

УДК 621.91.02:621

Н. А. Бондаренко, докт. техн. наук¹; **А. Н. Жуковский**, канд. физ.-мат. наук²;
В. А. Мечник, канд. техн. наук¹; **А. В. Панов**, **А. О. Казьмин**, инженеры¹.

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

²Институт математики НАН Украины, г. Киев, Украина

ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА С ПОКРЫТИЕМ

The axisymmetric problem of thermoelasticity for spherical diamond bit in hole drilling conditions is solved. The peculiarity of the problem is in that stresses themselves depend on temperature nonlinearly but the equilibrium conditions include the components of volume force vector. The problem solution is represented in terms of Legendre polynomials and spherical functions which enable to define the components of quasi-static thermoelastic stresses at a random point of time and to analyze the main factors influencing on kinetics of the given process.

Актуальность

В работе [1] методами конечных интегральных преобразований, разложения по собственным функциям спектральных задач с параметром в уравнении и граничном условии решена нестационарная задача теплопроводности для полусферического тела с покрытием, из которого удален сферический сектор с центром в начале координат. При этом теплофизические свойства покрытия существенно отличаются от аналогичных свойств тела основания. Модель учитывает интенсивное выделение тепла вследствие взаимодействия покрытия с упругим полупространством (горная порода) и охлаждение его жидкостью за счет вынужденной и естественной конвекции. Полученное решение позволяет определить температурное распределение в долоте из сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов (СКАМ) в произвольный момент времени и выявить основные факторы, влияющие на кинетику данного процесса.

Не останавливаясь на роли и важности результатов работы [1], отметим, что для анализа прочности, термостойкости и правильной эксплуатации алмазных буровых долот имеет важное значение термоупругое состояние, которое существенным образом зависит как от внешних нагрузок, так и от распределения температуры в алмазосодержащем слое инструмента. Температурные напряжения способствуют образованию пластических деформаций, приводящих к потере прочностных свойств СКАМ и преждевременному изнашиванию бурового долота. В настоящее время влияние этих факторов на работу такого инструмента изучено недостаточно. Это связано главным образом со сложностью учета в исходных уравнениях и граничных условиях физико-механических свойств как СКАМ, так и горной породы, а также формы и микрогеометрии инструмента с породой. В результате необходимо решать нелинейную задачу связанной термоупругости, когда термоупругие напряжения являются источниками теплового потока.

В настоящей работе сформулирована и решена задача термоупругости для внедренного в упругое полупространство полусферического тела с покрытием, которое приближенно моделирует работу алмазного долота.

Физические предпосылки и математическая постановка задачи

Пусть в упругое полупространство (горную породу) вдавливаются вращающееся вокруг оси Z с постоянной угловой скоростью ω долото в виде половины двухслойного шара с силой P , приложенной по оси симметрии.

Долото, находящееся в контакте с горной породой под нагрузкой (рис. 1)

$\Omega_1 = \left\{ (r, q, j) \mid r \in [0; r_2]; q \in \left[0; \frac{p}{2} \right]; j \in [0; 2p] \right\}$; рассматриваем в сферической системе координат: $x = r \sin \theta \cdot \cos \varphi$; $y = r \sin \theta \cdot \sin \varphi$; $z = r \cos \theta$.

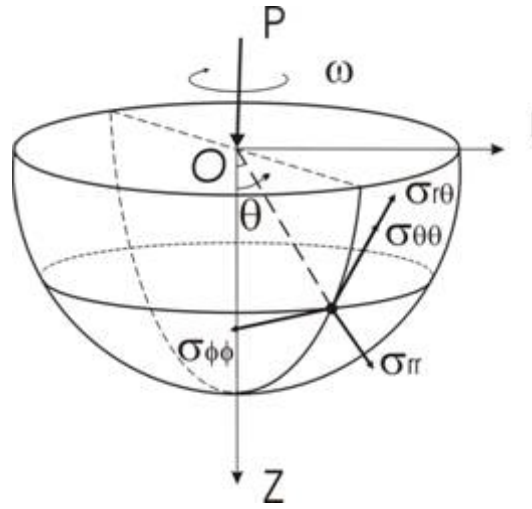


Рис. 1. Схема контакта алмазного долота с породой.

