

НКАП СССР
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ
им. П. И. Баранова

629.13

Т 78

ТРУДЫ ЦИАМ

№ 59

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МАСЛЯНОГО СЛОЯ В ПОДШИПНИКЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ

С. Н. КУЦАЕВ

Рэспубліканская
навукова-тэхнічная
бібліятэка

ОБОРОНГИЗ
1943

ДВД

В настоящей работе приводится решение задачи об определении толщины масляного слоя в подшипнике конечной длины при действии нагрузки, меняющейся по величине.

Книга предназначена для инженеров-конструкторов двигателей.

Редактор Г. К. Холомянов.

Г250499.

Подп. к печ. 21/VIII 1943 г.

Печ. л. 1 $\frac{1}{4}$.

Уч.-авт. л. 1,5.

Зн. в печ. л. 51200.

Заказ 625/7573.

Московская типография Облоргиза.

Авторские исправления

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
3, правая колонка	14 сверху	$\left[\frac{\sin \frac{m\pi}{l} z}{m} = 0, \right.$	$\left. \cdot \frac{de}{dt} \right] \frac{\sin \frac{m\pi}{l} z}{m} = 0,$
3, левая колонка	20 сверху [формула (2)]	$\frac{\cos \varphi}{(1 - \chi \cos \varphi)^3} = 0, \quad (2)$	$\frac{\cos \varphi}{(1 - \chi \cos \varphi)^3} \cdot \frac{de}{dt} = 0, \quad (2)$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МАСЛЯНОГО СЛОЯ В ПОДШИПНИКЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ

С. Н. Куцаев

ВВЕДЕНИЕ

С появлением прочных подшипниковых сплавов широкое распространение в моторостроении получили подшипники малой длины, длина которых составляет часть диаметра. Применение таких подшипников вызвано необходимостью уменьшать вес и габариты двигателя.

Вопросу о работе подшипников малой длины, к сожалению, уделено немного внимания. Следует отметить интересные работы А. Riebe¹ [1] и Э. Фальца [2]. В первой даны результаты испытания подшипников, изготовленных из карбонизированной бронзы, имеющих размеры роликовых. Эти подшипники испытывались при тяжелых режимах и показали высокую работоспособность. Во второй описаны результаты опытов, проведенных для определения наиболее выгодного соотношения между длиной и диаметром для бронзовых подшипников. Эти опыты показали, что наибольшей несущей способностью обладает подшипник, у которого длина составляет половину диаметра. В подшипниках авиационных двигателей из конструктивных соображений отношение длины к диаметру берут в пределах от 1 до 0,15.

Несмотря на широкое применение подшипников малой длины в моторостроении расчет их находится в неудовлетворительном состоянии. Действительно, основным фактором, определяющим работоспособность и надежность подшипника двигателя, является масляный слой, разделяющий поверхности скольжения. Однако еще до сих пор остается неизвестным влияние длины подшипника на толщину слоя, переменность нагрузки также учитывается неудовлетворительным образом.

Теория смазки бесконечно длинного подшипника может дать удовлетворительные результаты для расчета длинных подшипников, поскольку длина является второстепенным фактором, который приближенно можно учесть параболическим или иным поправочным множителем. Когда же длина подшипника становится малой, теория бесконечно длинного подшипника становится малоприменимой, она может служить лишь для качественных суждений.

Попытки последнего времени решить задачу о смазке подшипника конечной длины не дали практически удовлетворительных результатов.

Следует указать работы Рейснера (H. Reissner) [3], Муската и Морган (Muskat a. Morgan) [4].

¹ Цифры в [] показывают порядковый номер труда в библиографии, помещенной в конце книги.

Рейснер рассматривает задачу о подшипнике с постоянной нагрузкой при условии непрерывности масляного слоя во всем зазоре. Но это условие выполняется только для эксцентриситетов меньших 0,5, как показал А. Зоммерфельд [5]. Решение Рейснера и для этого интервала зазоров далеко от законченности.

Мускат и Морган для той же задачи вычислили толщину масляного слоя и момент трения для эксцентриситетов от 0 до 0,4 при различных значениях $\frac{l}{d}$. О результатах работы Муската и Морган следует сказать, что они относятся к менее важной области эксцентриситетов и что их нельзя экстраполировать на остальную часть.

В настоящей работе дается решение задачи об определении толщины масляного слоя в подшипнике конечной длины при действии нагрузки, меняющейся по величине без учета влияния вращения вала.

Полученные результаты с достаточной точностью можно применить к определению толщины масляного слоя в подшипнике двигателя. Действительно, в подшипнике двигателя масло из зазора выдавливается силами, действующими в течение коротких промежутков времени (0,01 ÷ 0,05 сек.), попеременно на различных участках окружности. Небольшими изменениями в распределении давлений, которые вносятся вращением вала, можно пренебречь подобно тому, как при рассмотрении явлений удара пренебрегают действием обычных сил по сравнению с ударными.

Толщина масляного слоя определяется с помощью безразмерного динамического отношения. Вычисления выполнены для следующих значений отношения $\frac{l}{d}$: $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$. Для бесконечно длинного подшипника задача была решена автором [6] в 1935 г.

Вычисления показывают, что максимальная толщина масляного слоя при изменении только зазора при заданных прочих условиях зависит от отношения длины к диаметру — при уменьшении отношения $\frac{l}{d}$ оптимальный зазор также уменьшается.

Следует отметить, что при малой длине подшипника достаточная несущая способность в подшипнике получается только при малых толщинах слоя.

МОСКОВСКАЯ

1946

ПРЕДПЕЧАТ

Методика вычисления наименьшей толщины масляного слоя на основании полученной таблицы с помощью диаграммы нагрузок показана на примере подшипника мотора.

I. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ И ПОГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ЗАДАЧИ

Уравнение для определения распределения давления в слое масла было дано Рейнольдсом [7]. Для общего случая оно имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \left[(U_0 + 3U_1) \frac{dh}{dx} + 2V \right],$$

где x — координата на поверхности скольжения в направлении относительной скорости,
 z — координата на поверхности скольжения в направлении, перпендикулярном к относительному движению,
 y — координата, перпендикулярная к поверхностям скольжения,

U_0 — скорость при $y = 0$,

U_1 — скорость при $y = h$,

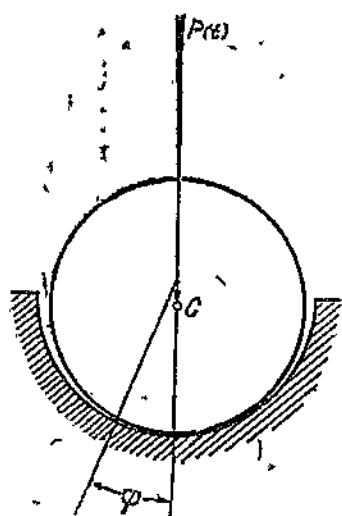
$$V = \frac{dh}{dt}.$$

В рассматриваемом нами случае невращающейся шейки

$$U_0 = 0; \quad U_1 = 0.$$

Для рассматриваемой задачи уравнение Рейнольдса примет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\eta \cdot \frac{dh}{dt}. \quad (1)$$



Фиг. 1. Положение шейки во вкладыше.

