

вался на осциллографе. При дальнейшем относительном движении ролика пазы расходились, и луч света, падающий на фотоэлемент, прерывался. Зная время поступления первого сигнала и последнего и подсчитав количество сигналов за это время, легко определить скорость скольжения и величину проскальзывания роликов.

Данная конструкция роликовой машины позволяет моделировать работу шарикового подшипника качения. Наличие подвески, показанной на рис. 3, позволило провести исследование сопротивления качению шарика по беговой дорожке внутреннего кольца шарикоподшипника. В момент запуска или при внезапном отклонении скорости вращения одного из роликов от заданного значения шарик 1 удерживается от перемещения с линии центров внутренних колец подшипника 2 и 3 с помощью державки 4. На державке, установленной на неподвижном суппорте, установлены два приборных шарикоподшипника с весьма незначительным моментом трения по сравнению с измеряемым.

В заключение отметим, что данная установка позволила провести сложное комплексное экспериментальное исследование сопротивления качению с изменением скорости качения, нагрузки, формы обкатываемых поверхностей и условий смазки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинегин С. В., Шевелев И. А. и др. Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении. М., «Наука», 1972.
2. Пинегин С. В., Блохин Ю. П. Авторское свидетельство на «Устройство для измерения момента сопротивления качению». Решение от 15 июня 1971 г. по заявке № 1469326/25—28.

Д. С. КОДНИР, Р. Г. САЛУКВАДЗЕ,
Д. Л. БАКАШВИЛИ, В. Ш. ШВАРЦМАН

ТОЛЩИНА СМАЗОЧНОГО СЛОЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ В ТЯЖЕЛО НАГРУЖЕННОМ ТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

h — толщина смазочного слоя в данной точке, м;
 h_0 — толщина смазочного слоя в точке, где градиент давления равен нулю, м;

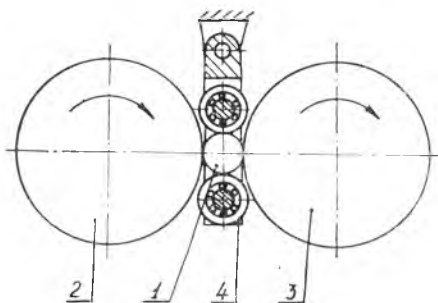


Рис. 3. Приставка для моделирования работы шарикоподшипника:
1 — шарик; 2, 3 — внутреннее кольцо шарикоподшипника; 4 — державка

- h_m — минимальная толщина смазочного слоя в направлении скольжения, m ;
 h_{m1} — наименьшая толщина смазочного слоя в направлении, перпендикулярном направлению движения, m ;
 $H = \frac{h}{h_0}$ — относительная толщина смазочного слоя;
 $d_{ш}$ — диаметр шарика, m ;
 $r_{ж}$ — радиус желоба, m ;
 $a_1 = \frac{r_{ж}}{d_{ш}}$ — относительный радиус желоба;
 $\lambda_a \pm \lambda_b$ — приведенная кривизна трущихся поверхностей, $\frac{1}{m}$;
 U_a, U_b — окружные скорости движения трущихся поверхностей, $m/сек$;
 $U_a + U_b$ — суммарная скорость, $m/сек$;
 $U_a - U_b$ — скорость скольжения, $m/сек$;
 U — скорость вращения шарика, $m/сек$;
 P_0 — нагрузка на шарик, $кГ$;
 K_c — погонная нагрузка на контакт, $кГ/м$;
 k_0 — давление в данной точке смазочного слоя, $кГ/м^2$;
 k_{0max} — максимальное герцевское напряжение, $кГ/м^2$;
 $k_{оср} = \frac{2}{3} k_{0max}$ — среднее герцевское напряжение, $кГ/м^2$;
 t_p — время релаксации, $сек$;
 T — температура в данной точке смазочного слоя, $^{\circ}C$;
 $T_{вх}$ — температура масла на входе, $^{\circ}C$;
 $T_{вых}$ — температура на выходе или объемная температура, $^{\circ}C$;
 ΔT — приращение температуры по Блоку, $^{\circ}C$;
 f — коэффициент трения трущихся поверхностей;
 μ_0 — вязкость при атмосферном давлении, $кГсек/м^2$;
 μ — вязкость при данном давлении k_0 , $кГсек/м^2$, $\mu = \mu_0 e^{\mu k_0}$;
 μ_s — вязкость на стенке при данном давлении и температуре, $кГсек/м^2$;
 n — пьезокоэффициент вязкости, $м^2/кГ$;
 α — коэффициент вязкости, $кГсек/м^2$;
 β — коэффициент вязкости, $1/^{\circ}C$, $\mu = \alpha e^{-\beta T}$;
 b — полуширина площадки контакта, m ;
 R_f — среднеарифметическое отклонение поверхностей, $мк$;
 i — коэффициент теплопередачи стали, $ккал/м сек ^{\circ}C$;
 γ — удельный вес стали, $кГ/м^3$;
 c — коэффициент теплоемкости, $к кал/кГ ^{\circ}C$.

1. Введение

В последние годы по инициативе А. Камерона появилось значительное количество экспериментальных исследований толщины и формы смазочного слоя интерференционным методом [1—6]. В этих работах решен ряд важных вопросов экспериментальной эластогидродинамики. Вместе с тем многое еще не исследовано. В частности, все эксперименты проводились при сравнительно низких скоростях, обычно менее $2,5 м/сек$. При использовании оптического метода, как показывает анализ, причиной ограничения скорости является возникновение масляного голодания, подробно исследованного в работе [4]. Практику же интересуют большие скорости, при которых проявляются некоторые новые явления.

Нами применены новые конструкции экспериментальных установок, позволившие увеличить скорости движения и обнаружить связанные с этим некоторые факты.

До сих пор в литературе не рассмотрен вопрос определения толщины и формы смазочного слоя при качении шарика по желобу шарикоподшипника и о влиянии радиуса желоба на толщину смазочного слоя.

В ряде работ (например [7]) имеются указания на то, что при значительных герцевских напряжениях невозможно теоретическое определение коэффициента трения без учета неньютоновских явлений в смазке. Однако нам не известны публикации, содержащие зависимость времени релаксации масел от давления и температуры. Поэтому все ссылки на возможное неньютоновское поведение масел носят скорее качественный, чем количественный характер.

Целью данной работы и является описание некоторых исследований, направленных на уменьшение указанных пробелов.

2. Экспериментальное исследование качения шарика в упорном шарикоподшипнике

Исследовалась модель упорного шарикоподшипника, состоящая из верхнего кольца с желобом, изготовленного из оптического стекла; трех шариков, находящихся в автономных элементах сепаратора; нижнего плоского стального кольца подшипника.

Желоб стеклянного кольца покрыт тонким слоем нитрида кремния, Si_3N_4 , обеспечивающим хорошую контрастность интерференционных полос и высокую износостойкость поверхности. Чистота поверхности шарика и желоба стеклянного кольца соответствовали $\nabla 13$ и среднеарифметическое отклонение профиля R_a не превосходило $0,025 \text{ мк}$.

Верхнее и нижнее кольца шарикоподшипника приводились во вращение цепными передачами и редуктором от одного двигателя в противоположные стороны. При этом сепаратор и центры шариков оставались неподвижными. Числа оборотов колец подшипника фиксировались фотодатчиками, которые передавали сигналы на пересчетные устройства.

