально не подтверждается, так как объемная температура масла увеличивается лишь на несколько градусов, а измерить гипотетически высокую локальную температуру в смазочном слое ЭГД-контакта (более 100°C) пока не удавалось.

Основные положения эластогидродинамической теории смазки изложены в [4-7] и базируются на ряде известных основных положений, характеризующих ЭГД-контакт. На рисунке 3 представлена зависимость давления p в смазочном слое толщиной h от расстояния по оси X относительно центра нагрузки O при движении плоской поверхности со скоростью V . Плоская подвижная поверхность с неподвижной поверхностью h_x образуют контакт протяженностью $[-aOa]$, где без трения возникают контактные напряжения p_n , при трении — p_x , и минимальная толщина смазочного слоя соответствует области выхода полуплоскости OX из контакта с поверхностью h_{min} .

Базовые положения ЭГД-теории смазки состоят в следующем.

1. Ресурс областей ЭГД-контакта определяется предельно допустимой толщиной смазочного слоя, которая должна превышать сумму высот микронеровностей контактирующих поверхностей.
2. Считается, что смазочная пленка в контакте, образованная жидкой средой, является однофазной ньютоновской жидкостью.
3. Пленка смазки в ЭГД-контакте практически параллельна в его центральной части и сужается в районе выхода движущейся поверхности из него.
4. Давление в смазочном слое отождествляется с напряжениями в поверхностях ЭГД-контакта.
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.
6. Считается, что толщина слоя смазочного материала в ЭГД-контакте, как определяющий критерий работоспособности узлов трения, находится в диапазоне $0,1 \dots 1$ мкм при герцовском давлении 1 ГПа, а время прохождения смазки через контакт составляет $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с.

Из этих положений ЭГД-теории смазки (рис.3) следует, что для повышения ресурса трибосистем необходимо реализовывать обильное смазывание контакта и избегать возможности возникновения условий масляного голодания. Теоретически трение ЭГД-контакта является безыносным, однако при эксплуатации трибосистемы качения и скольжения изнашиваются, что объясняется неустойчивостью режима трения в пуско-остановочные периоды работы. В ряде случаев обильное смазывание ЭГД-контакта приводит к увеличению интенсивности износа поверхностей, их выкрашиванию или к термическому разрушению. Увеличение расхода смазочного материала для обеспечения более интенсивного теплоотвода от ЭГД-контакта оказалось малоэффективным и, как показала практика, стает причиной

дополнительного теплообразования особенно при высоких скоростях качения или скольжения (больше 10 м/с).

Постановка задачи

Вопрос о нелинейности поведения силы трения с ростом скорости скольжения или качения в жидкой смазочной среде, не находит удовлетворительного объяснения с точки зрения ЭГД-теории и по сути остаётся открытым.

В данной работе сделана попытка объяснить нелинейность характеристики подшипников с позиций компрессионно-вакуумной гипотезы (КВ) о природе трения. Исходя из КВ гипотезы, процессы, протекающие в эластогидродинамическом контакте, представляются несколько более сложными (рис.4). При движении нижней плоской поверхности со скоростью V в конфузурной области из-за набегающего потока граничных слоев возникают вторичные, обратные движению течения смазочной среды (показано стрелками). В диффузорной, расширяющейся области, при определенных скоростях возникает маслопаровоздушная фаза смазки и вторичные, обратные движению, течения из среды в контакт. Это происходит в соответствии с экспериментально-наблюдаемой закономерностью распределения давления в смазочном слое P_m , которое в конфузурной области выше, а в диффузорной ниже давления окружающей среды. При этом реактивные давления, возникающие на поверхности неподвижного криволинейного трибоэлемента P_Σ , представляют собой сумму герцевских напряжений σ_r и давления в смазочном слое P_m , а контактные напряжения σ_k следует рассматривать, как разницу герцевских напряжений σ_r и давления в смазочном слое P_m . При этом под термином «контактные напряжения», следует понимать те напряжения, которые возникают лишь в области разрежения, то есть в диффузорной части контакта, так как в конфузурной – поверхности раздвигаются граничными слоями с высоким давлением.

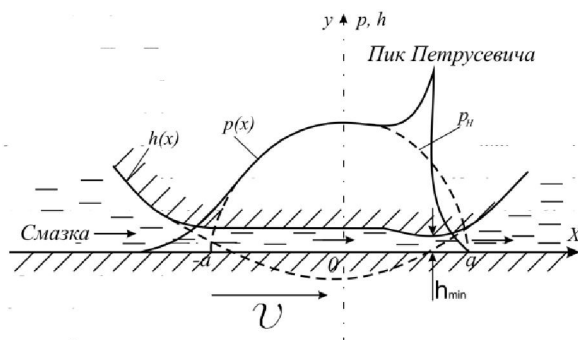


Рис. 3. Зависимость давления p в смазочном слое толщиной h от расстояния (ось X) от центра нагрузки O при движении плоской поверхности со скоростью V в контакте с неподвижной поверхностью h_x протяженностью $[-a; a]$, где без трения возникают контактные напряжения p_n , при трении - p_x , а минимальная толщина смазочного слоя h_{min} .

