

ке, что и без учета зависимости вязкости от давления, по во всех выражениях $\sigma(\alpha')$ заменяется на $\sigma_d(\alpha')$ из (25).

При численном решении задачи расчеты производятся для нескольких значений параметра B .

Удовлетворительное совпадение опытных и расчетных коэффициентов деформации (см. таблицу), а также близкое совпадение кривых $v(l)$ и $W(l)$ (рис. 3) подтверждают достаточную точность приближенного решения контактно-гидродинамической задачи для практических расчетов.

Полученные зависимости $C=C(\Psi)$ позволяют рядом пробных расчетов определить действительный зазор в рабочей зоне подшипника скольжения с учетом деформации деталей подшипника под нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

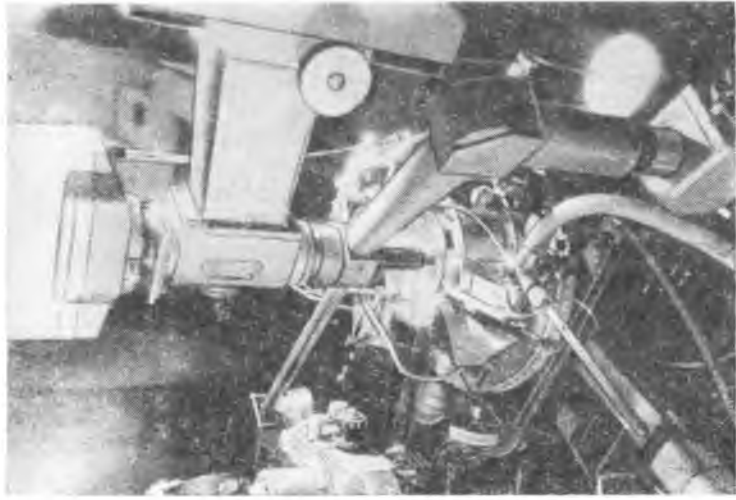
1. Снеговский Ф. П. Опоры скольжения тяжелых машин. М., Машиностроение, 1969.
2. Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. М., Гостехиздат, 1949.
3. Коровчинский М. В. Некоторые вопросы гидродинамической теории смазки при деформируемости тел, ограничивающих смазочный слой. Тр. III Всес. конф. по трению и износу в машинах, т. 3. Изд. АН СССР, 1960.
4. Коднир Д. С. Контактно-гидродинамическая теория смазки. Куйбышев. 1963.
5. Дьячков А. К. Учет влияния зависимости вязкости смазочного масла от давления на показатели работы цилиндрического подшипника при статическом нагружении. «Трение и износ в машинах», сб. III. Москва, 1946 г.

Д. Л. БАКАШВИЛИ

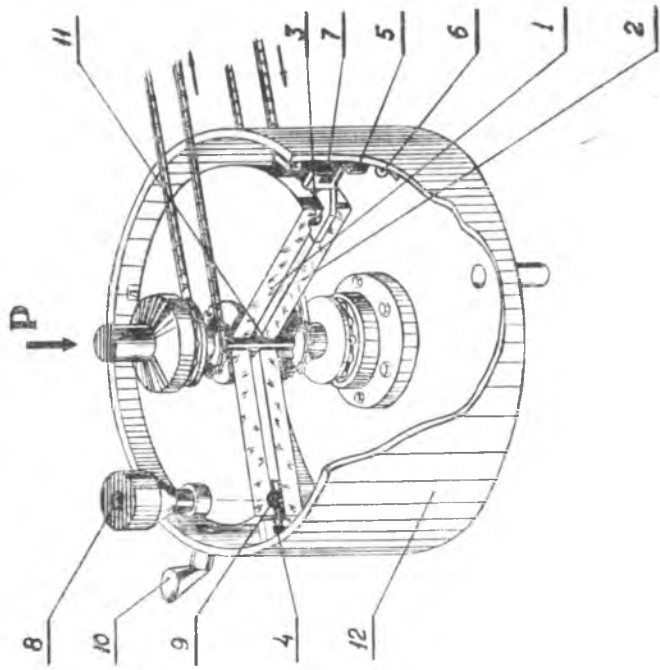
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕНИЯ ШАРИКА В ШАРИКОПОДШИПНИКЕ

Работы, проводимые в последние годы в лабораториях Англии и США показали, что оптическая интерференция является наиболее удобным методом для получения фундаментальных характеристик эластогидродинамической смазки. Методика и физика интерференционной техники определения толщины масляного слоя подробно приводится в работах А. Камерона, Тейбора, Блока, В. Винера и др. Нами для изучения процесса контактирования шарика с кольцами подшипника в условиях жидкостного трения металлические кольца заменялись стеклянными [1].