Толщина слоя

$$h = \delta - e \cos \varphi,$$

где δ равна $R - r$;

e — расстояние между центрами (фиг. 1);

$$\frac{dh}{dt} = -\cos \varphi \frac{de}{dt}.$$

Введя вместо x произведение радиуса r на угол φ , получим

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \\ & + 12\eta \cos \varphi \frac{de}{dt} = 0. \quad (1') \end{aligned}$$

Начало координат поместим у торца цапфы. Длину цапфы обозначим через l . Пограничные условия задачи: $p = 0$ для $z = 0, l$ и для $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$.

II. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ВЫВОД УРАВНЕНИЯ РЕЙНОЛЬДСА

Пусть между двумя параллельными пластинками a и b , которые могут сближаться, оставаясь параллельными, движется вязкая жидкость. Частицы жидкости движутся под действием разно-

стей давления и сил трения. Толщину слоя h будем считать малой в сравнении с другими размерами. Ввиду малости толщины слоя можно считать, что давление в жидкости изменяется только вдоль пластинок, т. е. в направлении осей x и z . Изменениями давления по толщине слоя будем пренебрегать, $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$.

Можно считать также (ввиду малости толщины слоя и параллельности пластинок), что изменения скоростей частиц вдоль осей x и z также малы по сравнению с изменениями их вдоль y .

Возьмем силы, действующие на элементарный параллелепипед (фиг. 2). На гранях, перпендикулярных к оси y , в направлении оси x действуют силы трения

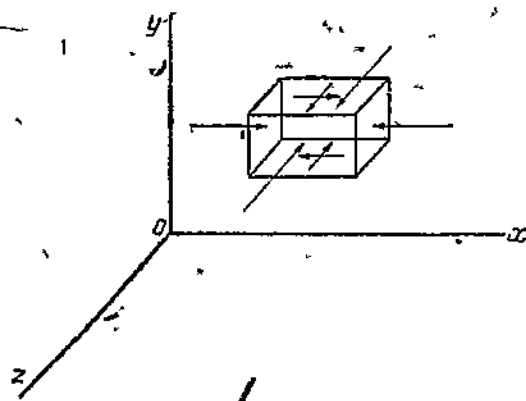
$$-\eta \frac{\partial v}{\partial y} dx dz, \quad + \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} dy \right) dx dz;$$

силами трения на других гранях можно пренебречь, так как изменения скоростей на них малы.

На гранях, перпендикулярных к оси x , действуют силы давления

$$p dy dz, \quad - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz.$$

На фиг. 2 указаны силы, относящиеся к осям x и z ; отбрасываемые силы меньшего порядка на фиг. 2 не указаны.



Фиг. 2. Силы, действующие на элементарный параллелепипед жидкости.

Пренебрегая силой инерции частицы, из условия равновесия сил получим:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial y^2};$$

после двукратного интегрирования

$$v = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + ay + b.$$

Пластины могут только сближаться, оставаясь параллельными; жидкость к пластинкам прилипает совершенно, поэтому $v = 0$ при $y = h$ и $y = 0$.

Окончательно получим

$$v = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} y(y - h).$$

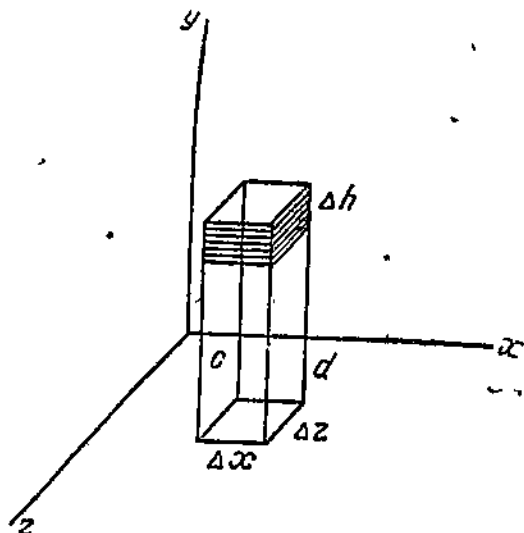
Максимум скорости получается при $y = \frac{h}{2}$

$$v_{\max} = -\frac{1}{8\eta} \frac{\partial p}{\partial x} h^2.$$

Средняя скорость в каком-либо сечении высотой h , шириной dz составляет $\frac{2}{3}$ максимальной

$$v_{\text{ср}} = -\frac{1}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 \quad (a).$$

Пусть верхняя пластинка опускается, оставаясь параллельной себе. В слое создаются переменные давления. Установим зависимость между скоростью опускания пластинки $\frac{dh}{dt}$, толщиной слоя h и давлением p в жидкости. Воспользуемся для этого условием сплошности. Количество жидкости, вытекающей из элементарного параллелепипеда с размерами Δx , Δz , h , при опускании верхней пластинки на Δh будет равно $\Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta h$ (фиг. 3).



Фиг. 3. Элементарный столбик жидкости.

Вычислим количество жидкости, протекающее сквозь боковые стенки элементарного параллелепипеда.

Количество жидкости, вытекшей сквозь стенку c , будет

$$Q_c = (v_{cy})_x \cdot h \cdot \Delta z \cdot \Delta t = -\frac{1}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} h^3 \right)_x \cdot \Delta z \cdot \Delta t.$$

Количество жидкости, вытекшей через площадку d , будет

$$Q_d = -\frac{1}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} h^3 \right)_{x+\Delta x} \cdot \Delta z \cdot \Delta t.$$

Разность

$$Q_d - Q_c = -\left[\frac{1}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} h^3 \right)_{x+\Delta x} - \frac{1}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} h^3 \right)_x \right] \Delta z \cdot \Delta t = \left[-\frac{1}{12\eta} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} h^3 \right) + \varepsilon_1 \right] \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t.$$

Аналогично получим для количества жидкости, вытекшей через стенки, перпендикулярные к оси z ,

$$\left[-\frac{1}{12\eta} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial p}{\partial z} h^3 \right) + \varepsilon_2 \right] \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t.$$

Сложим эти количества, приравняем их объему $-\Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t$ и перейдем к пределу.

Получим

$$\frac{1}{12\eta} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} h^3 \right) + \frac{1}{12\eta} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial p}{\partial z} h^3 \right) = \frac{dh}{dt}.$$

III. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РЕЙНОЛЬДСА

Решение уравнения (1) возьмем в виде суммы произведений некоторой функции от φ на $\sin \frac{m\pi}{l} z$

$$p = \sum_m \frac{F_m(\varphi) \cdot \sin \frac{m\pi}{l} z}{m}, \quad (a)$$

где целое число m может принимать только нечетные значения, так как слагаемые должны быть симметричны относительно $z = \frac{l}{2}$.

