

УДК 621.891

Н.Ф. Дмитриченко, А.А. Миланенко,  
Р.Г. Мнацаканов, Е.П. Золотарева,  
Л.Ф. Карпенко

## ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СМАЗКА ТОЧЕЧНЫХ КОНТАКТОВ В УСЛОВИЯХ МАСЛЯНОГО ГОЛОДАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Проведен системный анализ масляного голодания при повышенных температурах точечного контакта трения. На основании выполненных исследований было выяснено, что условие масляного голодания и температурный режим смазки, влияющие на механизм смазочного действия, дают новый подход к разработке эластогидродинамических критериев оценки долговечности подшипников качения и выбора смазочного материала в различных условиях смазки.*

Подшипники качения часто работают в условиях масляного голодания, т.е. подача масла на входе в контакт составляет только часть расхода, требуемого для условия обильной смазки. Недостаточный расход может быть обусловлен ограничениями в линии подачи смазки или в смазочной канавке, либо недостаточной производительностью или плохой работой масляных насосов, а также термостойкостью смазочных материалов. Последнее является справедливым, так как самым важным свойством смазочного материала является, пожалуй, его вязкость. По мере роста температур вязкость смазочного материала уменьшается, что сказывается как на толщине эластогидродинамической (ЭГД) пленки, разделяющей контактирующие поверхности подшипников, так и на их действительной долговечности. В течение последних нескольких лет разработан целый ряд перспективных с точки зрения повышения диапазона рабочих температур смазочных материалов и среди них синтетические масла [1].

Представленные в настоящей статье исследования базируются на результатах опубликованных ранее работ [2 – 5]; они были выполнены с целью изучения механизма смазочного действия масел в условиях масляного голодания в широком диапазоне изменения температур.

Наиболее важным прикладным аспектом ЭГД теории смазки является определение толщины смазочного слоя в контакте трения. Применяемый нами интерференционный метод измерения тонких смазочных слоев позволяет достоверно определять критерии масляного голодания, сущность которых заключается в установлении взаимосвязи между расстоянием от границы смазки до средней линии контакта  $m$  и толщиной смазочного слоя в контакте трения  $h$  в выбранном диапазоне рабочих температур  $t$ . Прикладные аспекты смазки точечного ЭГД контакта могут быть более детально рассмотрены с точки зрения существования трех областей и режимов обильной смазки, прогрессирующего и катастрофического масляного голодания [6].

При исследовании шарикоподшипников в условиях масляного голодания исследовались смазочные материалы: синтетическое масло и минеральное масло со средним индексом вязкости. На рис. 1 представлены вязкостно-температурные зависимости обоих масел, а в таблице – характеристики исследуемых масел.

Масло	Плотность в атм. условиях $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость $\nu$ , сСт			
		20 °С	30 °С	50 °С	70 °С
Синтетическое SAE 5W-40	0,905	238,6	146,4	63,1	–
Минеральное SAE 20W-50	0,87	535,0	–	97,5	46,5

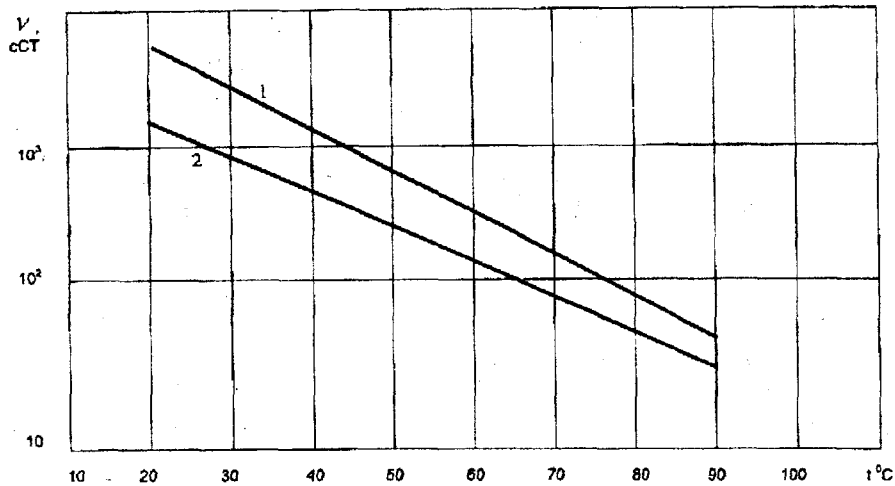


Рис. 1 Зависимость кинематической вязкости смазочных материалов от температуры:  
1 – минеральное масло; 2 – синтетическое масло