Условия рассматриваем симметричными вокруг оси Z, т.е. независимыми от угла φ . В области контакта имеем радиальные $\sigma_{rr}(r_2, \theta, t)$ и касательные $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ составляющие общих термоупругих напряжений, которые связаны между собой законом Кулона:

$$s_{rq}(r_2, q, t) = k s_{rr}(r_2, q, t), \quad (1)$$

где k – коэффициент трения (скольжения).

Контактное давление $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ совершает в единицу времени работу

$$Q(q, t) = w r_2 s_{rq}(r_2, q, t) = w r_2 k s_{rr}(r_2, q, t), \quad (2)$$

подавляющая часть которой идет на теплообразование и нагревание покрытия.

Для определения температуры и термоупругих напряжений в области контакта нужно решить связанную осесимметричную задачу термоупругости для сферического долота:

$$\frac{1}{c_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \Delta T_i, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$T_H(q, t) = T_1(r_2, q, t) = T_2(r_2, q, t), \quad q \in \left[0; \frac{p}{2} \right]; \quad (4)$$

$$I_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - I_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = a(T_H(q, t) - T_{жс}) + Q(q, t), \quad q \in \left[0; \frac{p}{2} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial q} = 0, \quad q = \frac{p}{2}, \quad r \in [0; +\infty]; \quad (6)$$

$$T_i(r, q, 0) = T_0; \quad (7)$$

$$s_{rj} = 0; s_{qj} = 0; s_{rr} = \bar{s}_{rr} + \bar{\bar{s}}_{rr}; s_{qq} = \bar{s}_{qq} + \bar{\bar{s}}_{qq}; s_{jj} = \bar{s}_{jj} + \bar{\bar{s}}_{jj};$$

$$s_{rj} = \bar{s}_{rq} + \bar{\bar{s}}_{rq}; e_{kj} = \bar{e}_{kj} + \bar{\bar{e}}_{kj}. \quad (8)$$

Здесь $i = 1$ относится к долоту, а $i = 2$ – к горной породе в которой находится долото:

$$\Omega_2 = \left\{ (r, q) \mid r \in [r_2; +\infty]; q \in \left[0; \frac{p}{2} \right] \right\};$$

$\bar{s}_{kj}, \bar{e}_{kj}$ – напряжения и деформации соответственно, связанные с изменением температуры и выражаются с помощью термоупругого потенциала Φ :

$$\Delta\Phi = \frac{1+n}{1-n} a_T (T - T_{ж}). \quad (9)$$

Уравнения равновесия для вращающегося долота имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{s}_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \bar{s}_{rq}}{\partial q} + 2\bar{s}_{rr} - \bar{s}_{qq} - \bar{s}_{jj} + \bar{s}_{rq} \operatorname{ctg} q \right) + gw^2 r \sin^2 q &= 0; \\ \frac{\partial \bar{s}_{rq}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \bar{s}_{qq}}{\partial q} + (\bar{s}_{qq} - \bar{s}_{jj}) \operatorname{ctg} q + 3\bar{s}_{rq} \right) + gw^2 r \sin q \cos q &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения для деформаций:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \bar{e}_{qq} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_q}{\partial q} + u_r \right); \bar{e}_{jj} = \frac{1}{r} (u_r + \operatorname{ctg} q \cdot u_q); \\ \bar{e}_{rq} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial q} - \frac{u_q}{r} + \frac{\partial u_q}{\partial r} \right); \bar{e}_{rj} = \bar{e}_{qj} = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где u_r, u_θ – компоненты вектора перемещений.

Уравнения для напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{s}_{rr} = \frac{E}{1+n} \left(\bar{e}_{rr} + \frac{n}{1-2n} e \right); \bar{s}_{qq} = \frac{E}{1+n} \left(\bar{e}_{qq} + \frac{n}{1-2n} e \right); \\ \bar{s}_{jj} = \frac{E}{1+n} \left(\bar{e}_{jj} + \frac{n}{1-2n} e \right); \bar{s}_{rq} = \frac{E}{1+n} \bar{e}_{rq}; \bar{s}_{rj} = 0; \bar{s}_{qj} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где E – модуль упругости

ν – коэффициент Пуассона материала покрытия,

$$e = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u_r) + \frac{1}{r \sin q} \frac{\partial}{\partial q} (u_q \sin q); \quad (13)$$

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin q} \frac{\partial}{\partial q} \left(\sin q \cdot \frac{\partial}{\partial q} \right) \quad (14)$$

Решение задачи

Для решения температурного поля и термоупругого состояния алмазного долота рассматриваем установившийся режим, который более всего подходит к исследованию таких инструментов.

