

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ ТРИБОСИСТЕМ В РЕЖИМЕ ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

Аксенов А.Ф., Стельмах Д.А., Стельмах А.У.  
*Национальный авиационный университет, Украина*  
 Колесник П.А.  
*ГП «Ивченко-Прогресс», Украина*

В статье исследуется эластогидродинамическая теория смазки, которая отражает гидродинамические процессы, протекающие в трибоконтакте радиального подшипника скольжения. Изначально при составлении уравнения динамики такой системы рассматривался симметричный контакт с сужающейся конфузальной областью контакта по направлению движения вала, и, после достижения минимального зазора, с расширяющейся диффузной областью. Нами детально изучалась именно диффузная область, поскольку там возникает ряд самых неблагоприятных для поверхностей трения процессов и условий, вызванных интенсивным разрежением определенного количества вещества, поступившего из переходной области.

**Ключевые слова.** Эластогидродинамическая теория смазки, радиальные подшипники скольжения, динамические процессы, трение, диффузная и конфузальная области контакта, граничные слои

**Постановка проблемы.** Современная эластогидродинамическая (ЭГД) теория смазки основана на фундаментальных работах О. Рейнольдса, Н.П. Петрова, А. Зоммерфельда и др. [1-2]. При постановке ЭГД-задачи используют общеизвестное дифференциальное уравнение О. Рейнольдса, которое отражает гидродинамические процессы, протекающие в трибоконтакте радиального подшипника скольжения. В своей известной работе «Гидродинамическая теория смазки и ее применение к опытам Тоуэра» О. Рейнольдс подчеркнул несколько весьма важных и со временем упущенных ограничений применимости его теории [2]:

1) теория применима для радиальных подшипников скольжения с минимальным зазором, величина которого не превышает половины разницы радиусов вала и отверстия подшипника, то есть не учитывается упругое деформирование поверхностей под действием осевой нагрузки  $N$ ;

2) в подшипнике смазочная среда полностью заполняет зазор и находится в неразрывном жидком состоянии;

3) изначально при составлении уравнения рассматривался симметричный контакт с сужающейся (конфузной) областью контакта (КО) по направлению движения вала, и, после достижения минимального зазора, с расширяющейся (диффузной) областью (ДО). Это соответствует реальному подшипнику скольжения. Однако, ряд суждений, основанных на результатах опытов Тоуэра, привел к упрощению постановки задачи, которая сводилась к определению величины избыточного давления во вкладыше, образующем с валом лишь конфузальный зазор [3].

**Цель исследования.** Используя эластогидродинамическую теорию трения исследовать динамические процессы в граничных слоях трибосистем.

**Основные результаты исследования.** В современных работах рассматривается также лишь конфузальный участок ЭГД-контакта, где создается избыточное давление в слоях смазки. Поэтому большинство расчетов гидромеханических характеристик (ГМХ) радиальных подшипников скольжения основаны на решениях уравнения О. Рейнольдса [2] относительно функции безразмерных гидродинамических давлений  $\bar{p}(\varphi, \bar{z})$ :

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\bar{h}^3 \bar{\rho}}{12 \bar{\mu}_3} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \frac{\bar{h}^3 \bar{\rho}}{12 \bar{\mu}_3} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = \frac{\bar{\omega}}{2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\bar{h} \bar{\rho}) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\bar{h} \bar{\rho}) \quad (1)$$

при граничных условиях Свифта-Штибера (СШ), записанных в виде следующих ограничений функции  $\bar{p}(\varphi, \bar{z})$ :

$$\bar{p}(\varphi, \bar{z} = \pm a) = \bar{p}_a; \quad \bar{p}(\varphi, \bar{z}) = \bar{p}(\varphi + 2\pi, \bar{z}); \quad \bar{p}(\varphi, \bar{z}) \geq 0. \quad (2)$$

где  $\bar{h}, \bar{\rho}, \bar{\mu}_3, \bar{p}, a$ , соответственно безразмерные: толщина смазочного слоя, плотность и вязкость смазочной жидкости, гидродинамическое давление, ширина подшипника;  $\varphi, \bar{z}$  –

координаты по углу и ширине подшипника;  $\bar{p}_a$  – безразмерное значение атмосферного давления;  $\bar{\omega}$  – безразмерное значение относительной угловой скорости вала;  $\tau$  – безразмерное время.

