

ТРЕНИЕ В УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ

М. А. ГАЛАХОВ, В. В. ШИРОКОВ

(Москва)

Рассмотрена задача о движении жидкости в упругогидродинимическом контакте при больших давлениях, скоростях сдвига и малых характерных временах. Учтены нелинейные свойства жидкости — зависимость вязкости от давления, температуры и скорости сдвига. Получены простые асимптотические формулы. В одномерном случае проведено численное решение. Дано сравнение с экспериментом по измерению силы трения в упругогидродинимическом контакте.

1. Упругогидродинимический контакт — контакт упругих тел, разделенных пленкой вязкой жидкости, встречается в различных областях техники: в подшипниках качения и скольжения, зубчатых передачах, уплотнениях, при экструзии со смазкой, а также в биомеханике. Один из центральных вопросов — определение касательных напряжений на поверхности, или напряжений трения. Знание напряжений трения необходимо для нахождения напряженного состояния в зоне контакта и оценки работоспособности контакта. Напряжения трения связаны с тепловыми потоками в поверхности и могут служить для оценки верности условия прилипания. В случае подшипников качения, где кинематика контакта не задана, напряжения трения необходимы для получения сил и моментов, которые определяют кинематику подшипника.

Как правило, жидкость находится в контакте при большом давлении ($\sim 10^9 \text{ н.м}^{-2}$), высокой скорости сдвига ($\sim 10^7 \text{ сек}^{-1}$) и недолго ($\sim 10^{-5} \text{ сек}$). Температура поверхностей различна и непостоянна в области контакта. Изменение температуры поперек пленки при скольжении может достигать сотен градусов.

В этих условиях неприменимы одномерная изотермическая или неизотермическая [1] постановка задачи для ньютоновской жидкости с равными и постоянными температурами поверхностей [2, 3]. Реологические исследования [4–6] показали, что в условиях упругогидродинимического контакта качения-скольжения жидкость имеет существенно не-ньютоновские свойства. В [3] предложен алгоритм решения одномерной задачи для нелинейно-вязкой жидкости и одинаковых температур поверхностей.

В данной работе получено решение двумерной задачи для нелинейно-вязкой жидкости при различных температурах поверхностей. В частных случаях результат представляется в виде простых формул.

2. Рассмотрим две поверхности, разделенные пленкой жидкости (фиг. 1). Геометрия зазора, заполненного жидкостью, стационарна. Точки O_1 и O_2 имеют в неподвижной системе координат скорости (u_1, v_1) и (u_2, v_2) . Температуры в точках O_1 и O_2 — T_1 и T_2 . Будем считать, что 1) тепловыделение в контакте происходит в основном за счет нагрева при сдвиге, теплопередача идет поперек пленки жидкости [3]; 2) вязкость жидкости — нелинейная функция давления p , температуры T и скорости сдвига [6, 7]; 3) относительное скольжение не слишком мало (обычно достаточно долей процента), так что напряжение сдвига не зависит от z ; 4) коэффициент теплопроводности k жидкости и ее высокочастотный модуль сдвига G_∞ постоянны [3].

В этих предположениях уравнения задачи принимают вид

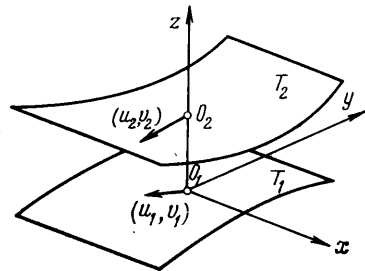
$$(2.1) \quad k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\tau \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$(2.2) \quad T(x, y, 0) = T_1(x, y), \quad T(x, y, h(x, y)) = T_2(x, y)$$

$$(2.3) \quad \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{G}{\mu(p, T)} \operatorname{sh} \frac{\tau}{G}$$

$$(2.4) \quad w(x, y, 0) = w_1(x, y), \quad w(x, y, h) = w_2(x, y)$$

Здесь τ , w , w_1 , w_2 — напряжение сдвига, скорости жидкости и поверхностей в направлении относительного скольжения, G — некоторый модуль сдвига, $h(x, y)$ — переменная толщина пленки.



Фиг. 1

Принятая зависимость скорости сдвига от напряжения обобщает максвелловскую модель быстро релаксирующей вязкоупругой жидкости [7] и модель, полученную рассмотрением энергии активации при больших давлениях [6], и переходит в эти модели при $G=G_\infty/\sqrt{6}$ и $G=1/2\alpha$ соответственно (α — пьезокоэффициент жидкости). Эта модель может рассматриваться как полумпирическая, учитывающая неьютоновские эффекты различной физической природы.

