

УДК 539.3:621.891

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СМАЗКИ ПРОФИЛИРОВАННОГО РОЛИКА С УЧЁТОМ ОДИНОЧНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА

© Михаил Яковлевич Пановко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россияmpanovko@yandex.ru

Аннотация. Формулируется и решается численно упругогидродинамическая задача о контакте смазанного профилированного ролика с учётом одиночных неровностей (бугорок, лунка) на его поверхности. Показано значительное влияние расположения и типа неровности на распределения давления и толщины смазочной плёнки в зоне контакта.

Ключевые слова: упругогидродинамический контакт, ролик, профилирование, численное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF THE ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF A PROFILING ROLLER TAKING IN THE ACCOUNT A SINGLE ASPERITIES AT CONTACT SURFACE

© Mikhail Panovko

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russiampanovko@yandex.ru

Abstract. An elastohydrodynamic problem for lubricated contact of a profiling roller is formulated and solved numerically taking in the account a single asperities (bump, dent) at contact surface. It is shown that location and type of the asperities influence significantly on pressure and film thickness distributions in contact zone.

Keywords: elastohydrodynamic contact, roller, profiling, numerical simulation.

Введение. Задачи об упругогидродинамической (УГД) смазке возникают при анализе процессов в зоне контакта смазанных деформируемых тел, образующих различные узлы трения (например, зубчатые передачи, роликовые и шариковые подшипники качения). Режим УГД смазки характеризуется наличием тонкой смазочной плёнки и упругой деформацией тел в зоне контакта. К настоящему времени наибольшее число результатов получено для линейных (неограниченных по длине) и точечных контактов [1]. Вместе с тем значительный практический интерес представляют процессы УГД смазки в линейном контакте конечной длины. Подобные контакты имеют место в роликоподшипниках и зубчатых передачах. Причём осевой профиль ролика в торцевой зоне скругляется с целью снижения напряжений в этой зоне. Для несмазанного контакта это показано в ряде численных исследований (см., например, [2]). В отличие от УГД смазки линейных и

точечных контактов смазка коротких роликов исследована численными методами существенно меньше, главным образом, из-за трудностей реализации устойчивого вычислительного процесса, особенно в случае тяжёлого нагружения. В публикациях, посвящённых численному моделированию УГД смазки роликов, приводятся решения, полученные в предположении, что взаимодействующие поверхности являются гладкими [3-6]. Для более реалистичного описания характеристик УГД контакта шероховатость поверхности может быть учтена в математических моделях как на основе стохастического подход [7], так и детерминированного [8]. Детерминированный подход в отличие от стохастического позволяет путём задания функции, описывающей неровности поверхности, изучать локальные флуктуации давления и толщины смазочной плёнки в УГД контакте. Этот подход был использован для анализа влияния модельных неровностей (единичные неровности, волнистость), а также реальной топографии поверхности в случае линейных (неограниченных по длине) и точечных УГД контактов (см., например, [9]). Применительно к профилированным роликам подобная задача, насколько известно автору, не решалась. В настоящей работе сформулирована и решается численным методом УГД задача о контакте смазанного профилированного ролика с учётом одиночных неровностей (типа бугорка или лунки) на его поверхности. Показано значительное влияние расположения и типа неровности на распределения давления и толщины смазочной плёнки в зоне контакта.

Постановка задачи. Рассматривается стационарная изотермическая задача о смазке ролика со скруглённым краем и одиночными неровностями (см. рис. 1 и рис. 2), поверхность которого в зоне УГД контакта описывается следующей функцией:

$$z = h_0 + f(y) + x^2 / 2R_x(y) + u_z(x, y) - u_z(0, 0) + d(x, y) - d(0, 0).$$

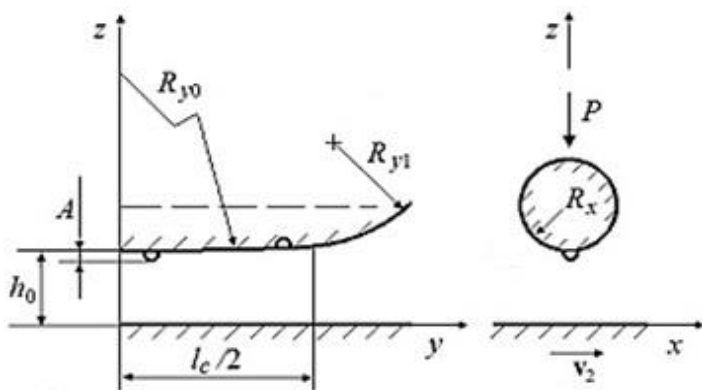


Рис. 1. Схема смазанного контакта с неровностям

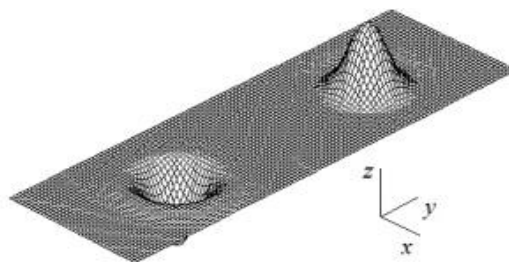


Рис. 2. Виды неровностей

Здесь x, y - декартовы координаты в плоскости контакта, h_0 – расстояние между смазанными поверхностями в начале координат, $f(y)$ – уравнение образующей, $R_x(y)$ – радиус кривизны ролика в сечении $y = \text{const}$, $u_z(x, y)$ - упругая деформация, $d(x, y)$ - неровность. В задаче полагается, что одиночные неровности располагаются на верхней неподвижной поверхности ролика ($v_1 = 0$); нижняя поверхность гладкая и движется с постоянной скоростью $v_2 > 0$.