Альтернативными условиям СШ при решении задач с «абсолютно жестким» подшипником – есть граничные условия Якобсона–Флоберга–Ольсона (ЯФО) [2]:

$$\begin{aligned} \bar{p}(\varphi, \bar{z} = \pm a) &= 0; \quad \bar{p}(\varphi, \bar{z}) = \bar{p}(\varphi + 2\pi, \bar{z}); \\ \bar{p}(\varphi_{раз}, \bar{z}) &= \frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi}(\varphi_{раз}, \bar{z}) = 0; \quad \bar{p}(\varphi_{вос}, \bar{z}) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

С 1983 года наибольшего признания при решении ЭГД-задачи подшипника скольжения получило обобщенное уравнение Гарольда Элрода [2]:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \frac{\bar{h}^3 \bar{\beta}}{12\bar{\mu}} g(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \frac{\bar{h}^3 \bar{\beta}}{12\bar{\mu}} g(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \bar{z}} \right] = \frac{\bar{\omega}}{2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\bar{h} \theta) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\bar{h} \theta). \quad (4)$$

Здесь учитывается область кавитации путем введения функции степени заполнения зазора  $\theta(\varphi, z)$ , что обеспечивает выполнение условий неразрывности с помощью функции переключения  $g(\theta)$  и  $\bar{\beta}$  – безразмерного коэффициента сжимаемости смазочной среды.

Алгоритмы, с помощью которых решается уравнение (4) при граничных условиях ЯФО, носят название «алгоритмов сохранения массы». Безразмерная толщина смазочного слоя подшипника, которая входит в уравнение (2), определяется выражением:

$$\bar{h}(\varphi, \tau, \bar{p}, T) = \bar{h}_{rig}(\varphi, \tau) + \bar{W}(\varphi, \bar{p}, \tau, T), \quad (5)$$

где  $\bar{h}_{rig}(\varphi, \tau)$  – безразмерная толщина смазочного слоя в «абсолютно жестком» подшипнике;  $\bar{W}(\varphi, \bar{p}, \tau, T)$  – безразмерные упругие перемещения поверхностей подшипника под действием нагрузок;  $T$  – тепловые поля вала и подшипника.

Обращает на себя внимание, что в граничных условиях как СФ так и ЯФО давление в граничных слоях всегда больше давления окружающей среды (атмосферного), что не находит своего экспериментального подтверждения прямыми измерениями [4]. Экспериментально в диффузорной области контакта всегда происходит разрежение граничных слоев и нуклеация газовой фазы.

Исходя из ЭГД-теории смазки, при малых нагрузках и достаточно высоких скоростях трение скольжение должно протекать безызносно, то есть без адгезии поверхностей. Это положение не согласуется с практикой и объясняется тем, что реальное разрежение граничных слоев в диффузорной области контакта (ДО) приводит к возникновению условий квазисухого трения: происходит увеличение локальных напряжений и одновременная десорбция граничных слоев. О высокой степени разрежения граничных слоев смазки свидетельствует понижение давления в них, вплоть до давления насыщенных паров даже вакуумного масла VM-4 [4], при сверхмалых максимальных контактных напряжениях (до 0,2 МПа) и линейной скорости скольжения (до 0,01 м/с), что обуславливает трение практически сухих поверхностей и их адгезионное изнашивание. С увеличением нагрузки и скорости скольжения, степень разрежения граничных слоев в ДО возрастает пропорционально вплоть до критических значений перехода масла в двухфазную газо-паро-воздушную масляную суспензию в объеме.

В реальном подшипнике скольжения в условиях действия осевой нагрузки  $N$  (рис. 1, а) при движении вала в радиальном направлении  $[0 \dots \pi \dots 2\pi]$  периодически изменяются величина зазора  $h$  и давление в граничных слоях  $p$ . Учитывая динамические процессы в граничных слоях смазки, протекающие в каждой зоне трибоконтакта [4], в зависимости от изменения зазора относительно линии центров вала и подшипника  $dh/dx$  в радиальном направлении, выделяется шесть характерных областей, принципиально отличающихся по распределению градиентов давления  $dP/dx$  в граничных слоях смазки (рис. 1, б):