Перепишем уравнение (1), подставив множителем в последнее слагаемое сумму,

$$\frac{4}{\pi} \left(\sin \frac{\pi \cdot z}{l} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{l} z + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi}{l} z + \dots + \frac{1}{m} \sin \frac{m\pi}{l} z \dots \right),$$

которая равна 1 для всех z в интервале $(0, l)$ *,

$$\frac{1}{r^2} h^3 \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + \frac{3}{r^2} h^2 \frac{\partial h}{\partial \varphi} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + h^3 \frac{\partial^3 p}{\partial z^3} + 12\eta \cos \varphi \frac{dh}{dt} \frac{4}{\pi} \left(\sin \frac{\pi z}{l} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{l} z + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi}{l} z + \dots \right) = 0.$$

После подстановки (a) получим:

$$\sum_{m=1,3,5,\dots} \left[F_m''(\varphi) + \frac{3\chi \sin \varphi}{1-\chi \cos \varphi} F_m'(\varphi) - \frac{r^2 \pi^2}{l^2} m^2 F_m(\varphi) + \frac{48}{\pi} \frac{r^2 \eta}{\delta^3} \frac{\cos \varphi}{(1-\chi \cos \varphi)^3} \right] \frac{\sin \frac{m\pi}{l} z}{m} = 0,$$

где

$$\chi = \frac{e}{\delta}; \quad (\chi < 1).$$

Приравнявая нулю коэффициент при $\sin \frac{m\pi}{l} z$, получим следующую систему уравнений:

$$F_m''(\varphi) + \frac{3\chi \sin \varphi}{1-\chi \cos \varphi} F_m'(\varphi) - \frac{r^2 \pi^2}{l^2} m^2 F_m(\varphi) + \frac{48}{\pi} \frac{r^2 \eta}{\delta^3} \frac{\cos \varphi}{(1-\chi \cos \varphi)^3} = 0, \quad (2)$$

$$m = 1, 3, 5 \dots$$

В уравнении (2) заменим функцию F_m :

$$F_m = \frac{48 r^2 \eta}{\pi \delta^3} \frac{de}{dt} f_m; \quad (b)$$

обозначим

$$\frac{r^2 \pi^2}{l^2} m^2 = B_m.$$

После подстановки и сокращения получим

$$f_m'' + \frac{3\chi \sin \varphi}{1-\chi \cos \varphi} f_m' - B_m f_m + \frac{\cos \varphi}{(1-\chi \cos \varphi)^3} = 0, \quad (3)$$

$$m = 1, 3, 5 \dots$$

Заменим в (3) f_m с помощью равенства

$$f_m = \frac{1}{2\chi(1-\chi \cos \varphi)^2} - \frac{1}{2\chi} + v_m; \quad (c)$$

получим

$$v_m'' + \frac{3\chi \sin \varphi}{1-\chi \cos \varphi} v_m' - B_m v_m - \frac{\cos \varphi - \frac{\chi}{2} \cos^3 \varphi}{(1-\chi \cos \varphi)^2} = 0, \quad (4)$$

Решение уравнения (4) будем искать в виде ряда

$$v_m = U_{0,m} + \chi U_{1,m} + \chi^2 U_{2,m} + \chi^3 U_{3,m} + \dots \quad (d)$$

* См. Хютте, Ряды Фурье, стр. 209, частный случай e .

Помножим уравнение (4) на $(1 - \chi \cos \varphi)$, получим

$$(v_m'' - B_m v_m')(1 - \chi \cos \varphi) + 3\chi \sin \varphi \cdot v_m' - B_m \frac{\cos \varphi - \frac{\chi}{2} \cos^2 \varphi}{1 - \chi \cos \varphi} = 0. \quad (4')$$

Подставим (d) в уравнение (4'), соберем коэффициенты при одинаковых степенях χ . Приравняем коэффициенты при различных степенях χ нулю. Получим следующую рекуррентную систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_{0,m}'' - B_m \cdot U_{0,m} - B_m \cos \varphi &= 0, \\ U_{1,m}'' - B_m \cdot U_{1,m} - \cos \varphi (U_{0,m}'' - B_m U_{0,m}) + \\ + 3 \sin \varphi \cdot U_{0,m}' - \frac{1}{2} B_m \cos^2 \varphi &= 0, \\ U_{2,m}'' - B_m \cdot U_{2,m} - \cos \varphi (U_{1,m}'' - B_m U_{1,m}) + \\ + 3 \sin \varphi \cdot U_{1,m}' - \frac{1}{2} B_m \cos^3 \varphi &= 0. \end{aligned}$$

Решения этих уравнений, обращающиеся в нуль при $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, получаются элементарным способом в виде сумм тригонометрических и гиперболических функций и их сочетаний.

Полученную функцию p умножим на $\cos \varphi r d\varphi dz$ и проинтегрируем по φ в пределах от $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$ и по z в пределах от 0 до l . Результат приравняем приложенной силе $P(t)$,

$$r \int_0^l \left(\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \cos \varphi d\varphi \right) dz = P(t),$$

где

$$p = \sum_{m=1,3,5} \frac{48r^2\eta}{\pi\delta^3} \frac{de}{dt} \left[\frac{1}{2\chi(1-\chi \cos \varphi)^2} - \frac{1}{2\chi} + U_{0,m} + \chi U_{1,m} + \chi^2 U_{2,m} + \dots \right] \frac{\sin \frac{m\pi}{l} z}{m}.$$

С помощью равенств

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\cos \varphi}{2\chi(1-\chi \cos \varphi)^2} - \frac{\cos \varphi}{2\chi} \right) d\varphi &= \\ = \frac{2}{(1-\chi^2)^{3/2}} \arctg \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} + \frac{\chi}{1-\chi^2} &^{*)}, \end{aligned}$$

*) Из равенства

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{1-\chi \cos \varphi} = \frac{4}{\sqrt{1-\chi^2}} \arctg \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}}$$

(см. Хютте, стр. 100, формула 34) следует

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\chi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{1-\chi \cos \varphi} &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \varphi}{(1-\chi \cos \varphi)^2} = \\ = \frac{4\chi}{(1-\chi^2)^{3/2}} \arctg \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} + \frac{2}{1-\chi^2} &^{**}). \end{aligned}$$

$$1 + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \dots = \frac{\pi^2}{8} \quad ^{**})$$

получим

$$\begin{aligned} \frac{2l}{\pi} \frac{48r^2\eta}{\pi\delta^3} \frac{de}{dt} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{m^2} \left[\frac{2}{(1-\chi^2)^{3/2}} \arctg \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} + \right. \\ \left. + \frac{\chi}{1-\chi^2} + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{0,m} \cos \varphi d\varphi + \chi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{1,m} \cos \varphi d\varphi + \right. \\ \left. + \chi^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{2,m} \cos \varphi d\varphi + \dots \right] = P(t). \quad (e) \end{aligned}$$

Заменим $\frac{de}{dt}$ через $d\chi$ и умножим обе части равенства (e) на dt , проинтегрируем по t от 0 до t и по χ от 0 до χ .