Для экспериментального определения толщины и формы смазочного слоя при качении была создана установка, приведенная на рис. 1. Она состоит из модели упорного шарикоподшипника, привода и приборов, необходимых для обеспечения интерферометрии. Кольца подшипника изготовлены из оптического стекла марки К-8;



а



б

Рис. 1. Установка для измерения толщины смазочного слоя при качении шарика в упорном шарикоподшипнике: 1 — верхний стеклянный диск с желобом; 2 — нижний стеклянный диск; 3 — шарик; 4 — упорный элемент сепаратора; 5 — осветитель; 6 — освещитель; 7 — тензодатчики; 8 — фотообъектив; 9 — термометр; 10 — подача масла; 11 — защитный кожух; 12 — центральная ось.

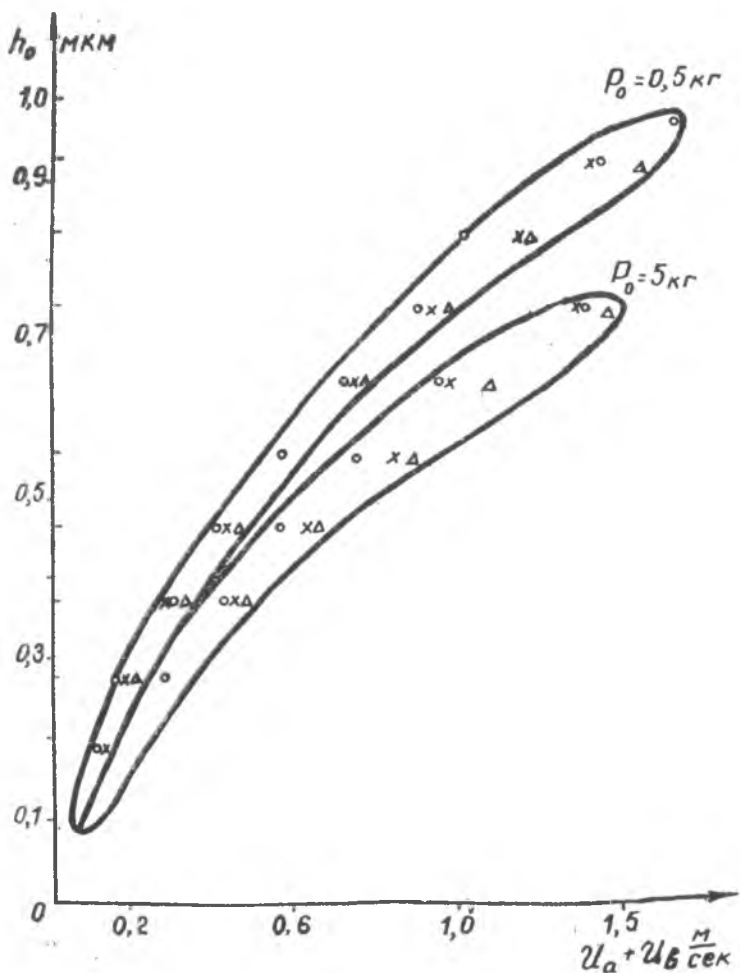


Рис. 2. Разброс толщины смазочного слоя
 O — оба диска ведущие; Δ — верхний диск ведущий; X — нижний диск ведущий

верхнее кольцо имеет желоб, покрытый тонким слоем кремния, нижнее кольцо плоское. Кольца подшипника разделяются тремя шариками, находящимися в автономных элементах сепаратора. С помощью цепных передач от специального редуктора кольца вращаются в противоположные стороны. Число оборотов колец подшипника фиксируется фотодатчиками, которые передают сигналы на пересчетные устройства. Нагрузка прикладывается к верхнему кольцу при помощи нагрузочного рычага (отношение плеч рычага 1:3).