3. Для вязкости, зависящей от давления и температуры по формулам $\mu(p, T) = \mu_0 \exp[\alpha p / (1 + \beta p)] [1 + \delta(T - T_0)]^{-1}$ и $\mu(p, T) = \mu_0 \exp[\alpha p / (1 + \beta p) - \delta(T - T_0)]$, система (2.1)–(2.4) сводится к уравнениям (3.1) и (3.2) соответственно

$$(3.1) \quad G \operatorname{sh} \frac{\tau}{G} = \mu \frac{w_2 - w_1}{h} \frac{\operatorname{arctg} \Lambda^0}{\Lambda^0}$$

$$\mu = \mu(p, T^*), \quad T^* = (T_1 + T_2)/2, \quad \Lambda^0 = \Lambda^* \left[\frac{\tau/G}{\operatorname{sh}(\tau/G)} \right]^{1/2}$$

$$\Lambda^* = \frac{w_2 - w_1}{2[1 + \delta(T^* - T_0)]} \left\{ \frac{\mu_0 \delta \exp[\alpha p / (1 + \beta p)]}{k} \right\}^{1/2}$$

$$(3.2) \quad G \operatorname{sh} \frac{\tau}{G} = \mu \frac{w_2 - w_1}{h} \frac{\operatorname{arsh} \Lambda}{\Lambda \sqrt{1 + \Lambda^2}}$$

$$\Lambda = \left\{ \Lambda_0^2 \frac{\tau/G}{\operatorname{sh}(\tau/G)} + \operatorname{sh}^2 \left[\frac{\delta(T_2 - T_1)}{4} \right] \right\}^{1/2}, \quad \Lambda_0 = \left(\frac{\mu \delta}{8k} \right)^{1/2} (w_2 - w_1)$$

В ряде предельных случаев уравнения (3.1), (3.2) имеют решения

$$(3.3) \quad \tau \ll G, \quad \tau = \mu \frac{w_2 - w_1}{h} \frac{\operatorname{arctg} \Lambda^*}{\Lambda^*}$$

$$\tau = \mu \frac{w_2 - w_1}{h} \frac{\operatorname{arsh} \Lambda'}{\Lambda' \sqrt{1 + \Lambda'^2}}$$

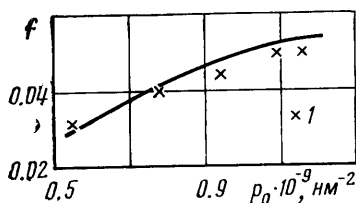
$$\Lambda' = \left\{ \Lambda_0^2 + \operatorname{sh}^2 \left[\frac{\delta(T_2 - T_1)}{4} \right] \right\}^{1/2}$$

$$(3.4) \quad \Lambda^0 \ll 1, \quad \Lambda \ll 1, \quad \tau = G \operatorname{arsh} \left(\mu \frac{w_2 - w_1}{Gh} \right)$$

$$(3.5) \quad \Lambda^0 \gg 1, \quad \tau \operatorname{sh} \frac{\tau}{G} = \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 \frac{\mu_0 k \exp[\alpha p / (1 + \beta p)]}{G\delta}$$

Уравнение (3.1) решалось численно. Решение согласуется с асимптотиками (3.3)–(3.5).

4. Уравнения (3.1), (3.2) или асимптотические формулы (3.3), (3.4) и уравнение (3.5) позволяют находить напряжения трения. Было предпринято сравнение данной теории с экспериментом, в котором измерялась интегральная величина — сила трения при качении цилиндров со скольжением. Эксперимент проводился в Институте машиноведения для масла МС-20 и стальных цилиндров. Параметры эксперимента следующие:



Фиг. 2

$$T^* = 50^\circ \text{C}, \quad \mu_0 = 1.05 \text{ н} \cdot \text{сек} \cdot \text{м}^{-2}, \quad T_0 = 20^\circ \text{C}$$

$$\delta = 0.2 \text{ град}^{-1}, \quad \alpha = 2.05 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{н}^{-1}$$

$$k = 0.13 \text{ вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{град}^{-1},$$

$$u^* = (u_1 + u_2)/2 = 10 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$$

$$\beta = 1.7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{н}^{-1}, \quad u_2 - u_1 = 0.2 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$$

$$E' = E / (1 + \nu^2), \quad E = 2 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{м}^{-2}, \quad \nu = 0.3$$

$$R = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad G_\infty = 1.2 \cdot 10^7 \text{ н} \cdot \text{м}^{-2}$$