Полагается, что $R_x(y) \cong R_{x0}$, где $R_{x0} = R_x(0)$. Образующая, составленная из дуг двух окружностей с радиусами R_{y0} , R_{y1} ($R_{y1} < R_{y0}$), сопрягаемых в сечении $|y| = l_c/2$, описывается функцией следующего вида:

$$f(y) = y^2 / 2R_{y0} + f_1(|y|)(1/2R_{y1} - 1/2R_{y0})\theta(|y|),$$

$$\theta(|y|) = \begin{cases} 1, & \text{при } |y| > l_c/2 \\ 0, & \text{при } |y| \leq l_c/2. \end{cases}$$

Здесь $f_1(|y|) = (|y| - l_c/2)^2$ при гладком сопряжении дуг, $f_1(|y|) = y^2 - (l_c/2)^2$ при негладком. В первом случае в точке $|y| = l_c/2$ сопрягаемые дуги имеют общую касательную, во втором – касательная имеет конечный разрыв. Выражение для $f(y)$ описывает образующую бочкообразного ролика. При $R_{y0} \rightarrow \infty$ образующая $f(y)$ описывает цилиндрический ролик со скруглённым краем. В настоящей работе рассматривается именно это тип роликов. Одиночная неровность типа бугорка или лунки (см. рис. 2), расположенная на верхней неподвижной поверхности контакта, описывается следующей функцией:

$$d(x, y) = A \times 10^{-10(((x-x_d)/w_x)^2 + ((y-y_d)/w_y)^2)} \times \cos\left(2\pi\sqrt{((x-x_d)/w_x)^2 + ((y-y_d)/w_y)^2}\right),$$

обобщающей на пространственный случай выражение, использованное в [10] для численного анализа линейного контакта с неровностями. Здесь A – амплитуда неровности (в случае бугорка $A < 0$, в случае лунки $A > 0$); w_x , w_y – длины волн неровности в направлении осей x и y соответственно; x_d , y_d – координаты центра неровности.

Полагается, что смазочный материал – несжимаемая вязкая жидкость; к ролику приложена внешняя сила $P = \text{const}$. Толщина смазочной плёнки мала по сравнению с характерными размерами области контакта. Силы вязкого трения значительно больше инерционных. Локально контактирующие тела заменяются упругими полупространствами. Вводятся следующие безразмерные переменные:

$$(x', y', \xi', \eta') = (x, y, \xi, \eta) / a_H, \quad p' = p / p_H, \quad h' = h / h_0, \quad \mu' = \mu / \mu_0, \quad H_0 = 2R_{x0}h_0 / a_H^2, \quad Q_0' = Q_0 p_H,$$

$$V = (24\mu_0 |\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2| R_{x0}^2) / p_H a_H^3, \quad P' = P / p_H a_H^2,$$

$$P = \pi p_H a_H l_c / 2, \quad \mathbf{v} = (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2) / |\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2|,$$

$$\varepsilon_0 = R_{x0} / R_{y0}, \quad \varepsilon_1 = R_{x0} / R_{y1}, \quad d' = d / h_0, \quad A' = 2R_{x0}A / a_H^2, \quad (x'_d, y'_d) = (x_d, y_d) / a_H,$$

$$(w'_x, w'_y) = (w_x, w_y) / a_H.$$

Здесь x, y, ξ, η – декартовы координаты в плоскости контакта; $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ – параметры скругления (в настоящей работе $\varepsilon_0 = 0$); $p(x, y)$ и $h(x, y)$ – соответственно давление и толщина смазочной плёнки (зазор); P – внешняя нагрузка; a_H и p_H – соответственно полуширина и максимальное герцевское напряжение в линейном контакте; μ – вязкость смазки; μ_0 – вязкость смазки при давлении окружающей среды; $\mathbf{v}_1(v_{1x}, v_{1y}), \mathbf{v}_2(v_{2x}, v_{2y})$ – скорости контактирующих поверхностей; H_0 – безразмерная толщина плёнки в начале координат; V – нагрузочно-скоростной параметр; l_c – длина цилиндрической части ролика; Q_0 – пьезокоэффициент вязкости.

