

УДК 531/534: [57+61]

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЗАЗОРЕ МИКРО- И БИОПОДШИПНИКОВ

К. Вежхольский

Department of Basic Engineering, Gdynia Maritime University, Morska 83, PL-81-225, Gdynia, Poland, e-mail: wierzch@pg.gda.pl

Кафедра основ инженерии, Гдыньский Морской университет, Гдыня, Польша

Аннотация. Данное исследование посвящено определению распределения давлений в тонком слое неньютоновской вязкоупругой смазки в микроподшипнике скольжения криволинейной ортогональной формы (сферической, конической, цилиндрической, параболической, гиперболической). В работе принимаются в рассмотрение неизотермические, неустановившиеся и случайные условия течения, а также температурные деформации био- и микроподшипников и их муфт. Представлен общий анализ влияния неустановившегося неизотермического течения вязкоупругой жидкости в магнитном поле на давление в зазорах криволинейных микроподшипников между двумя вращательными поверхностями при случайных условиях. Смазывание поверхностей микроподшипника характеризуется различными геометрическими формами и неньютоновскими свойствами смазок.

Ключевые слова: трибология, микроподшипник, биоподшипник, формы криволинейных подшипников.

Введение

Смазывание поверхностей микроподшипников обуславливается различными геометрическими формами и неньютоновскими свойствами смазок. Целью работы является численный анализ распределения давлений в тонком слое неньютоновской вязкоупругой смазки в зазорах микроподшипников скольжения [2, 3, 10, 12–16, 37, 38, 40, 41], биоподшипников [1, 5, 11, 23, 24, 27–31], а также в тонком пограничном слое [4, 17, 18–22, 32–36, 39, 42], ограниченном цилиндрическими, сферическими, коническими, параболическими и гиперболическими поверхностями (рис. 1–4) в биореакторах с учётом случайных условий.

Микроподшипники используются в буровых головках медицинских инструментов, а также в шпиндельных медицинских системах с жёстким диском [14, 41] (рис. 4).

Геометрические формы цилиндрических, сферических, конических, параболических и гиперболических поверхностей подшипников изображены на рис. 5.

Анализ течения вязкоупругой смазки проведён с использованием уравнения Гельмгольца и уравнений неразрывности, движения и энергии [7, 8, 25, 26]

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \mu_e \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (2)$$

$$\operatorname{Div} \mathbf{S} + \mu (\mathbf{N} \nabla) \mathbf{H} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div}(\kappa \operatorname{grad} T) + \operatorname{div}(\mathbf{v} \mathbf{S}) - \mathbf{v} \operatorname{Div} \mathbf{S} - \mu T \left(\frac{d\mathbf{N}}{dt} \right) \frac{d\mathbf{H}}{dt} = \rho \frac{d(c_v T)}{dt}, \quad (4)$$

где \mathbf{v} – вектор скорости смазки, T – температура смазки, \mathbf{N} – вектор намагниченности смазки, \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля, c_v – удельная теплоёмкость, μ и μ_e – коэффициенты магнитной и электрической проницаемости смазки соответственно, \mathbf{S} – тензор напряжений смазки, ∇ – набла-оператор, κ – коэффициент теплопроводности смазки, t – время, ρ – плотность жидкости.

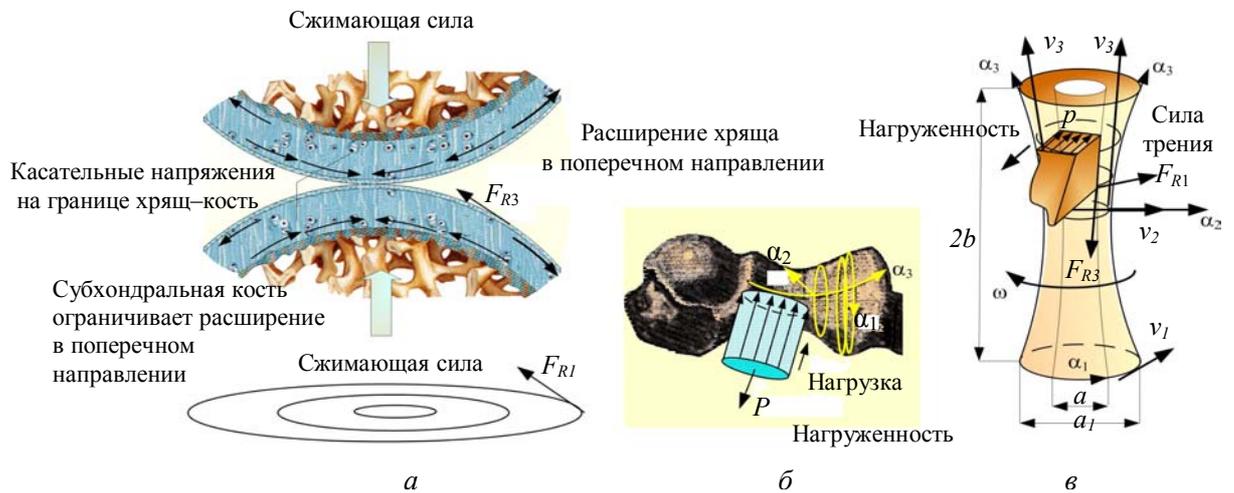


Рис. 1. Суставы человека: *a* – фрагмент двух взаимодействующих цилиндрических поверхностей коленного сустава; *б* – радиальный локтевой сустав в цилиндрических и гиперболических координатах; *в* – фрагмент взаимодействующих гиперболических поверхностей локтевого сустава

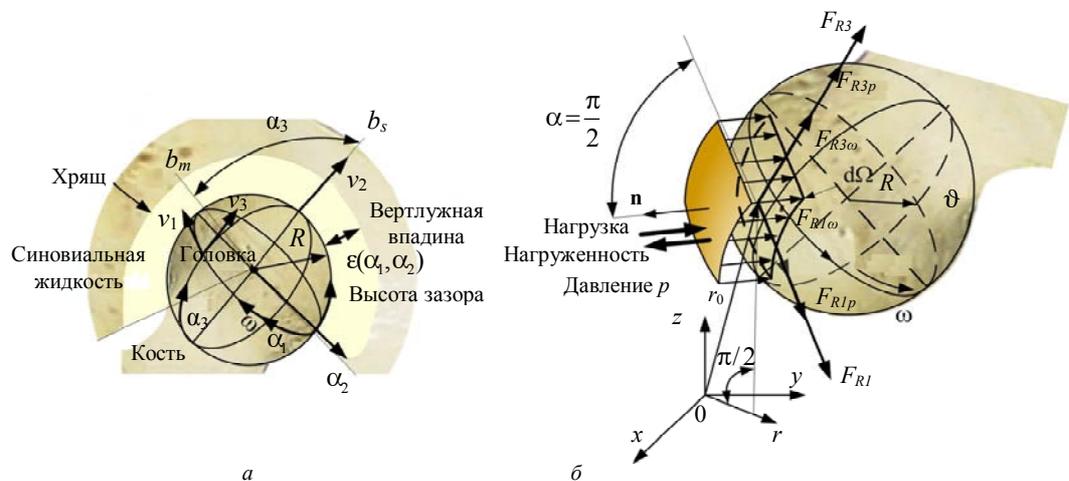


Рис. 2. Суставы бедра человека: *a* – сферическая головка кости и высота зазора; *б* – сферический сустав и схематическое расположение сил трения и нагрузок

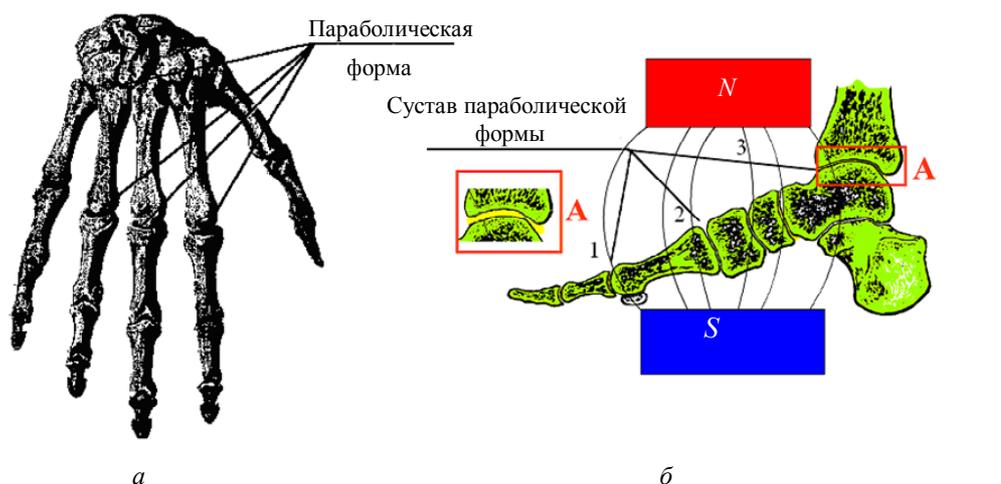


Рис. 3. Суставы человека параболической формы: *а* – фаланговый сустав; *б* – суставы в стопе человека

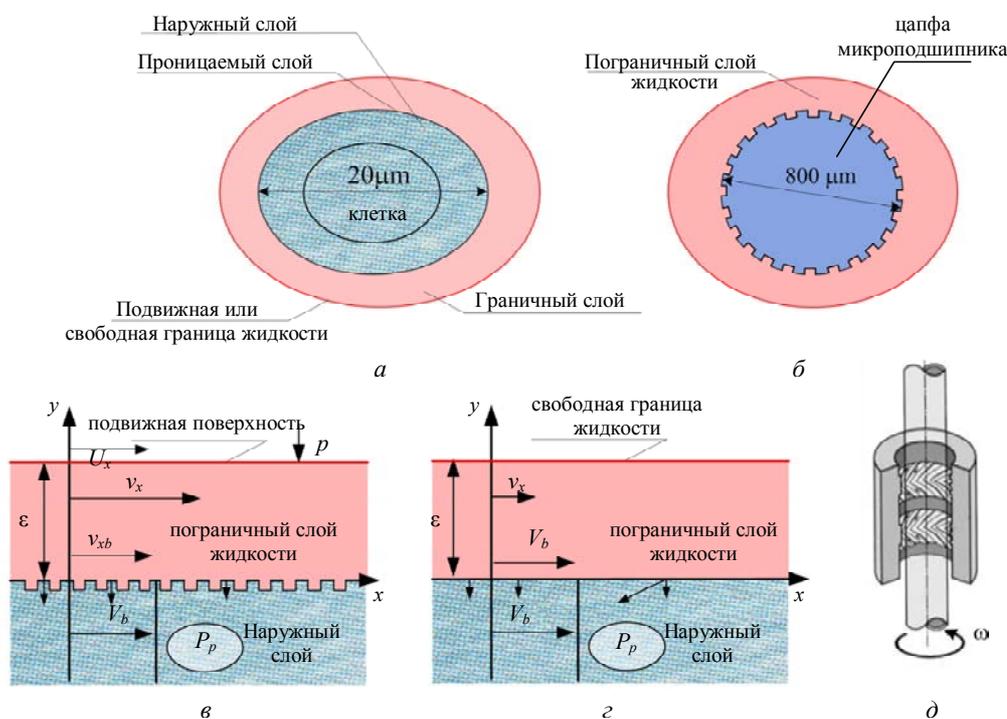


Рис. 4. Смазывание: *а* – течение тонкого жидкого слоя вокруг клетки хряща человека; *б* – асимметричные канавки в поперечном сечении цапфы шпindelной системы с жёстким диском; *в* – жидкий слой, ограниченный проницаемой стенкой пористого тела клетки и зоной подвижного потенциального течения или подвижной поверхностью; *г* – жидкий слой, ограниченный проницаемой стенкой пористого тела клетки и неподвижной ненагруженной свободной жидкой поверхностью; *д* – вал микроподшипника длиной 3 мм