Усилие прикладывалось к верхнему кольцу при помощи нагрузочного рычага. Наблюдение за зоной контакта шарика с желобом стеклянного кольца велось через объектив с пятикратным увеличением и апертурой $0,12$ с фокусным расстоянием 15 мм . Освещение — люминесцентное. Испытывались шарики диаметром $d_{\text{ш}} = 5,183; 6,00; 7,20; 7,928; \text{ и } 8,74 \text{ мм}$. Отношение радиуса желоба к диаметру шарика $\alpha_1 = \frac{r_{\text{ж}}}{d_{\text{ш}}} = 0,509; 0,551; 0,607; 0,728; 0,843$.

Кроме того, значительное количество экспериментов произведено при качении шарика не по желобу, а по плоскости $\alpha_1 = \infty$.

Диаметр беговой дорожки равнялся 77 мм. Смазка контактов осуществлялась циркуляционным способом маслом МС-20 при температуре на входе 20°C. Объемная температура измерялась на выходе из области трения термопарой, установленной на расстоянии 1,5 мм от зоны контакта. Показания термопары усиливались и записывались самописцем, причем эта температура превышала входную в некоторых случаях даже на 25°C. Максимальные герцевские напряжения в контактах изменялись в пределах 16700—4760 $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ — при качении шарика по плоскости и 11350—4440 $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ — при качении по желобу. Максимальные суммарные скорости достигали 17,6 м/сек — при качении по плоскости и 7,9 м/сек — при качении шарика по желобу.

Благодаря обильной циркуляционной смазке масляное голодание не наблюдалось при этих скоростях движения. Однако при скудной смазке оно наступало у нас уже при суммарной скорости 5 м/сек.

Расшифровка полученных картин форм смазочного слоя показывает, что кроме минимальной толщины смазочного слоя — h_m , в направлении движения наблюдалось также «опускание» концов области трения в поперечном направлении и образование здесь (с двух сторон зоны контакта) наименьших толщин смазочного слоя h_{m1} . Отмечено, что всегда $h_{m1} \leq h_m$. Этот факт резко снижает возможные торцевые утечки масла из зоны контакта и способствует превращению пространственной контактно-гидродинамической задачи в плоскую даже в случае контакта шарика с плоскостью.

Необходимо отметить, что нагрев поверхностей трения происходит как в результате потерь на трение качения в контактах, так и на трение скольжения между шариком и элементом сепаратора.

Приведем на рис. 1а сравнение теоретических и экспериментальных значений h_0 при качении шарика по желобу, а на рис. 1б — по плоскости.

Во всех случаях расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями не превышало 20% или 0,07 мк.

Исключениями являются точки (рис. 1б, обозначение в ромбике), когда форма зазора между поверхностями напоминает форму зазора, образующуюся при смазке неньютоновской жидкостью. Такое относительно резкое уменьшение толщины смазочного слоя при больших скоростях движения не могло явиться результатом существенного приращения температуры контакта, т. к. время проведения этого эксперимента было меньшим, чем в других случаях и общий нагрев систем был еще невелик.

Возникновение существенного влияния неньютоновских свойств смазки могло быть следствием относительно низких

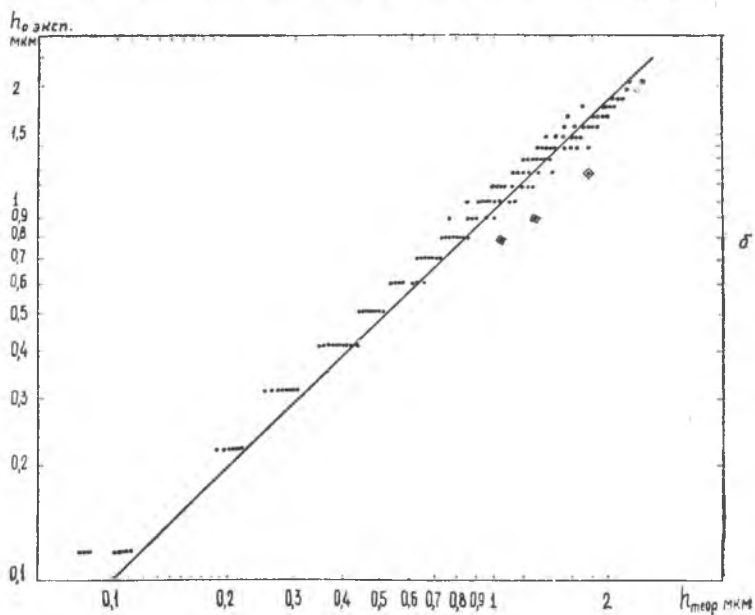
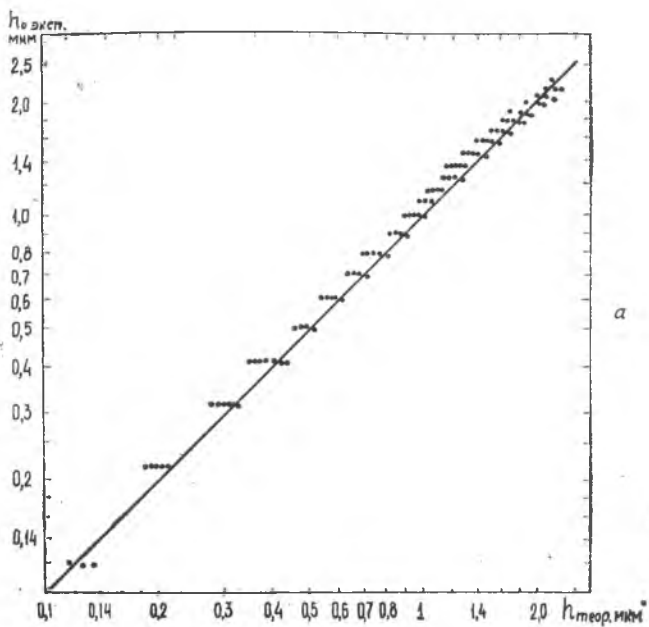


Рис. 1. Сравнение теоретических и экспериментальных h_0 :

— при качении шарика в желобе упорного шарикоподшипника

— при качении шарика в плоскости

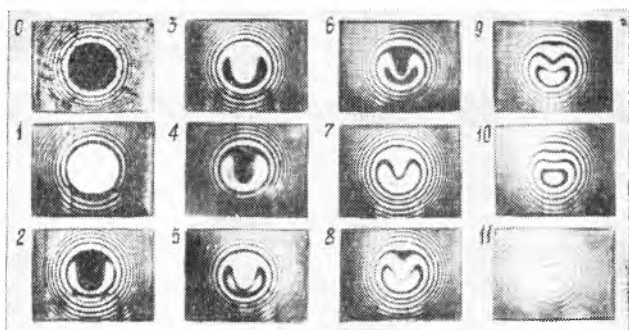


Рис. 2. Фотографии форм зазоров при увеличении скорости движения

температур зоны контакта $T_{\text{вых}}$ и больших скоростей качения, когда время релаксации — t_p стало соизмеримо с временем прохождения частицы масла через зону контакта.

На рис. 2 приведены для этого случая фотографии форм зазоров при увеличении скорости качения $k_{0 \max} = 5800 \text{ кг/см}^2$; $\lambda_a \pm \lambda_b = 333 \frac{1}{\mu}$. Обращаем внимание на то, что с ростом скорости происходит резкое сокращение длины плоской «раздавленной» площадки. При больших скоростях она полностью исчезает, и форма зазора начинает напоминать недеформированный зазор.