Масляное голодание исследовалось путем уменьшения входного параметра  $m$ . Условие обильной смазки реализуется, когда безразмерный входной параметр  $m$  перестает оказывать какое-либо существенное влияние на толщину пленки в центре контакта  $h_0$ . Если начать с условий обильной смазки и уменьшать параметр  $m$ , то значение, при котором впервые начинает заметно изменяться значение центральной толщины смазочной пленки, называется границей между обильной и обедненной смазкой и обозначается через  $m^*$ . С учетом существования трех областей и режимов смазки при  $m-1 > m^*-1$  наблюдается режим обильной смазки, при  $m_{c.s}-1 < m-1 < m^*-1$  возникает режим прогрессирующего масляного голодания, а при  $m-1 < m_{c.s}-1$  реализуется режим катастрофического масляного голодания.

Экспериментальные результаты, представленные на рис.2 и рис.3, отображают общую схему развития масляного голодания для точечного ЭГД контакта.

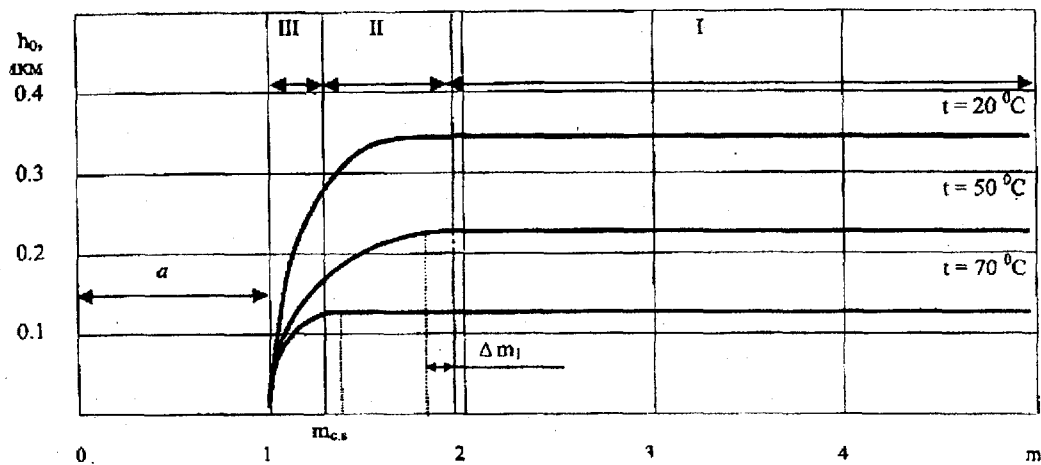


Рис.2 Влияние входного параметра  $m$  на толщину пленки в центральной зоне контакта  $h_0$  в зависимости от изменения температуры  $t$  для минерального масла ( $F=31,12\text{Н}$ ,  $V=0,22\text{ м/с}$ ). (Здесь и далее на рис.3: I – область обильной смазки; II – область прогрессирующего масляного голодания; III – область катастрофического масляного голодания)

Из рис.2 и рис.3 следует, что в условиях масляного голодания толщина смазочного слоя уменьшается с уменьшением входного параметра, причем в условиях прогрессирующего масляного голодания характерно медленное уменьшение толщины, а для катастрофического – резкое. В случае увеличения температуры для обоих масел характерно то, что до границы перехода от прогрессирующего масляного голодания к катастрофическому  $\Delta m$  протяженность пленки возрастает, а градиент толщины пленки стремится быть постоянным, уравнивая нагрузку при заданных условиях.

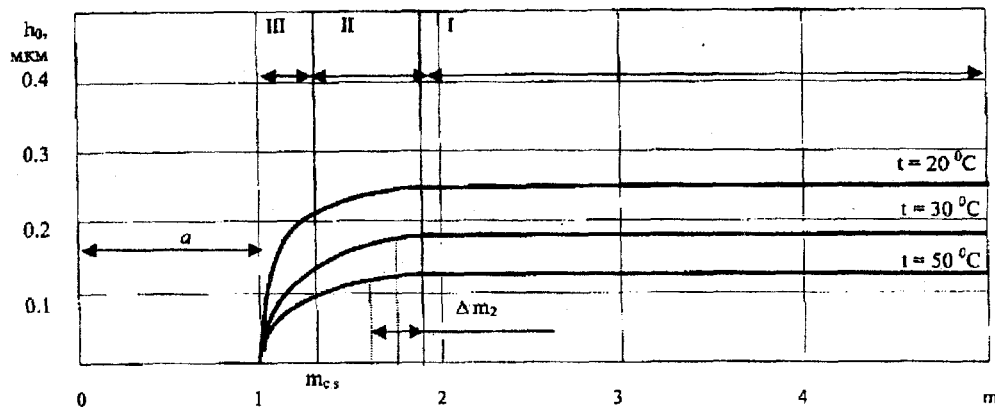


Рис.3 Влияние входного параметра  $m$  на толщину пленки в центральной зоне контакта  $h_0$  в зависимости от изменения температуры  $t$  для синтетического масла ( $F = 31,12\text{Н}$ ,  $V = 0,4\text{ м/с}$ )