Коэффициент магнитной восприимчивости смазки постоянен. Соотношение между тензором напряжений $S \equiv \|\tau_{ij}\|$ и тензорами деформаций Ривлина–Эриксона A_1 и A_2 в смазке было представлено в [29]. Динамическая вязкость смазки зависит от магнитной индукции и температуры, т.е. $\eta = \eta(H, T)$. Уравнение движения

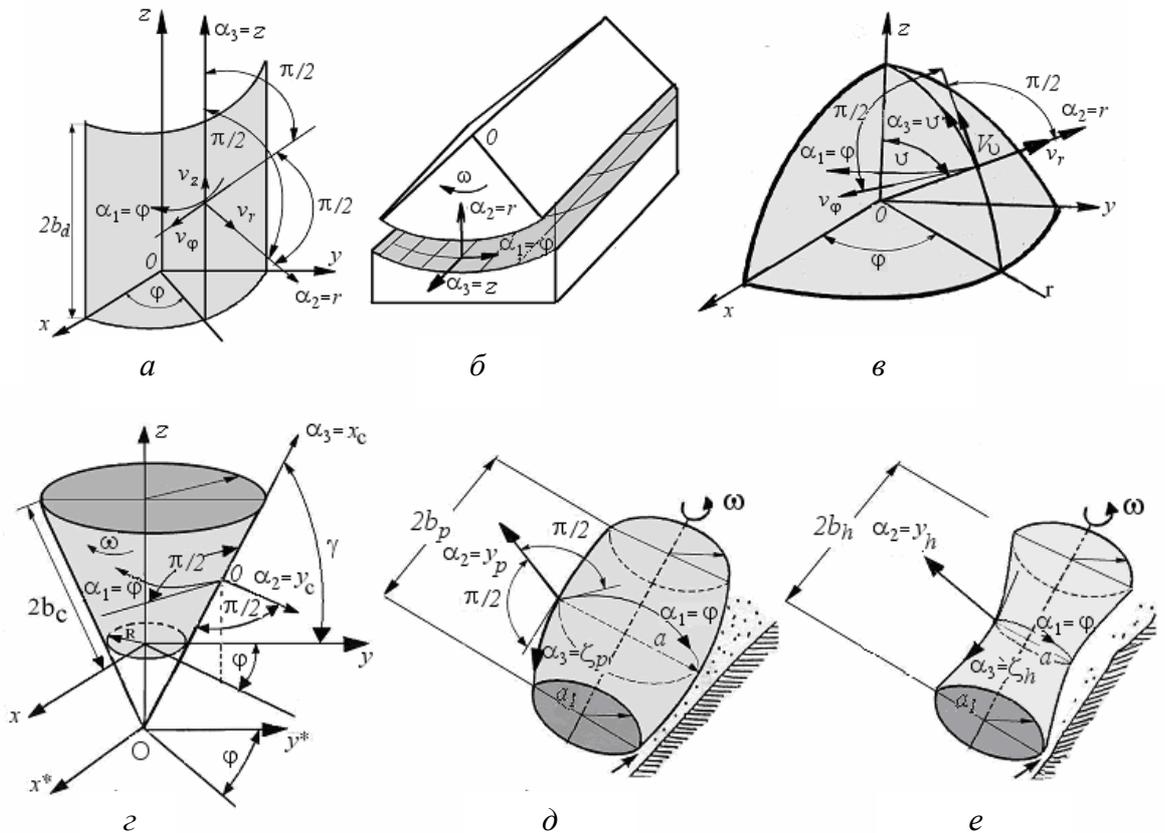


Рис. 5. Вид криволинейных ортогональных поверхностей микро- и биоподшипников: *a* – цилиндрическая поверхность; *б* – цилиндрический зазор микроподшипника; *в* – сферическая поверхность; *г* – коническая поверхность; *д* – параболическая поверхность; *е* – гиперболическая поверхность

и уравнение теплопроводности для упругой муфты подшипника записываются в следующем виде [9, 27]:

$$\text{Div} \mathbf{S}^* + \mu^* (\mathbf{N}^* \nabla) \mathbf{H}^* = 3\rho^* \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right) K(\alpha_T)^* \text{grad} T^*, \quad (5)$$

$$\text{div} (\kappa^* \text{grad} T^*) = (\rho c_v)^* \frac{\partial T^*}{\partial t} + 3K(\alpha_T)^* T^* \frac{\partial (\text{div} \mathbf{u})}{\partial t}, \quad (6)$$

где K – модуль объёмного расширения; T^* – температура материала микроподшипника, \mathbf{N}^* – интенсивность намагниченности, \mathbf{H}^* – вектор напряженности магнитного поля в упругом теле, μ^* – коэффициент магнитной проницаемости гиперупругого тела. Символы ρ^* , c_v^* , κ^* , $(\alpha_T)^*$ обозначают плотность, удельную теплоёмкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент линейного температурного расширения для упругого материала соответственно. Соотношения Дюамеля–Нейманна между компонентами τ_{ij}^* тензора напряжений \mathbf{S}^* в упругом теле и компонентами тензора деформаций ϵ_{ij} принимаются во внимание. Кроме того, учитываются зависимости деформация–смещение для u_{α_1} , u_{α_2} , u_{α_3} -компонент вектора смещения \mathbf{u} упругого тела. Характерная размерная высота упругого слоя (ϵ_s) в тысячу раз меньше радиуса кривизны и других величин в области трения. Полная размерная высота зазора может быть записана следующим образом [27]:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_P + u_{\alpha_2} + u_{\alpha_2 B}, \quad (7)$$

где ε_P – начальная высота зазора, u_{α_2} – размерное смещение в направлении высоты зазора (вследствие действия температуры и давления) внешнего упругого поверхностного слоя, находящегося в контакте со смазкой, $u_{\alpha_2 B}$ – размерное магнитное смещение в направлении высоты зазора внешнего слоя, находящегося в контакте со смазкой. Система уравнений (1)–(7) включает следующие неизвестные: v_1, v_2, v_3 , т.е. трёхмерные компоненты вектора скорости смазки в трёх криволинейных ортогональных направлениях: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, p – гидродинамическое давление, T – температура смазки; T^* – размерная температура в поверхностном слое тела муфты, $u_{\alpha_1}, u_{\alpha_2}, u_{\alpha_3}$ – три компоненты вектора перемещения \mathbf{u} в упругом теле. Символ α_1 означает окружное направление в каждой системе координат, например φ в цилиндрических или сферических подшипниках. α_2 показывает направление высоты зазора, например r в цилиндрических или сферических подшипниках. α_3 обозначает продольное направление в каждой координатной системе, например z в цилиндрических подшипниках и ϑ в сферических. Следовательно, $(v_1, v_2, v_3) = (v_\varphi, v_r, v_z)$ в цилиндрических и $(v_1, v_2, v_3) = (v_\varphi, v_r, v_\vartheta)$ в сферических координатах. Обозначим R_1 – радиус кривизны в направлении α_1 , R_3 – радиус кривизны в направлении α_3 или длина цилиндрического микроподшипника, $U = \omega R$ – линейная поверхностная размерная скорость в направлении α_1 , $L_R = R_3/R_1$, ε – средняя высота зазора и ω – угловая скорость цапфы подшипника.

1. Граничные условия

Течение смазки в зазоре подшипника возникает при вращении цилиндрической, сферической, конической или параболической цапфы. Муфта подшипника неподвижна. Следовательно, граничные условия для компонентов скорости смазки принимают вид [25]

$$v_1 = \omega h_1 \text{ при } \alpha_2 = 0, \quad v_1 = 0 \text{ при } \alpha_2 = \varepsilon_T, \quad (8)$$

$$v_2 = 0 \text{ при } \alpha_2 = 0, \quad v_2 = 0 \text{ при } \alpha_2 = \varepsilon_T, \quad (9)$$

$$v_3 = 0 \text{ при } \alpha_2 = 0, \quad v_3 = 0 \text{ при } \alpha_2 = \varepsilon_T, \quad (10)$$

где ε_T – высота зазора, h_1 – коэффициент Ляме. В цилиндрических (r, φ, z) и сферических (r, φ, ϑ) координатах компоненты скорости масла (v_1, v_2, v_3) имеют вид (v_φ, v_r, v_z) , $(v_\varphi, v_r, v_\vartheta)$ соответственно. Следовательно, условие (8) в цилиндрических $(h_1 = R)$ и сферических $(h_1 = R \sin \vartheta_1)$ координатах принимает следующий вид: $v_\varphi = \omega R$ при $\alpha_2 = 0$, $v_\varphi = 0$ при $\alpha_2 = \varepsilon_T$ и $v_\varphi = \omega R \sin \vartheta_1$ при $\alpha_2 = 0$, $v_\varphi = 0$ при $\alpha_2 = \varepsilon_T$ соответственно. R обозначает радиус цилиндрической или сферической цапфы, а ω – угловая скорость либо цилиндрической, либо сферической цапфы в окружном направлении.

Распределение температуры вдоль зазора подшипника на поверхности цапфы принимает постоянное значение f_c , в то время как на поверхности муфты оно имеет вид $f_p(\alpha_1, \alpha_3)$. Следовательно,

$$T(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = f_c \text{ при } \alpha_2 = 0, \quad T(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = f_p(\alpha_1, \alpha_3) \text{ при } \alpha_2 = \varepsilon_T. \quad (11)$$

Тепловой поток направлен от вращательной поверхности цапфы подшипника к смазке, следовательно, получим следующие граничные условия [25, 27]:

$$\kappa_s \frac{\partial T}{\partial \alpha_2} = -q_c \text{ при } \alpha_2 = 0. \quad (12)$$

Для свободного теплового обмена между цапфой и смазкой на основе закона Фурье тепловой поток может быть выражен как

$$q_c \equiv \nu \Delta f, \quad (13)$$

где ν – коэффициент теплопередачи, Δf – разность температур цапфы и окружающей масляной среды.