На рис. 3а, 3б и 3в приведены экспериментальные безразмерные формы зазоров $H = \frac{h}{h_0}$ при качении шарика по плоскости. В случае низких температур зоны контакта на рис. 3а и 3б действительно наблюдается резкое сокращение и исчезновение плоской «раздавленной» площадки. При этом случай 3б соответствует фотографиям формы зазора рис. 2 и точкам — ромбикам рис. 1,б.

На рис. 4 приведены теоретические безразмерные формы зазоров $H = \frac{h}{h_0}$ и соответствующие эпюры давления для неньютоновской Ри-Эйринговской жидкости. С увеличением параметра c_1 пропорционально растет сумма скоростей $U_a + U_b$. Качественное совпадение экспериментальных безразмерных форм зазоров (рис. 3а и 3б) с теоретическими (рис. 4), очевидно, и не нуждается в пояснениях. Выполнить же количественное сопоставление затруднительно, т. к. до сих пор неизвестны численные характеристики для Ри-Эйринговской жидкости в зависимости от давления и температуры масел типа МС-20.

Для пояснения того, как изменяется эпюра давления в случае исчезновения плоской «раздавленной» площадки, на рис. 5 вверху покажем деформированную форму зазора, соответ-

вуюшую последней фотографии рис. 2 или кривой б рис. 3б, а также теоретическую недеформированную поверхность. Наложим их друг на друга таким образом, чтобы далеко за пределами зоны трения они бы совпали. Предположим, что в случае герцевского контакта форма зазора за пределами площадки совпадает с недеформированной и существует прямая пропорциональность между перемещениями поверхности и местным давлением. Тогда эпюра давления на герцевской площадке

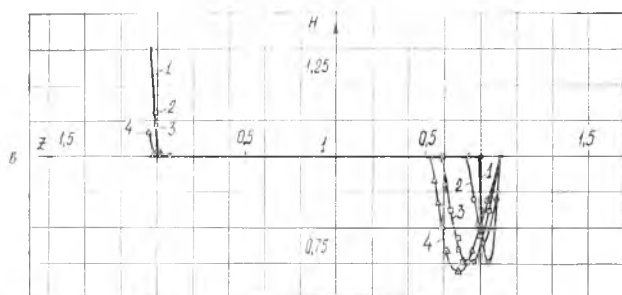
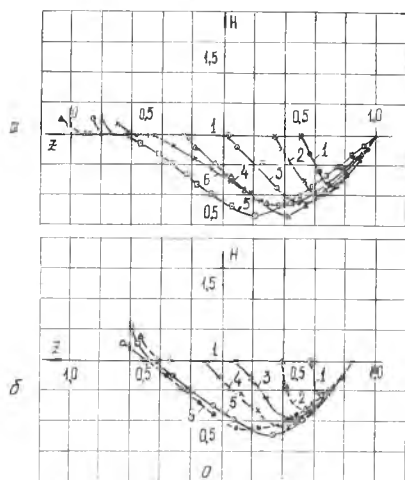


Рис. 3. Экспериментальные безразмерные формы зазоров:

$$a - \lambda_a + \lambda_b = 333 \text{ 1/м}; \quad \alpha_1 = \infty; \quad \kappa_{0 \text{ max}} = 7300 \text{ кг/см}^2;$$

$$б - \lambda_a + \lambda_b = 333 \text{ 1/м}; \quad \alpha_1 = \infty; \quad \kappa_{0 \text{ max}} = 5800 \text{ кг/см}^2;$$

$$в - \lambda_a + \lambda_b = 386 \text{ 1/м}; \quad \alpha_1 = \infty; \quad \kappa_{0 \text{ max}} = 16700 \text{ кг/см}^2$$

контакта будет в соответствующем масштабе определяться перемещениями поверхности — расстоянием по вертикали между недеформированной формой зазора и площадкой Герца. Эпюра же давления на деформированной площадке будет в таком же масштабе определяться перемещениями деформированной поверхности — расстоянием по вертикали между деформированной и недеформированной поверхностями.

Таким образом, переход от ньютоновского поведения смазки к неньютоновскому приводит иногда к исчезновению «раздавленной» плоской площадки, более пологой эпюры давления со снижением максимального напряжения $\kappa_{0 \text{ max}}$, а следовательно,

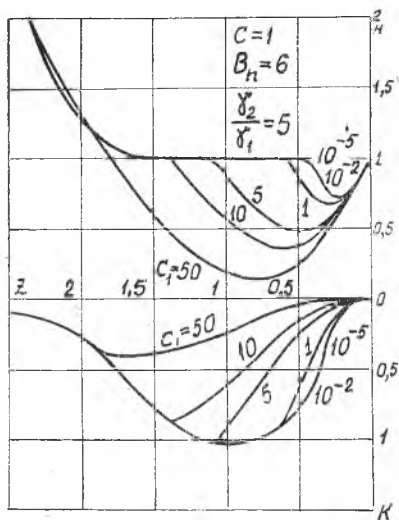


Рис. 4. Теоретические безразмерные формы зазоров для Рн-Эйринговской жидкости

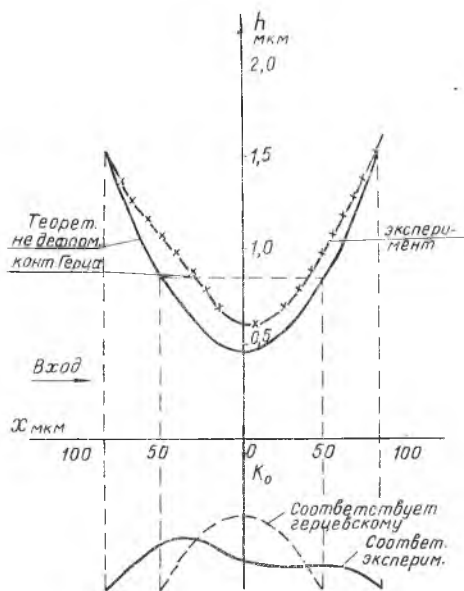


Рис. 5. Сравнение теоретической недеформированной формы зазора и экспериментальной деформированной, когда исчезает горизонтальный «раздавленный» участок

к увеличению усталостной долговечности поверхности трения.

На рис. 6а, 6б, 6в и 6г изображены зависимости толщины смазочного слоя от суммарной скорости движения для случаев качения шарика по плоскости и по желобу при малых и значительных нагрузках и смазке жидкими и консистентными смазками. Толщины смазочного слоя для консистентной смазки ЦИАТИМ-201 почти совпали с толщинами при смазке трансформаторным маслом, вязкость которого весьма близка к МВП, являющемуся базовым маслом для консистентной смазки. Для УС-1 толщины смазочного слоя также соответствуют базовому маслу. Таким образом, наши эксперименты подтвердили, что толщина смазочного слоя для консистентных смазок определяется главным образом базовым маслом.

Зависимость толщины смазочного слоя от скорости при качении шарика $d_{ш} = 5,183$ мм по плоскости шарика показана на рис. 7 для различных нагрузок.

