Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. В. Башкинова, Решение краевой задачи установившейся ползучести для неосесимметричной толстостенной трубы, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2002, выпуск 16, 105–110

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu106>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.80.73.141

26 апреля 2023 г., 15:57:51

РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ

Предложен способ построения аналитических решений краевых задач установившейся ползучести с возмущенными граничными условиями для толстостенной трубы методом малого параметра. Рассмотрен случай плоского деформированного состояния и приведена полная схема расчета полей напряжений и скоростей деформаций для неосесимметричной толстостенной трубы.

Задача построения аналитических решений краевых задач ползучести для толстостенных труб реализована лишь в ряде простых случаев установившейся ползучести для труб с постоянной толщиной стенки [1]. В действительности же трубы в результате неизбежных отклонений при изготовлении оказываются разностенными, вследствие чего задача построения аналитических решений существенно усложняется. Преимущества аналитических моделей очевидны и в первую очередь связаны с возможностью функционального анализа влияния внешних воздействий и свойств материала на напряженно-деформированное состояние, решения задач оптимизации, учета различного рода случайных факторов и т.п.

В настоящей работе рассматривается способ построения аналитических решений для краевых задач установившейся ползучести толстостенных труб с возмущенными граничными условиями методом малого параметра.

В качестве основных реологических соотношений используются квазилинейные уравнения установившейся ползучести [1], записанные в традиционной цилиндрической системе координат:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{3}{2} \frac{\nu(\sigma_i)}{\sigma_i} \bar{\sigma}_r, \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{3}{2} \frac{\nu(\sigma_i)}{\sigma_i} \bar{\sigma}_\theta, \dot{\varepsilon}_z = \frac{3}{2} \frac{\nu(\sigma_i)}{\sigma_i} \bar{\sigma}_z, \dot{\gamma}_{r\theta} = 3 \frac{\nu(\sigma_i)}{\sigma_i} \tau_{r\theta}, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\varepsilon}_z, \dot{\gamma}_{r\theta}$ – скорости компонент деформаций ползучести; $\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \bar{\sigma} \delta_{ij}$ – компоненты девиатора напряжений, $\bar{\sigma} = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$; σ_i – интенсивность напряжений;

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 6\tau_{r\theta}^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$\nu(\sigma_i)$ – функция напряжений, для которой принимается степенная аппроксимация вида

$$\nu(\sigma_i) = A(\sigma_i)^n, \quad (3)$$

где A, n – const.

Ограничимся в настоящей работе случаем плоскодеформированного состояния. Тогда полагая $\varepsilon_z = 0$ и учитывая соотношения (3), для скоростей деформации получаем

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{3}{4} A \sigma_i^{n-1} (\sigma_r - \sigma_\theta), \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{3}{4} A \sigma_i^{n-1} (\sigma_\theta - \sigma_r), \dot{\gamma}_{r\theta} = 3 A \sigma_i^{n-1} \tau_{r\theta}. \quad (4)$$

Линеаризуем компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций по малому параметру δ , ограничиваясь разложением 2-го порядка:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \delta \sigma'_{ij} + \delta^2 \sigma''_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^0 + \delta \dot{\varepsilon}'_{ij} + \delta^2 \dot{\varepsilon}''_{ij}. \quad (5)$$

Для случая плоской деформации в полярной системе координат за начальное состояние принимается случай осевой симметрии, для которого $\tau_{r\theta}^0 = 0$. Если ввести в рассмотрение функцию

$$K(r) = 3A \left(\frac{\sqrt{3}}{2} |\sigma_r^0 - \sigma_\theta^0| \right)^{n-1}, \quad (6)$$

то для первого приближения системы (4) с учетом (5) и (6) соответственно получаем

$$\dot{\varepsilon}'_r = \frac{1}{4} K(r) n (\sigma'_r - \sigma'_\theta), \dot{\varepsilon}'_\theta = \frac{1}{4} K(r) n (\sigma'_\theta - \sigma'_r), \dot{\gamma}'_{r\theta} = K(r) \tau'_{r\theta}. \quad (7)$$

В дальнейшем будем использовать условия несжимаемости материала:

$$\dot{\varepsilon}'_r + \dot{\varepsilon}'_\theta = 0, \quad \frac{\partial \dot{u}'}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{v}'}{\partial \theta} + \frac{\dot{u}'}{r} = 0, \quad (8)$$

где $(\dot{u}, \dot{v})$ – вектор скорости перемещения.

По аналогии с [2] введем функцию $\xi = \xi(r, \theta)$, такую, что соотношения

$$\dot{u}' = -\frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial \theta}, \quad \dot{v}' = \frac{\partial \xi}{\partial r} \quad (9)$$

и (8) удовлетворяется тождественно.