Средние величины полной толщины плёнки $E(\varepsilon_T)$ и функции давления $E(p)$ могут быть выражены с помощью оптимальной функции плотности распределения изменения зазора (f) и математического ожидания в следующем виде [30, 35]:

$$E(*) = \int_{-\infty}^{+\infty} (*) \times f(\delta_1) d\delta_1, \quad \sigma_s = \frac{c_1}{\sqrt{13}} = 0,375$$

$$f(\delta_1) \equiv \begin{cases} \left(1 - \frac{\delta_1^2}{c_1^2}\right)^5 & \text{при } -c_1 \leq \delta_1 \leq +c_1 \\ 0 & \text{при } |\delta_1| > c_1 \end{cases}, \quad (14)$$

где $c_1 = 1,353515$ – половина полного разброса случайной величины толщины тонкого слоя для бедренного сустава в норме, δ_1 – безразмерная случайная часть высоты зазора. Имеем $\delta = \varepsilon_0 \delta_1$ и $c = \varepsilon_0 c_1$, где ε_0 – характерная высота зазора. Безразмерная величина стандартного отклонения $\sigma_s = 0,37539$ была получена на основе расчётов реальной шероховатости поверхности микроподшипника.

2. Частные решения

Полагаем частный случай системы уравнений (1)–(3) в криволинейных координатах для установившегося течения переменной вязкости $\eta(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ с постоянным коэффициентом теплопроводности и ньютоновского течения без магнитных эффектов. Центробежными силами и конвективными ускорениями пренебрегаем.

Свойства смазки микроподшипника зависят от изменений динамической вязкости в тонком слое зазора.

Учитывая вращательное движение цапфы, имеем $h_1 = h_1(\alpha_3)$, $h_3 = h_3(\alpha_3)$. Решение системы частных уравнений (1)–(4) с граничными условиями (8)–(10) имеет следующий вид [27]:

$$v_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{1}{h_1} \frac{\partial p_1}{\partial \alpha_1} A_\eta + (1 - A_s) \omega h_1, \quad (15)$$

$$v_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{1}{h_3} \frac{\partial p_1}{\partial \alpha_3} A_\eta, \quad (16)$$

$$A_s(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \equiv \frac{\int_0^{\alpha_2} \frac{1}{\eta} d\alpha_2}{\int_0^{\varepsilon_T} \frac{1}{\eta} d\alpha_2}, \quad A_\eta(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \equiv \int_0^{\alpha_2} \frac{\alpha_2}{\eta} d\alpha_2 - A_s(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \int_0^{\varepsilon_T} \frac{\alpha_2}{\eta} d\alpha_2, \quad (17)$$

где $0 \leq \alpha_1 \leq 2\pi\theta_1$; $0 \leq \theta_1 \leq 1$; $b_m \leq \alpha_3 \leq b_s$; $0 \leq \alpha_2 \leq \varepsilon_T$, $\varepsilon_T = \varepsilon_T(\alpha_1, \alpha_3)$, $\eta(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$.

Решения уравнений неразрывности с граничными условиями (9), где $v_2 = 0$ для $\alpha_2 = 0$ имеют следующий вид [27, 29]:

$$v_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = - \int_0^{\alpha_2} \frac{1}{h_1} \frac{\partial v_1}{\partial \alpha_1} d\alpha_2 - \int_0^{\alpha_2} \frac{1}{h_1 h_3} \frac{\partial (h_1 v_3)}{\partial \alpha_3} d\alpha_2. \quad (18)$$

Подставляя решения (15), (16) в (18), рассчитаем ожидаемую величину обеих сторон уравнения при использовании оператора ожидания E . Накладывая второе граничное условие (9) на радиальную компоненту скорости смазки, т.е. $v_2 = 0$ при $\alpha_2 = \varepsilon_T$, нетрудно установить, какая функция давления p в криволинейных координатах $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ удовлетворяет следующему модифицированному стохастическому уравнению Рейнольдса [27, 29]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial \alpha_1} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta d\alpha_2 \right) \right] + \frac{1}{h_3} \frac{\partial}{\partial \alpha_3} \left[\frac{h_1}{h_3} \frac{\partial E(p)}{\partial \alpha_3} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta d\alpha_2 \right) \right] = \\ = \omega h_1 \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left[E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_s d\alpha_2 \right) - E(\varepsilon_T) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

где динамическая вязкость масла непостоянна в направлении высоты зазора, т.е. $\eta(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$.

Если динамическая вязкость масла постоянна в направлении высоты зазора, т.е. $\eta(\alpha_1, \alpha_3)$, то

$$A_s = \frac{\alpha_2}{\varepsilon_T} \equiv s, \quad \int_0^{\varepsilon_T} A_\eta d\alpha_2 = -\frac{\varepsilon_T^3}{12\eta}, \quad \int_0^{\varepsilon_T} A_s d\alpha_2 - \varepsilon_T = -\frac{1}{2}\varepsilon_T. \quad (20)$$

Следовательно, стохастическое уравнение Рейнольдса (19) принимает следующий вид:

$$\frac{1}{h_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \alpha_1} \right] + \frac{1}{h_3} \frac{\partial}{\partial \alpha_3} \left[\frac{h_1}{h_3} \frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \alpha_3} \right] = 6\omega h_1 \frac{\partial E(\varepsilon_T)}{\partial \alpha_1}. \quad (21)$$

Для цилиндрического подшипника имеем $\alpha_1 = \varphi$, $\alpha_2 = r$, $\alpha_3 = z$ и коэффициенты Ляме: $h_1 = R$, $h_3 = 1$, где R – радиус цапфы (рис. 5, а, б). В этом случае стохастическое уравнение Рейнольдса (19) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dr \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial z} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dr \right) \right] = \\ = \omega \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_s dr \right) - E(\varepsilon_T) \right], \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$A_s(r, \varphi, z) \equiv \frac{\int_0^r \frac{1}{\eta} dr}{\int_0^{\varepsilon_T} \frac{1}{\eta} dr}, \quad A_\eta(r, \varphi, z) \equiv \int_0^r r dr - A_s(r, \varphi, z) \int_0^{\varepsilon_T} \frac{r}{\eta} dr, \quad \eta = \eta(r, \varphi, z). \quad (23)$$

Если динамическая вязкость жидкости постоянна в направлении высоты зазора, т.е. $\eta(\varphi, z)$, то, преобразуя уравнение (21), получаем

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial z} \right] = 6\omega \frac{\partial E(\varepsilon_T)}{\partial \varphi}, \quad (24)$$

где $p(\varphi, z)$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $-b_d \leq z \leq b_d$, $\varepsilon_T = \varepsilon_T(\varphi, z)$, $2b_d$ – длина подшипника.

Уравнение (22) описывает функцию давления $p(\varphi, z)$ в цилиндрическом микроподшипнике или в цилиндрическом коленном суставе, изображённом на рис. 1, а, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора приняты во внимание. Уравнение (24) описывает функцию давления в цилиндрическом микроподшипнике, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора не учитываются.

Для сферического подшипника имеем $\alpha_1 = \varphi$, $\alpha_2 = r$, $\alpha_3 = \vartheta$, коэффициенты Ляме – $h_1 = R \sin \vartheta_1$, $h_3 = 1$, где R – радиус сферы (рис. 5, в). В этом случае размерная функция давления $p(\varphi, \vartheta)$ в сферических координатах (φ, ϑ) удовлетворяет модифицированному уравнению Рейнольдса (19) в виде [29]

$$\begin{aligned} \frac{1}{R^2 \sin \vartheta_1} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dr \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[(\sin \vartheta_1) \frac{\partial E(p)}{\partial \vartheta} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dr \right) \right] = \\ = \omega \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_s dr \right) - E(\varepsilon_T) \right] (\sin \vartheta_1) \end{aligned} \quad (25)$$

при $\eta = \eta(\varphi, r, \vartheta)$, $A_s(r, \varphi, \vartheta)$, $A_\eta(r, \varphi, \vartheta)$, $0 \leq r \leq \varepsilon_T$, $0 \leq \varphi < 2\pi\theta_1$, $0 \leq \theta_1 < 1$, $R\pi/8 \leq \vartheta \leq R\pi/2$. Тогда уравнение (21) принимает вид

$$\frac{1}{R^2 \sin \vartheta_1} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{E(\varepsilon_{T1}^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \vartheta} \sin \vartheta_1 \right] = 6\omega \frac{\partial E(\varepsilon_{T1})}{\partial \varphi} \sin \vartheta_1 \quad (26)$$

при $\eta = \eta(\varphi, \vartheta)$, $0 \leq \varphi < 2\pi\theta_1$, $0 \leq \theta_1 < 1$, $R\pi/8 \leq \vartheta \leq R\pi/2$, $\vartheta = R\vartheta_1$.

Уравнение (25) описывает функцию давления $p(\varphi, \vartheta)$ в сферическом микроподшипнике в случае, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора принимаются в рассмотрение. Уравнение (26) описывает функцию давления в сферическом микроподшипнике в случае, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора не учитываются.

Для конического подшипника имеем $\alpha_1 = \varphi$, $\alpha_2 = y_c$, $\alpha_3 = x_c$. Коэффициенты Ляме $h_1 = R + x_c \cos \gamma$, $h_3 = 1$, где γ – угол между конической поверхностью и плоскостью поперечного сечения цапфы, b_c – длина образующей конуса, R – радиус цапфы (рис. 5, г). В этом случае функция давления $p(\varphi, x_c)$ в конических координатах (φ, y_c, x_c) удовлетворяет модифицированному уравнению Рейнольдса (19) в виде

$$\frac{1}{R + x_c \cos \gamma} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dy_c \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_c} \left[(R + x_c \cos \gamma) \frac{\partial E(p)}{\partial x_c} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dy_c \right) \right] =$$

$$= \omega (R + x_c \cos \gamma) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_s dy_c \right) - E(\varepsilon_T) \right] \quad (27)$$

при $\eta = \eta(\varphi, y_c, x_c)$, $A_s(\varphi, y_c, x_c)$, $A_\eta(\varphi, y_c, x_c)$, где $0 \leq y_c \leq \varepsilon_T$, $0 \leq \varphi < 2\pi\theta_1$, $0 \leq \theta_1 < 1$, $-b_c \leq x_c \leq b_c$. Уравнение (21) примет вид

$$\frac{1}{X_c} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial x_c} \left[\frac{X_c E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial x_c} \right] = 6\omega X_c \frac{\partial E(\varepsilon_T)}{\partial \varphi} \quad (28)$$

при $\eta = \eta(\varphi, x_c)$, $X_c = R + x_c \cos \gamma$, где $0 \leq \varphi < 2\pi\theta_1$, $0 \leq \theta_1 < 1$, $-b_c \leq x_c \leq b_c$.