Вначале с ростом скорости толщина слоя всегда растет, затем рост прекращается и толщина даже начинает очень быстро уменьшаться, что объясняется увеличением температуры смазки, которая приводит к резкому уменьшению вязкости и толщины слоя. Чем

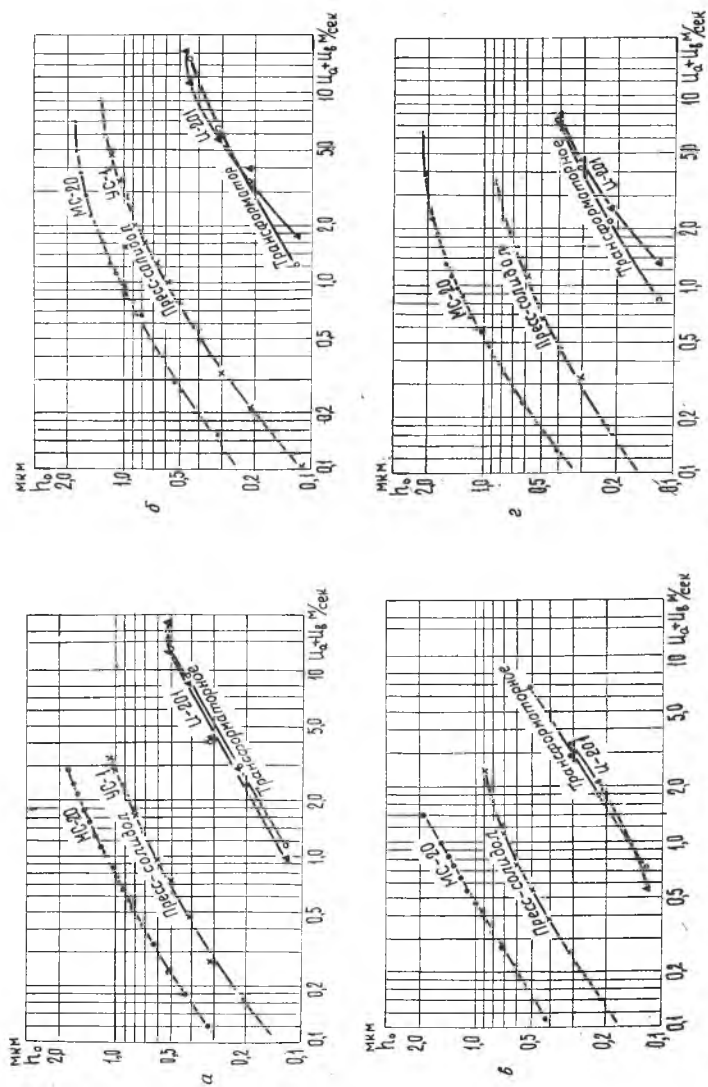


Рис. 6. Зависимость толщины масляного слоя от скорости качения при разных нагрузках, маслах и качении шарика по плоскости и по желобу;

σ — $d_{\text{ш}} = 7,928$ мм; $\alpha_1 = \infty$; $P_0 = 0,315$ кг; $K_0 \text{ max} = 5000$ кг/см²; $K_0 = 4340$ кг/м;
 δ — $d_{\text{ш}} = 7,928$ мм; $\alpha_1 = \infty$; $P_0 = 1,25$ кг; $K_0 \text{ max} = 7500$ кг/см²; $K_0 = 10800$ кг/м;
 ν — $d_{\text{ш}} = 7,928$ мм; $\alpha_1 = 0,551$; $P_0 = 1,5$ кг; $K_0 \text{ max} = 4440$ кг/см²; $K_0 = 4340$ кг/м;
 z — $d_{\text{ш}} = 7,928$ мм; $\alpha_1 = 0,551$; $P_0 = 5,9$ кг; $K_0 \text{ max} = 7000$ кг/см²; $K_0 = 13800$ кг/м.

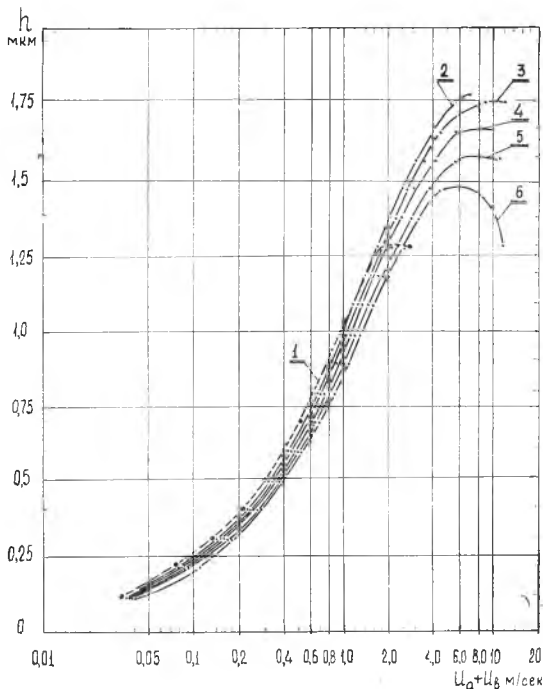


Рис. 7. Зависимость толщины смазочного слоя от скорости при качении шарика по плоскости.

1 —	$P_0 = 0,255 \text{ кг}$;	$\kappa_0 \text{ max} = 6200 \text{ кг/см}^2$;	$K_0 = 4340 \text{ кг/м}$;
2 —	$0,75 \text{ кг}$;	9700 кг/см^2 ;	8850 кг/м ;
3 —	$1,00 \text{ кг}$;	9800 кг/см^2 ;	10800 кг/м ;
4 —	$1,84 \text{ кг}$;	12000 кг/см^2 ;	15800 кг/м ;
5 —	$3,0 \text{ кг}$;	14100 кг/см^2 ;	22400 кг/м ;
6 —	$5,0 \text{ кг}$;	16700 кг/см^2 ;	31500 кг/м ;

больше нагрузка, тем при прочих равных условиях больше приращение температуры. При меньших скоростях прекращается рост толщины слоя и начинается его убывание.

Единственным исключением является кривая 1 для наименьшей нагрузки. Здесь значительно раньше начинает убывать толщина слоя, чего нельзя объяснить большим чем в других случаях приращением температуры. Именно для этой кривой снижение толщины слоя сопряжено с изменением формы зазора, когда исчезает плоская «раздавленная» площадка. Поэтому можно предположить, как уже отмечалось ранее, что здесь благодаря низкой температуре зоны контакта время релаксации очень велико и становится соизмеримым с временем прохождения частицы масла через зону контакта, возникает не-newтоновское поведение смазки, меняется форма зазора и происходит относительное уменьшение толщины смазочного слоя.

Действительно, измеренные температуры зоны контакта показали, что для этой кривой 1 они наименьшие. Иное положение для больших нагрузок и для больших температур контакта. Например, для кривой 6 рис. 7 формы зазоров изображены на рис. 3с.