Получим

$$\begin{aligned} \frac{\delta^2}{\eta r^3 l} \int_0^t P(t) dt &= \frac{24\chi}{\sqrt{1-\chi^2}} \arctg \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} + \\ + \frac{96}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{m^2} \left(\chi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{0,m} \cos \varphi d\varphi + \right. \\ \left. + \frac{\chi^2}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{1,m} \cos \varphi d\varphi + \frac{\chi^3}{3} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{2,m} \cos \varphi d\varphi + \dots \right). \end{aligned}$$

Вычисление выполнено нами для пяти значений отношения $\frac{l}{d}$:

$$\frac{1}{6}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}.$$

В табл. 1 даны значения безразмерного отношения $\frac{\delta^2}{\eta r^3 l} \int_0^t P(t) dt$ или, лучше, $\frac{2\delta^2}{\eta r^2} \int_0^t k(t) dt$ для различных значений эксцентриситета от 0,1 до 0,94, где $k(t)$ — удельная нагрузка.

Таблица 1

$\frac{l}{d}$	0,167	0,25	0,50	1,0	1,5	∞
χ						
0,1	—	0,04	0,2	0,5	0,8	2,0
0,2	—	0,1	0,4	1,1	1,8	4,3
0,3	—	0,2	0,65	2,0	3,2	7,1
0,4	0,10	0,3	1,1	3,1	4,8	10,4
0,5	0,20	0,45	1,7	4,7	7,1	14,5
0,6	0,35	0,7	2,6	6,9	10,3	19,9
0,7	0,7	1,3	4,3	10,8	15,3	27,6
0,8	1,5	2,8	7,7	17,7	23,9	40,0
0,9	3,9	7,3	18,5	35,6	44,5	66,6
0,92	5,5	9,7	23,7	43,3	53,1	77,1
0,94	7,9	13,0	30,5	54,1	65,3	92,1
0,95	—	—	—	—	—	103,1

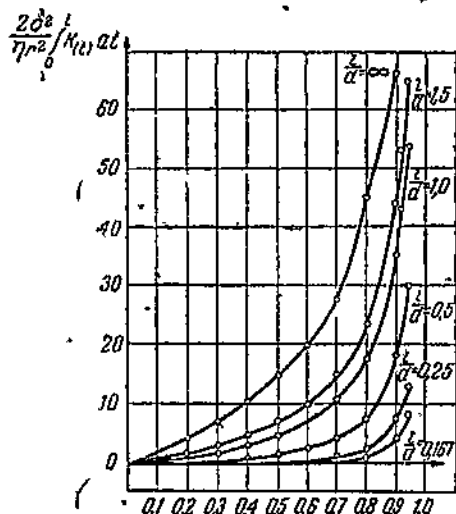
**) Из равенства

$$x = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \left(\frac{\cos x}{1} + \frac{\cos 3x}{3^2} + \frac{\cos 5x}{5^2} + \dots \right)$$

для $0 \leq x \leq \pi$ при $x=0$ (см. Хютте, Ряды Фурье, стр. 210)

В графическом виде результат представлен на фиг. 4.

Примерные вычисления с помощью табл. 1 показывают, что при изменении зазора при постоянных прочих условиях максимальная толщина слоя



Фиг. 4. Зависимость эксцентриситета от безразмерного

$$\text{отношения: } \frac{2\delta^2}{\eta r^2} \int_0^l k(l) dt$$

δ — разность радиусов,
 η — вязкость масла,
 r — радиус вала,
 $k(l)$ — удельная нагрузка.

получается при некотором зазоре, зависящем от отношения $\frac{l}{d}$.

Максимальные толщины масляного слоя получаются при зазорах, дающих следующие значения для эксцентриситетов:

для отношения $\frac{l}{d} = 0,167 - 0,25$ при χ от 0,7 до 0,8
 „ „ $\frac{l}{d} = 0,50$ „ χ „ 0,6 „ 0,7
 „ „ $\frac{l}{d} = 1,0$ „ χ „ 0,5 „ 0,6
 „ „ $\frac{l}{d}$ от 1,5 до ∞ „ χ „ 0,4 „ 0,5

Данные по табл. 1 показывают, что достаточная несущая способность у коротких подшипников получается при малых толщинах слоя, т. е. при больших эксцентриситетах.

Для выяснения вопроса о пригодности поправочных множителей Нидса (Needs) [8], Кингсбери (Kingsbury) [9], Гюмбеля [10] на ограниченность длины подшипника составим табл. 2 отношения характеристических чисел для бесконечного подшипника к характеристическим числам для конечных подшипников для различных значений отношения длины к диаметру.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что поправочные множители зависят от $\frac{l}{d}$ и от эксцентриситета χ . С уменьшением $\frac{l}{d}$ и χ отношения характеристических чисел сильно возрастают.

Таблица 2

$\chi \backslash \frac{l}{d}$	0,167	0,25	0,50	1,0	1,5
0,5	72,5	32,2	8,5	3,1	2,0
0,6	56,9	28,4	7,3	2,9	1,9
0,7	39,4	21,2	6,4	2,6	1,8
0,8	26,7	14,3	5,2	2,3	1,7
0,9	17,1	9,1	3,6	1,9	1,5
0,92	14,0	8,0	3,2	1,8	1,45
0,94	11,7	7,1	3,0	1,7	1,4

Нидс дает поправочные множители в зависимости от $\frac{l}{d}$ и от χ ; поправочные множители Кингсбери и Гюмбеля зависят только от величин отношения $\frac{l}{d}$.

Нидс рассматривал подшипник с углом охвата в 120° ; его поправочные множители приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\chi \backslash \frac{l}{d}$	0,3	0,5	1,0	1,5
0,5	10,8	4,6	2,1	1,35
0,6	9,26	4,3	2,0	1,3
0,7	7,0	3,8	1,9	1,3

Приведенные в табл. 3 данные показывают, что множители Нидса меньше полученных нами: для отношения $\frac{l}{d} = 1 \div 1,5$ приблизительно в 1,5 раза, для отношения $\frac{l}{d} = 0,5$ — приблизительно в 2 раза, для отношения $\frac{l}{d} = 0,3$ приблизительно в 2,5 раза.

Поправочные множители Кингсбери (m_K) и Гюмбеля m_G даны в табл. 4.

Таблица 4

Отношение $\frac{l}{d}$	0,167	0,25	0,5	1,0	1,5
m_K	-	-	11,6	3,8	2,2
m_G	7	5	3	2	1,67

Множители Кингсбери могут дать хорошее соответствие только для малых эксцентриситетов. Для более важных практически эксцентриситетов от 0,8 до 0,94 их значения больше наших приблизительно в 2 раза.

Множители Гюмбеля могут иметь некоторую применимость только для длинных подшипников.

При действии знакопеременной силы центр цапфы перемещается в подшипнике от одного крайнего положения к другому.