В безразмерной форме уравнения, описывающие УГД контакт, имеют вид (без штрихов):

$$L(p) = \nabla \cdot \left(H_0^2 \frac{h^3}{\mu} \nabla p - V \mathbf{v} h \right) = 0, \quad (1)$$

$$h(x, y) = 1 + \frac{x^2 + \varepsilon_0 y^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) f_1(|y|) \theta(|y|)}{H_0} + \frac{1}{\pi H_0} \iint_{\Omega} G(x, y, \xi, \eta) p(\xi, \eta) d\xi d\eta + \frac{1}{H_0} (d(x, y) - d(0,0)), \quad (2)$$

$$M(p) = \iint_{\Omega} p(\xi, \eta) d\xi d\eta - \frac{\pi}{2} l_c = 0, \quad (3)$$

$$p|_C = \frac{\partial p}{\partial n} \Big|_{C_e} = 0, \quad (4)$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \mathbf{v} = (v_x, v_y), \quad \mu = \mu_0 \exp(Q_0 p), \quad G(x, y, \xi, \eta) = \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} - \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}.$$

Здесь Ω - область контакта; C – граница области контакта; C_e – выходная граница области контакта $C_e = C \setminus C_i$, где C_i – входная граница.

Нелинейная интегродифференциальная система уравнений (1)-(4) включает уравнение Рейнольдса (1), уравнение для определения толщины смазочной пленки между упругими телами (2), условие равенства внешней нагрузки интегралу от давления по области контакта (3) и граничные условия для давления (4). Условие равновесия (3) записано в предположении, что сила, приложенная к ролику, равна суммарной силе P на участке l_c в случае бесконечно длинного цилиндра, т.е. в размерных величинах $P = \pi H a_H l_c / 2$.

Решение задачи должно удовлетворять граничным условиям для давления на входной части границы области контакта C_i , которая задана, и на заранее неизвестной границе выхода C_e , $C = C_i \cup C_e$. Точное определение входной и выходной границы записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} C_i & \text{ задано, если } (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{n})|_{C_i} < 0 \\ (\nabla p \cdot \mathbf{n})|_{C_e} & = 0, \text{ если } (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{n})|_{C_e} \geq 0 \\ \mathbf{Q} & = \mathbf{v} h - H_0^2 h^3 \nabla p / (\mu V) \end{aligned}$$

здесь \mathbf{Q} – вектор плотности потока смазочной жидкости, \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали.

Выходная граница C_e отделяет зону смазки, где $p > 0$, от кавитационной, где полагается $p = 0$. Конфигурация и местоположение выходной границы C_e определяются в процессе решения задачи. Граничное условие для давления $(\nabla p \cdot \mathbf{n})|_{C_e} = 0$ известно как условие Рейнольдса (кавитационное) и применяется для решения различных задач контактной гидродинамики

[11]. В настоящей работе определение расположения выходной границы C_e основано на принципе дополнителности, согласно которому, если $(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{n})_{C_e} \geq 0$, то

$$L(p; H_0) = 0, p > 0 \text{ в зоне смазки; } L(p; H_0) < 0, p = 0 \text{ в зоне кавитации} \quad (5)$$

Обоснование применимости для решения задач об УГД контакте условий дополнителности подробно изложено в [12, 13]. В [14] отмечалось, что при использовании этого подхода удовлетворяется кавитационное условие на C_e .

В системе уравнений и неравенств (1)-(5) заданными считаются входная граница C_i ; нагрузочно-скоростной параметр V ; вектор скорости $\mathbf{v}(v_x, v_y)$; параметры скругления $\varepsilon_0 = R_{x0}/R_{y0}$, $\varepsilon_1 = R_{x0}/R_{y1}$; зависимость вязкости от давления $\mu(p)$; параметры неровности A , w_x, w_y, x_d, y_d . В расчетах использовалась зависимость $\mu = \mu_0 \exp(Q_0 p)$.

Решение задачи представляется распределениями давления $p(x, y)$ и зазора $h(x, y)$, местоположением выходной границе $x_e(y)$, безразмерной толщиной смазочной пленки H_0 в центре контакта.

Если рассматривается ролик с симметрией относительно плоскости $y=0$, то расчёт целесообразно осуществлять для половины УГД контакта. В этом случае для ролика при $y \geq 0$ функция Грина $G(x, y, \xi, \eta)$ записывается с учётом влияния нагрузки, приложенной на отброшенной части ролика при $y \leq 0$, т.е. в уравнении (2) следует использовать $G(x, y, \xi, \eta) = G(x - \xi, y - \eta) + G(x - \xi, y + \eta)$ при расчёте симметричной части ролика, а в уравнении (3) вместо $\pi l_c / 2$ используется $\pi l_c / 4$.

Численный метод. В численном методе учитывалась симметрия ролика относительно плоскости $y=0$. Расчётная область в плоскости (x, y) задается в виде прямоугольника и покрывается декартовой сеткой с системой узлов $(x_i, y_j), (x_{i-1/2}, y_{j-1/2})$. Интегрируя (1) по области $\Delta\Omega_{ij}$ ячейки (i, j) внутри контура (l_{ij}) , получаем

$$L_1(p) = \int_{(l_{ij})} \left[H_0^2 \frac{h^3}{\mu} (\nabla p \cdot \mathbf{n}) - V(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) h \right] dl = 0. \quad (6)$$