Уравнение (27) описывает функцию давления $p(\varphi, x_c)$ в коническом микроподшипнике, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора приняты в рассмотрение. Уравнение (28) описывает функцию давления $p(\varphi, x_c)$ в коническом микроподшипнике в случае, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора не учитываются.

Для параболического подшипника имеем $\alpha_1 = \varphi$, $\alpha_2 = y_p$, $\alpha_3 = \zeta_p$. В работе учитывается немонотонная образующая цапфы в направлении длины. Для параболического подшипника коэффициенты Ляме [29]

$$h_1 = a \cos^2(\Lambda_{p1} \zeta_{p1}), \quad h_3 = \sqrt{1 + 4(\Lambda_{p1} / L_{R1})^2 \sin^2(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})} \cos(\Lambda_{p1} \zeta_{p1}), \quad (29)$$

$$\Lambda_{p1} \equiv \sqrt{\frac{a - a_1}{a}}, \quad L_{R1} \equiv \frac{b_p}{a}, \quad \zeta_{p1} = \zeta_p / b_p,$$

где a – наибольший радиус параболической цапфы; a_1 – наименьший радиус параболической цапфы, $2b_p$ – длина подшипника (рис. 5, д). В этом случае функция давления $p(\varphi, \zeta_p)$ в параболических координатах (φ, y_p, ζ_p) удовлетворяет модифицированному уравнению Рейнольдса в виде [29]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dy_p \right) \right] + \\ & + \frac{\cos(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{p1} / L_{R1})^2 \sin^2(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}} \frac{\partial}{\partial \zeta_p} \left[\frac{\cos(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{p1} / L_{R1})^2 \sin^2(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}} \frac{\partial E(p)}{\partial \zeta_p} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dy_p \right) \right] = \\ & = \omega a^2 \cos^4(\Lambda_{p1} \zeta_{p1}) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_s dy_p \right) - E(\varepsilon_T) \right], \quad (30) \end{aligned}$$

где $\eta = \eta(\varphi, y_p, \zeta_p)$, $A_s(\varphi, y_p, \zeta_p)$, $A_\eta(\varphi, y_p, \zeta_p)$, $0 \leq y_p \leq \varepsilon_T$. Уравнение (21) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} \right] + \\ & + \frac{\cos(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{p1} / L_{R1})^2 \sin^2(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}} \frac{\partial}{\partial \zeta_p} \left[\frac{\cos(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{p1} / L_{R1})^2 \sin^2(\Lambda_{p1} \zeta_{p1})}} \frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \zeta_p} \right] = \end{aligned}$$

$$= 6a^2 \frac{\partial E(\varepsilon_T)}{\partial \varphi} \cos^4(\Lambda_{p1} \zeta_{p1}), \quad |\zeta_{p1}| \leq \frac{1}{\Lambda_{p1}} \arccos \sqrt{\frac{a_1}{a}} \quad (31)$$

при $\eta = \eta(\varphi, \zeta_p)$, где $0 \leq \varphi < 2\pi\theta_1$, $0 \leq \theta_1 < 1$, $\zeta_{p1} = \zeta_p/b_p$, $-b_p \leq \zeta_p \leq b_p$.

Уравнение (30) описывает функцию давления $p(\varphi, \zeta_p)$ в параболическом микроподшипнике в случае, если изменение вязкости масла в направлении высоты зазора приняты в рассмотрение. Уравнение (31) описывает функцию давления $p(\varphi, \zeta_p)$ в коническом микроподшипнике в случае, если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора не учитываются. Параболические микроподшипники изображены на рис. 3.

Для гиперболического подшипника имеем $\alpha_1 = \varphi$, $\alpha_2 = y_h$, $\alpha_3 = \zeta_h$. В работе учитывается немонотонная образующая цапфы в направлении длины. Для гиперболического подшипника коэффициенты Ляме [29]

$$h_1 = a \cos^{-2}(\Lambda_{h1} \zeta_{h1}), \quad h_3 = \sqrt{1 + 4(\Lambda_{h1}/L_{R1})^2 \tan^2(\Lambda_{h1} \zeta_{h1})} \cos^{-2}(\Lambda_{h1} \zeta_{h1}), \quad (32)$$

$$\Lambda_{h1} \equiv \sqrt{\frac{a_1 - a}{a}}, \quad L_{R1} \equiv \frac{b_h}{a}, \quad \zeta_{h1} = \zeta_h/b_h,$$

где a_1 – наибольший радиус параболической цапфы, a – наименьший радиус параболической цапфы, $2b_p$ – длина подшипника. В этом случае функция давления p в параболических координатах (φ, y_h, ζ_h) удовлетворяет модифицированному уравнению Рейнольдса (19) в виде

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dy_h \right) \right] + \\ & + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{h1}/L_{R1})^2 \tan^2(\Lambda_{h1} \zeta_{h1})}} \frac{\partial}{\partial \zeta_h} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{h1}/L_{R1})^2 \tan^2(\Lambda_{h1} \zeta_{h1})}} \frac{\partial E(p)}{\partial \zeta_h} E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_\eta dy_h \right) \right] = \\ & = \omega a^2 \cos^{-4}(\Lambda_{h1} \zeta_{h1}) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E \left(\int_0^{\varepsilon_T} A_s dy_h \right) - E(\varepsilon_T) \right] \end{aligned} \quad (33)$$

при $\eta = \eta(\varphi, y_h, \zeta_h)$, $A_s(\varphi, y_h, \zeta_h)$, $A_\eta(\varphi, y_h, \zeta_h)$, $0 \leq y_h \leq \varepsilon_T$. Уравнение (21) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \varphi} \right] + \\ & + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{h1}/L_{R1})^2 \tan^2(\Lambda_{h1} \zeta_{h1})}} \frac{\partial}{\partial \zeta_h} \left[\frac{\cos(\Lambda_{h1} \zeta_{h1})}{\sqrt{1 + 4(\Lambda_{h1}/L_{R1})^2 \tan^2(\Lambda_{h1} \zeta_{h1})}} \frac{E(\varepsilon_T^3)}{\eta} \frac{\partial E(p)}{\partial \zeta_h} \right] = \\ & = 6a^2 \frac{\partial E(\varepsilon_T)}{\partial \varphi} \cos^{-4}(\Lambda_{h1} \zeta_{h1}), \quad |\zeta_{h1}| \leq \frac{1}{\Lambda_{h1}} \arccos \sqrt{\frac{a}{a_1}} \end{aligned} \quad (34)$$

при $\eta = \eta(\varphi, \zeta_h)$, где $0 \leq \varphi < 2\pi\theta_1$, $0 \leq \theta_1 < 1$, $\zeta_{h1} = \zeta_h/b_h$, $-b_h \leq \zeta_h \leq b_h$.

Уравнение (33) описывает функцию давления $p(\varphi, \zeta_h)$ в гиперболическом микроподшипнике или в гиперболическом локтевом суставе в случае, если изменение вязкости масла в направлении высоты зазора приняты в рассмотрение. Уравнение (34) описывает функцию давления $p(\varphi, \zeta_h)$ в гиперболическом микроподшипнике в случае,

если изменения вязкости масла в направлении высоты зазора не учитываются. Величина зазора ε_T зависит от переменных α_1, α_3 и состоит из двух частей [35]:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{Ts}(\alpha_1, \alpha_3) + \delta(\alpha_1, \alpha_3, \xi), \quad (35)$$

где ε_{Ts} обозначает полную номинальную гладкую часть геометрической формы тонкого жидкого слоя. Это слагаемое учитывает поправки к величине зазора, вызванные гиперупругими деформациями; δ (обозначает случайную часть зазора) – изменение величины, вызванное вибрациями, динамическими нагрузками и шероховатостью поверхности, измеряемой от номинального среднего уровня; ξ – случайную переменную, характеризующую расположение шероховатости. Используя безразмерную функцию вероятности (14), после вычислений получим [35]:

$$E(\varepsilon_T) = \int_{-c_1}^{+c_1} (\varepsilon_{Ts} + \varepsilon_o \delta_1) f(\delta_1) d\delta_1 = \varepsilon_{Ts} \quad (36)$$

$$E(\varepsilon_T^3) = \int_{-c_1}^{+c_1} (\varepsilon_{Ts} + \varepsilon_o \delta_1)^3 f(\delta_1) d\delta_1 = \varepsilon_{Ts}^3 + 3\sigma_s^2 \varepsilon_{Ts}.$$

3. Численные результаты

Распределения давления в цилиндрических микро- и биоподшипниках скольжения найдены в области смазывания Ω_d , которая определяется следующими неравенствами: $0 \leq \varphi \leq \varphi_k, -b_d \leq z \leq b_d$, где $2b_d$ – длина микроподшипника.

Решение уравнения (24) найдено в программном пакете *Matlab 7.2* с использованием метода конечных разностей (рис. 6–8).

Величина зазора в цилиндрическом микро- и биоподшипнике

$$\varepsilon_T = \varepsilon(1 + \lambda_{cy} \cos \varphi), \quad (37)$$

где λ_{cy} – эксцентриситет в цилиндрическом микроподшипнике, ε – радиальный зазор в цилиндрическом микро- или биоподшипнике. На рис. 6 показано распределение давлений без учёта влияния магнитного поля и стохастических изменений. Положим радиус цапфы $R = 0,001$ м, отношение длина/радиус $L_{d1} = b_c/R = 1$, динамическая вязкость масла $\eta_0 = 0,03$ Па·с, угловая скорость $\omega = 565,5$ с⁻¹, $p_0 = 16,96$ МПа и эксцентриситеты $\lambda_{cy} = 0,4$; $\lambda_{cy} = 0,3$; $\lambda_{cy} = 0,2$. При граничных условиях Рейнольдса угловая координата края плёнки приобретает значения $\varphi_k = 3,658$ рад; $\varphi_k = 3,684$ рад; $\varphi_k = 3,704$ рад. Если величина эксцентриситета увеличивается от $\lambda_{cy} = 0,2$ до $\lambda_{cy} = 0,4$, то максимальное значение гидродинамического давления возрастает с 8,13 МПа до 21,73 МПа и полная нагрузка возрастает с 16,46 Н до 40,46 Н.