- I Конфузорная бесконтактная область, где  $\sigma = 0$ ,  $dh/dx < 0$  и  $dP/dx > 0$ ;
- II Конфузорная упругодеформированная область, где  $\sigma > 0$ ,  $dh/dx < 0$  и  $dP/dx > 0$ ;
- III Переходная область минимального зазора ( $\sigma = \sigma_{max}$ ,  $h = h_{min}$  и  $dP/dx \approx 0$ ;

IV Диффузорная упругодеформированная, где  $\sigma > 0$ ,  $dh/dx > 0$  и  $dP/dx < 0$ ;

V Диффузорная бесконтактная  $\sigma = 0$ ,  $dh/dx > 0$  и  $dP/dx < 0$ ;

VI Переходная область максимального зазора  $\sigma = 0$ ,  $h = h_{\max}$  и  $dP/dx \approx 0$ .

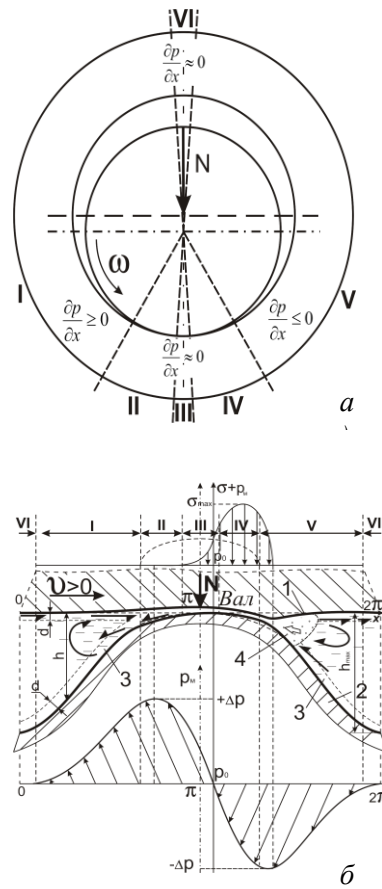


Рис. 1. Шесть характерных областей в радиальном подшипнике скольжения, где в радиальном направлении движения вала изменяются давление в граничных слоях  $p$  и величина зазора  $h$  (а), и физическая модель подшипника скольжения, образованного поверхностью трения вала 1 (развернуто в плоскость), и подшипника 2, заполненного смазкой с слоями 3 при скольжении, 4 – газ

Именно в диффузорной, IV-й области возникает ряд самых неблагоприятных для поверхностей трения процессов и условий, вызванных интенсивным разрежением определенного количества вещества, поступившего из переходной области III:

- при всестороннем растяжении смазки в диффузорном зазоре возникает дополнительная нагрузка под действием давления окружающей среды, т.е. дополнительное сжатие поверхностей. Это обстоятельство следует учитывать, так как понижение давления в граничных слоях диффузорной области приводит к увеличению дополнительной нагрузки прижатия поверхностей до десятков и сотен МПа, так как давление насыщенных паров масел, например ИПМ-10, составляет  $10^{-5}$  Па;

- давление в смазочном слое понижается до значений порога кавитации. Это явление следует рассматривать как трибокавитацию, принципиально отличающуюся от известной гидравлической и акустической;

- в этой области смазка представляет собой тонкие мультимолекулярные слои на поверхностях трения, разделенных газо-паровоздушной полостью разрежения, обуславливающего их физическую десорбцию.

Экспериментальные качественные соотношения параметров ЭГД трибоконтакта в характерных областях радиального подшипника скольжения (табл. 1) позволили предложить новый дифференцированный подход при теоретическом определении ГМХ подшипников.

Экспериментальные качественные соотношения параметров в характерных областях радиального подшипника скольжения