В неравенствах (5) оператор $L(p; H_0)$ заменяется на $L_1(p; H_0)$. Алгоритм решения системы уравнений и неравенств, описывающих УГД контакт, основан на методе Ньютона. Уравнения (3), (4), (6), линеаризованные около решения $(p(x, y), H_0)_k$ (k - номер итерации), в общем виде записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1(p; H_0)}{\partial p} \Big|_k \Delta p_{k+1} + \frac{\partial L_1(p; H_0)}{\partial H_0} \Big|_k \Delta H_{0, k+1} &= -L_1(p; H_0) \Big|_k \\ \frac{\partial M(p)}{\partial p} \Big|_k \Delta p_{k+1} &= -M(p) \Big|_k \\ \Delta p_{k+1} \Big|_C &= 0 \end{aligned}$$

После дифференцирования выражений для $L_1(p; H_0)$ и $M(p)$ получаем

$$\int_{(l_{ij})} \left\{ \left[H_0^2 \frac{3h^2}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} - V(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \right]_k \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_k \Delta p_{k+1} + \left(H_0^2 \frac{h^3}{\mu} \right)_k \frac{\partial \Delta p_{k+1}}{\partial n} - \left(H_0^2 \frac{h^3}{\mu^2} \frac{\partial \mu}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial n} \right)_k \Delta p_{k+1} + \left[2H_0 \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} - V(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \frac{\partial h}{\partial H_0} + H_0^2 \frac{3h^2}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} \frac{\partial h}{\partial H_0} \right]_k \Delta H_{0,k+1} \right\} dl = - \int_{(l_{ij})} \left[H_0^2 \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} - V(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) h \right]_k dl \quad (7)$$

$$\iint_{\Omega_k} \Delta p_{k+1}(\xi, \eta) d\xi d\eta = \frac{\pi}{2} l_c - \iint_{\Omega_k} p_k(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (8)$$

$$\Delta p_{k+1}|_C = 0 \quad (9)$$

$$\Delta p_{k+1} = p_{k+1} - p_k, \quad \Delta H_{0,k+1} = H_{0,k+1} - H_{0,k}$$

Здесь $(\partial h / \partial H_0)_k$ - частная производная от h по H_0 , вычисляемая по соотношению (2); $(\partial \mu / \partial p)_k$ - частная производная от μ по p , вычисляемая по зависимости $\mu = \mu_0 \exp(Q_0 p)$; $(\partial h / \partial p)_k$ - линейный оператор, действующий на Δp_{k+1} , имеет вид

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_k \Delta p_{k+1} = \frac{1}{\pi H_{0,k}} \iint_{\Omega_k} G(x, y, \xi, \eta) \Delta p_{k+1}(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (10)$$

Система уравнений (7)-(9) с учетом аппроксимации пространственных производных является исходной для построения конечноразностной схемы, при этом система разностных уравнений на каждом итерационном шаге имеет следующую структуру:

$$\begin{pmatrix} (a_{qr})_{nn} & (b_q)_n \\ (c_r)_n & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\Delta p_r)_n \\ \Delta H_0 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} (L_1(p_r; H_0))_n \\ M(p_r) \end{pmatrix}_k$$

где элементами матрицы Якоби порядка $(n+1)$ являются полная квадратная матрица $(a_{qr})_{nm}$ порядка n , вектор-столбец $(b_q)_n$ и вектор-строка $(c_r)_n$ ($q, r = 1, \dots, n$). Значение n равно числу узлов сетки, в которых определяется давление, и зависит от местоположения выходной границы. Интеграл в выражениях (2), (10) вычислялся по кубатурной формуле, применяемой при вычислении сингулярных интегралов [15]

$$\iint_{\Omega} \left(\frac{1}{\sqrt{(x_{m-1/2} - \xi)^2 + (y_{n-1/2} - \eta)^2}} - \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) p(\xi, \eta) d\xi d\eta \cong$$

$$\cong \sum_{j=1}^{NY} \sum_{i=i1(j)}^{i2(j)} \left(\frac{1}{\sqrt{(x_{m-1/2} - x_i)^2 + (y_{n-1/2} - y_j)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_{m0-1/2} - x_i)^2 + (y_{n0-1/2} - y_j)^2}} \right) \times \\ \times p(x_i, y_j)(x_{i+1/2} - x_{i-1/2})(y_{j+1/2} - y_{j-1/2})$$

здесь $i1(j)$, $i2(j)$ - целочисленные массивы, описывающие расположение соответственно входной и выходной границ ($m=1, \dots, NX+1$; $n=1, \dots, NY+1$). Массив $i2(j)$ определяется, исходя из условий дополнительности (5) на каждой итерации. Узел $(m0-1/2, n0-1/2)$ соответствует началу координат. Формула вычисления сингулярного интеграла в случае расчёта симметричного ролика обобщается согласно представленной выше схеме.

Один шаг итерационного процесса состоит в решении разностных уравнений относительно $\Delta H_{0,k+1}$, $\Delta p_{k+1}(x_i, y_j)$ методом гауссова исключения с частичным выбором ведущего элемента, вычислении $H_{0,k+1} = H_{0,k} + \omega \Delta H_{0,k+1}$, $p_{k+1} = p_k + \omega \Delta p_{k+1}$ с учетом коэффициента релаксации ω ($0,05 < \omega < 1$), вычислении $h_{k+1}(x_{i-1/2}, y_{j-1/2})$ по соотношению (2) и определении выходной границы $x_{e,k}(y_j)$. Коэффициент релаксации ω увеличивался по мере приближения к решению. Итерационный процесс продолжался до достижения требуемой относительной точности решения δ , т.е. $\max(|H_{0,k+1}/H_{0,k} - 1|, |p_{k+1}/p_k - 1|, |h_{k+1}/h_k - 1|, |x_{e,k+1}/x_{e,k} - 1|) < \delta$.