На рис. 7 показано распределение давления в зазоре цилиндрического микроподшипника, вызванное возмущением магнитного поля при безразмерном коэффициенте магнитной восприимчивости $\chi = 1,50$, безразмерном магнитном коэффициенте вязкости ферросмазки $\delta_{B1} = 0,20$ и магнитном числе $R_f = N_o B_o / p_0 = 0,50$. Используя граничные условия Рейнольдса, угловая координата края плёнки приобретает значения $\varphi_k = 3,654$ рад; $\varphi_k = 3,679$ рад; $\varphi_k = 3,698$ рад. Из расчётов видно, что поле магнитной индукции увеличивает нагрузку на микроподшипник минимум на 6%, а в некоторых случаях на 10%.

На рис. 8 представлено распределение давления в зазоре цилиндрического локтевого сустава (рис. 1, б). Положим радиус цилиндрической кости $R = 0,026$ м,

отношение длина/радиус $L_{d1} = 1,0$, динамическая вязкость синовиальной жидкости $\eta_0 = 0,15$ Па·с, угловая скорость $\omega = 1,0$ с⁻¹, среднее значение давления $p_0 = \omega\eta_0 R^2/\varepsilon^2 \approx 0,15$ МПа, эксцентриситет $\lambda_{cy} = 0,7$; $\lambda_{cy} = 0,8$; $\lambda_{cy} = 0,9$. При граничных условиях Рейнольдса угловая координата края плёнки принимает значения $\varphi_k = 3,400$ рад; $\varphi_k = 3,485$ рад; $\varphi_k = 3,540$ рад. Если величина эксцентриситета увеличивается от 0,7 до 0,9, то максимальное значение гидродинамического давления возрастает с 0,85 МПа до 5,43 МПа, и полная нагрузка возрастает с 824 Н до 3396 Н.

Распределения давления в конических микроподшипниках скольжения найдены в области смазывания Ω_c , которая определяется следующими неравенствами: $0 \leq \varphi \leq \varphi_k$, $-b_c \leq z \leq b_c$, где $2b_c$ – длина микроподшипника.

Решение уравнения (27) найдено в программном пакете *Matlab* 7.2 с использованием метода конечных разностей (рис. 9–11).

Величина зазора конических микро- и биоподшипников

$$\varepsilon_T = \varepsilon(1 + \lambda_c \cos \varphi) \sin^{-1} \gamma, \quad (38)$$

где λ_c – эксцентриситет конического микроподшипника, ε – радиальный зазор конического микро- и биоподшипника.

На рис. 9 представлены значения давлений в зазоре конического микроподшипника, угол между конической поверхностью и плоскостью поперечного сечения $\gamma = 70^\circ$. Влияния магнитных полей и стохастических изменений не учитываются. Положим минимальное значение конической цапфы подшипника $R = 0,001$ м, отношение длина/радиус $L_{c1} = b_c/R = 1,0$, динамическая вязкость жидкости $\eta_0 = 0,03$ Па·с, угловая скорость $\omega = 565,5$ с⁻¹, среднее значение давления $p_0 = \omega\eta_0 R^2/\varepsilon^2 \approx 16,96$ МПа, эксцентриситет $\lambda_c = 0,4$; $\lambda_c = 0,3$; $\lambda_c = 0,2$. При граничных условиях Рейнольдса угловая координата края плёнки приобретает значения $\varphi_k = 3,678$ рад; $\varphi_k = 3,705$ рад; $\varphi_k = 3,731$ рад. Если величина эксцентриситета увеличивается от 0,2 до 0,4, то максимальное значение гидродинамического давления возрастает с 7,07 МПа до 18,87 МПа. Полная нагрузка в направлении по оси y возрастает с 13,44 Н до 32,93 Н, а в направлении по оси z – с 4,89 Н до 11,98 Н.

На рис. 10 представлены значения давлений в зазоре конического микроподшипника, угол между конической поверхностью и плоскостью поперечного сечения $\gamma = 45^\circ$. Влияния магнитных полей и стохастических изменений не учитываются. Положим минимальное значение конической цапфы подшипника $R = 0,001$ м, отношение длина/радиус $L_{c1} = b_c/R = 1,0$, динамическая вязкость жидкости $\eta_0 = 0,03$ Па·с, угловая скорость $\omega = 565,5$ с⁻¹, среднее значение давления $p_0 = \omega\eta_0 R^2/\varepsilon^2 \approx 16,96$ МПа, эксцентриситет $\lambda_c = 0,4$; $\lambda_c = 0,3$; $\lambda_c = 0,2$. При граничных условиях Рейнольдса угловая координата края плёнки приобретает значения $\varphi_k = 3,770$ рад; $\varphi_k = 3,815$ рад; $\varphi_k = 3,855$ рад. Если величина эксцентриситета увеличивается от 0,2 до 0,4, то максимальное значение гидродинамического давления возрастает с 3,89 МПа до 10,31 МПа. Полная нагрузка в направлении осей y и z возрастает с 5,53 Н до 13,36 Н.

На рис. 11 представлены значения давлений в зазоре конического биоподшипника, угол между конической поверхностью и плоскостью поперечного сечения $\gamma = 70^\circ$. Влияния магнитных полей и стохастических изменений не учитываются. Положим минимальное значение конической кости: $R = 0,026$ м, отношение длина/радиус $L_{c1} = b_c/R = 1,0$, динамическая вязкость синовиальной жидкости $\eta_0 = 0,15$ Па·с, угловая скорость $\omega = 1,0$ с⁻¹, среднее значение давления $p_0 = \omega\eta_0 R^2/\varepsilon^2 \approx 0,15$ МПа, эксцентриситет $\lambda_c = 0,7$; $\lambda_c = 0,8$; $\lambda_c = 0,9$.

$R = 0,001$ [м], $L_{d1} = b_d/R=1$, $\eta_o = 0,03$ [Па·с], $\omega = 565,5$ [1/с], $p_o = 16,96$ [МПа], $B = 0$ [Тл]

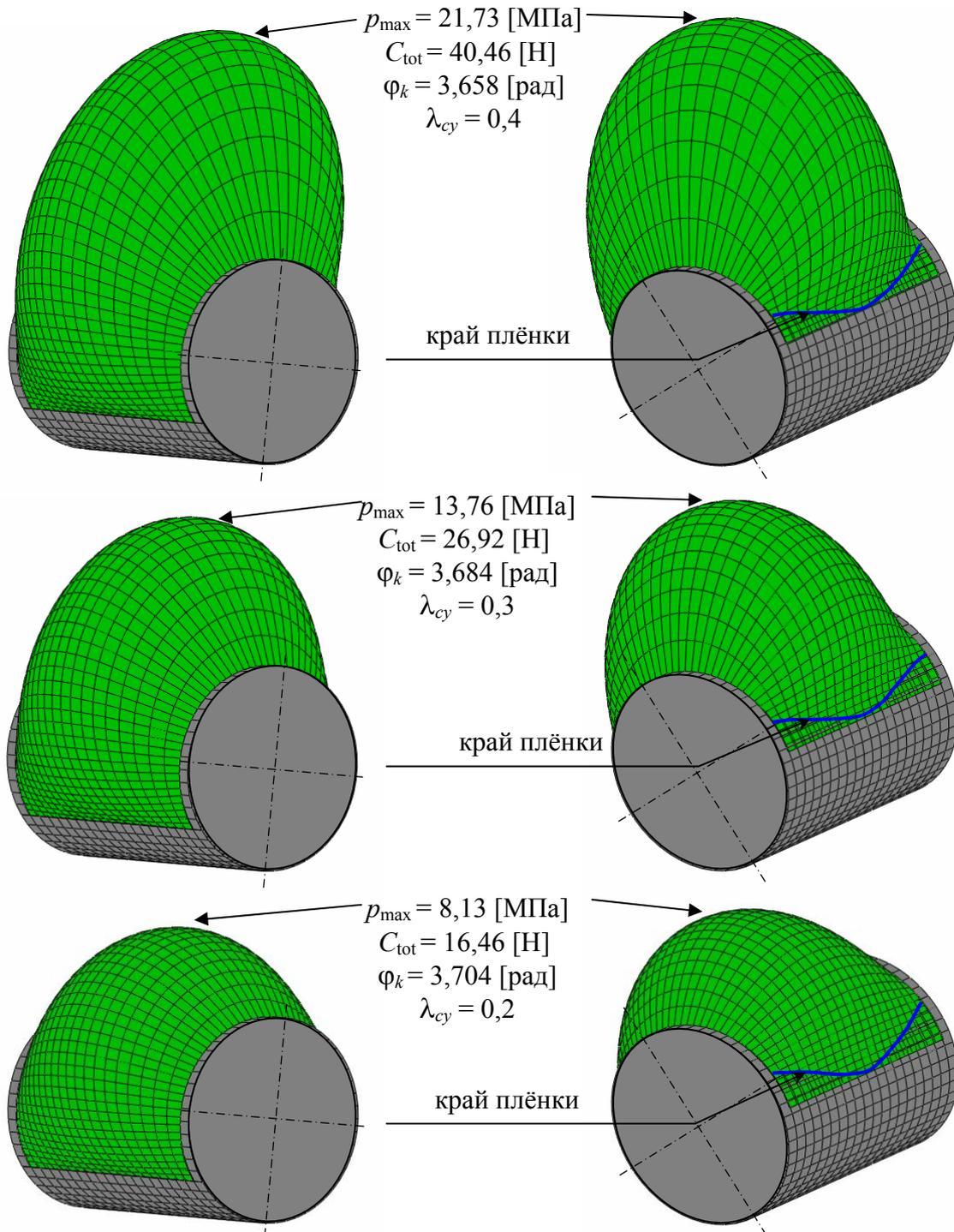


Рис. 6. Распределение напряжений в цилиндрических микроподшипниках, вызванных вращением в круговом направлении, без учёта влияния магнитного поля; начало плёнки – на виде слева, край плёнки – справа

$R = 0,001$ [м], $L_{d1} = b_d/R=1$, $\eta_o = 0,03$ [Па·с], $\omega = 565,5$ [1/с], $p_o = 16,96$ [МПа], $B \neq 0$ [Тл]