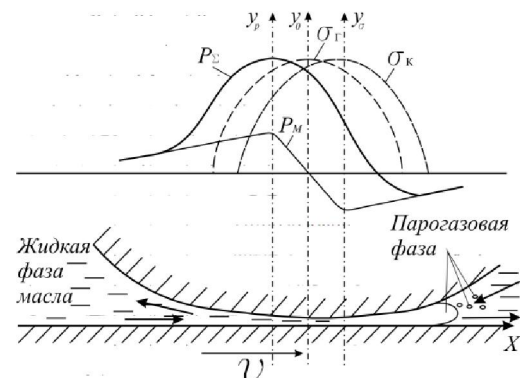


Рис. 4. Схема контактно-гидродинамических процессов с позиций компрессионно-вакуумной теории трения [10]

Решение задачи

В работах [9,10] представлены результаты эксперимента, которые легли в основу компрессионно-вакуумной гипотезы природы трения и трибокавитационного механизма 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. конфузурной, происходит повышение давления в граничных слоях смазки и возникновение вторичного течения, противоположного направлению движения. 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.

В диффузорной области увеличения зазора по направлению качения или скольжения, происходит разрежение граничных слоев и уменьшение давления в них относительно давления

окружающей среды до значений, равных и меньших давления насыщенного пара смазочной среды. Здесь возникает вторичное течение, направленное из окружающей среды в контакт и против движения. Эти течения также вызваны градиентом давлений, но отрицательным в направлении движения. При этом в диффузорных областях ЭГД-контактов, особенно при высоких скоростях (больше 0,1 м/с), происходит нарушение однородности смазочного слоя с образованием маслопаровоздушных полостей кавитации, которая характеризуется самопроизвольным возникновением паровоздушных пузырьков и их схлопыванием у поверхности трения, что также приводит к нагреву.

Экспериментальные исследования

Характеристики сил трения при скольжении в среде авиационного моторного масла МС-20 проводились на лабораторном приборе трения АСБ-01 [2]. Линейный контакт создавался поверхностью образующей цилиндр ролика (модель вала) с плоской гранью неподвижного параллелепипеда (модель подшипника скольжения). В неподвижном образце было вмонтировано приемное устройство в виде щели с сечением 0,3x5 мм. Осевая нагрузка составляла 20 Н, ширина контакта – 9 мм. Контакт помещался в специальную ванночку, которая заполнялась маслом МС-20. На расстоянии 2 мм от самого контакта в области входа вала в контакт размещалось приемное устройство в виде щели, которое через внутренние каналы образца-параллелепипеда сообщалось с датчиком давления. Это позволило экспериментально определять давление P в конфузорной области контакта и величину силы трения $F_{тр}$ по изменению мощности электропривода постоянного тока при различных скоростях скольжения одновременно. Оптическая прозрачность неподвижного образца и ванночки, изготовленная из стекла, позволяли наблюдать за течениями в околосконтактной области, а также за агрегатным состоянием масла МС-20.

Линейная скорость скольжения поверхности образующей цилиндр фторопластового ролика изменялась плавно от 0,4 до 2,5 м/с, с шагом 0,2 м/с и выдержкой в течение 10 минут, когда все параметры стабилизировались. При постоянной осевой нагрузке 2 Н, комнатной температуре и атмосферном давлении окружающей среды измерялись давление смазки через приёмное устройство и потери мощности электропривода. Графики зависимостей силы трения $F_{тр0}$ и давления ΔP_0 в слоях смазки от скорости скольжения через 1 минуту после установления определенной скорости $v_{л}$, представлены на рис.4. Такие же зависимости, но через 10 минут трения ($F_{трk}$ и ΔP_k соответственно) при тех же скоростях представлены на рис.5.