После замены

$$r = \frac{r}{r_2}; \quad m = \cos q; \quad u_i(r, m) = \frac{T_i(r, m) - T_{ж}}{T_k - T_{ж}} \quad (15)$$

для установившегося режима получим следующую задачу для определения температурных полей:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial m} \left((1-m^2) \frac{\partial u_i}{\partial m} \right) = 0; \quad i = 1, 2; \quad (16)$$

$$u_1(1, m) = u_2(1, m) = u_*(m), \quad m \in [0; 1]; \quad (17)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial r} - \frac{I_1}{I_2} \frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{r=1} = hu_*(m) + q_0 s_{rr}(1, m); \quad (18)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial m} = 0, \quad m = 0, \quad r \in [0; +\infty], \quad (19)$$

где

$$h = \frac{ar_2}{I_2}; q_0 = \frac{wr_2^2 k}{I_2(T_k - T_{жс})}. \quad (20)$$

Применяем к этой задаче конечное четное преобразование Лежандра по переменной μ :

$$\bar{u}_{i,2n}(r) = \int_0^1 u_i(r, m) P_{2n}(m) dm \quad (21)$$

с формулой обращения

$$u_i(r, m) = \sum_{n=0}^{\infty} (4n+1) \bar{u}_{i,2n}(r) P_{2n}(m). \quad (22)$$

В результате имеем вспомогательную задачу:

$$\frac{d^2 \bar{U}_{i,2n}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d \bar{U}_{i,2n}}{dr} - \frac{2n(2n+1)}{r^2} \bar{U}_{i,2n} = 0; i = 1, 2; \quad (23)$$

$$\bar{U}_{1,2n}(1) = \bar{U}_{2,2n}(1) = \bar{U}_* \quad (24)$$

$$\frac{d \bar{U}_{2,2n}}{dr} - \frac{I_1}{I_2} \frac{d \bar{U}_{1,2n}}{dr} = h \bar{U}_* + q_0 b_{2n}; r = 1, \quad (25)$$

где

$$b_{2n} = \int_0^1 s_{rr}(1, m) P_{2n}(m) dm \quad (26)$$

Решение уравнения (23) представим в виде:

$$\bar{U}_{1,2n}(r) = A_{2n} r^{2n}; r \in [0; 1], \quad (27)$$

$$\bar{U}_{2,2n}(r) = B_{2n} r^{-(2n+1)}; r \in [1; +\infty], \quad (28)$$

где коэффициенты A_{2n} и B_{2n} находим из условий (24) – (25):

$$\begin{cases} A_{2n} = B_{2n}; \\ -(2n+1)B_{2n} - \frac{I_1}{I_2} 2nA_{2n} = hA_{2n} + q_0 b_{2n} \end{cases}, \quad (29)$$

откуда

$$A_{2n} = -\frac{q_0 b_{2n}}{2n+1 + \frac{I_1}{I_2} 2n + h}. \quad (30)$$

Тогда решение температурного поля в алмазном долоте имеет вид:

$$U_1(\rho, \mu) = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_0 (4n+1) \cdot b_{2n} \cdot P_{2n}(\mu) \rho^{2n}}{2n \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + h + 1}. \quad (31)$$

Для определения термоупругого потенциала $\Phi(\rho, \mu)$ имеем уравнение [2]:

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \times \left((1-\mu^2) \frac{\partial \Phi}{\partial \mu} \right) = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T r_2^2 (T_k - T_{жс}) U_1(\rho, \mu), \quad (32)$$

где α_T – линейный коэффициент температурного расширения.