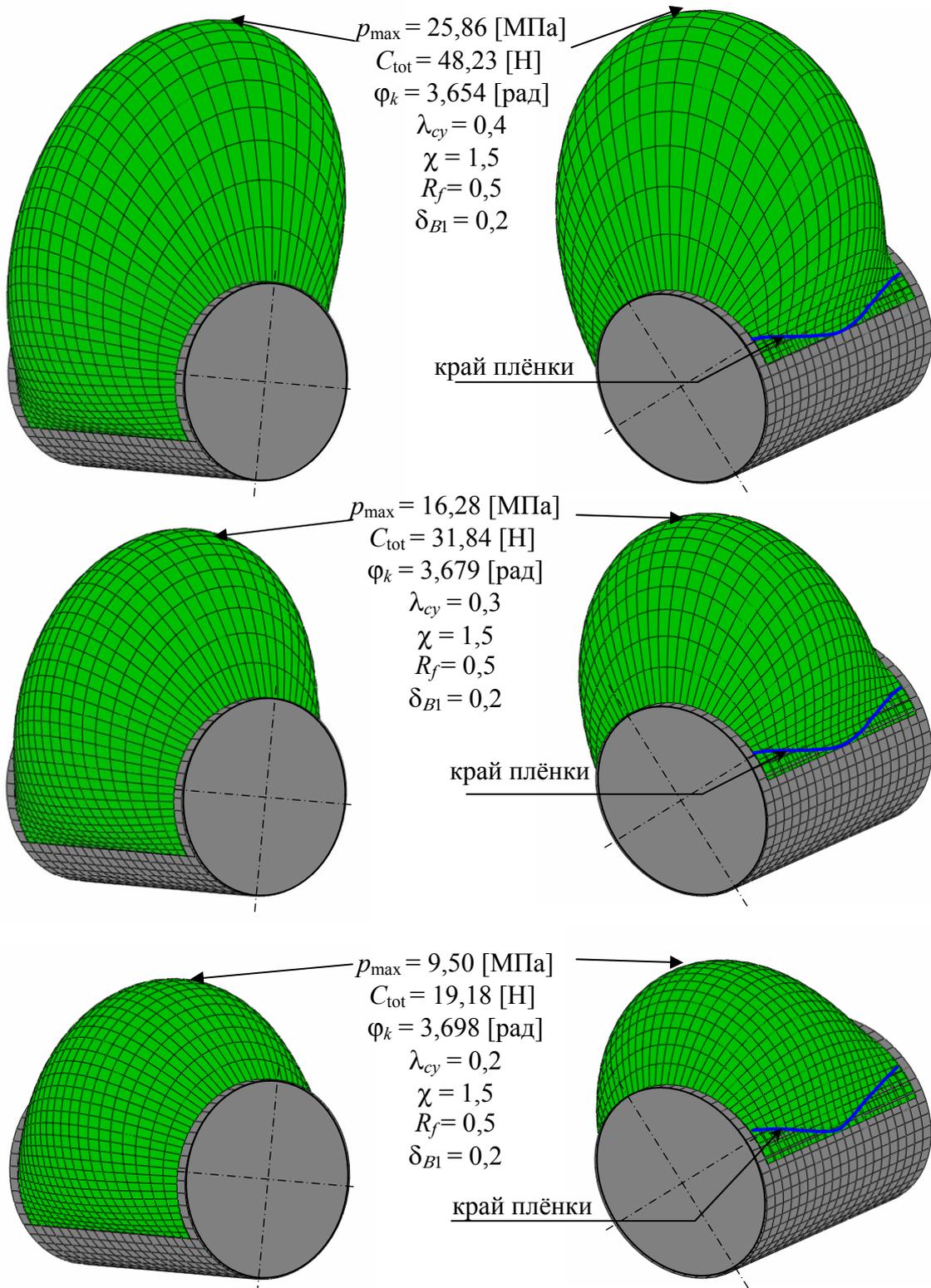


Рис. 7. Распределение давлений в цилиндрических микроподшипниках, вызванных вращением в круговом направлении, с учётом влияния магнитного поля; начало плёнки – на виде слева, край плёнки – справа

$R = 0,026$ [м], $L_{d1} = b_d/R = 1$, $\eta_0 = 0,15$ [Па·с], $\omega = 1,0$ [1/с], $p_0 = 0,15$ [МПа], $B = 0$ [Тл]

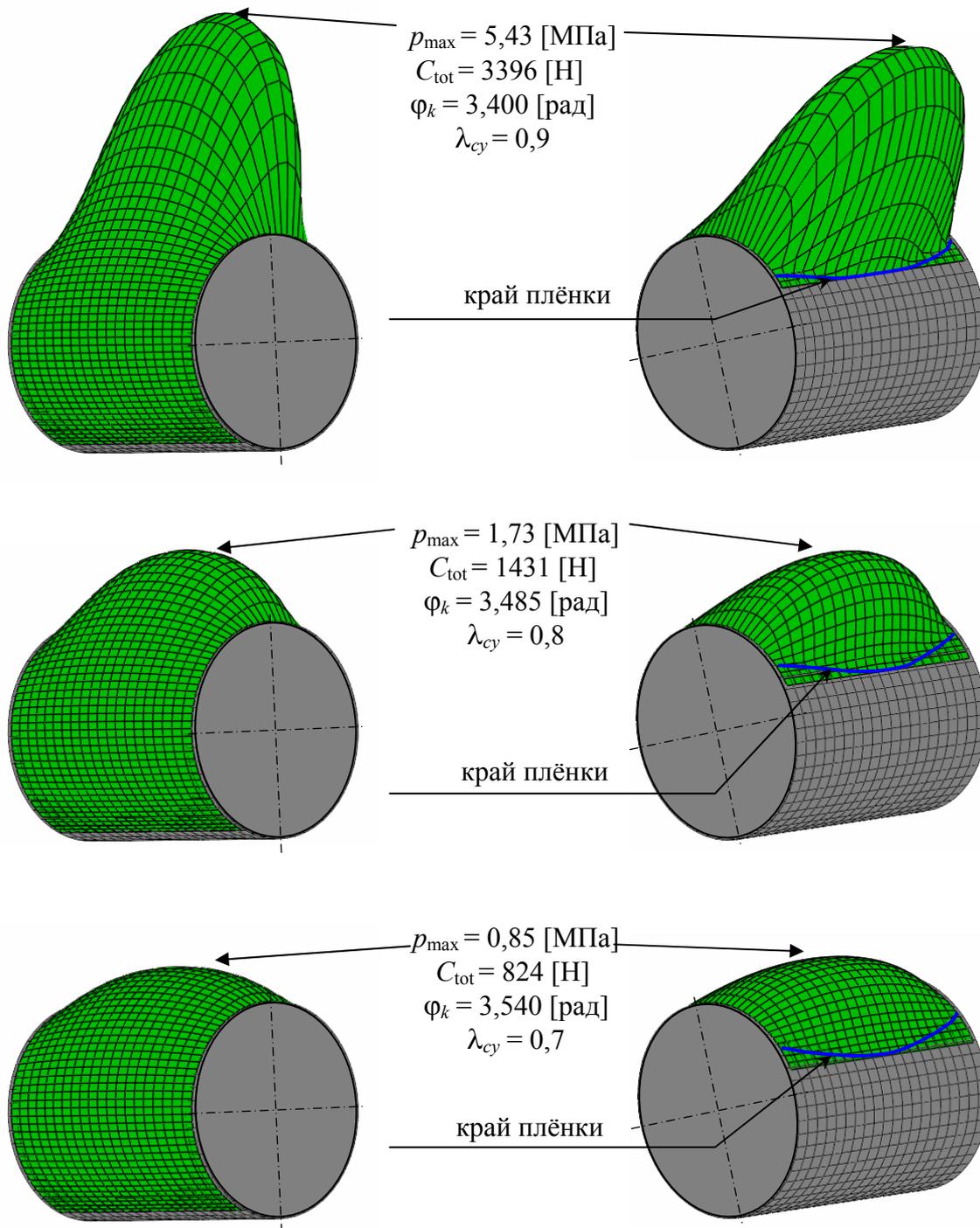


Рис. 8. Распределение давлений в цилиндрическом биоподшипнике (локтевой сустав человека), вызванных вращением в окружном направлении, без учёта влияния магнитного поля

$R = 0,001$ [м], $L_{c1} = b_c/R = 1$, $\eta_0 = 0,03$ [Па·с], $\omega = 565,5$ [1/с], $p_0 = 16,96$ [МПа], $B = 0$ [Тл]

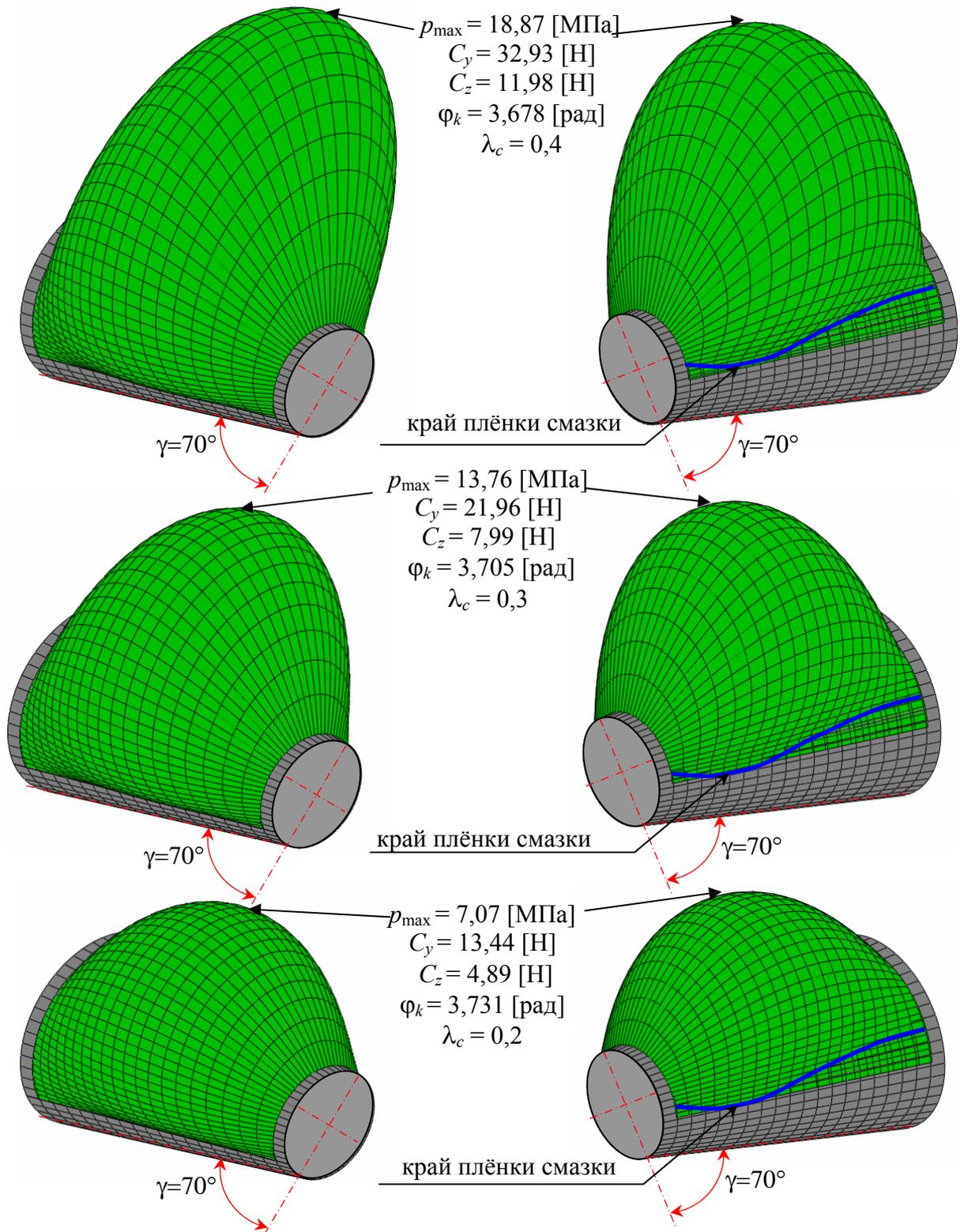


Рис. 9. Распределение давлений в конических микроподшипниках, вызванных вращением в круговом направлении, без учёта влияния магнитного поля, угол наклона конуса $\gamma = 70^\circ$; начало плёнки – на виде слева, край плёнки – справа