На рис. 8а показана зависимость h_0 от скорости качения при различных $\alpha_1 = \frac{r_{жк}}{d_{ш}}$ и фиксированной погонной нагрузке K_0 . При малых скоростях движения уменьшение α_1 способствует

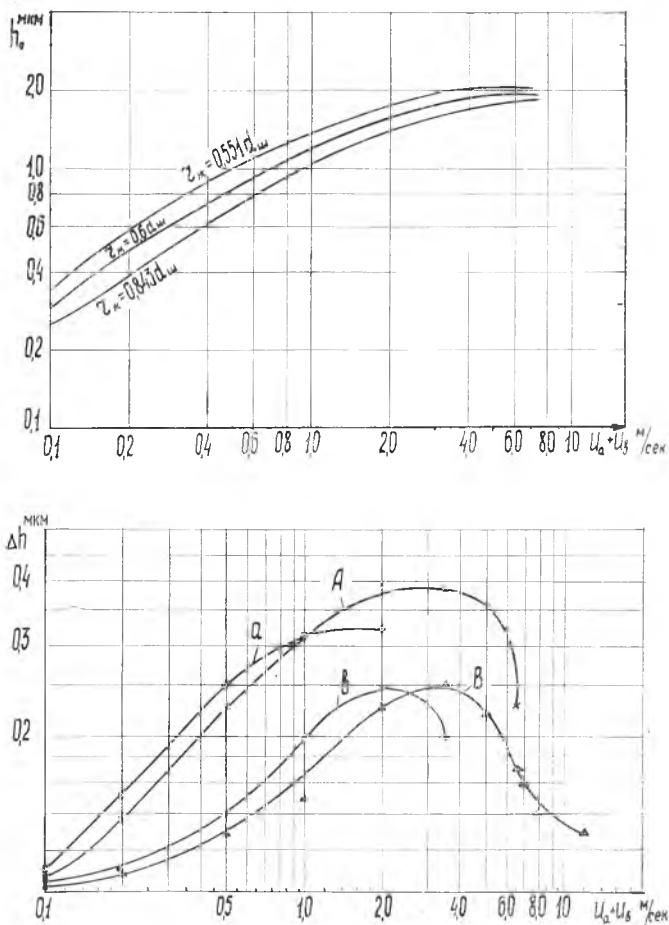


Рис. 8: а — зависимость h_0 от $U_a + U_b$ при разных α_1 и фиксированных K_0 МС-20, $t_{вх} 20C^\circ$, $K_0 = 10\ 800$ кг/м; б — разность толщин смазочного слоя при переходе от желоба $\alpha_1 = 0,843$ к желобу $\alpha_1 = 0,551$ в зависимости от скорости и нагрузки и при изменении диаметра шарика, катящегося по плоскости

увеличению h_0 . Однако при скоростях порядка 7 м/сек радиус желоба уже почти не влияет на толщину слоя смазки. Заметим, что толщина $h_0=2$ мк получается при $\alpha_1=0,843$; $\kappa_{0 \max} = 9370$ кг/см²; $\alpha_1 = 0,6$ — $\kappa_{0 \max} = 7800$ кг/см²; $\alpha_1 = 0,551$ — $\kappa_{0 \max} = 7110$ кг/см².

На рис. 8 б изображена зависимость от скорости качения разности толщины смазочного слоя Δh при переходе от желоба с $\alpha_1=0,843$ к желобу с $\alpha_1=0,551$ в случае больших нагрузок — $K_0=10800$ кг/м — кривая А и малых нагрузок — $K_0=4340$ кг/м — кривая а.

Кроме того, на графике приводится зависимость от скорости качения разности толщин смазочного слоя Δh при переходе от качения по плоскости шарика малого диаметра к шарiku больших размеров. При этом изменяется $\lambda_a \pm \lambda_b$ от 386 до $229 \frac{1}{\text{м}}$. Здесь кривая В соответствует большим нагрузкам ($K_0=10800$ кг/м), а кривая б — меньшими нагрузками ($K_0=4340$ кг/м).

Рассмотрим характер этих кривых. Сначала с ростом скорости переход к уменьшенному развалу желоба приводит к увеличению толщины смазочного слоя, причем тем больше, чем больше скорость. Однако после $U_a+U_b=2-3$ м/сек увеличение прекращается и вскоре толщина начинает резко убывать.

Уменьшение Δh объясняется тем, что с ростом скорости растет тепловыделение и температура контакта, падает вязкость и толщина слоя. Причем, чем меньше развал желоба, тем больше растет температура.

Поэтому уменьшение развала желоба целесообразно при малых скоростях движения. С ростом скорости, наоборот, целесообразно увеличивать развал желоба, что и делают на практике.

При увеличении диаметра шарика при той же нагрузке увеличивается площадка контакта и растет толщина смазочного слоя, но при больших скоростях с ростом размера площадки контакта увеличиваются тепловыделение и температура контакта, что приводит в конечном счете к торможению роста h_0 и даже к его уменьшению. Однако такое объяснение характера кривых рис. 8 б не является полным. Действительно, если бы все можно было объяснить температурным эффектом, то при переходе от больших нагрузок к малым перегиб кривых происходил бы при больших скоростях движения. Опыт показывает, что с ростом скорости при погонных нагрузках $K_0=4340$ кг/м кривые изгибаются не позже, а раньше. Поэтому имеются основания предположить, что такой более ранний перегиб кривых вызван проявлением неньютоновских свойств смазки при низких температурах слоя и большом t_p . Кстати, во всех этих случаях форма зазора, как уже отмечалось, напоминает форму зазора при неньютоновской жидкости.

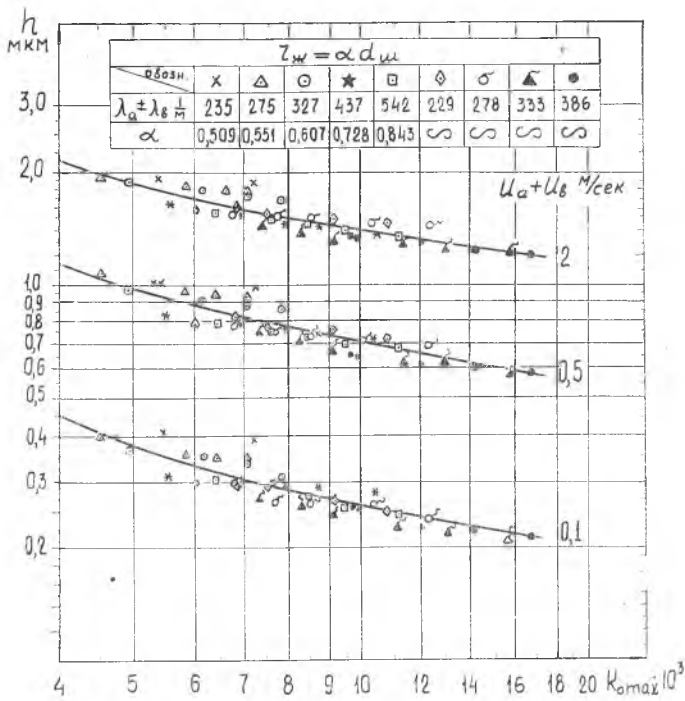


Рис. 9. Зависимость толщины масляного слоя от напряжения при различных скоростях движения и развалах желобов

На рис. 9 приведена зависимость h_0 от максимального герцевского напряжения при разных скоростях движения, различных диаметрах шариков и различных развалах желобов.

Как показывают эксперименты, на толщину смазочного слоя оказывают основное влияние скорость движения и напряжения. Форма развала желоба и диаметр шарика влияют незначительно.

На рис. 10 изображены теоретические и экспериментальные формы зазоров в различных случаях. Если смазка находится в ньютоновском состоянии, соответствие теоретических и экспериментальных результатов хорошее. Только в случае возникновения неньютоновских явлений в смазке нарушается соответствие.