Частное решение уравнения (32) ищем в виде:

$$\tilde{\Phi}(r, m) = \sum_{n=0}^{\infty} f_{2n}(r) P_{2n}(m). \quad (33)$$

Подставляя (33) в (32), получим выражение для определения термоупругого потенциала:

$$\tilde{\Phi}(r, m) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+n}{1-n} a_T (T_k - T_{жс}) r_2^2 A_{2n} \frac{4n+1}{2(4n+3)} r^{2n+2} P_{2n}(m). \quad (34)$$

Окончательные выражения для определения температурных и упругих напряжений имеют вид:

$$\bar{s}_{rr} = \frac{E}{(1+n)r_2^2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial r^2} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \frac{E}{1-n} a_T \times \\ \times (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{(4n+1)(4n^2 - 2n - 4)}{4n+3} r^{2n} P_{2n}(m); \quad (35)$$

$$\bar{s}_{qq} = \frac{E}{(1+n)r_2^2} \times \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial q^2} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \\ = -\frac{E}{(1-n)} a_T (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{(4n+1)}{4n+3} r^{2n} \left((2n+2)^2 P_{2n}(m) - m \frac{dP_{2n}}{dm} \right); \quad (36)$$

$$\bar{s}_{jj} = \frac{E}{(1+n)r_2^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} m \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial m} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \\ = -\frac{E}{(1+n)} a_T (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{4n+1}{4n+3} r^{2n} \left((6n+4) P_{2n}(m) + m \frac{dP_{2n}}{dm} \right); \quad (37)$$

$$\bar{s}_{rj} = \frac{E}{2(1+n)r_2^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial q} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial r \partial q} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial q} \right) \right] = \\ = \frac{E}{2(1+n)} a_T (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{4n+1}{4n+3} r^{2n} (2n+1) \sqrt{1-m^2} \frac{dP_{2n}}{dm}. \quad (38)$$

$$\bar{\bar{s}}_{rr} = \frac{E}{1+n} \sum_{n=0}^{\infty} [c_{2n} 2n(2n-1)(rr_2)^{2n-2} + d_{2n} (2n+1)(4n^2 - 2n - 2 - 2n)(rr_2)^{2n}] P_{2n}(m); \quad (39)$$

$$\bar{\bar{s}}_{qq} = -\frac{E}{1+n} \sum_{n=0}^{\infty} \{c_{2n} (4n^2 P_{2n}(m) - m P'_{2n}(m))(rr_2)^{2n-2} + d_{2n} [(2n+1) \times \\ \times (4n^2 + 8n + 2 + 2n) P_{2n}(m) - (2n+5-4n) m P_{2n}(m)](rr_2)^{2n}\}; \quad (40)$$

$$\bar{\bar{s}}_{jj} = gw^2 r^2 (1-m^2) + \frac{E}{1+n} \sum_{n=0}^{\infty} \{c_{2n} (2n P_{2n}(m) - m P'_{2n}(m)) \times \\ \times (rr_2)^{2n-2} + d_{2n} [(2n+1)(2n-2-2n-8nn) P_{2n}(m) - (2n+5-4n) m P'_{2n}(m)](rr_2)^{2n}\}; \quad (41)$$

$$\bar{\bar{s}}_{rq} = -\frac{E}{1+n} \sum_{n=0}^{\infty} [c_{2n} (2n-1)(rr_2)^{2n-2} + \\ + d_{2n} (4n^2 + 4n - 1 + 2n)(rr_2)^{2n}] \sqrt{1-m^2} P'_{2n}(m). \quad (42)$$

Проектируя внешние и внутренние упругие силы по направлению оси Z, получим следующие интегральные уравнения:

$$P = \int_0^{2p} dj \int_0^{p/2} (s_{rr} \cos q - s_{rq} \sin q) r_2^2 \sin q dq = 2pr_2^2 \int_{-1}^0 (ms_{rr} - \sqrt{1-m^2} s_{rq}) dm, \quad (43)$$