$R = 0,001$ [м], $L_{c1} = b_c/R = 1$, $\eta_0 = 0,03$ [Па·с], $\omega = 565,5$ [1/с], $p_0 = 16,96$ [МПа], $B = 0$ [Тл]

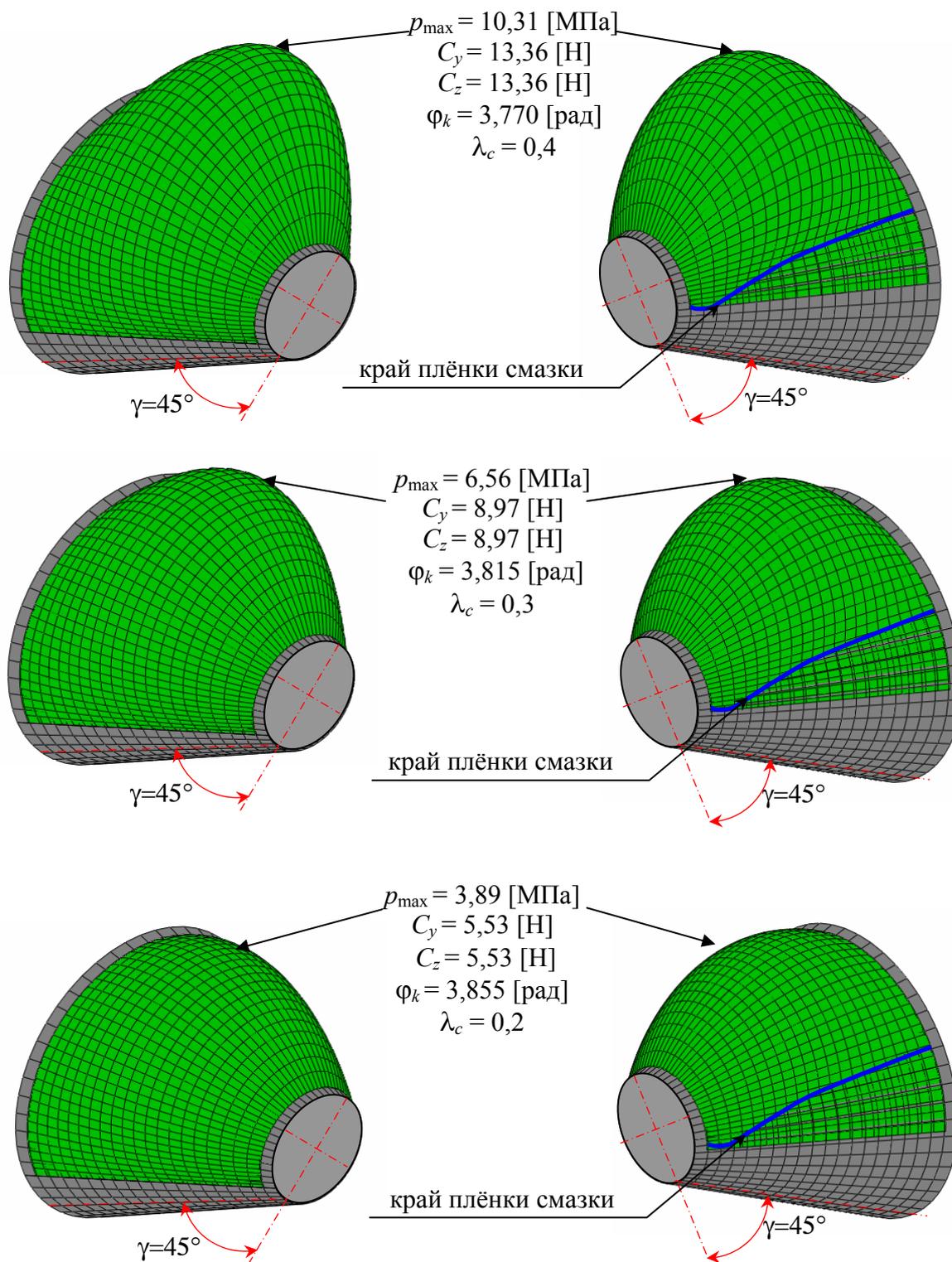


Рис. 10. Распределение давлений в конических микроподшипниках, вызванных вращением в круговом направлении, без учёта влияния магнитного поля, угол наклона конуса $\gamma = 45^\circ$. начало плёнки – на виде слева, край плёнки – справа

$R = 0,026$ [м], $L_{c1} = b_c/R = 1$, $\eta_0 = 0,15$ [Па·с], $\omega = 1,0$ [1/с], $p_0 = 0,15$ [МПа], $B = 0$ [Тл]

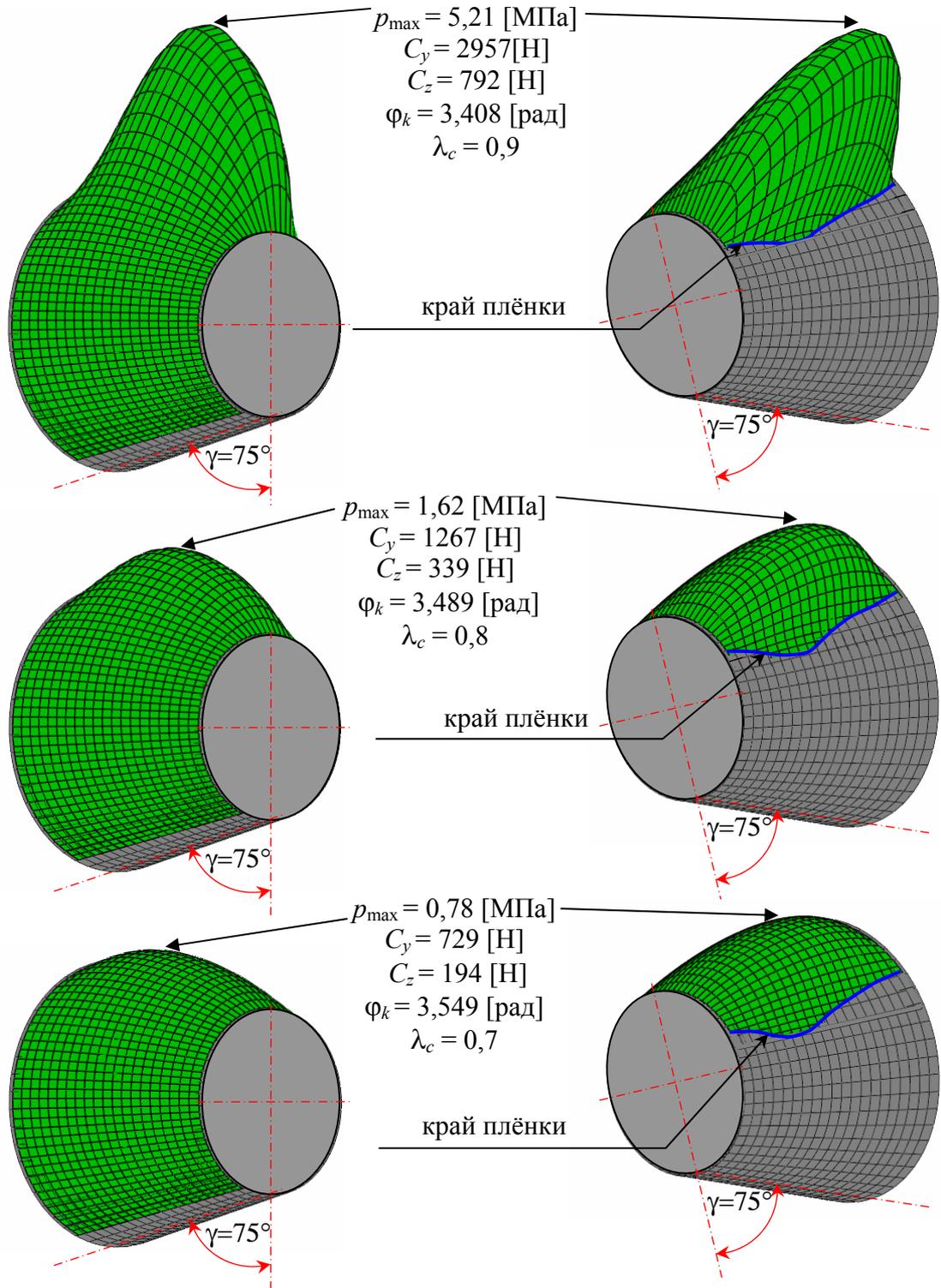


Рис. 11. Распределение давлений в конических биоподшипниках, вызванных вращением в круговом направлении, без учёта влияния магнитного поля

При граничных условиях Рейнольдса угловая координата края плёнки приобретает значения $\varphi_k = 3,408$ рад; $\varphi_k = 3,489$ рад; $\varphi_k = 3,549$ рад. Если величина эксцентриситета увеличивается от 0,7 до 0,9, то максимальное значение гидродинамического давления возрастает с 0,78 МПа до 5,21 МПа и полная нагрузка в направлении y возрастает с 729 Н до 2957 Н, а в направлении z – с 194 Н до 729 Н.

Выводы

5.1. Влияние поля магнитной индукции увеличивает давление и нагрузку в цилиндрических микроподшипниках и суставах человека.

5.2. При увеличении угла γ между конической поверхностью и плоскостью поперечного сечения конических микро- и биоподшипников нагрузка в поперечном направлении возрастает, а в продольном – убывает.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Шестой рамочной программы Евросоюза в рамках контракта МTKD–СТ–2004–2008–517226 (проект передачи знаний имени Марии Кюри).