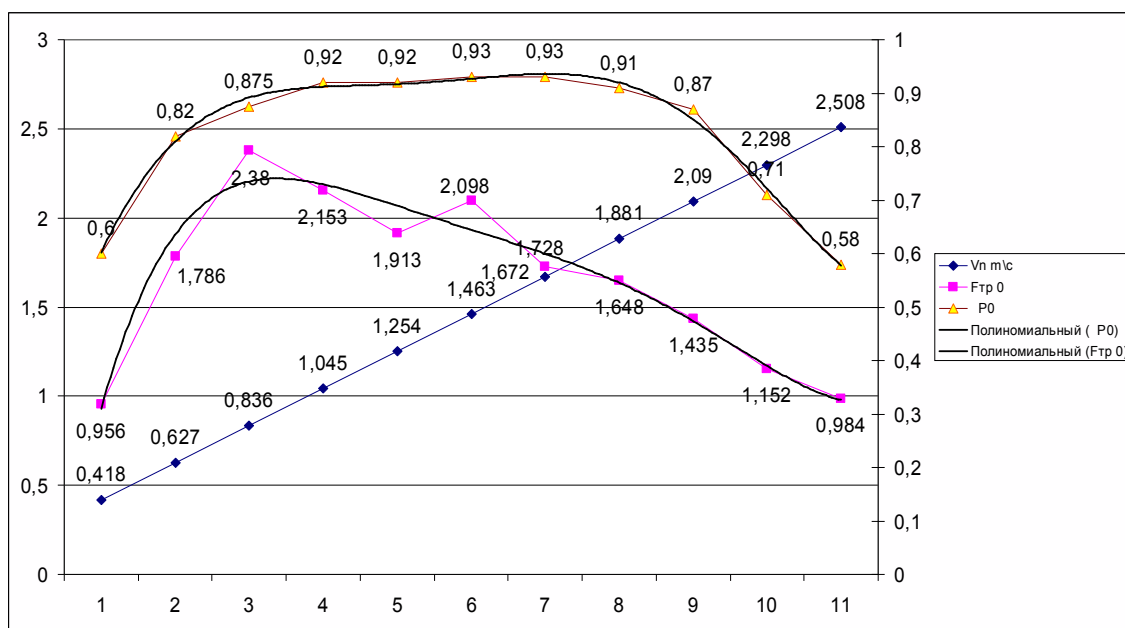


Рис.4. Зависимость силы трения $F_{тр0}$ и избыточного давления ΔP_0 от скорости линейного скольжения $v_{л}$ через 1 минуту после выхода на скоростной режим

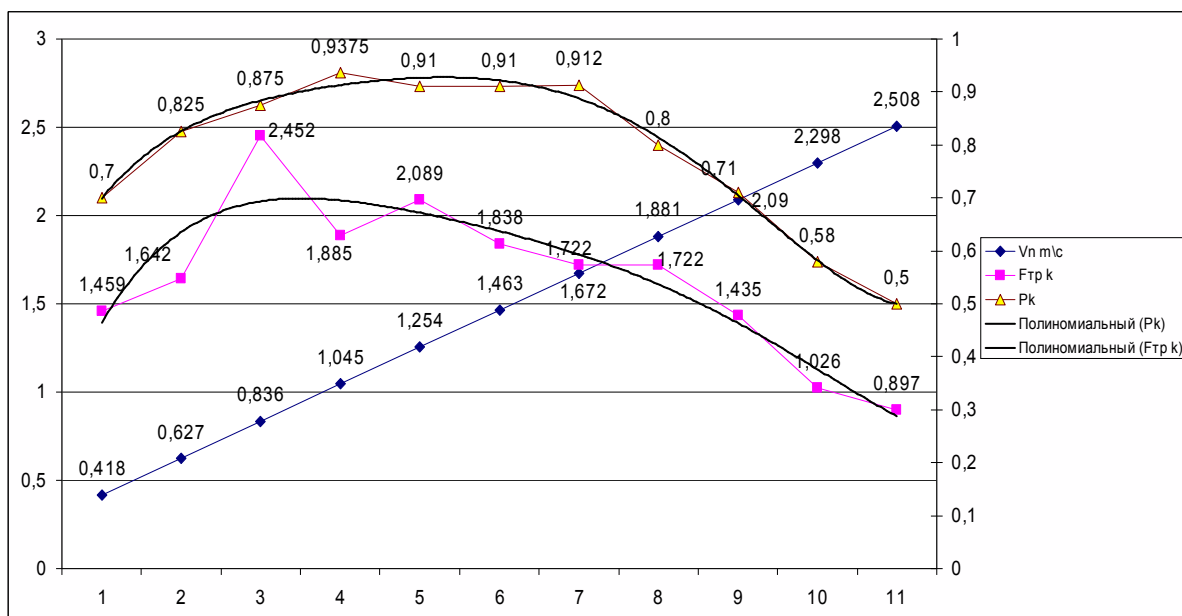


Рис.5. Зависимость силы трения $F_{\text{тр } k}$ и избыточного давления ΔP_k от скорости линейного скольжения $v_{\text{л}}$ через 10 минут после выхода на скоростной режим

Как видно из полученных зависимостей (рис.4,5), при данных условиях трения в режиме жидкостной смазки с увеличением скорости сила трения возрастает от 0,1 до 0,6 м/с, после чего наблюдается ее уменьшение. Давление в конфузورной области контакта ведет себя аналогично: синхронно с силой трения возрастает до максимальных значений, после чего оно уменьшается также как и сила трения. Визуальное наблюдение показало, что с увеличением скорости в прозрачном масле МС-20 происходило возникновение воздушных пузырьков. Во времени их количество возрастало. Повышение скорости скольжения приводило к росту интенсивности их образования в масле МС-20. При скорости 0,6 м/с масло теряло прозрачность и при дальнейшем увеличении частоты вращения ролика превращалось в непрозрачную однородную масловоздушную смесь в виде суспензии белого цвета. Объемная температура масла к концу серии испытаний повышалась на 4 °С.