Из (8) и (9) будем иметь

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}'_r = -\dot{\varepsilon}'_\theta &= \frac{\partial \dot{u}'}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \xi}{\partial r \partial \theta}; \\ \dot{\gamma}'_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{u}'}{\partial \theta} + \frac{\partial \dot{v}'}{\partial r} - \frac{\dot{v}'}{r} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив соотношения (10) в (7), получаем

$$\begin{aligned} \tau'_{r\theta} &= \frac{1}{2K} \left[\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \theta^2} \right]; \\ \sigma'_r - \sigma'_\theta &= \frac{4}{nK} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \xi}{\partial r \partial \theta} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (11) в уравнения равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau'_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} &= 0; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma'_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau'_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau'_{r\theta}}{r} &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma'_\theta}{\partial \theta} &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{2K(r)} \right) \left[r \frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} - \frac{\partial \xi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \theta^2} \right] - \frac{1}{2K(r)} \left[r \frac{\partial^3 \xi}{\partial r^3} - \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \xi}{\partial r \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} \right]; \\ \frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} &= \frac{1}{2rK(r)} \left[\left(\frac{\partial^3 \xi}{\partial r^2 \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 \xi}{\partial \theta^3} \right) + \frac{\partial^2 \xi}{\partial r \partial \theta} \frac{n+8}{nr} + \frac{8}{n} \frac{1}{r^2} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Решение для функции $\xi(r, \theta)$ ищется в виде

$$\xi(r, \theta) = rR(r)\varphi(\theta). \quad (14)$$

Подставляя (14) в соотношения (13) и второе соотношение (11), найдем и приравняем смешанные производные по $\frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta}$ от функций $\sigma'_r, \sigma'_\theta, \sigma'_r - \sigma'_\theta$. В результате получается дифференциальное уравнение четвертого порядка в частных производных вида

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2K(r)} \frac{d^4 \varphi}{d\theta^4} \frac{R}{r^2} + \left[\frac{1}{K(r)} \left(-\frac{R}{r^2} + \frac{n-4}{n} \left(\frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \frac{d^2 R}{dr^2} \right) \right) + \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{K(r)} \right) \left(\frac{R}{2r} + \frac{dR}{dr} - \frac{4}{n} \frac{d^2 R}{dr^2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{R}{2} \frac{d^2}{dr^2} \left(\frac{1}{K(r)} \right) \right] \frac{d^2 \varphi}{d\theta^2} - \left[\frac{1}{2K(r)} \left(\frac{R}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + 5 \frac{d^2 R}{dr^2} + 6r \frac{d^3 R}{dr^3} + r^2 \frac{d^4 R}{dr^4} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{K(r)} \right) \left(-\frac{R}{r} + \frac{dR}{dr} + 7r \frac{d^2 R}{dr^2} + 2r^2 \frac{d^3 R}{dr^3} \right) + \frac{1}{2} \frac{d^2}{dr^2} \left(\frac{1}{K(r)} \right) \left(-R + r \frac{dR}{dr} + r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} \right) \right] \varphi = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из физических соображений очевидно, что $\varphi(\theta)$ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) является периодической функцией с максимальным периодом 2π . Поэтому положим

$$\varphi(\theta) = \sin m\theta \quad (m=1, 2, \dots). \quad (16)$$

В частности, для задачи об установившейся ползучести толстостенной трубы с несоосными центрами внутреннего и внешнего поперечного сечений можно положить $m=1$. Очевидно также, что функция $K(r)$ является степенной функцией от радиуса и представима в виде:

$$K(r) = Lr^s, \quad (17)$$

где параметры L и s будут определены ниже.

Подставляя (16) и (17) в соотношение (15), получаем основное дифференциальное уравнение для функции $R(r)$ вида

$$-m^4 \frac{R}{r^2} - m^2 \left[\frac{R}{r^2} (s^2 - 2) + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \left(2 - \frac{8}{n} \right) (1-s) + \frac{d^2 R}{dr^2} \left(2 - \frac{8}{n} \right) \right] + \left[\frac{R}{r^2} (s^2 - 1) - \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} (s^2 - 1) + \frac{d^2 R}{dr^2} (-s^2 + 6s - 5) + \frac{d^3 R}{dr^3} r(2s - 6) - r^2 \frac{d^4 R}{dr^4} \right] = 0. \quad (18)$$

Частное решение для функции $R(r)$ ищется в виде

$$R(r) = r^\mu \quad (\mu = \text{const}). \quad (19)$$

Подстановка (19) в (18) дает уравнение четвертого порядка относительно μ . В рассматриваемом случае при $m=1$ оно имеет вид

$$\mu \left(\mu^3 - 4 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \mu^2 + 4 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{4}{n} + 1 \right) \mu + \frac{16}{n} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right) = 0. \quad (20)$$