Список литературы

1. *Asada, T.* Hydrodynamic bearings and applied technologies / T. Asada et al. // *Matsushita Tech.* – 2000. – Vol. 46, No. 1. – P. 54–76.
2. *Chizhik, S.A.* Tuning fork energy dissipation nanotribometry as option of AFM / S.A. Chizhik, H.-S. Ahn, V.V. Chikunov, A.A. Suslov // *Scanning Probe Microscopy.* – 2004. – P. 119–121.
3. *Chen, S.X.* Design of fluid bearing spindle motors with controlled unbalanced magnetic forces / S.X. Chen, Q.D. Zhang // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 1997. – Vol. 33, No. 5. – P. 2638–2640.
4. *Chizhik, S.A.* Micromechanical properties of elastic polymeric materials as probed by scanning force microscopy / S.A. Chizhik, Z. Huang, V.V. Gorbunov, N.K. Myshkin, V.V. Tsukruk // *Langmuir.* – 1998. – Vol. 14. – P. 2606–2609.
5. *Chun-Yuh, H.* Experimental verification of the roles of intrinsic matrix viscoelasticity and tension-compression nonlinearity in the biphasic response of cartilage / H. Chun-Yuh, M.A. Soltz, M. Kopacz, V.C. Mow, G.A. Ateshian // *Journal of Biomechanical Engineering.* – 2005. – Vol. 125, No. 1. – P. 84–93.
6. *Frechette, L.G.* An electrostatic induction micromotor supported on gas-lubricated bearing / L.G. Frechette, S.F. Nagle, R. Ghodssi, S.D. Umans, M.A. Schmidt, J.H. Lang // *Journal MEMS.* – 2005. – Vol. 14. – P. 141–152.
7. *Fung, Y.C.* Biomechanics of motion, flow, stress and growth / Y.C. Fung. – New York, Hong Kong: Springer-Verlag, 1993.
8. *Fung, Y.C.* The meaning of constitutive equations in biomechanics, mechanical properties of living tissues / Y.C. Fung. – Berlin: Springer – Verlag, 1993.
9. *Fyhrie, D.P.* Polymer dynamics as a mechanistic model for the flow-independent viscoelasticity of cartilage / D.P. Fyhrie, J.R. Barone // *Transactions of the ASME.* – 2003. – Vol. 125. – P. 578–584.
10. *Gad-el-Hak, M.* The MEMS handbook / M. Gad-el-Hak. – CRC Press. – 2001.
11. *Ныс, А.* The morphology and selected biological properties of articular cartilage / А. Ныс, А. Osiecka-Iwan, J. Józwiak, S. Moskalewski // *Ortopedia Traumatologia Rehabilitacja.* – 2001. – Vol. 3, No. 2. – P. 151–162.
12. *Jang, G.H.* Dynamic analysis of a HDD spindle system with FDBs due to the bearing width and asymmetric grooves of journal bearing / G.H. Jang, S.H. Lee, H.W. Kim, C.S. Kim // *Microsystem Technologies.* – 2005. – Vol. 11. – P. 499–505.

13. *Jang, G.H.* Finite element model analysis of an HDD considering the flexibility of spinning disc-spindle, head-suspension-actuator and supporting structure / G.H. Jang, C.H. Seo, S.H. Lee // *Microsystem Technologies*. – 2007. – Vol. 13. – P. 837–847.
14. *Jang, G.H.* Investigation of the electromechanical variables of the spindle motor and the actuator of HDD due to positioning and the free fall / G.H. Jang, S.J. Park, C.S. Kim, J.H. Han // *Microsystem Technologies*. – 2007. – Vol. 13. – P. 797–809.
15. *Liu, L.X.* Effects of bearing stiffness anisotropy on hydrostatic micro gas journal bearing dynamic behavior / L.X. Liu, Z.S. Spakovsky // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2007. – Vol. 129. – P. 177–184.
16. *Lin, J.R.* The Effects of couple stresses in the squeeze film behaviour between isotropic rough rectangular plates / J.R. Lin // *Journal of Applied Mechanical Engineering*. – 2001. – Vol. 6, No. 4. – P. 1007–1024.
17. *Kino-Oka, M.* A kinetic modeling of chondrocyte culture for manufacture of tissue-engineered cartilage / M. Kino-Oka, Y. Maeda, T. Yamamoto, K. Sugawara, M. Taya // *J. of Bioscience and Bioengineering*. – 2005. – Vol. 99, No. 3. – P. 197–207.
18. *Minuth, W.W.* Tissue engineering from cell biology to artificial organs / W.W. Minuth, R. Strehl, K. Schumacher. – Weinheim: Wiley–VCH, 2005.
19. *Nagel-Heyer, S.* Bioreactor cultivation of three-dimensional cartilage-carrier-constructs / S. Nagel-Heyer, Ch. Geopfert, F. Feyerabend, J.P. Peterson, P. Adamietz, N.M. Meenen, R. Pörtner // *Springer–Verlag Bioprocess Biosyst. Eng.* – 2005. – Vol. 27. – P. 273–280.
20. *Obradovic, B.* Gas exchange is essential for bioreactor cultivation of tissue engineered cartilage / B. Obradovic, L.R. Carrier, B. Vunjak-Novakovic, L.E. Freed // *Biotech. Bioeng.* – 1999. – Vol. 63. – P. 197–205.
21. *Shasholko, D.I.* Joint analysis of topography and contrast SPM images with the software package surface view / D.I. Shasholko, A.A. Suslov, S.A. Chizhik // *Scanning Probe Microscopy*. – 2005. – P. 17–30.
22. *Suckosky, P.H.* Flow characterization and modeling of cartilage development in a spinner-flask bioreactor / P.H. Suckosky: PhD thesis. – Georgia Institute of Technology, 2005.
23. *Stockwell, R.A.* Biology of cartilage cells / R.A. Stockwell. – Cambridge University Press. – 1979.
24. *Trickey, T.R.* Viscoelastic properties of chondrocytes from normal and osteoarthritic human cartilage / T.R. Trickey, M. Lee, T. Guilak // *Journal Orthop. Res.* – 2000. – Vol. 18. – P. 891–898.
25. *Truckenbrodt, E.* Strömungsmechanik / E. Truckenbrodt. – New York, Berlin: Springer–Verlag, 1986.
26. *Truesdell, C.* A First Course in Rational Continuum Mechanics / C. Truesdell. – Baltimore: John Hopkins University, 1972.
27. *Wierzcholski, K.* Random changes of temperature in slide bearing gap / K. Wierzcholski // *Proceedings of International Congress Thermal Stress IUTAM*. – Vienna, Austria. – 2005. – P. 449–452.
28. *Wierzcholski, K.* Boundary conditions on the bio cell surfaces for nano-lubrication of micro-bearings / K. Wierzcholski // *J. of Kones Powertrain and Transport*. – 2007. – Vol. 14, No. 3. – P. 603–609.
29. *Wierzcholski, K.* Principles of human joint lubrication / K. Wierzcholski // *Bio and slide bearings; their lubrication by non-Newtonian fluids and application in non-conventional systems I, II*. – Gdąnsk University of Technology, 2006.
30. *Wierzcholski, K.* Hip joint lubrication after injury for stochastic description with optimum standard deviation / K. Wierzcholski // *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. – 2005. – Vol. 7, No. 2. – P. 13–40.
31. *Wierzcholski, K.* Lubrication of deformed hip joint / K. Wierzcholski // *International Conference System Modelling and Control*. – Zakopane. – 2002. – P. 1–8.
32. *Wierzcholski, K.* Experimental measurements of friction forces on the tissue in probabilistic view / K. Wierzcholski // *J. of Kones Powertrain and Transport*. – 2006. – Vol. 13, No. 3. – P. 427–435.
33. *Wierzcholski, K.* Research methods of tribological parameters in intelligent bioreactor / K. Wierzcholski, A. Miszczak // *Tribologia*. – 2007. – Vol. 3, No. 213. – P. 355–368 (*in Polish*).
34. *Wierzcholski, K.* Project of determination of tribological parameters of cartilage cells in intelligent bioreactor / K. Wierzcholski, A. Miszczak // *Tribologia*. – 2007. – Vol. 3, No. 213. – P. 339–353 (*in Polish*).
35. *Wierzcholski, K.* Tribology of cartilage cells in the intelligent bioreactor / K. Wierzcholski // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2007. – Vol. 11, No. 2. – P. 47–61.
36. *Wierzcholski, K.* Tribological properties of tissue in biobearings and bioreactors as the histotribological parameters / K. Wierzcholski, M. Ghaemi // *Exploitation Problems of Machines Polish Academy of Sciences*. – 2005. – No. 3. – P. 17–30.
37. *Wierzcholski, K.* Flow on the bio cell surfaces as an element of the microbearing tribology / K. Wierzcholski, A. Miszczak // *J. of Kones Powertrain and Transport*. – 2007. – Vol. 14, No. 2. – P. 553–560.
38. www.oce.pg.gda.pl/biobearing/?path=8, 2006.
39. *Xu, L.M.* Modal testing and finite element modeling of subsystem in hard disc driver / L.M. Xu, N. Guo //

- Mech. Syst. Signal Process. – 2003. – Vol. 17, No. 4. – P. 747–764.
40. *Lee, Y.B.* Numerical prediction of slip flow effect on gas-lubricated journal bearing for MEMS/MST- based micro-rotating machinery / Y.B. Lee, H.D. Kwak, C.H. Kim, N.S. Lee // Tribology International. – 2005. – Vol. 38. – P. 89–96.
 41. *Yoon, W.* Dynamic characteristics of a coupled journal and thrust hydrodynamic bearing in a HDD spindle system due to its groove location / W. Yoon, G.H. Jang // Microsystem Technologies. – 2002. – Vol. 8. – P. 261–270.
 42. *Yu, X.* Bioreactor based bone tissue engineering the influence of dynamic flow on osteoblast phenotypic expression and matrix mineralization / X. Yu, E.A. Botchway, E.M. Levine, S.R. Pollack, C.T. Laurencin // Proc. Natl. Acas. Sci. USA. – 2004. – Vol. 101. – P. 11203–11208.

HYDRODYNAMIC PRESSURE IN MICRO- AND BIOBEARING GAP

K. Wierzcholski (Gdynia, Poland)

The topic of presented paper deals with determination of the pressure distributions in a thin layer of non-Newtonian, visco-elastic lubricant inside the slide microbearing which has a curvilinear orthogonal form (spherical, conical, cylindrical, parabolic, hyperbolic). Non-isothermal, unsteady and random flow conditions and thermal deformations of biobearing, microbearing, and its sleeve are taken into account. A general analysis of the influence of unsteady non isothermal flow of visco-elastic liquid in magnetic field on the pressure, within curvilinear microbearing gaps between two rotational surfaces in random conditions will be presented in this paper. Lubrication of microbearing surfaces is characterized by various geometries form and non-Newtonian lubricants.

Key words: tribology, microbearing, biobearing, curvilinear bearing shapes.

Получено 3 января 2008