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2, \quad R_1 = R_2 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Максимальное герцево давление p_0 изменялось от $5.5 \cdot 10^8$ н.м⁻² до $1.16 \cdot 10^9$ н.м⁻². Постоянная в контакте толщина пленки определялась по [8]

$$h = 1.65 \left(\frac{E'}{p_0} \right)^{0.18} \left(\frac{\alpha \mu^* u^*}{R} \right)^{0.73} R$$

где μ^* — вязкость при $T=T^*$ и нормальном давлении.

Для данных значений параметров можно пользоваться первой формулой (3.4). Так как $\mu(w_2 - w_1) \gg Gh$ почти для всей зоны контакта и $\beta p_0 \ll 1$, то интегрирование по зоне контакта приводит к формулам для силы трения F и коэффициента трения $f = F/q$, где q — нагрузка на единицу длины цилиндра

$$(4.1) \quad f = \frac{4G}{\pi p_0} \left[\ln 2\Omega + \frac{\pi}{4} \alpha p_0 - \frac{\alpha \beta p_0^2}{2} \right], \quad \Omega = \mu_0 (u_2 - u_1) / \{ Gh [1 + \delta (T^* - T_0)] \}$$

Теоретические и экспериментальные результаты представлены на фиг. 2. Данные I — экспериментальные точки, сплошная линия — теоретическая кривая.

Авторы благодарят В. Д. Данилова и А. И. Петрусевича за предоставленные экспериментальные данные.

Поступила 25 VI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Dowson D., Higginson G. R. *Elasto — hydrodynamic lubrication*. Oxford, Pergamon Press, 1966.
2. Коднир Д. С., Саввин Л. Л. Определение касательных нагрузок и коэффициентов трения для поверхностей, работающих в контактно-гидродинамическом режиме. Тр. Куйбышевск. авиац. ин-та им. С. П. Королева, 1969, № 40.
3. Каннел, Уолоуит. Упрощенный анализ сил трения при упругогидродинамическом контакте в условиях качения со скальжением. Тр. Америк. об-ва инж.-механ. Проблемы трения и смазки, 1971, т. 93, № 1.
4. Белл, Кеннел, Аллен. Реологическое поведение смазки в контактной зоне системы с контактом качения. Тр. Америк. об-ва инж.-механ., Теорет. основы расчетов, 1964, т. 86, № 3.
5. Новак, Винер. Вязкость некоторых смазочных масел при повышенных температурах, высоких давлениях и больших скоростях сдвигов. Тр. Америк. об-ва инж.-механ., Проблемы трения и смазки, 1968, т. 90, № 3.
6. Смит. Некоторые аспекты нелинейного поведения в смазках при сверхвысоком давлении. Тр. Америк. об-ва инж.-механ., Проблемы трения и смазки, 1968, т. 90, № 3.
7. Чжоу, Сэйбел. Упругогидродинамическая теория для вязкоупругой жидкости. Тр. Америк. об-ва инж.-механ., Проблемы трения и смазки, 1971, т. 93, № 1.
8. Грубин А. Н. Основы гидродинамической теории смазки тяжело нагруженных цилиндрических поверхностей. ЦНИИТМАШ, 1949, кн. 30.

УДК 532.526

О ХАРАКТЕРЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВБЛИЗИ ЕГО НАЧАЛА НА ТЕЛАХ, ВРАЩАЮЩИХСЯ В ПОКОЯЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Я. Л. РУДЕРМАН

(Москва)

Развитие пограничного слоя на телах вращения, вращающихся вокруг оси симметрии в покоящейся жидкости, во многом определяется положением его начала по отношению к оси вращения. Если начало пограничного слоя совпадает с полюсом вращающегося тела, то при достаточном общих предположениях относительно формы тела в окрестности полюса пограничный слой имеет ненулевую толщину, а течение в нем описывается тем или иным «автомодельным» решением уравнений пограничного слоя [1, 2]. Применимость существующих приближенных методов расчета пограничного слоя [2, 3] ограничена этим случаем.

Результаты данной работы относятся к случаю, когда пограничный слой берет начало на передней кромке, находящейся на конечном расстоянии от оси вращения. Выявляется характер решения уравнений пограничного слоя вблизи кромки. Вводит-