а на поверхности долота

$$\int_{-1}^0 [s_{rq}(r_2, m) - k s_{rr}(r_2, m)] dm = 0. \quad (44)$$

Полученные выражения (35) – (42) и (8) позволяют определить составляющие температурных и общих термоупругих напряжений в алмазном долоте при бурении нефтяной или газовой скважины. Подставляя (8) в (43) – (44) и (30), получим систему уравнений для определения неизвестных коэффициентов c_{2n} , d_{2n} и A_{2n} , где в соотношение для A_{2n} входит параметр

$$b_{2n} = \frac{1}{4n+1} [c_{2n} 2n(2n-1)r_2^{2n-2} + d_{2n}(2n+1)(4n^2 - 2n - 2 - 2\nu)r_2^{2n}]$$

Для решения этой системы удобно использовать итерационный метод: найдя на i -м шаге $c_{2n}^{(i)}$, $d_{2n}^{(i)}$, определяем по уравнению (30) коэффициент $A_{2n}^{(i+1)}$, потом из соотношений (43) – (44) находим $c_{2n}^{(i+1)}$, $d_{2n}^{(i+1)}$. На начальном этапе принимаем $c_{2n}^{(0)} = d_{2n}^{(0)} = 0$. Процесс заканчивается при условии $|c_{2n}^{(i+1)} - c_{2n}^{(i)}| \leq \epsilon$; $|d_{2n}^{(i+1)} - d_{2n}^{(i)}| \leq \epsilon$; $|A_{2n}^{(i+1)} - A_{2n}^{(i)}| \leq \epsilon$, где $\epsilon \sim 10^{-4}$.

Анализ результатов

Контрольные расчеты термоупругого состояния алмазного долота ИСМ-214,3 Т при бурении песчаника проведены для следующих параметров: вертикальная нагрузка на долото $P = 12000$ кг; внешний радиус долота $r_2 = 107,15$ мм; относительные значения коэффициента теплообмена $\alpha = 0,5 - 3,5$ кВт/(м²·К); время бурения $t = 1000$ с; угловая координата $\theta = 10 - 90$ град.; скорость вращения $\omega = 4 - 6$ с⁻¹. В качестве покрытия используется композит алмаз – твердый сплав ВК6 со следующими характеристиками: коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = 120$ Вт/(м·К); модуль Юнга $E_1 = 640$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,22$; предел прочности при сжатии $\sigma_1 = 5,6$ МПа; коэффициент линейного расширения $\alpha_T = 7,6 \cdot 10^{-10}$ К⁻¹ [3]; относительная концентрация алмазов в композите $K = 100$ (что соответствует 4,4 карат алмазов на 1 см³ шихты); зернистость алмазов (3) 800/630 мкм. В качестве буримого материала взят кварцевый песчаник со следующими свойствами: $E_2 = 0,47$ МПа; $\sigma_2 = 1,45$ МПа; $\nu_2 = 0,25$; $\rho_2 = 2,543$ г/см³; $\lambda_2 = 2,2$ Вт/(м·К) [4].

На рис. 2 построены зависимости радиальных температурных напряжений $\bar{\sigma}_{rr}$ в долоте от радиальной координаты ρ для различных значений ω и θ . Их анализ показывает, что максимальные значения $\bar{\sigma}_{rr}$ достигаются на контакте рабочая поверхность – порода, они существенно зависят от угловой скорости ω и координаты θ .

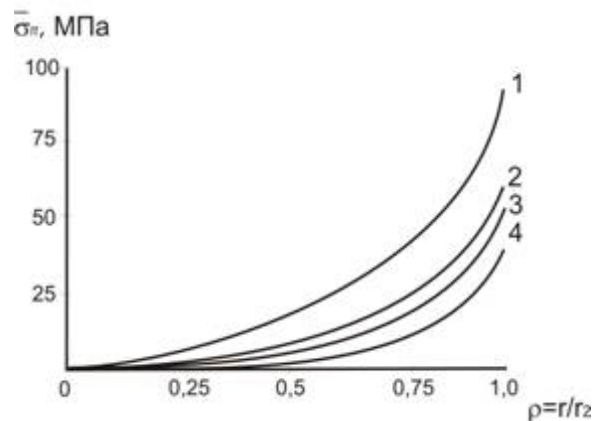


Рис. 2. Зависимости радиальных температурных напряжений $\bar{\sigma}_{rr}$ в алмазном долоте ИСМ-214,3 Т при бурении песчаника от радиальной координаты ρ для $\lambda_1 = 120$ Вт/(м·К); $\rho_1 = 14,4$ г/см³; $E_1 = 640$ ГПа; $\nu_1 = 0,22$; $\sigma_1 = 5,6$ МПа; $\alpha = 1,5$ кВт/(м²·К); $P = 12000$ кг; $K = 100$; 3 = 800/630 мкм; угловой скорости ω (с⁻¹): 6 (1), 4 (2), $\theta = 36^\circ$; 6 (3), 4 (2), $\theta = 0^\circ$.