Необходимо также заметить, что при качении трех шариков, находящихся на одной беговой дорожке, кавитационная зона уменьшает величину масляного мениска на входе. Если же сместить в радиальном направлении шарики так, чтобы беговые дорожки имели смещения на несколько десятых миллиметра, протяжение масляного мениска возрастает и опасность масля-

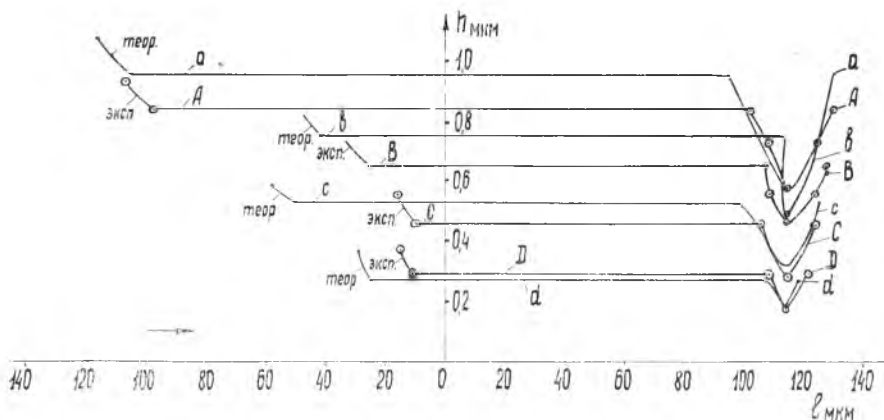


Рис. 10. Сравнение теоретических и экспериментальных форм зазоров

ного голодания существенно уменьшается. В связи с малым влиянием коэффициента α_1 на h_0 , по-видимому, возможно и целесообразно разработать конструкции подшипников со смещенными шариками. В радиально-упорных шарикоподшипниках это в какой-то степени автоматически осуществляется при комбинированном нагружении подшипника радиальной и осевой нагрузками и при перекосах.

3. Экспериментальное исследование при скольжении шарика по плоскости

В предыдущем разделе было показано, что неньютоновские свойства масел лишь иногда влияют на толщину и форму смазочного слоя.

Однако при больших герцевских напряжениях они всегда влияют на коэффициент трения. Объясняется это тем, что толщина смазочного слоя, как сейчас уже общепризнано, определяется гидродинамическими характеристиками и свойствами масла только на входе в область трения, где давления еще невелики и время релаксации еще мало. Поэтому неньютоновские явления относительно мало влияют на h_0 . Иначе обстоит дело с определением коэффициента трения. При разности скоростей движения трущихся поверхностей наибольшие касательные напряжения развиваются в центральной зоне контакта, где напряжение и время релаксации велики. Определять при неизотермическом процессе коэффициент трения без знания характеристик неньютоновского поведения смазки практически не возможно. Кроме того, толщина смазочного слоя весьма слабо зависит от нормальных напряжений и погонной нагрузки (в

степени 0,15), а общая сила трения — линейно от касательных напряжений (показатель степени 1,00). Таким образом без значений времени релаксации практически невозможно определение f , а следовательно, и приращение температуры в зоне контакта и достаточно достоверный расчет h_0 при наличии проскальзывания.

В настоящей работе производилось измерение толщины и формы смазочного слоя, а также коэффициента трения при скольжении шарика по плоскости с тем, чтобы найти время релаксации и предложить методику расчета коэффициента трения.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [8], при одновременной регистрации нагрузки, скорости скольжения, толщины и формы смазочного слоя, силы трения, температуры масла на входе и на выходе из контакта.

Фиксировались толщина смазочного слоя и температура масла на выходе, причем скорость скольжения изменялась так, чтобы h_0 изменялась кратно четверти длины волны света.

Эксперименты проводились при смазке маслом МС-20 шарика диаметром $d_{ш}=9,75$ мм, скользящего по плоскости со скоростями от 0,05 м/сек до 5 м/сек. При этом температура масла на входе была $T_{вх} = 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80^\circ\text{C}$ и максимальные герцевские напряжения равнялись 14000 кг/см²; 13000 кг/см²; 11200 кг/см²; 9400 кг/см²; 6500 кг/см².

Измерялись температуры как на входе, так и на выходе из зоны контакта с помощью хромель-алюмелиевой термопары, причем температура на входе выдерживалась с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

На установке были получены интерференционные картины более чем для 160 различных сочетаний нагрузки и скорости. Измеренная толщина смазочного слоя h_0 была сравнена с теоретической, вычисляемой по формуле [9]

$$h_{0\text{ теор.}} = 3,17 \frac{(\mu_0 U)^{0,75} \cdot n^{0,6}}{K_0^{0,15} \cdot (\lambda_a \pm \lambda_b)^{0,4}}$$

Сравнение теоретической и экспериментальной толщины слоя приведено на рис. 11. Расхождение всюду менее 18% или 0,07 мк. Одновременно с замером толщины слоя были определены силы и коэффициент трения.

Зависимость коэффициента трения от скорости показаны на рис. 12. Во всех случаях коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости скольжения. С увеличением нагрузки он возрастает, однако незначительно.

Влияние температуры подаваемого масла на коэффициент трения проявляется через изменение вязкости масла. Температура

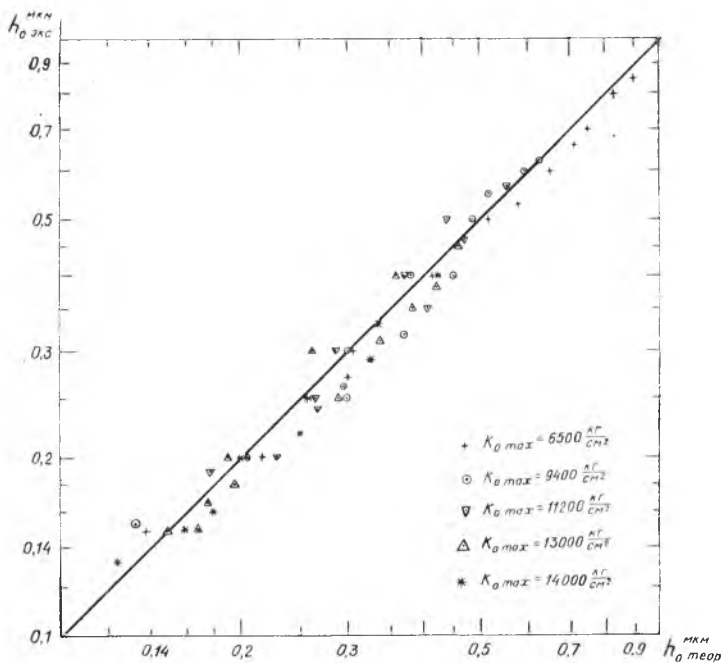


Рис. 11. Сравнение теоретических и экспериментальных толщин смазочной пленки при скольжении шарика по плоскости