Для движения центра цапфы от какого-либо положения до центра подшипника получим равенство

$$\frac{\delta^2}{\eta r^3 l} \int_0^t P(t) dt = \frac{24\chi}{\sqrt{1-\chi^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} -$$

$$-\frac{96}{\pi^2} \left(\chi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{0,m} \cos \varphi d\varphi + \frac{\chi^2}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{1,m} \cos \varphi d\varphi + \dots + \right.$$

$$\left. + \frac{\chi^n}{n} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_{n-1,m} \cos \varphi d\varphi + \dots \right),$$

где χ следует давать значения от -1 до 0 . Например, для перемещения от $\chi = -0,9$ до $\chi = 0$ получаем для отношения $\frac{l}{d} = 1$

$$\frac{\delta^2}{\eta r^3 l} \int_0^t P(t) dt = 1,9.$$

Сложив это значение с ранее полученным значением безразмерного отношения для перемещения от 0 до $0,9$, получим значение безразмерного отношения для перемещения от $\chi = -0,9$ до $\chi = +0,9$

$$\frac{\delta^2}{\eta r^3 l} \int_0^t P(t) dt = 35,6 + 1,9 = 37,5.$$

В табл. 5 дается результат вычислений для трех значений отношения $\frac{l}{d}$:

$$\frac{l}{d} = 0,25; 1,0; \infty.$$

Таблица 5

от $-\chi$ до $+\chi$	0,25	1,0	∞
$-0,1$ до $0,1$	0,3	0,9	3,8
$-0,2$ " $0,2$	0,6	1,8	7,6
$-0,3$ " $0,3$	1,0	3,0	11,8
$-0,4$ " $0,4$	1,5	4,5	16,4
$-0,5$ " $0,5$	2,0	6,0	21,7
$-0,6$ " $0,6$	3,1	8,5	28,2
$-0,7$ " $0,7$	4,7	12,3	36,9
$-0,8$ " $0,8$	8,3	19,5	50,3
$-0,9$ " $0,9$	19,1	37,5	77,7
$-0,92$ " $0,92$	24,4	45,3	88,4
$-0,94$ " $0,94$	31,3	56,2	103,6
$-0,95$ " $0,95$	—	—	114,7

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА.

Полученное нами решение уравнения Рейнольдса для конечного подшипника при переменной нагрузке необходимо проверить экспериментально для выяснения того, в какой мере оно соответствует действительности.

Экспериментальное определение толщины масляного слоя выполнено несколькими авторами:

известны работы Гейна (P. Hein) [11], Б. Я. Гинцбурга [12] — при переменной нагрузке, Нюккера [13], Стона (Stone) [14], Румпфа (A. Rumpf) [15] — при постоянной нагрузке. Опыты Гейна¹ проведены довольно тщательно. Особое внимание он уделял вопросу о наполнении зазора маслом. Эти опыты дают возможность произвести количественную проверку теории.

В опытах Б. Я. Гинцбурга определялась толщина масляного слоя при знакопеременной нагрузке при невращающемся вале. Постановку этих опытов нельзя признать удовлетворительной, так как убыль масла из зазора при работе, повидимому, не могла восполняться в промежутках между переменами направления силы при отсутствии вращения вала и отсутствии давления подачи масла. Этим объясняется то странное обстоятельство, что Б. Я. Гинцбург не обнаружил зависимости поправочного множителя от эксцентриситета. Вычисления и рекомендации Б. Я. Гинцбурга ошибочны.

Из опытов по определению толщины масляного слоя при постоянной нагрузке достаточно рассмотреть тщательно выполненные опыты Нюккера. Эти опыты дают возможность установить аналогичный характер зависимости поправочного множителя на конечность длины от эксцентриситета с достаточно близким количественным соответствием.

1. Опыты Гейна

Основная часть установки Гейна представляет собой кривошипно-шатунный механизм с малым кривошипом. Нагрузки создаются стальной полосой, в которую упирается шатун. При вращении вала центр экспериментальной цапфы описывает окружность, а конец шатуна, упирающийся в стальную полосу, совершает колебательные движения по закону синуса. Нагрузка $P(t)$ изменяется также по закону синуса

$$P(t) = A \sin \frac{\pi n}{30} t,$$

где A — амплитуда в кг, n — об/мин.

При установившемся движении поверхности цапфы и вкладыша периодически сближаются. Для определения моментов предельного сближения используется постоянный ток небольшого напряжения в 2 В. Цапфа и вкладыш представляют собой элементы цепи; при сближении или соприкосновении поверхностей цепь замыкается. Моменты замыкания регистрируются с помощью осциллографа.

В опытах Гейна менялись следующие факторы: 1) амплитуда нагрузки, 2) количество протекающего масла, 3) вязкость масла (сорт масла и температура подаваемого масла).

Предельное число оборотов для данной нагрузки и данного сорта масла Гейн получал постепенным снижением числа оборотов до того момента, когда осциллограф регистрировал замыкания цепи при неизменном количестве протекающего масла.

Мы рассмотрим опыты с достаточной подачей масла, которую можно считать равной $25 \text{ см}^3/\text{час}$ (увеличение подачи масла сверх этого количества не вносит изменений в процесс) (фиг. 5).

¹ Гейн, Экспериментальное исследование предельных условий жидкостного трения в подшипнике, нагруженном знакопеременной силой.

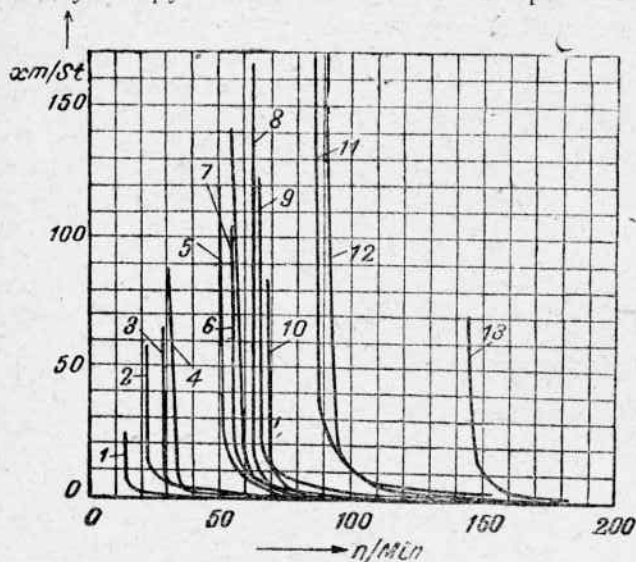
Температура подшипника измерялась в трех местах. В табл. 6 приведены средние значения температуры и соответствующие им значения вязкости масла. Диаметр подшипника 40 мм, рабочая длина подшипника 46 мм, подшипник разделен двумя круговыми канавками на три части,

таты опытов Гейна и результаты наших вычислений представлены в табл. 6.