Наблюдение зоны контакта шарика с желобом стеклянного

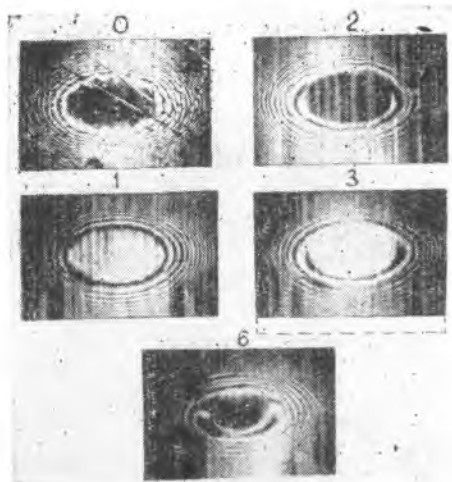


Рис. 3. Расшифровочная серия фотографий, полученных при качении шарика по желобу:

$$p_2 = 0,5 \text{ кг}; \lambda_a + \lambda_b = 157 \text{ 1/м};$$

$$0 - U_a + U_b = 0 \text{ м/сек} \quad \text{при этом } h_0 = 0 \text{ мкм}$$

$$1 - U_a + U_b = 0,056 \text{ м/сек} \quad \text{при этом } h_0 = 0,093 \text{ мкм}$$

$$2 - U_a + U_b = 0,072 \text{ м/сек} \quad \text{при этом } h_0 = 0,186 \text{ мкм}$$

$$3 - U_a + U_b = 0,128 \text{ м/сек} \quad \text{при этом } h_0 = 0,279 \text{ мкм}$$

$$6 - U_a + U_b = 0,4 \text{ м/сек} \quad \text{при этом } h_0 = 0,558 \text{ мкм}$$

жений выбраны размеры шариков и желоба, обеспечившие соотношение $r_{жк} = 0,804 d_{ш}$ и $r_{жк} = 0,682 d_{ш}$.

Эксперименты проводились как в режиме противовращения, так и при вращении одного из колец, т. е. ведомое кольцо увлекалось ведущим. По разнице скорости ведущего и ведомого колец определяется процент проскальзывания одного кольца относительно другого. На рис. 2 приведено поле разброса экспериментальных значений и толщины смазочного слоя при качении шарика диаметром $\varnothing = 5,2 \text{ мм}$ по плоскости.

Для определения начала отсчета нами были получены серии расшифровочных фотографий, которые дают возможность быстро и точно обработать полученные экспериментальные данные [2]. Рассмотрим серию фотографий, полученных при качении шарика по желобу стеклянного кольца при последовательном увеличении скорости вращения. На рис. 3 поз. «0» изображена картина, наблюдаемая при статическом состоянии шарика и дисков. Здесь интерференционная картина имеет темную центральную область при освещении монохроматическим светом и толщина слоя равна нулю. В момент начала движения, когда толщина слоя в этой зоне достигает $1/4$ длины волны света, темная область становится светлой (в нашем случае толщина $0,093 \text{ мм}$, рис. 3 поз. «1»). При толщине слоя, равной длине полуволны света (в нашем случае

кольца ведется через объектив с пятикратным увеличением и с апертурой $0,12$, с фокусным расстоянием 15 мм . Освещение осуществляется с помощью люминесцентного осветителя. Кинокамера «Красногорск» размещается над окуляром, поэтому на пленке получается увеличение в 20 раз.

Диаметр шариков равняется в одном случае $5,2 \text{ мм}$, а в другом — $6,4 \text{ мм}$. Желоб стеклянного кольца сделан глубиной $0,3 \text{ мм}$, радиусом $r_{жк} = 4,37 \text{ мм}$; диаметр беговой дорожки 77 мм . Радиус желобов колец радиально упорных шарикоподшипников обычно выбирается равным $0,505 - 0,540$. Однако при такой комбинации наблюдаемая картина представляет собой параллельные полосы и краевые эффекты при вращении шарика не видны. Исходя из этих соображений