Решение полученного алгебраического уравнения относительно μ не составляет труда [3]:

$$\mu_1 = 0, \quad \mu_2 = -s, \quad \mu_{3,4} = \frac{-s \pm \sqrt{s^2 + \frac{32}{n}}}{2} = \frac{-s}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{s^2 + \frac{32}{n}} = \frac{-s}{2} \pm \frac{1}{2} t, \quad (21)$$

где $t = \sqrt{s^2 + \frac{32}{n}}$. Зная корни μ_i ($i=1,2,3,4$), можно построить общее решение для функции

$\xi(r, \theta)$:

$$\xi = r \sin(\theta) \sum_{i=1}^4 C_{\mu_i} r^{\mu_i} = r \sin(\theta) (C_{11} + C_{12} r^{-s} + C_{13} r^{(-s+t)/2} + C_{14} r^{(-s-t)/2}). \quad (22)$$

Из соотношений (9) получаем компоненты скорости перемещения $(\dot{u}', \dot{v}')$:

$$\dot{u}' = -\frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} = -(C_{11} + C_{12} r^{-s} + C_{13} r^{(-s+t)/2} + C_{14} r^{(-s-t)/2}) \cos(\theta); \quad (23)$$

$$\dot{v}' = \left(C_{11} + (-s+1)C_{12} r^{-s} + \left(\frac{-s+t}{2} + 1 \right) C_{13} r^{(-s+t)/2} + \left(\frac{-s-t}{2} + 1 \right) C_{14} r^{(-s-t)/2} \right) \sin(\theta). \quad (24)$$

Подставляя (23) и (24) в (10), находим компоненты скоростей деформаций:

$$\dot{\epsilon}'_r = \frac{\partial \dot{u}'}{\partial r} = - \left(-s C_{12} r^{-s-1} + \frac{(-s+t)}{2} C_{13} r^{(-s+t)/2-1} + \frac{(-s-t)}{2} C_{14} r^{(-s-t)/2-1} \right) \cos(\theta); \quad (25)$$

$$\dot{\epsilon}'_\theta = - \left(-s C_{12} r^{-s-1} + \frac{(-s+t)}{2} C_{13} r^{(-s+t)/2-1} + \frac{(-s-t)}{2} C_{14} r^{(-s-t)/2-1} \right) \cos(\theta); \quad (26)$$

$$\dot{\gamma}'_{r\theta} = \frac{1}{2} \left[s^2 C_{12} r^{-s-1} + \frac{(-s+t)^2}{4} C_{13} r^{(-s+t)/2-1} + \frac{(-s-t)^2}{4} C_{14} r^{(-s-t)/2-1} \right] \sin(\theta), \quad (27)$$

а из соотношения (11) определяем

$$\tau'_{r\theta} = L \frac{1}{2} \left[s^2 C_{12} r^{-1} + \frac{(-s+t)^2}{4} C_{13} r^{(s+t)/2-1} + \frac{(s+t)^2}{4} C_{14} r^{(s-t)/2-1} \right] \sin(\theta); \quad (28)$$

$$(\sigma'_r - \sigma'_\theta) = -\frac{4}{n} L \left(-s C_{12} r^{-1} + \frac{(-s+t)}{2} C_{13} r^{(s+t)/2-1} + \frac{(-s-t)}{2} C_{14} r^{(s-t)/2-1} \right) \cos(\theta). \quad (29)$$

Для нахождения компоненты напряжения σ'_r используем первое из уравнений равновесия (12):

$$\begin{aligned} \sigma'_r = & -L \left[\left(s^2 \frac{1}{2} + \frac{4}{n} s \right) C_{12} \frac{r^{-1}}{-1} + \frac{(-s+t)}{2} \left(\frac{(-s+t)}{4} - \frac{4}{n} \right) C_{13} \frac{r^{(s+t)/2-1}}{(s+t)/2-1} + \right. \\ & \left. + \frac{(-s-t)}{2} \left(\frac{(-s-t)}{4} - \frac{4}{n} \right) C_{14} \frac{r^{(s-t)/2-1}}{(s-t)/2-1} \right] \cos(\theta) + \xi(\theta). \end{aligned} \quad (30)$$

Компонента σ'_θ вычисляется через соотношение (29).