Таблица 6

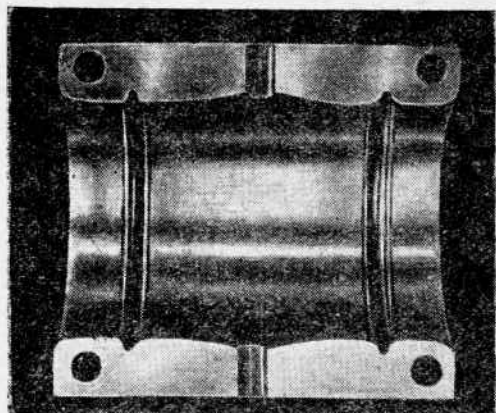
Результаты опытов Гейна

О п ы т ы е д а н н ы е					Результаты вычислений	
Амплитуда синусоидальной нагрузки, кг	Сорт масла	Количество протекающего масла, см ³ /час	Вязкость масла кг сек/м ²	Предельное число оборотов в мин.	$\frac{2\delta^2}{\eta r^2} \int_0^t k(t) dt$	безразмерное вычисленная наименьшая толщина масляного слоя, μ
388,8	Shell B-21	142	0,0221	45	70,5	2,3
388,8	Diesel Maschin	68	0,056	23	54,4	3,5
388,8	Ricinus	44	0,0965	162	44,9	4,4
780	Gargoyle Arctic	60	0,01235	145	78,6	2,0
780	Gargoyle Mobil A	120	0,0344	65	63,0	2,8
780	Gargoyle Mobil BB ₁	102	0,046	55	55,7	3,4
780	Diesel Maschin Ol	100	0,0527	52	51,3	3,8
780	Sommerachsen Ol	167	0,0388	63	57,7	3,2
780	Winterachsen Ol	81	0,0314	68	65,9	2,6
780	Aspa № 3	77	0,142	30,75	32,4	7,2
780	Aspa Spezial № 2	142	0,076	54,5	34,0	6,8
780	Castrol R	55	0,1185	22	54,0	3,5
780	Shell B-21	217	0,0216	90	72,4	2,1
	Ricinus	51,6	0,103	28,5	48,0	4,1
780	Shell VD	258	0,02085	94	71,8	2,1
780	Shell VD	251	0,02366	83	71,8	2,1
1488	Aspa BB	52	0,185	32,4	44,8	4,4
1488	Ricinus	63	0,0615	95	46,0	4,3
1488	Mobil BB-2	200	0,034	142	55,7	3,4
Подача под давлением 6,8 ат						
780	Shell Diesel	28650	0,0109	177	73,2	2,1



Фиг. 5. Зависимость предельных чисел оборотов от количества протекающего масла (опыты Гейна).

длина средней части 34 мм, крайних частей по 6 мм (фиг. 6). Основной несущей частью этого подшипника является средняя часть длиной 34 мм, боковые участки воспринимают небольшую часть нагрузки (около 0,2). Эту часть легко определить из того условия, что толщина масляного слоя для всех трех участков одинакова; для простоты вычислений при сравнении мы возьмем приблизительно эквивалентную длину 40 мм.



Фиг. 6. Экспериментальный подшипник Гейна (отрезанная половина).

В ненагружаемой части подшипника для распределения масла сделаны еще две канавки, параллельные оси. Диаметральный зазор равен 0,1 мм. Высоту неровностей на двух поверхностях Гейн принимает равной 0,01 мм; неровности поверхностей (впадины) увеличивают расчетный зазор; примем его равным среднему значению (0,1 + 0,01 мм). Опыты проводились при трех значениях амплитуды нагрузки: 388,8 кг, 780 кг, 1488 кг. Масла брались различных сортов с различными вязкостями: от 0,0109 до 0,185 кг сек/м². Резуль-

Предельные толщины слоя заключаются в интервале 2,0—7,2 μ . Строго говоря, все вычисленные значения должны быть одинаковыми. Если бы поверхности скольжения были правильными, гладкими, при движении оси цапфы и подшипника оставались бы параллельными и все масла были бы с одинаковыми диэлектрическими свойствами, то при постоянном напряжении в цепи (2 V) ток проходил бы при некоторой постоянной очень малой предельной толщине в 0,1—0,2 μ . В действительности же соприкосновение поверхностей наступает раньше из-за геометрической неточности и негладкости поверхностей скольжения, непараллельности осей цапфы и подшипника и различий в диэлектрических свойствах масел. Поэтому экспериментальные толщины слоя для предельных положений должны быть отличны от нуля на величину, большую 0,2 μ .

Для масел с одинаковыми диэлектрическими свойствами значения толщины слоя должны быть отличными от нуля на некоторую постоянную величину. Такой величиной можно считать минимальное значение толщины слоя или среднее значение (если отклонения от среднего значения можно объяснить ошибками опыта). Гейн дает следующие значения ошибок для отдельных факторов: вязкость определялась с точностью $\pm 8\%$, нагрузка $\pm 4\%$, обороты $\pm 8\%$; ошибки в определении зазора и изменение зазора в процессе Гейн не указывает.

Перечисленными ошибками, однако, нельзя объяснить всех отклонений вычисленной предельной толщины от среднего значения. Эти отклонения можно объяснить различием в диэлектрических свойствах масел. Электрическая прочность масел особенно в тонких слоях зависит от вязкости масла, от содержания влаги, от количеств растворенных электролитов и от загрязнений. Некоторые причины очень резко снижают электрическую прочность масел, например, 0,02 + 0,03% влаги снижают электрическую прочность в 5—6 раз [16]. Тарировки или специальной подготовки масел различных сортов Гейн не производил.

Если расположить результаты вычисления в порядке возрастания вязкости, то станет очевидным, что большей вязкости соответствует большая вычисленная предельная толщина слоя (табл. 7).

Таблица 7

Параметры	Значение в пределах от — до				
Вязкость η в сек/м ²	0—0,0250	0,0250—0,0500	0,0500—0,0750	0,0750—0,1000	0,100—0,185
Предельная толщина слоя, μ	2,0—2,3	2,8—3,4	3,5—4,3	4,4—6,8	3,5—7,2

Вся группа опытов, кроме опытов с маслами Асра, дает предельные толщины от 2,0 до 4,4 μ . Отклонения от среднего значения для этой подгруппы в большой мере можно объяснить ошибками опытов.

Для правильности сравнения имеет значение величина изменения зазора в процессе работы. Участки поверхности скольжения подшипника, где происходило соприкосновение, по всей вероятности были сглажены. Это следует принять во внимание при согласовании значений предельной толщины слоя и величины зазора, увеличенного на половину суммы высот неровностей.

Следует указать на упрощение теоретической схемы по сравнению с действительным движением: в теоретических вычислениях мы пренебрегли вращением цапфы, благодаря которому давления в жидкости несколько изменяются. Однако заметного изменения здесь не получается. Происходит это, повидимому, потому, что рассматриваемое явление — выдавливание масла под действием кратковременной силы — по характеру своему приближается к ударным явлениям; действие же ударных сил значительно превосходит действие обычных сил (которым пренебрегают).

Вращение вала важно как фактор, непрерывно возобновляющий масляный слой в зазоре. При увеличении числа оборотов длительность действия силы уменьшится, характер явления еще больше приблизится к ударному и потому надо ожидать еще лучшего соответствия между вычисленной и опытной толщиной слоя.