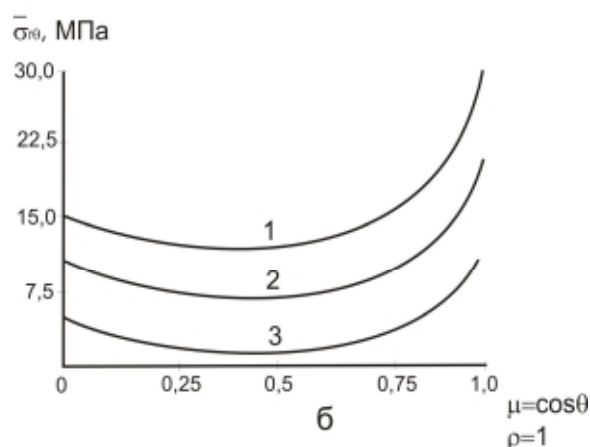
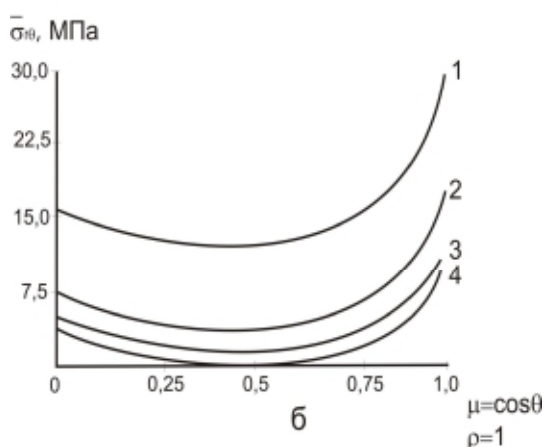
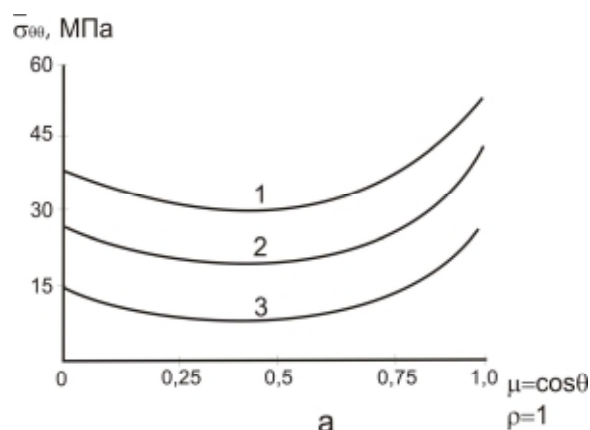
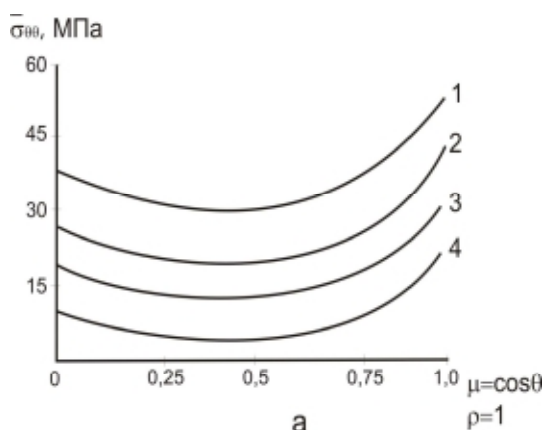


Рис. 3. Зависимости тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ (а) и касательных $\bar{\sigma}_{r\theta}$ (б) составляющих температурных напряжений в алмазном долоте ИСМ-214,3 Т от угловой координаты θ при бурении песчаника для $\rho = 1$ и тех же условий, что и на рис. 2.