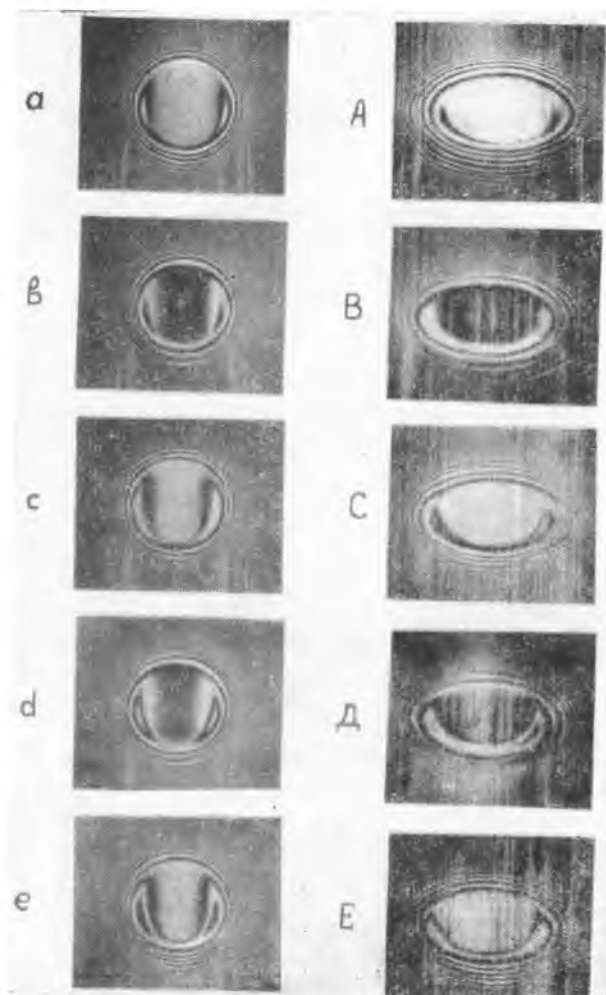


Рис. 4. Сравнительная кинограмма при качении шарика ($\Phi=5,2$ мм по плоскости (а, в, с, д, е) и по желобу (А, В, С, Д, Е).

0,1868 мкм), эта зона становится опять темной (рис. 3, поз. «2»). При этом на входной стороне зоны контакта образуется серповидная светлая полоса, где толщина смазочного слоя меньше, чем в центре, на величину, равную $\frac{1}{4}$ длины волны света, т. е. 0,0934 мкм. На рис. 3 поз. «3» центральная область стала светлой—толщина слоя смазки возросла еще на $\frac{1}{4}$ длины волны, при этом серповидная полоса также изменила свою окраску. Далее происходит аналогичная смена цветов, толщина масляного слоя в центре зоны контакта в нашем случае достигает 0,568 мкм.