Вопросу о наполнении зазора маслом Гейн уделяет большое внимание: были построены графики зависимости предельных чисел оборотов от количества протекающего масла и поставлен опыт с обильной подачей масла. Оказалось, что предельные числа оборотов при очень обильной подаче масла (28650 $\text{см}^3/\text{час}$) не отличаются от предельных чисел оборотов при капельной подаче масла (258 $\text{см}^3/\text{час}$).

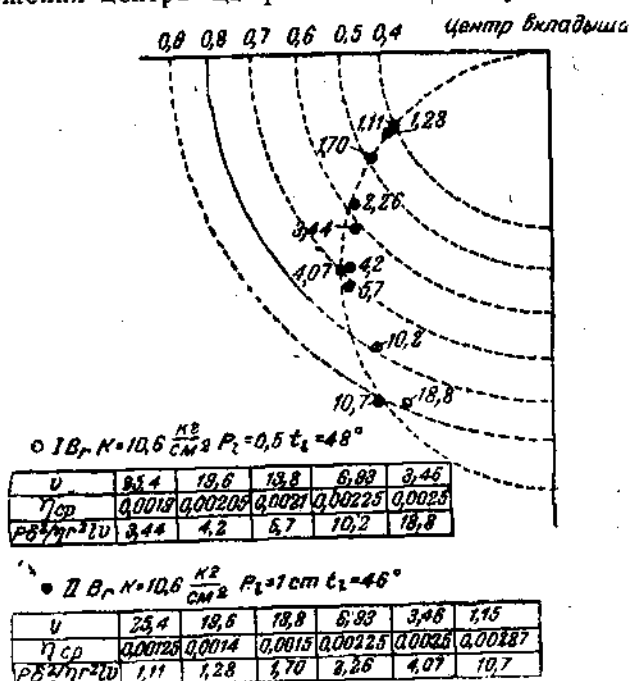
2. Опыты Нюккера

Нюккер определял толщину масляного слоя в подшипнике для различных режимов работы при постоянной нагрузке методом измерения малых емкостей. Характеристикой этого движения является безразмерное число Зоммерфельда

$$\frac{P \cdot \delta^3}{\eta^2 l \omega}$$

где P — нагрузка;
 δ — разность радиусов;
 η — вязкость масла;
 r — радиус шейки;
 l — длина рабочей части;
 ω — угловая скорость вала.

На фиг. 7 представлены экспериментальные положения центра цапфы и соответствующие им



Фиг. 7. Положения центра вала во вкладыше при постоянной нагрузке (опыты Нюккера).

значения числа Зоммерфельда. Возьмем средние значения чисел Зоммерфельда для близких положений:

- 1) $\frac{1,1 + 1,28}{2}$ для эксцентриситета $\chi = 0,42$;
- 2) 1,7 для $\chi = 0,49$;
- 3) $\frac{2,26 + 3,46}{2}$ для $\chi = 0,60$;
- 4) $\frac{4,2 + 4,07 + 5,7}{3}$ для $\chi = 0,70$;
- 5) $\frac{10,7 + 18,8}{2}$ для $\chi = 0,89$.

Сведем данные Зоммерфельда в табл. 8.

Таблица 8

χ	0,42	0,49	0,60	0,70	0,80	0,89
$\frac{P \delta^3}{\eta^2 l \omega}$	1,195	1,70	2,86	4,55	10,2	14,75

Соответствующие значения характеристических чисел по Гюмбелю и их отношения к экспериментальным данным даны в табл. 9.

Таблица 9

χ	0,42	0,49	0,60	0,70	0,81	0,89
$\frac{P\delta^2}{\eta^2/\omega}$	3,38	4,01	5,3	7,2	11,5	19,5
Отношение	2,83	2,41	1,85	1,55	1,1	1,3

Значения чисел Зоммерфельда при уточненных пограничных условиях [17] дают несколько лучшее соответствие, что видно из рассмотрения данных табл. 10.

Таблица 10

χ	0,42	0,49	0,60	0,70	0,81	0,89
$\frac{P\delta^2}{\eta^2/\omega}$	3,6	4,0	6,13	8,5	13,3	23,0
Отношение	3,02	2,41	2,14	1,83	1,30	1,56

На основании данных табл. 1 получаем для отношений характеристик следующие значения (для $\frac{l}{d} = \infty$ и $\frac{l}{d} = 1,36$):

χ	0,4	0,6	0,8	0,9
Отношение	2,53	2,20	1,82	1,59

Это подтверждает вывод, что поправочные множители зависят от эксцентриситета. Поправочные множители, получаемые на основании табл. 1, приводят к удовлетворительному соответствию между расчетом и опытом и в случае постоянной нагрузки с достаточной точностью.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение наших результатов с опытными результатами Гейна и Нюккера показывает достаточно удовлетворительное соответствие. Подтверждается и принятое в работе положение, что при кратковременном действии силы изменением в распределении давлений в слое, которое вносит вращение вала, можно пренебречь.

При действии знакопеременной силы расчет можно вести по табл. 1 (т. е. для движения от центра) с достаточной для практики точностью.

Приложение

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ МАСЛЯНОГО СЛОЯ В ПОДШИПНИКЕ ДВИГАТЕЛЯ

На фиг. 8 и 9 представлены диаграммы сил, действующих на корневые подшипники рядного двенадцатицилиндрового двигателя.

Для производства расчета распределим приложенные силы на группы, действующие на отдельные участки масляного слоя. Это распределение сделаем таким образом, чтобы силы одной группы сменялись силами другой группы, действующей на новый свежий участок слоя. Например, в подшип-



Фиг. 8. Векторная диаграмма сил, действующих на первый подшипник рядного двенадцатицилиндрового двигателя, и диаграмма результирующих импульсов.

Фиг. 9. Векторная диаграмма сил, действующих на средний подшипник того же двигателя, и диаграмма результирующих импульсов.

нике (фиг. 8) силы I группы от $\alpha = 0$ до 180° сменяются силами II группы от $\alpha = 200-300^\circ$, затем III, IV, V, I и т. д. Силы каждой группы действуют в течение малых промежутков времени. Например, при $n = 2850$ об/мин. длительность действия группы из 10 сил составляет

$$\frac{60 \cdot 10}{2850 \cdot 18} = 0,012 \text{ сек.}$$

Действие отдельных групп сил поэтому носит ударный характер. Распределение сил на группы дается в табл. 11.

Таблица 11

Подшипник	№ групп сил	от α_1° до α_2°	Количество сил	Результирующий импульс кг/сек
См. фиг. 8	I	0—180	10	24,3
	II	200—300	6	12,9
	III	320—400	5	11,7
	IV	420—600	10	29,1
	V	620—700	5	8,2
См. фиг. 9	I	180—340	10	48,1
	II	0—20		
		40—100	5	13,5
	III	120—160	3	5,6
	IV	540—700		
		360—380	10	48,1
	V	400—460	5	13,5
	VI	480—520	3	5,6

Распределение сил на группы сделано так, что два последовательных результирующих импульса составляют угол больше 90° . Действие сил на каждом участке поэтому можно рассматривать независимо друг от друга.