Результаты расчётов. Все расчёты проводились для симметричного относительно плоскости $y=0$ цилиндрического ролика с гладким сопряжением в торцевой зоне на сетке с числом узлов 34×84 при следующих параметрах расчёта: $V=0,1$, $Q_0=3$, $v_x=1, v_y=0$, $\varepsilon_0=0$, $\varepsilon_1=0,1$, $l_c/2=20$, $A=-0,07$ для бугорка, $A=0,07$ для лунки, $w_x=1, w_y=3$. При значении $y=l_c/2=20$ прямолинейная часть образующей цилиндрического ролика сопрягается гладким образом со скруглённой.

Расчёты для гладкого ролика показали, что с увеличением l_c значения H_0 приближаются к значению H_0 для бесконечно длинного цилиндра $H_0=0,1622$, полученного из численного решения задачи о линейном УГД контакте по методике, изложенной в [16].

Так, для гладкого ролика в случае $l_c=40$ $H_0=0,1692$. Результаты решения УГД задачи для гладкого ролика, показанные в виде распределений $p(x,y)$ и $h(x,y)$ на рис. 3, а также на рис. 4 в виде распределений $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y=\text{const}$, где $y < l_c/2$, и $p(y)$, $h(y)$ в сечении $x=0$, отражают характерные особенности УГД смазки сосредоточенных контактов: пик давления и сужение зазора в выходной зоне, уплощение зазора в центральной области контакта.

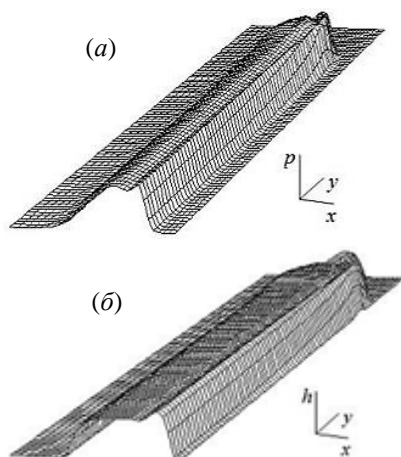


Рис. 3. Распределения $p(x,y)$ - (а) и $h(x,y)$ - (б) в УГД контакте гладкого ролика

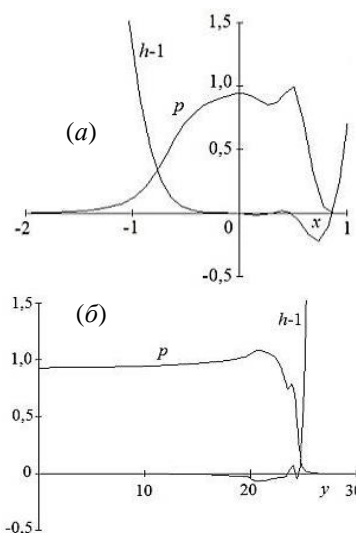


Рис. 4. Распределения $p(x)$, $h(x)$ - (а) и $p(y)$, $h(y)$ - (б) в УГД контакте гладкого ролика

Из этих распределений следует также, что на большей части ролика, где $y < l_c / 2$, $\partial p / \partial y \cong 0$, $\partial h / \partial y \cong 0$, а $p(x)$ и $h(x)$ фактически повторяют распределения, полученные из решения задачи о линейном УГД контакте неограниченного по длине цилиндра. На участке, где $y > l_c / 2$, весьма отчётливо (при заданном значении параметра скругления $\varepsilon_1 = 0,1$) проявляется “краевой” эффект – рост и последующее снижение давления. Обратная картина наблюдается в распределении толщины смазочной плёнки.

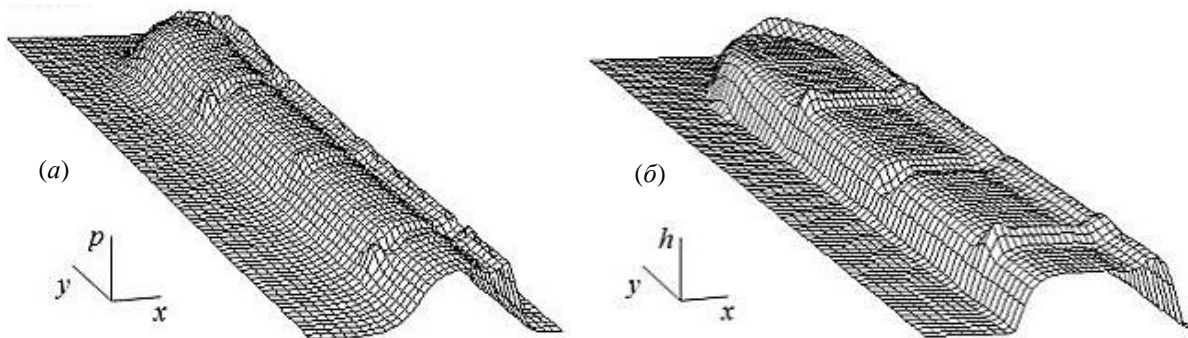


Рис. 5. Распределения $p(x,y)$ - (а) и $h(x,y)$ - (б) в УГД контакте ролика с неровностями во входной зоне