Конфузорные области		Переходные области		Диффузорные области	
I (КО I)	II (КО II)	III (ПО III)	VI (ПО VI)	IV (ДО IV)	V (ДО IV)
<i>Напряжения <math>\sigma</math> сжатых силой <math>N</math> идеальных поверхностей в линейном контакте шириной <math>b</math> на воздухе по Г.Герцу в статике, [МПа]</i>					
$\sigma \approx p_0$	$\sigma \approx p_0$	$(\sigma - p_0)^2 / \sigma_{\max}^2 + x^2 / b^2 = 1$	$\sigma \approx p_0$	$\sigma \approx p_0$	$\sigma \approx p_0$
<i>Давление в граничных слоях <math>p^M</math> по оси действия нагрузки <math>N</math> в статике, Н</i>					
$p^M \approx p_0$	$p^M \approx p_0$	$p^M \approx \sigma + p_0$	$p^M \approx p_0$	$p^M \approx p_0$	$p^M \approx p_0$
<i>Объемное давление масла в граничных слоях <math>p</math> при трении идеально гладких поверхностей, [Па]</i>					
$p > p_0$	$p > p_0$	$p \approx p_0$	$p \approx p_0$	$p < p_0$	$p < p_0$
<i>Градиент давления в смазочных слоях <math>dp/dx</math> [Па/м]</i>					
$dp/dx > 0$	$dp/dx > 0$	$dp/dx \approx 0$	$dp/dx \approx 0$	$dp/dx < 0$	$dp/dx < 0$
<i>Ускорение граничных слоев вала <math>dv/dt</math>, [м/с<sup>2</sup>]</i>					
$dv/dt \approx 0$	$dv/dt < 0$	$dv/dt \approx 0$	$dv/dt \approx 0$	$dv/dt > 0$	$dv/dt \approx 0$
<i>Плотность смазочной среды <math>\rho</math>, [кг/м<sup>3</sup>]</i>					
$\rho \approx \rho_0$	$\rho > \rho_0$	$\rho \approx \rho_0$	$\rho > \rho_0$	$\rho \ll \rho_0$	$\rho < \rho_0$
<i>Температура <math>T</math>, °C</i>					
$dT/dx > 0$	$dT/dx \gg 0$	$dT/dx \approx 0$	$dT/dx \approx 0$	$dT/dx \ll 0$	$dT/dx < 0$

**Выводы.** Таким образом, ЭГД задача с учетом динамических процессов, протекающие в граничных слоях сводится к определению доминирующих параметров трибосистемы, обуславливающих возникновение условий квазисухого трения и изнашивания поверхностей, а именно: степень разрежения, величина дополнительной нагрузки и плотность граничных слоев.

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
2. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М.: М., 1976 – 304 с.
3. 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.
4. Стельмах А.У. Экспериментальное исследование динамики течений граничных слоев смазки в контакте скольжения // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №5. – С.147-155.

**A.F. Aksenov, D.A. Stelmach, A.U. Stelmach, P.A. Kolesnik. Dynamic processes in the boundary layers tribosystems mode elastohydrodynamic friction.** The article considers elastohydrodynamic lubrication theory, which reflects the hydrodynamic processes in tribocontacts radial bearings. In the bar embodiment theory is applicable for radial sliding bearings with minimum clearance, the value of which does not exceed half of the difference of the radii of the shaft and the bearing bore. Under such conditions, the lubricant in the bearing completely fills the gap and is inseparable liquid state.

Initially, when the equation of contact with treated symmetrically tapered confusor contact area in the direction of movement of the shaft, and, after reaching the minimum gap with the expanding diffusion region. This corresponds to the actual bearings. However, a number of judgments based on the results of experiments Touera led to simplify formulation of the problem, which was reduced to the determination of the amount of excess pressure in the liner forming the shaft only confusor gap.

However, according to the results of our experiments, it is in the diffuser region, a number of the most unfavorable for the friction surface processes and conditions caused by intense suction certain amount of material delivered from the transition region. Thus, elastohydrodynamic problem with the dynamic processes occurring in the boundary layers is reduced to the determination of the dominant parameters tribosystem causing occurrence conditions kvazisuhoogo friction and wear surfaces, namely, the vacuum degree, the value of the additional load and the density of the boundary layers.

**Аксенов А.Ф., Стельмах Д.А., Стельмах О.У., Колесник П.О. Динамічні процеси в граничних шарах трибосистем в режимі еластогідродинамічного тертя.** У статті досліджується еластогідродинамічна теорія мащення, яка відображає гідродинамічні процеси, що протікають в трибоконтакті радіального підшипника ковзання. Спочатку при складанні рівняння динаміки такої системи розглядався симетричний контакт з конфузornoю областю контакту (яка звужується) по напрямку руху вала, і, після досягнення мінімального зазору, з дифузornoю областю (яка розширюється). Нами детально вивчалася саме дифузorna область, оскільки там виникає ряд найбільш несприятливих для поверхонь тертя процесів і умов, викликаних інтенсивним розрідженням певної кількості речовини, що надійшла з перехідної області.

Стаття надійшла в редакцію 07.05.2014р.