Рис. 4. Зависимости тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ (а) и касательных $\bar{\sigma}_{r\theta}$ (б) составляющих температурных напряжений в долоте при бурении песчаника от угловой координаты θ для $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$; $\rho = 1$; α (кВт/(м²·К)): 1,5 (1); 2,5 (2); 3,5 (3) и тех же условий, что и на рис. 3.

Тангенциальные $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и касательные $\bar{\sigma}_{r\theta}$ составляющие температурных напряжений также зависят от ρ и θ (рис. 3, а, б). В отличие от $\bar{\sigma}_{rr}$ они имеют меньшие значения и отличаются характером распределения по угловой координате θ . Наименьшие значения $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и $\bar{\sigma}_{r\theta}$ достигаются при $\mu = \cos \theta = 0,5$. Они зависят от угловой скорости ω и относительного значения коэффициента теплообмена α . Так, при увеличении α от 1,5 до 3,5 кВт/(м²·К), $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и $\bar{\sigma}_{r\theta}$ уменьшается более чем в 2 раза для всех исследуемых параметров (рис. 4, а, б).

Для общих термоупругих напряжений σ_{ij} сохраняются в принципе те же тенденции, что и для температурных $\bar{\sigma}_{ij}$, хотя и есть существенные отличия. Радиальные σ_{rr} и касательные $\sigma_{r\theta}$ составляющие термоупругих напряжений всегда являются сжимающими для всех условий бурения (рис. 5, а, б), а тангенциальные $\sigma_{\theta\theta}$ могут менять знак (рис. 5, в). Они, как и температурные напряжения $\bar{\sigma}_{ij}$, существенно зависят от радиальной ρ и угловой θ координат, угловой скорости ω . Максимальные значения общих радиальных σ_{rr} и касательных $\sigma_{r\theta}$ напряжений достигаются на рабочей поверхности долота при $\theta = 18^\circ$ и 90° (см. рис. 5, а и 5, б соответственно). В отличие от σ_{rr} и $\sigma_{r\theta}$ общие тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ имеют наименьшие значения при $\theta = 18^\circ$, линейно возрастают при увеличении θ (см. рис. 5, в).

Продолжая обсуждать термоупругое состояние алмазного долота, отметим, что при бурении песчаника общие напряжения σ_{ij} имеют большие значения, чем при бурении гранита (см. рис. 5, кривые 2 и 1 соответственно). Это связано с тем, что абразивные характеристики песчаника (в данном случае) превышают аналогичные характеристики гранита.