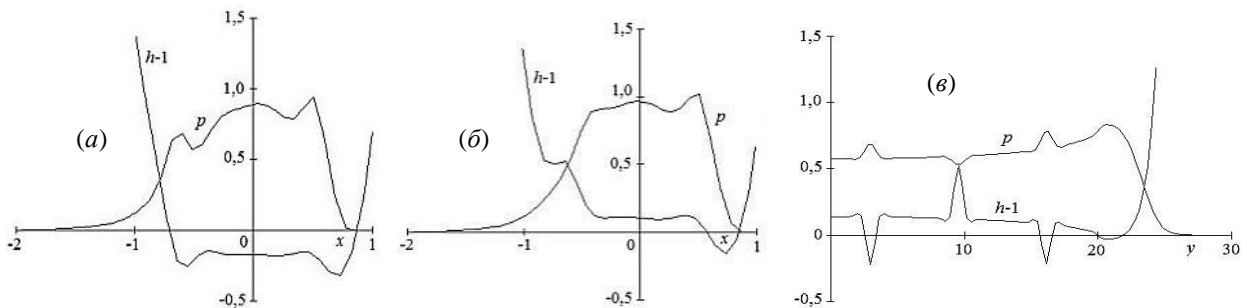


Рис. 6. Распределения $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y_b = \text{const}$ с бугорком (а) и $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y_d = \text{const}$ с лункой (б), распределения $p(y)$, $h(y)$ в сечении $x_{b,d} = \text{const}$ с бугорком и лункой во входной зоне (в)

На рис.5 и рис. 6 показаны распределения p и h , когда два бугорка и одна лунка расположены во входной зоне контакта. Видно, что влияние неровностей распространяется вниз по потоку (в направлении оси x).

В случае бугорка наблюдается увеличение давления в месте его расположения. Однако вниз по потоку распределение давления приобретает форму узкой “борозды”, проложенной в распределении для гладкого ролика. Зазор в месте расположения бугорка сужается, причём вниз по потоку в центральной зоне контакта также наблюдается сужение подобное “гряде” в распределении зазора для гладкого ролика.

В месте расположения лунки наблюдается увеличение давления и зазора. Вниз по потоку давление подобно “гряде”, возвышающейся над давлением в контакте гладкого ролика, а

увеличение зазора подобно “борозде” в распределении зазора в случае гладкого ролика. На рис.7 и рис. 8 показаны распределения p и h , когда два бугорка и одна лунка расположены в центральной зоне контакта.

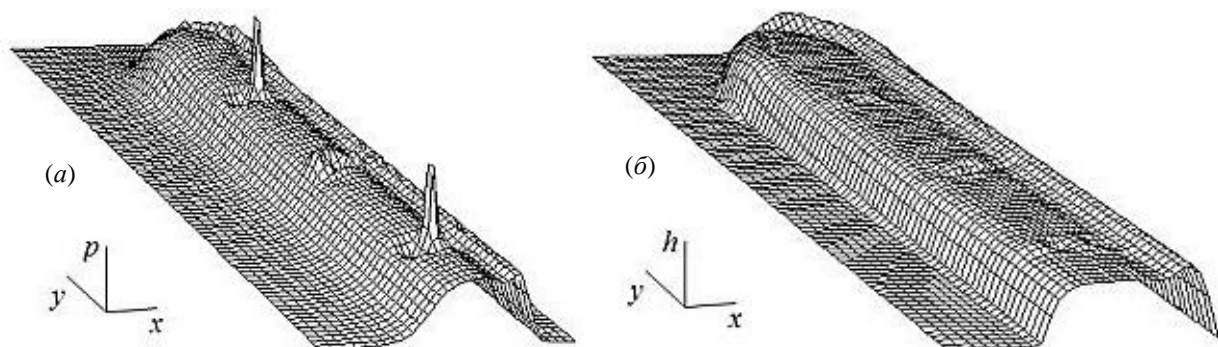


Рис. 7. Распределения $p(x,y)$ - (а) и $h(x,y)$ - (б) в УГД контакте ролика с неровностями в центральной зоне