Диаграммы результирующих импульсов делают очевидной разницу между нагрузкой I-го подшипника двигателя (см. фиг. 8) и среднего, наиболее нагруженного (см. фиг. 9). Максимальный импульс в среднем подшипнике равен 48,1 кг/сек. Этот импульс действует дважды в течение цикла на один и тот же участок подшипника.

I-й подшипник нагружен меньше среднего; импульсы в нем действуют на различные участки по одному разу в течение цикла; максимальная величина импульса в нем составляет 29,1 кг/сек, т. е. в 1,6 раза меньше, чем в среднем.

Группы сил с максимальным импульсом соответствует минимальная толщина масляного слоя.

Вычисления произведем для масла МС, вязкость которого в зависимости от температуры указана в табл. 12.

Таблица 12

$t^\circ\text{C}$	70	75	80	90	100	110	120	130
$\eta \frac{\text{кг.сек}}{\text{м}^2}$	0,0058	0,0044	0,0038	0,0026	0,0018	0,0014	0,0010	0,00082

Данные для расчета:

Число оборотов $n = 2850$ об/мин.; диаметр шейки $d = 85$ мм; диаметральный зазор $2\delta = 0,10$ мм; длина рабочей части подшипников: первого—33,5 мм, среднего—35,4 мм.

Таблицу 13 для вычисления эксцентриситета χ при отношении $\frac{l}{d} = \frac{33,5}{85} = 0,40$ получим интерполированием из табл. 1.

Таблица 13

χ	0,6	0,7	0,8	0,9	0,92	0,94
$\frac{\delta^2}{\eta \cdot l} \int_0^t P dt$	1,9	3,1	5,7	14,1	18,1	23,7

Первый подшипник (фиг. 8)

$$\frac{\delta^2}{\eta_{100} \cdot r^3 l} \int_0^t P dt = \frac{0,0025 \cdot 10^9}{10^6 \cdot 0,0018 \cdot 76765 \cdot 0,0335} \cdot 29,1 = 15,5.$$

Эксцентриситет будет равен 0,9; наименьшая толщина слоя будет $h_{\min}$ (1—0,9) $0,05 = 5 \mu$.

Подобным образом вычислена наименьшая толщина слоя (табл. 14) и для других значений температуры.

Таблица 14

t°	80°	100°	120°
$h_{\min} \mu$	9	9	2,5

Средний подшипник (фиг. 9 и табл. 15).

Таблица 15

t°	80°	100°	120°
$h_{\min} \mu$	6,3	2,8	2,0

В среднем подшипнике толщина слоя меньше, чем в первом, для одних и тех же температур.

Минимальная толщина слоя мала по сравнению с неточностями формы и неровностями поверхностей. Такие величины слоя, равномерные по всей длине, могут быть только у хорошо обработанных и хорошо приработанных подшипников. При температуре подшипников в 120° минимальная толщина слоя в 2,5—3 раза меньше, чем при температуре 80° .

При уменьшении зазора до оптимального толщина слоя будет увеличиваться, например, в первом подшипнике при зазоре $D - d = 0,07$ мм, для тех же температур толщина слоя будет, как указано в табл. 16.

Таблица 16

t°	80°	100°	120°
$h_{\min} \mu$	9,5	5,8	3,6

Данные табл. 16 показывают, что с точки зрения толщины масляного слоя зазор 0,07 мм более благоприятен, чем зазор 0,10 мм.

Если в подшипнике сделать круговую канавку по середине, то это сильно уменьшит минимальную толщину слоя. При ширине канавки в 4 мм отношение $\frac{l}{d} = 0,17$. Значение характеристики для первого подшипника для $D - d = 0,10$ мм будет

$$\frac{\delta^2}{\eta_{100} \cdot r^3 l} \int_0^t P dt = 16,4.$$

Наименьшая толщина слоя будет около 2 μ . Если канавку сделать только в верхней, менее нагруженной половине, то ухудшения не будет, так как минимальная толщина слоя не уменьшится.

Все изложенное показывает, что предлагаемый нами способ определения толщины масляного слоя в подшипнике двигателя, основанный на экспериментально проверенных выводах и на замене сил из диаграммы результирующими отдельными групп сил, дает удовлетворительное соответствие между расчетом и действительностью. Этого нельзя сказать о применявшемся до сих пор способе расчета подшипников двигателя, основанном на теории подшипника бесконечной длины и на замене переменной нагрузки средней нагрузкой постоянного направления.

1. ATZ, 1934, Heft 5, Anwendungs- und Belastungsmöglichkeiten eines neuen Gleitlagers in den Abmessungen der Wälzlager.
2. ATZ, 1932, N. 18—20.
3. Zeitschr. f. angew. Math. und Mech., 1935, B. 15; 1935, B. 16, Ebene und räumlicher Strömung zäher Flüssigkeiten.
4. Journal of Applied Physics, 1938, v. 9, p. 393, The Theory of the Thick Film Lubrication of a Complete Journal Bearing of Finite Length.
5. Классики естествознания, Гидродинамическая теория смазки, 1934, стр. 440—443.
6. Научные записки Харьковского машиностроительного института, 1935, С. Н. Куцаев, О смазке подшипника с переменной нагрузкой, или Дизелестроение, 1937, № 12.
7. Классики естествознания, Гидродинамическая теория смазки, стр. 295.
8. Trans. ASME, 1934, v. 56; 1935, v. 57, или Дьячков А. К., Расчет подшипников быстроходных двигателей, Машигиз, 1939.
9. Trans. ASME, RP-54-7, 1932, или Дьячков А. К., Расчет подшипников быстроходных двигателей Машигиз, 1939.
10. G ü m b e l - E v e r l i n g, Reibung und Schmierung im Maschinenbau, 1925, или Ф а л ь ц, Основы смазочной техники.
11. Petroleum, 1932, N. 19, Experimentelle Untersuchung der Grenzbedingungen flüssiger Reibung im oszillierend belasteten Gleitlager.
12. Трение и износ в машинах, Академия Наук СССР, 1939, т. 1.
13. VDI, Forschungsheft N. 352, 1932, der Üben Schmiervorgang im Gleitlager.
14. Journal of Applied Mechanics, 1935, June, Film Lubrication in Sleeve Bearings.
15. VDI, Forschungsheft N. 393, 1928, Reibung und Temperaturverlauf im Gleitlager.
16. Гемант, Электрофизика изолирующих материалов, 1932. Комарков Е. Ф., Электроматериаловедение, 1935.
17. Дизелестроение, 1936, № 8—9, Куцаев С. Н., Гидродинамическая теория смазки с уточненными граничными условиями.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	1
I. Основное уравнение и граничные условия задачи	2
II. Элементарный вывод уравнения Рейнольдса	2
III. Решение уравнения Рейнольдса	3
IV. Экспериментальная проверка	6
1. Опыты Гейна	6
2. Опыты Нюккера	8
V. Заключение	9
Приложение. Пример расчета толщины масляного слоя в подшипнике двигателя	9
Литература	стр. 3 обл.

dp. 55874

✓

Цена 1 р. 50 к.

0-15 коп.



1943