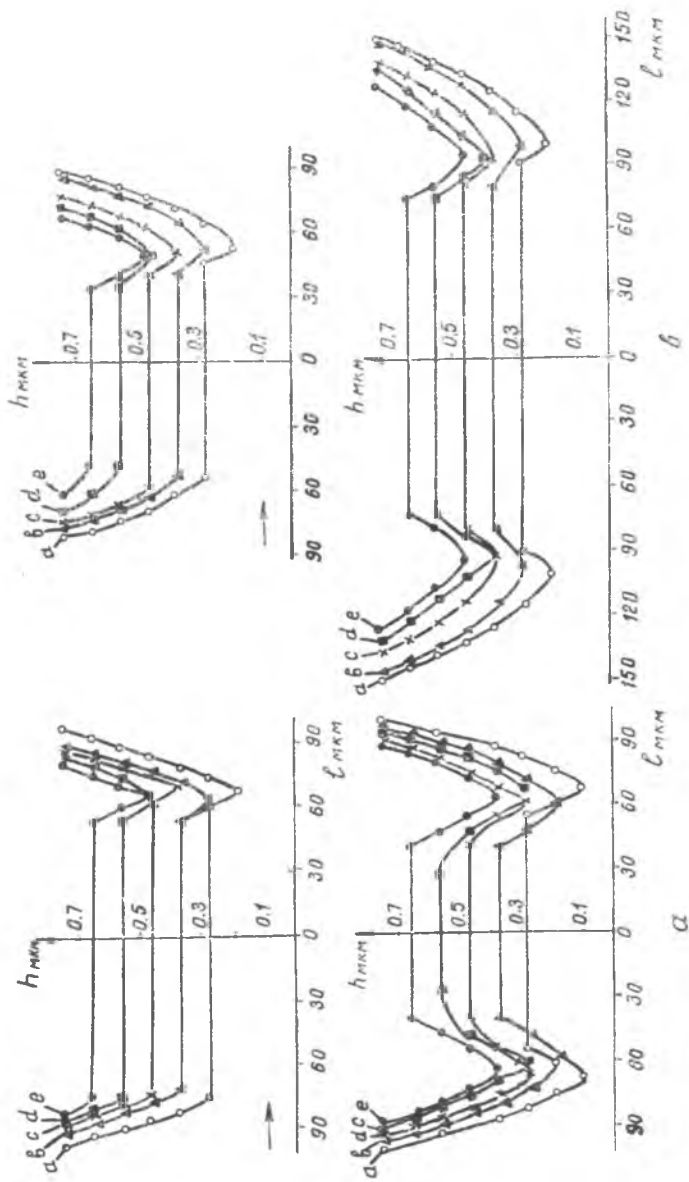


Рис. 5. Расшифровка карт по рис. 4а — по плоскости; в — по желобу;
 масштабы — МС=20; $P_0 = 1$ кг.