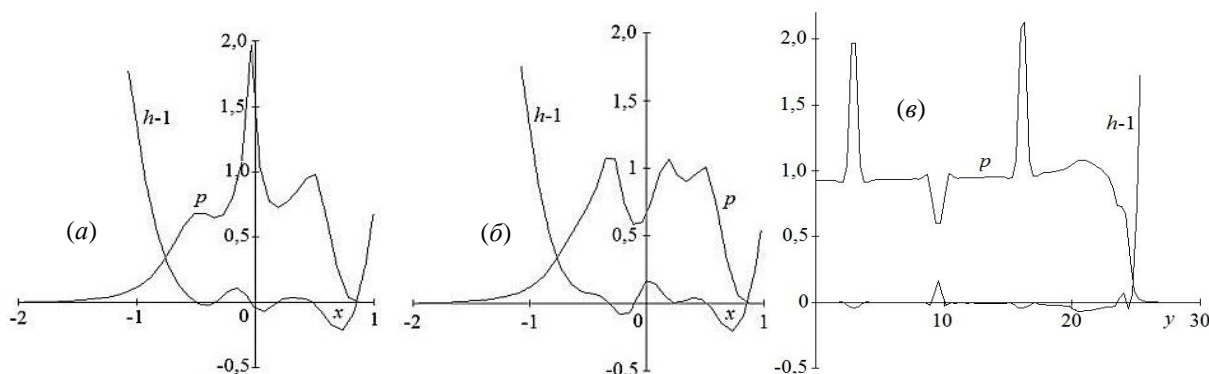


Рис. 8. Распределения $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y_b = \text{const}$ с бугорком (а) и $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y_d = \text{const}$ с лункой (б) в центральной зоне; распределения $p(y)$, $h(y)$ в сечении $x_{b,d} = \text{const}$ с бугорком и лункой (в)

Распределения, показанные на этих рисунках, значительно отличаются от распределений в случае, когда неровности располагаются во входной зоне. Видно, что влияние неровностей имеет локальный характер – все изменения в распределениях давления и зазора наблюдаются в месте расположения неровности. В месте расположения бугорка наблюдается резкое увеличение давления. В случае лунки распределение давления в этом месте подобно глубокому “кратеру” с возвышающимися краями. Из сопоставления распределений $h(x)$ на рис. 8 следует, что в центральной зоне контакта $h(x)$ для бугорка находится в противофазе по отношению к $h(x)$ для лунки. Более наглядно характер распределений $p(x,y)$ и $h(x,y)$ в центральной зоне контакта демонстрируют следующие фрагменты, представленные на рис. 9.

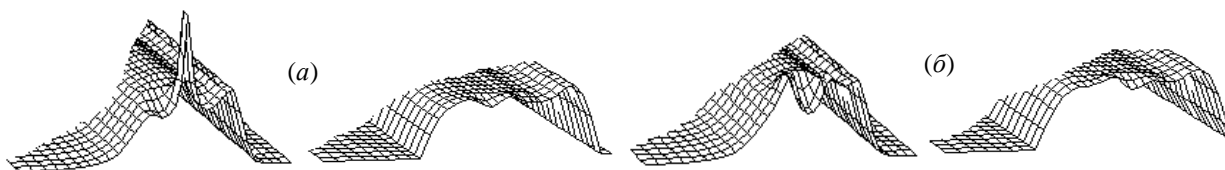


Рис. 9. Фрагменты распределений $p(x,y)$ и $h(x,y)$ в центральной зоне контакта: (а) – для бугорка; (б) – для лунки

Из соотношения $A'=(A/h_0)H_0$ следует, что поскольку $A'=\pm 0,07$, $H_0=0,1692$, то до начала деформирования неровности $A/h_0=\pm 0,414$. По завершении процесса деформирования значение этой величины, как видно из рис. 8, практически вдвое меньше. Полученная оценка свидетельствует, что даже при сравнительно умеренной внешней нагрузке, наблюдается заметное смятие неровности.

На рис.10 и рис. 11 показаны распределения p и h , когда два бугорка и одна лунка расположены в выходной зоне контакта. Как и в случае расположения этих неровностей в центральной зоне контакта, особенности распределений p и h локализуются в зоне расположения неровностей.

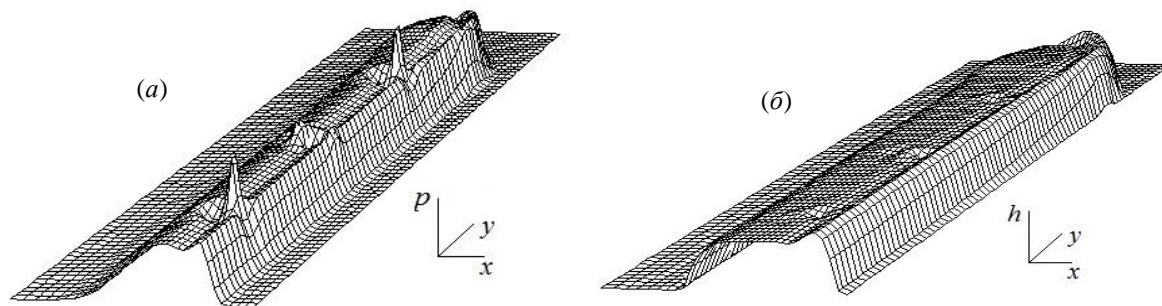


Рис. 10. Распределения $p(x,y)$ - (а) и $h(x,y)$ - (б) в УГД контакте ролика с неровностями в выходной зоне