В работе [9] предложен ряд приемов повышения долговечности трибосистем. Один из них заключается в использовании двухфазных воздушно-масляных смесей для смазки ЭГД-контактов. В области входа подвижной поверхности в контакт с контрповерхностью (в его конфузорной зоне) трение проявляется как сопротивление деформации сжатия смазочной среды (рис.3) и сопровождается интенсивным тепловыделением от трения набегающих и вторичных слоев смазки. Уменьшение вязкости смазочной среды должно привести к уменьшению тепловой напряженности контакта путем использования двухфазной маслопаровоздушной смазки с концентрацией масла, достаточной для формирования равномерных граничных слоев на поверхностях трения.

Такой прием позволяет на порядок снизить степени сжатия и разрежения смазочной среды, соответственно уменьшить скорости струйных вторичных течений как в диффузорных, так и конфузорных областях ЭГД-контактов. Следовательно, тепловыделение от трения в граничных слоях должно существенно уменьшиться, что и наблюдалось в описанных выше экспериментах.

Таким образом, использованием масловоздушной смеси вместо однородной однофазной жидкой смазки достигается повышение эффективности трибосистем, что подтверждает основные положения компрессионно-вакуумной (КВ) гипотезы о природе трения [8,9]. Это явление наблюдается при пуске холодных двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Облегченный запуск ДВС после кратковременных первичных прокруток с позиций КВ-гипотезы объясняется следующим образом. Снижение потерь на трение связано не только с нагревом масла на первых прокрутках ДВС и, таким образом, снижением его вязкости, но и с тем, что положительную роль выполняют парогазовоздушные пузырьки, которые образуются и накапливаются в объеме моторного масла. Причин фазового перехода жидкого моторного

масла в масловоздушную суспензию несколько. Известный процесс барботажа (самопроизвольное насыщение слоев смазки, имеющих большие скорости движения, фрагментами неподвижного воздуха), а также выделение воздушной фазы из гомогенного масла, в котором, как известно, растворено от 10 до 15% атмосферной среды в диффузорных областях многочисленных трибоконтактов маслосистем ДВС. Это наблюдается при осмотре стекающего масла по поверхности шупа, когда ДВС после длительной стоянки работал несколько секунд. В стекающих по шупу слоях масла обнаруживаются микропузырьки.

Выводы

1. Причиной нелинейного изменения силы трения (увеличения до максимума и дальнейшего уменьшения) при увеличении скорости скольжения ЭГД-контакта, обильно смазанного моторным маслом является переход его из гомогенного прозрачного жидкого состояния в мезогенную масло-воздушную фазу суспензии.

2. Образование масловоздушной суспензии, вызванное увеличением скорости вращения вала, приводит к увеличению коэффициента сжатия и растяжения исходно жидкой смазочной среды. Уменьшение сил сжатия смазочных слоев в конфузорной области контакта и разрежения в диффузорной приводит к снижению интегральной вязкости, скорости вторичных обратных течений, температуры и силы трения.

3. При проведении трибологических лабораторных испытаний смазочных материалов следует учитывать фактическое фазовое состояние смазочной среды (особенно при испытаниях смазочных материалов и присадок к ним на средних и больших скоростях). Фазовое состояние смазочных материалов может оказывать существенное влияние на результаты при оценке эффективности смазок с разными реологическими свойствами.

4. Результаты испытаний удовлетворительно объясняются с позиций компрессионно-вакуумной гипотезы природы трения.

Список литературных источников

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.:Физматгиз, 1963. – 472 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, - 1977. – 526 с.
4. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
5. 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.
6. Kenneth C Luderma, Arbor A. Friction, wear, lubrication. A Textbook in Tribology. – CRC Press, Inc. - Boca Raton, New York, London, Tokyo. – 1996. – 257 p.
7. Демидович В.М. Исследование теплового режима подшипников ГТД.- М.: Машиностроение, 1978.- 172 с.
8. Б.И.Костецкий Трение, смазка и износ в машинах – «Техніка», 1970, 396 с.
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. Нац. авиац. ун-т. – Киев, 2009.– Рус. Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009. – 43 с.