а) $U_a + U_b = 0,17$ м/сек; А) $U_a + U_b = 0,16$ м/сек

б) $U_a + U_b = 0,3$ м/сек; Б) $U_a + U_b = 0,21$ м/сек

в) $U_a + U_b = 0,71$ м/сек; В) $U_a + U_b = 0,55$ м/сек

г) $U_a + U_b = 0,49$ м/сек; С) $U_a + U_b = 0,36$ м/сек

д) $U_a + U_b = 0,58$ м/сек; Д) $U_a + U_b = 0,47$ м/сек

е) $U_a + U_b = 0,71$ м/сек; Е) $U_a + U_b = 0,55$ м/сек

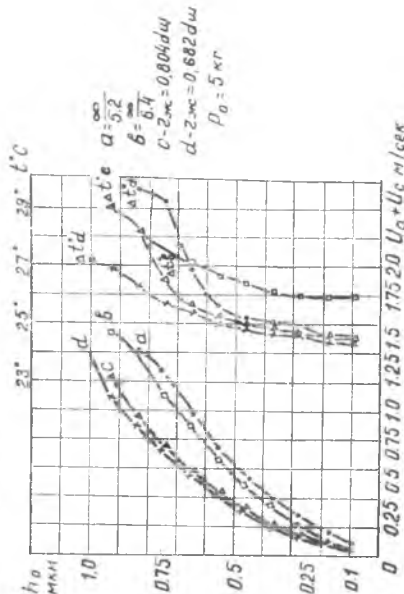
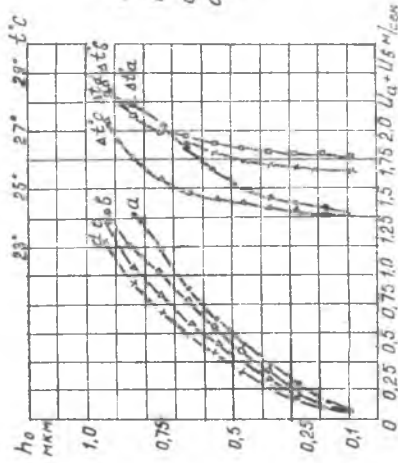
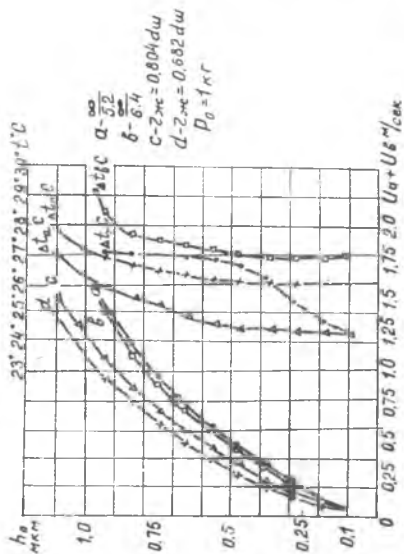
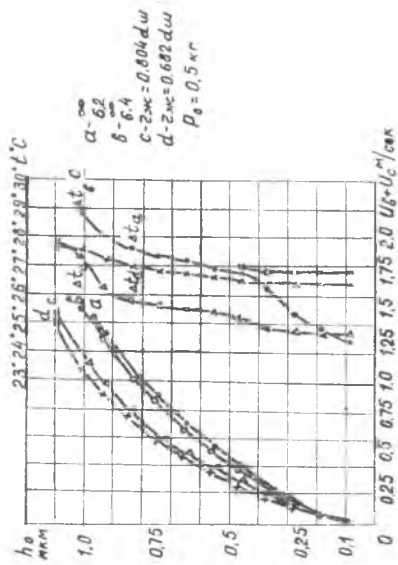
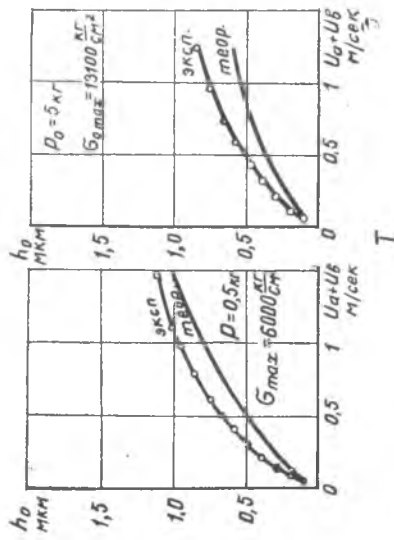
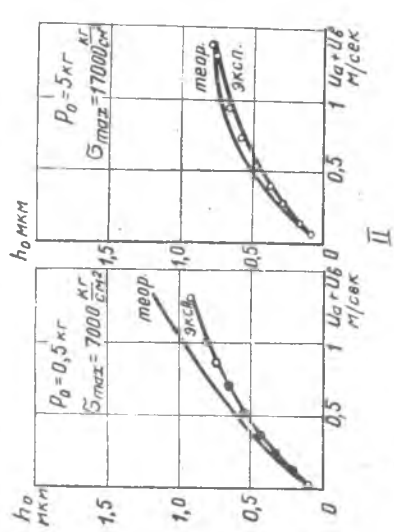
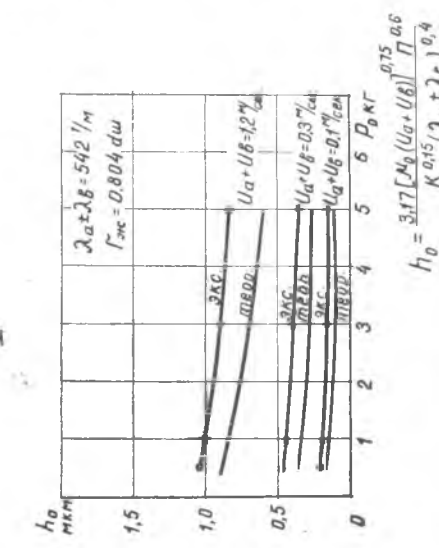
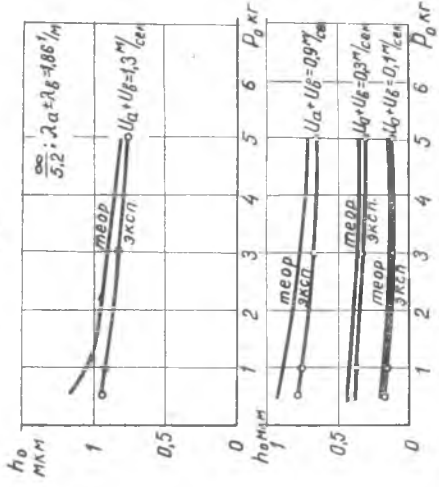


Рис. 6. Изменение толщины смазочного слоя в центре контакта от скорости качения при четырех нагрузках для четырех случаев, а также кривые изменения температуры во время эксперимента



II



$$h_0 = \frac{3,17}{K_0^{0,15}} [M_0 (U_a + U_b)]^{0,75} P_0^{0,6}$$

Рис. 7. Сравнение теории с экспериментом для максимальных толщин в зоне контакта
 1 — шарик $\phi = 5,2 \text{ мм}$ по желобу; 2 — шарик $\phi = 5,2 \text{ мм}$ по плоскости.

Оптический метод определения толщины масляного слоя в зоне контакта является одним из лучших для изучения формы зазора и для наблюдения боковых эффектов [3], [4]. Поэтому нами были проведены эксперименты при качении шарика как по плоскости, так и по желобу. В качестве смазки применялось масло МС-20. На рис. 4 дается кинограмма качения шарика диаметром 5,2 мм по плоскости (а, в, с, д, е) и по желобу (А, В, С, Д, Е). Расшифровка картин в направлении движения и в поперечном направлении показана на рис. 5. Опускание концов области трения в перпендикулярном направлении движения имеет наибольшую величину при качении шарика по плоскости и меньшую при качении по желобу. В нашем случае разница составляет 0,09—0,18 мкм.