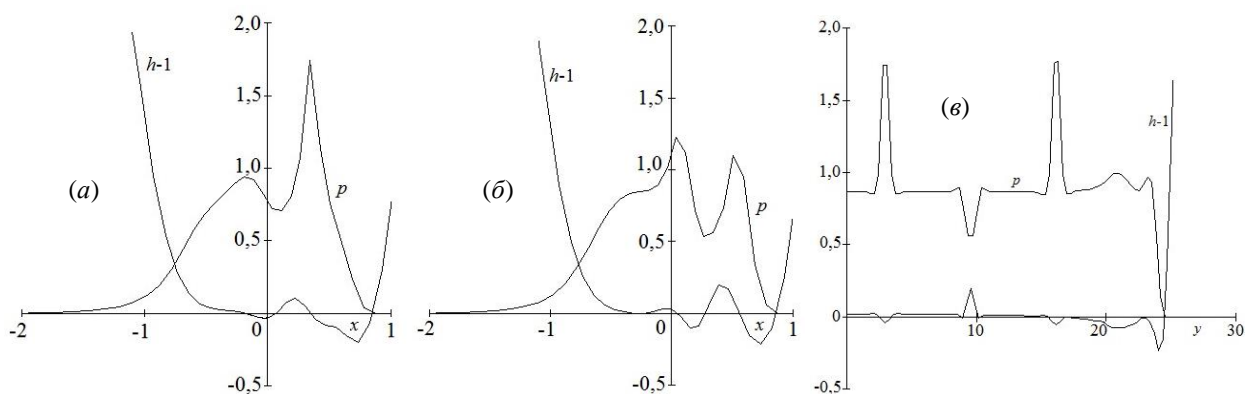


Рис. 11. Распределения $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y_b=\text{const}$ с бугорком (а) и $p(x)$, $h(x)$ в сечении $y_d=\text{const}$ с лункой (б) в выходной зоне; распределения $p(y)$, $h(y)$ в сечении $x_{b,d}=\text{const}$ с бугорком и лункой (в)

Характерные особенности распределений давления и толщины смазочной плёнки (зазора) в плоскости поперечного сечения $y_b=\text{const}$ для бугорка и $y_d=\text{const}$ для лунки, показанные на представленных выше рисунках, наблюдались также в работе, посвящённой численному исследованию (в рамках плоской задачи) влияния на УГД смазку одиночных неровностей на поверхности бесконечного ролика [8].

Список литературы

1. Dowson D., Ehret P. Past, present and future studies in elastohydrodynamics // Proc. Instn. Mech. Engrs. Part J. J. Engineering Tribol. - 1999. - V. 213, N J5. - P. 317-333.

2. Natsumeda S. Application of multi-level multi-integration to contact problems. Part 1: non-Hertzian contact in rolling bearings // Proc. Instn Mech. Engrs. Part J. J. Engineering Tribol. - 1999. - V. 213, N J1. - P. 63-80.
3. J Mostofi A., Gohar R. Elastohydrodynamic lubrication of finite line contacts // Trans. ASME. J. Lubric. Technol.- 1983. - V. 105, № 4. - P. 82-88.
4. Park T.J., Kim K.W. Elastohydrodynamic lubrication of a finite line contact // Wear. - 1998. - V. 223, № 1. - P. 102-109.
5. Пановко М.Я. Упругогидродинамическая смазка цилиндрического ролика со скруглённым краем // Изв. АН. Механика твёрдого тела. - 2003. - № 2. - С. 40-48.
6. Пановко М.Я. Влияние профилирования на параметры упругогидродинамического контакта коротких роликов // Трение и износ. - 2003. - Т. 24, № 4. - С. 355-361.
7. Zhu D., Cheng H.S. Effect of surface roughness on the point contact EHL // Trans. ASME J. of Tribology. - 1988. - V. 110, № 1. - P. 32-37.
8. Goglia P.R., Contry T.F., Cusano C. The effects of surfaces irregularities on the elastohydrodynamic lubrication of sliding line contacts. Part I – single irregularities // Trans. ASME J. of Tribology. - 1984. - V. 106, № 16. - P. 104-112.
9. Zhu D., Ai X. Point contact EHL based on optically measured three-dimensional rough surfaces // Trans. ASME J. of Tribology. - 1997. - V. 119, № 3. - P. 375-384.
10. Venner C.H., Lubrecht A.A., ten Napel W.E. Numerical simulation of the overrolling of a surface feature in an EHL line contact // Trans. ASME J. of Tribology. - 1991. - V. 113, № 4. - P. 777-783.
11. Галахов М.А., Гусятников П.В., Новиков А.П. Математические модели контактной гидродинамики. - М.: Наука, 1985. - 296 с.
12. Kostreva M.M. Elasto-hydrodynamic lubrication: a nonlinear complementarity problem // Intern. J. Numer. Methods in Fluids. - 1984. - V. 4, № 4. - P. 377-397.
13. Oh K.P. The numerical solution of dynamically loaded elastohydrodynamic contact as a nonlinear complementarity problem // Trans. ASME. J. Tribol. - 1984. - V. 106, № 1. - P. 88-95.
14. Oh K.P., Li C.H., Goenka P.K. Elastohydrodynamic lubrication of piston skirts // Trans. ASME. J. Tribol. - 1984. - V. 109, № 2. - P. 356-365.
15. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. - М.: Наука, 1985. - 253 с.
16. Айрапетов Э.Л., Кудиш И.И., Пановко М.Я. Численный метод решения задач смазки тяжело нагруженного упругогидродинамического контакта // Трение и износ. - 1992. - Т. 13, № 6. - С. 957-964.

Дата поступления: 30 ноября 2018 г.