В режиме катастрофического масляного голодания по мере увеличения температуры масла в контакте наблюдается более резкое падение толщины пленки, что объясняется увеличением степени масляного голодания и, как следствие, склонность к возникновению схватывания. Следует также отметить, что по мере увеличения температуры у синтетического масла расстояние  $\Delta m_2 > \Delta m_1$ , а падение толщины пленки осуществляется медленнее, из чего вытекает, что синтетическое масло способно по мере увеличения температуры выдерживать большие нагрузки, нежели минеральное масло, и при этом стремится сохранять постоянную толщину смазочной пленки. К тому же выводу пришли авторы работы [7], анализируя работу радиальных подшипников в режиме масляного голодания. Из всего изложенного можно заключить, что выбор смазки и рабочей температуры имеет большое значение для повышения долговечности подшипников качения, так как при нерациональной смазке и в зависимости от температурного режима долговечность подшипников может в несколько раз снизиться.

Нами проведены исследования долговечности шарикоподшипников в условиях обильной смазки и масляного голодания в выбранном температурном диапазоне. В качестве критериев использовались коэффициент смазочного действия  $a_2$  и параметр смазочного слоя  $\lambda$ . Причем параметр  $\lambda$  пригоден в первую очередь для оценки влияния минеральных и синтетических масел на долговечность подшипников качения. В условиях обильной смазки  $a_2 > 1$ , а при масляном голодании  $a_2 < 1$ . Причем  $a_2 = 1$  является базовым критерием, разделяющим весь диапазон смазочного действия на две области – область обильной смазки и масляного голодания (прогрессирующего масляного голодания). Действительная долговечность определяется выражением

$$L = a_1 a_2 L_n$$

Следует отметить, что коэффициент смазочного действия  $a_2$  зависит от условий смазки (по каталогам фирмы SKF зависит от отношения применяемой кинематической вязкости к требуемой  $V/V_1$ ) и значения параметра смазочного слоя  $\lambda$ . Тогда в условиях обильной смазки

$$\lambda_f = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

где  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$  – среднеарифметическое отклонение шероховатости контактирующих поверхностей.

В условиях прогрессирующего масляного голодания:

$$\lambda_{p.s} = \frac{h_{p.s}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

где  $h_{p.s}$  – центральная толщина пленки в условиях прогрессирующего масляного голодания.

Здесь  $\lambda_{p.s}$  является критерием долговечности по возникновению прогрессирующего масляного голодания. В этих условиях подшипники качения могут эксплуатироваться, однако их действительная долговечность, как правило, не превышает расчетную ( $L < L_h$ ).

Для прогнозирования возникновения катастрофического масляного голодания:

$$\lambda_{c.s} = \frac{h_{c.s}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

где  $h_{c.s}$  – центральная толщина пленки в условиях катастрофического масляного голодания.

В этих условиях наблюдается значительный износ поверхностей и нельзя обеспечить необходимую работоспособность подшипника качения.

На основании выполненных исследований можно заключить, что условия масляного голодания (недостаточной смазки) и температурный режим смазки, влияющие на механизм смазочного действия, обеспечивают новый подход к разработке ЭГД критериев оценки долговечности подшипников качения и выбора смазочного материала в различных условиях смазки.

#### Список литературы

1. Кламман Д. Смазка и родственные продукты. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Коднур Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
4. Wedeven L.D., Evans D. and Cameron A. Optical Analysis of Ball Bearing Starvation Trans. ASME, J., Lub. Tech., vol.93, 1971. – P. 349–363.
5. Gohar R. Elastohydrodynamics. Ellis Horwood Limited, Chichester, 1988. – P. 319
6. Dmytrychenko N., Aksyonov A., Gohar R., Wan G.T.Y. Elastohydrodynamic Lubrication of Line Contacts // Wear, 1991. – Vol.151. – P. 313.
7. А. Артилес, Х. Хешмат. Исследование радиальных подшипников в режиме масляного голодания с учетом температурных и кавитационных эффектов // Проблемы трения и смазки, 1985. – №1. – С.1.