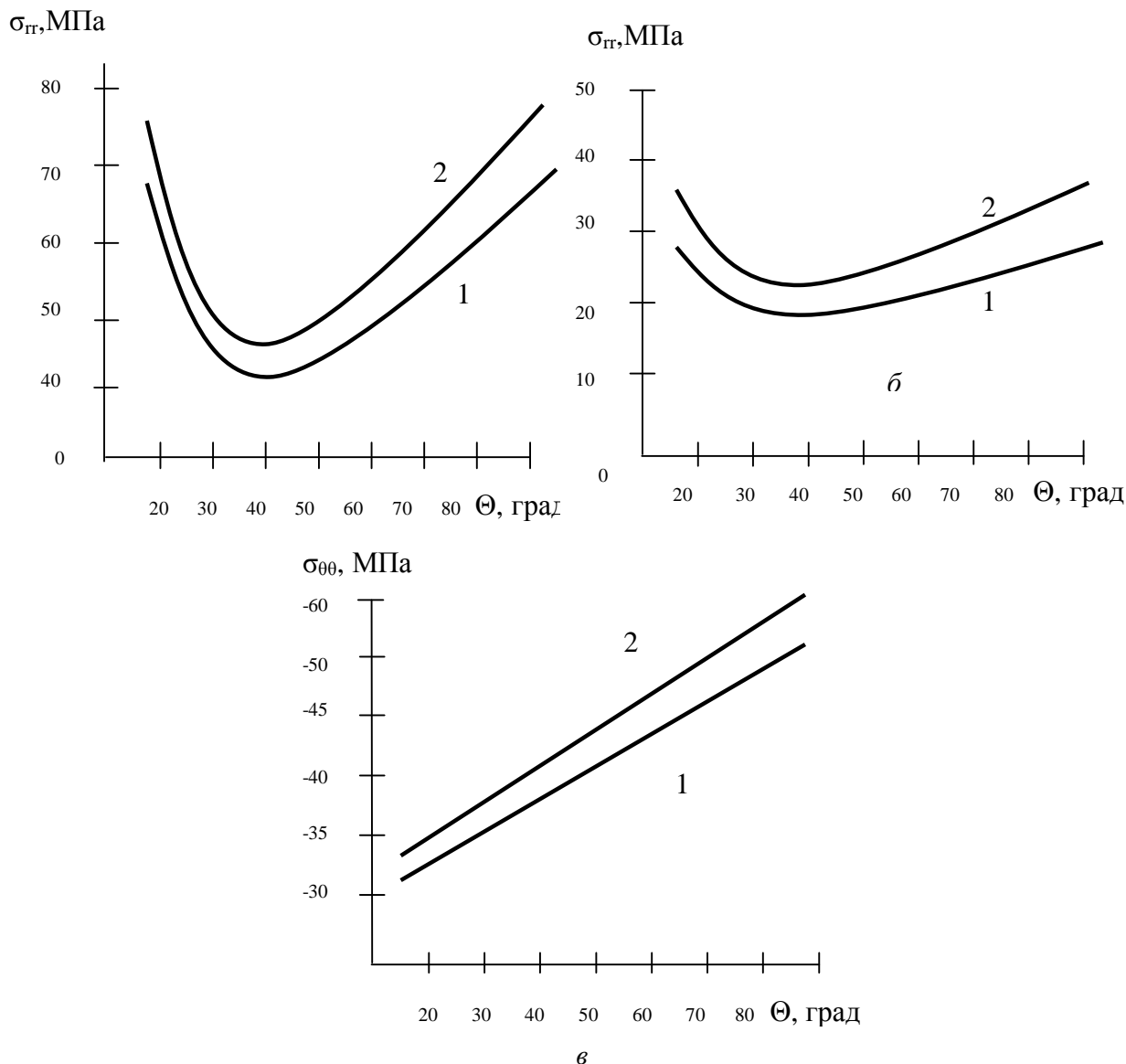


Рис. 5. Зависимости радиальных (а), касательных (б) и тангенциальных (в) составляющих общих термоупругих напряжений в долоте от угловой координаты θ при бурении гранита (1) и песчаника (2) для: $\alpha = 1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$; $\rho = 1$ и тех же условий, что и на рис. 2.

Выводы

1. Решена осесимметричная задача термоупругости для сферического алмазного долота в процессе бурения скважины. Характерной особенностью этого решения является то, что сами напряжения зависят от температуры нелинейно, а условия равновесия включают компоненты вектора объемной силы. Полученные решения представлены в аналитическом виде, они позволяют определить компоненты термоупругих напряжений и выявить основные факторы, влияющие на их уменьшение.

2. Выявлено, что максимальные значения радиальных $\bar{\sigma}_{rr}$, тангенциальных \bar{S}_{qq} и касательных \bar{S}_{rq} температурных напряжений, при бурении абразивных горных пород алмазным

долотом достигаются на границе контакта инструмент – порода, они существенно зависят от радиальной и угловой координат профиля, скорости вращения и относительного значения коэффициента теплообмена.

3. Установлено, что для общих термоупругих напряжений σ_{ij} сохраняются в принципе те же тенденции, что и для температурных $\bar{\sigma}_{ij}$, хотя и есть существенные отличия. Они существенно зависят от ρ , θ и ω .

4. Полученные результаты имеют важное значение для технологии изготовления буровых долот из СКМ и могут быть использованы для решения задач изнашивания таких инструментов.

Литература

1. Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Температурное состояние алмазных буровых долот // Доповіді НАН України. – 2006. – № 10. – С. 95 – 102.
2. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. – К.: Наук. думка, 1970. – 307 с.
3. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 328 с.
4. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка мл. – М.: Мир, 1969. – 543 с.

Поступила 07.06.07.