Измерение температуры проводилось при помощи компенсационной термопары. Она была установлена в месте выхода масла на расстоянии 1,5 мм от зоны контакта. Показания термопары усиливались и записывались самописцем. Тарировка термопары с точностью 0,1°C производилась в термостате.

На рис. 6 приводятся кривые изменения толщины смазочного слоя в центре контакта от скорости качения при четырех нагрузках, а также кривые изменения температуры.

Для всех случаев качения шарика по желобу (и для качения по плоскости) при определении толщины и формы масляной пленки можно применять контактно-гидродинамическую теорию смазки. Сравнение теории с экспериментом показало хорошее совпадение максимальных толщин в зоне контакта (рис. 7). Расхождение результатов расчета и эксперимента не превышало 15%.

ВЫВОДЫ

Проведен эксперимент для определения толщины и формы смазочного слоя при качении шарика по плоскости и по желобу. Герцовские напряжения достигали 17 тысяч кг/см² при скоростях 1,5 м/сек.

1. Экспериментальные результаты показывают, что кроме наименьшей толщины смазочного слоя в направлении движения, возникает значительное опускание концов зоны контакта в перпендикулярном направлении движения; особенно это заметно для случая качения шарика по плоскости. Следовательно, можно перейти от пространственной задачи к плоской, при этом минимальная толщина на концах зоны контакта оказывается значительно меньше, чем по направлению движения. При сравнении деформации плоскости или желоба (тороидная поверхность) заметим, что опускание концов области трения в перпендикулярном направлении движения имеет наибольшую величину в случае качения шарика по плоскости и меньшую при качении по желобу. Это можно объяснить уменьшением градиента давления.

Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными показало возможность применения контактно-гидродинами-

ческой задачи к определению толщины и формы масляной пленки при качении шарика по желобу со скоростью до 1,5 м/сек.

3. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения контактно-гидродинамической теории смазки при напряжениях, достигающих 17000 кг/см^2 [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Petrousevitch A. I., Kodnir D. S., Salukvadze R. G., Bakashvili D. L. and Schwarzman V. Sh. The investigation of oil film thickness in lubricated ball-race rolling contact, *Wear*, 19 (1972) 369—389.

2. Бакашвили Д. Л., Салуквадзе Р. Г., Шварцман В. Ш. Интерферометрический метод определения толщины смазочного слоя в точечном контакте. Научная конференция ТГУ, 21—24 апреля 1971 г.

3. Foord C. A., Hammann W. C. and Cameron A. Evaluation of lubricants using optical elastohydrodynamics. *ASLE Transactions*, VII, p. 31—43. (1968).

4. Wedeven L. D. and Cameron A. A study of elastohydrodynamic lubrication in rollinс bearings using optical interference. *Proc Instn Mech Engrs* 1967—68. Vol 182 pt 3 G.

5. Коднир Д. С. Определение толщины смазочного слоя в контакте качения. Куйбышев, 1970.

Е. Ш. ШВАРЦМАН

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСЕЛ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ШАРИКА

Высокая точность оптического метода, основанного на интерференционной технике [1, 2], определила выбор его в нашей работе для прямых измерений толщины и формы смазочного слоя при скольжении шарика по плоскости.

Для экспериментов была создана аппаратура собственной конструкции на базе микроскопа МБИ-6.

Экспериментальные материалы, полученные на этой установке, позволили провести сравнение с теоретическим расчетом и показали хорошее качественное и количественное соответствие. Результаты этих исследований опубликованы в работе [3].

Для изучения реологических свойств смазочных масел при высоких герцевских напряжениях и больших скоростях скольжения была создана новая установка, приведенная на рис. 1а.

Принципиальная схема установки показана на рис. 1б. Нить источника света коллектором, линзой и отражательной пластинкой направляется в зрачок объектива. От объектива, освещенного отраженным светом лучи попадают в фокальную плоскость фотоокуляра, проектирующего изображение на фотопленку. Объектом исследования является зона контакта между стандартным шариком диаметром 9,5 мм с чистой обработки поверхности $\nabla 14$ и прижимаемой к нему грузом стеклянной пластинкой, укрепленной в каретке перемещающейся в V-образных направляющих. Шарик приводится во вращение гибким тросом от реверсивного электро-