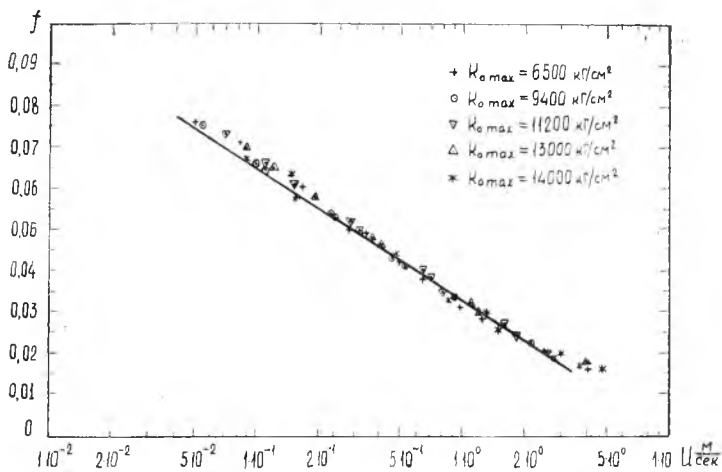


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения от скорости

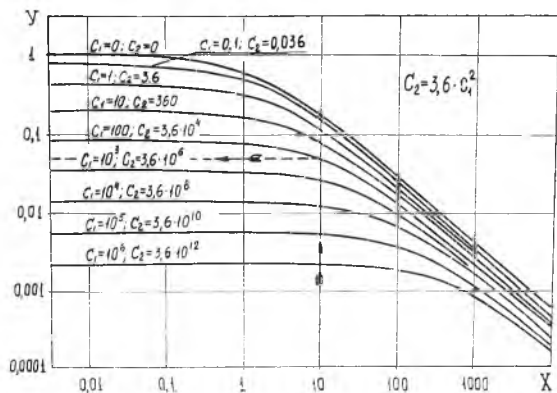


Рис. 13. Снижение эффективной вязкости при не-изотермическом процессе и неньютоновском по-ведении смазки

поверхности трения является весьма важным фактором, влияющим на коэффициент трения. При расчете коэффициента трения принималось, что средняя температура смазочного слоя в зоне контакта равна $T_1 = T_{\text{вых}} + \Delta T$, где ΔT — приращение температуры по Блоку, $\Delta T = \frac{0,83 f K_0 \sqrt{U}}{\sqrt{\lambda} \gamma c \sqrt{b}}$.

Средняя вязкость в зоне контакта определялась по T_1 и давлению $\kappa_0 = \frac{2}{3} \kappa_{0 \text{ max}}$. Толщина смазочного слоя определялась по известным зависимостям вязкости от давления и температуры при $T = T_{\text{вых}} + \frac{1}{3} \Delta T$, т. к. на входе в зону контакта температура явно ниже, а h_0 зависит от температуры входа.

В работе [10] был получен коэффициент Y , показавший, во сколько раз снижается вязкость или касательное напряжение при переходе от изотермического процесса для ньютоновской жидкости к неизотермическому процессу и неньютоновской жидкости (рис. 13). Коэффициент Y зависит как от абсциссы $X = \frac{\beta \mu_s U^2}{8 \cdot 427 \cdot \lambda}$, так и от параметра $C_1 = \frac{1}{3} \left[t_p \frac{U}{h_0} \right]^2$.

Усредняя касательное напряжение по площадке контакта, можно получить $f = \frac{4 \mu_s U}{\pi k_{\text{оср}} h_0} Y$.

Воспользовавшись экспериментальными значениями f для $\kappa_{0 \text{ max}} = 6500 \text{ кг/см}^2$, лучшим для $\kappa_{0 \text{ ср}} = 4300 \text{ кг/см}^2$ и различных $T_{\text{вх}}$ и U соответствующие значения Y , X и по работе [10] найдем C_1 . Отсюда легко определить t_p при соответствующих значениях $\kappa_{\text{оср}}$ и T .

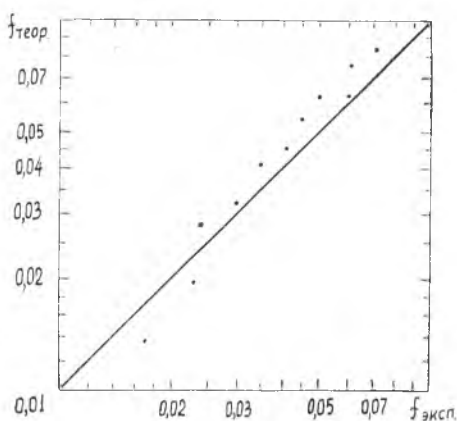
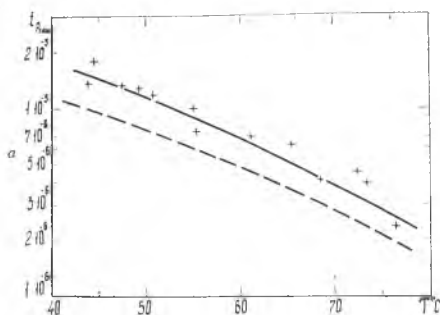


Рис. 14. а — сравнение времени релаксации, полученного вибрационным и «интерферометрическим» методами:

— — — — — вибрационный метод

$\kappa_0 = 4300 \text{ кг/см}^2$;

— — — — — «интерферометрический» метод

$\kappa_{0\text{ср}} = 4300 \text{ кг/см}^2$;

б — сравнение коэффициента трения теоретического и экспериментального

решетного определения времени релаксации. При этом t_p определяется температурой контакта и средним напряжением в контакте $\kappa_{0\text{ср}} = \frac{2}{3} \kappa_{0\text{макс}}$.

Соответствующие экспериментальные результаты приведены на рис. 15.

Таким образом, предлагается метод теоретического расчета коэффициента трения при смазке контакта маслом МС-20. На рис. 16, а приведена зависимость времени релаксации от T и $\kappa_{0\text{ср}}$, а на рис. 16, б — зависимость вязкости этого масла от $\kappa_{0\text{ср}}$ и тем-

Сравним на рис. 14 а, полученные значения t_p , основанные как на эксперименте со скользящим шариком, так и на предложенном нами теоретическом методе расчета с экспериментальными значениями t_p Б. П. Дьяченко, полученными вибрационным методом. Расхождение менее 50%. Учитывая, что время релаксации при этом изменяется в десять раз, обнаружим хорошее соответствие времен релаксации, определенных столь различными методами.

На рис. 14 б изобразим соответствие коэффициентов трения, определенных экспериментально при скольжении шарика по стеклянной плоскости и рассчитанных теоретически нашим методом на основе времени релаксации, найденного вибрационным методом. Различия не превосходит 20%.

В связи с этим можно воспользоваться проведенными экспериментами с интерференционным измерением h_0 и f для рас-

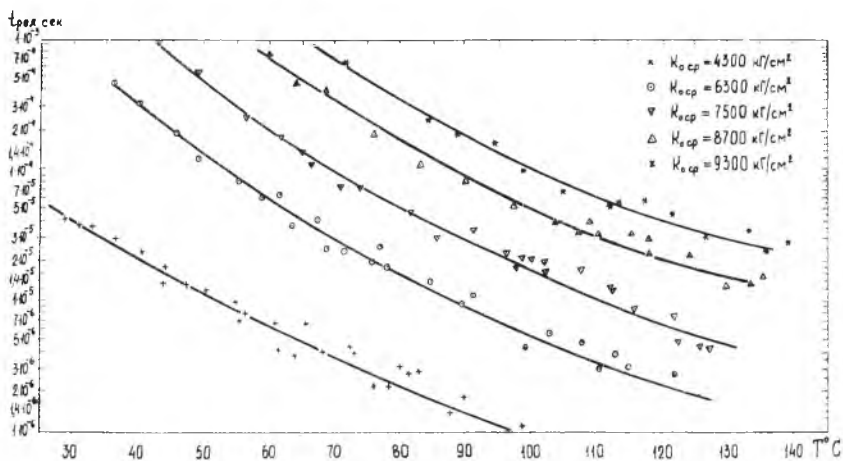


Рис. 15. Экспериментально полученные зависимости времени релаксации МС-20 от температуры и среднего давления

пературы. Приведенных данных достаточно для расчета коэффициента трения при $\kappa_{0 \max} \leq 14000 \text{ кг/см}^2$.

Методика расчета коэффициента трения следующая:

1. По заданной геометрии $\lambda_a \pm \lambda_b$, скорости поверхностей U_a и U_b , объемной температуре поверхностей трения $T_{\text{вых}}$, максимальным герцевским напряжением $\kappa_{0 \max}$ для применяемого масла задается $f_{\text{исх}} = 0,03$.

2. Определяем ΔT по Блоку, температуру смазочного слоя h_0 , вязкость масла μ и время релаксации t_r при $\kappa_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \kappa_{0 \max}$.

3. Определяем X , c'_1 .

4. По графику работы [10] находим Y и по формуле

$$f_{\text{пол}} = \frac{4\mu_s U}{\pi \kappa_{0 \text{ ср}} h_0} Y \text{ находим } f_{\text{пол}}.$$

5. Если этот коэффициент трения совпадает с исходным — расчет закончен. В противном случае задаемся $f_{\text{нов}} = \frac{1}{2} (f_{\text{исх}} + f_{\text{пол}})$ и расчет повторяем до его сходимости. Обычно сходимость достигается при втором приближении.

В настоящее время еще затруднительно производить определение t_r при высоких напряжениях, поэтому весьма целесообразно применять предлагаемый теоретическо-экспериментальный метод. Следует отметить, что указанный метод пригоден для весьма вязких масел. При недостаточной вязкости (например, при высоких температурах) он дает недостаточную точность для определения h_0 , а следовательно, и для времени релаксации.

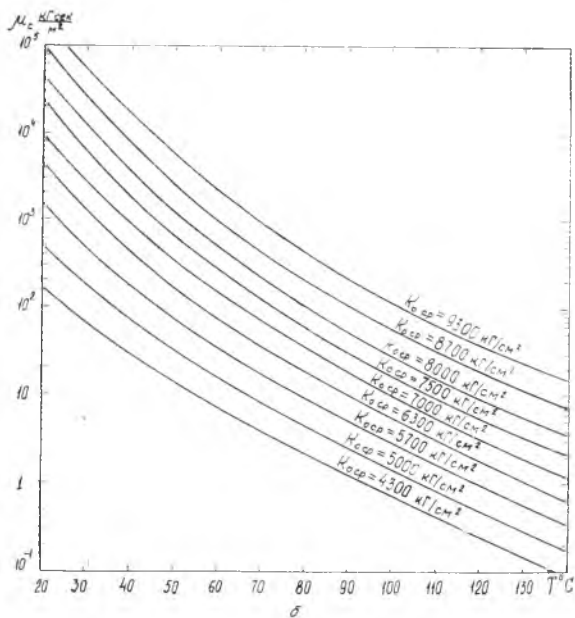
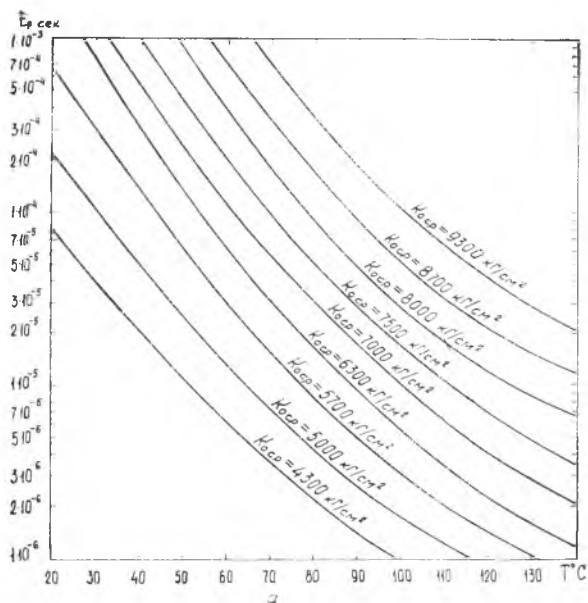


Рис. 16. Зависимости времени релаксации (а) и вязкости (б) от давления и температуры

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Cameron, R. Gohar. Theoretical and experimental studies of the oil film in lubricated point contact. «Proceedings of the Royal Society», Series A, Vol. 291, 1966, pp. 520—536.
2. R. Gohar N. Cameron. The mapping of elastohydrodynamic contacts. «ASLE Trans.», Vol. 10, 1967, pp. 215—225.
3. D. M. Sanborn, W. O. Winer. Fluid rheological effects in sliding elastohydrodynamic point contacts with transient loading: I-Filmthickness, 2-Traction. «Journal of Lubrication Technology», Series F, V. 93, No 2,3, 1071.
4. L. D. Wedeven, D. Evans, A. Cameron. Optical analysis of ball bearing starvation. «Journal of Lubrication Technology», Ser. F. V. 93, No. 3, 1971.
5. C. A. Foord, W. C. Hamman. A. Cameron. Evaluation of lubricants using optical elastohydrodynamics. «ASLE Trans», v. 11, 1968, pp. 31—43.
6. R. Gohar Oil film thickness and rolling friction in elastohydrodynamic point contact. «Journal of Lubrication Technology», Ser. F, 1971, V. 93, No. 3.
7. E. G. Tracthman, H. S. Cheng. Termal and non-Newtonian effects on traction in elastohydrodynamic contacts. The Institution of Mechanical Engineers. Elastohydrodynamic lubrication. Symposium 1972. 11—13 th April. Pp. 142—148.
8. В. Ш. Шварцман. Исследование масел при скольжении шарика. Труды первой Всероссийской конференции по контактно-гидродинамической теории смазки, вып. I, г. Куйбышев, 1973.
9. Коднир Д. С., Курушин М. И., Ратнер И. Д. Расчет толщины смазочного слоя в зубчатых передачах и подшипниках качения. «Применение контактно-гидродинамической теории смазки к исследованию деталей машин». Труды Куйбышевского авиационного института, вып. 40, 1969.
10. Коднир Д. С. Неизотермическая стационарная задача для неньютоновской жидкости. Труды I Всероссийской конференции по контактно-гидродинамической теории смазки, вып. I. Куйбышевский авиационный институт, 1973.

М. И. КУРУШИН

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В КОНТАКТАХ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЫСТРОХОДНОГО РОЛИКОПОДШИПНИКА С НАТЯГОМ

С улучшением процесса балансировки и уменьшением остаточных дисбалансов в опорах быстроходных газотурбинных двигателей все чаще возникает дефект — проскальзывание и износ роликоподшипников. Одним из средств борьбы с проскальзыванием является введение гарантированного натяга по роликам. Но в этом случае возникает проблема назначения оптимальной величины преднатяга (при большом натяге может произойти преждевременное выкрашивание роликов и колец). Принятая в настоящее время методика расчета подшипников качения по коэффициентам работоспособности [1] не позволяет