Р и с. 1. Схема толстостенной трубы

В качестве примера рассмотрим толстостенную трубу с несоосными центрами поперечных сечений под действием внутреннего давления (рис.1). Тогда граничные условия на поверхности трубы при $r=a$ принимают вид

$$\tau_{r\theta} = 0, \quad \sigma_r = -q. \quad (31)$$

Линеаризуя (31), получим,

$$\tau'_{r\theta} = 0, \quad \sigma'_r = 0. \quad (32)$$

Уравнение внешнего контура трубы с учетом возмущения δ имеет вид (рис.1)

$$(x - \delta)^2 + y^2 = b^2 \quad (33)$$

или в полярной системе координат -

$$(r \cos \theta - \delta)^2 + r^2 (\sin \theta)^2 = b^2. \quad (34)$$

Из (34) найдем

$$r = \delta \cos \theta + b \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\delta^2}{a^2} (\sin \theta)^2 + \dots \right) = b + \delta \cos \theta - \frac{\delta^2}{2b} (\sin \theta)^2 + \dots \quad (35)$$

На внешнем контуре граничные условия известны для нормального напряжения σ_v и касательного напряжения τ_v и имеют вид

$$\tau_v = 0, \quad \sigma_v = 0. \quad (36)$$

Записывая данные граничные условия через компоненты основной системы координат и линеаризуя их, получим следующие граничные условия на внешней поверхности трубы:

$$\sigma'_r + \frac{d\sigma_r^0}{dr} \cos \theta = 0; \quad \tau'_{r\theta} - \left(\sigma_\theta^0 - \sigma_r^0 \right) \left(\frac{-\sin \theta}{a} \right) = 0. \quad (37)$$

Функция $\xi(\theta)$ в силу ее зависимости только от угла, представима в следующем виде:

$$\xi(\theta) = C^* \cos(\theta). \quad (38)$$

Поэтому четыре уравнения (31), (36) и (37) позволяют определить константы $C_{12}, C_{13}, C_{14}, C^*$.

В явном виде эта система уравнений принимает вид

$$\begin{aligned} & \left[s^2 C_{12} + \frac{(-s+t)^2}{4} C_{13} a^{(s+t)/2} + \frac{(s+t)^2}{4} C_{14} a^{(s-t)/2} \right] = 0; \\ & + \frac{(-s-t)}{2} \left(\frac{(-s-t)}{4} - \frac{4}{n} \right) C_{14} \frac{a^{(s-t)/2-1}}{(s-t)/2-1} - C^* = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& L \left[\left(s^2 \frac{1}{2} + \frac{4}{n} s \right) C_{12} \frac{a^{-1}}{-1} + \frac{(-s+t)}{2} \left(\frac{(-s+t)}{4} - \frac{4}{n} \right) C_{13} \frac{a^{(s+t)/2-1}}{(s+t)/2-1} + s^2 C_{12} + \frac{(-s+t)^2}{4} C_{13} b^{(s+t)/2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{(s+t)^2}{4} C_{14} b^{(s-t)/2} \right] = \frac{2(\sigma_r^0(b) - \sigma_\theta^0(b))}{aL}, \\
& L \left[\left(s^2 \frac{1}{2} + \frac{4}{n} s \right) C_{12} \frac{b^{-1}}{-1} + \frac{(-s+t)}{2} \left(\frac{(-s+t)}{4} - \frac{4}{n} \right) C_{13} \frac{b^{(s+t)/2-1}}{(s+t)/2-1} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{(-s-t)}{2} \left(\frac{(-s-t)}{4} - \frac{4}{n} \right) C_{14} \frac{b^{(s-t)/2-1}}{(s-t)/2-1} \right] - C^* = \frac{d\sigma_\theta^0(b)}{dr}.
\end{aligned} \tag{39}$$

При ее решении за начальные значения напряжений $\sigma_r^0, \sigma_\theta^0, \tau_{r\theta}^0$ берутся решения для осесимметричной задачи (толстостенной трубы с постоянной толщиной стенки) [1]:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^0 &= \frac{q}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} \left(1 - \left(\frac{b}{r}\right)^{\frac{2}{n}} \right), \quad \sigma_\theta^0 = \frac{q}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} \left(1 - \left(1 - \frac{2}{n}\right) \left(\frac{b}{r}\right)^{\frac{2}{n}} \right), \\
\sigma_z^0 &= \frac{q}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(\frac{b}{r}\right)^{\frac{2}{n}} \right), \quad \tau_{r\theta}^0 = 0,
\end{aligned} \tag{40}$$

где q – внутреннее давление; a и b – внутренний и наружный радиусы трубы соответственно. Отсюда можно определить коэффициенты L и s для функции $K(r)$ в явном виде:

$$L = 3A^* \left(\frac{2}{n} \right)^{n-1} \frac{q}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} b^{\frac{2(n-1)}{n}}, \quad s = -\frac{2(n-1)}{n}.$$

В качестве примера были получены первые приближения для трубы с параметрами $a=11,5$ см; $b=15$ см; $n=5,3$; $A=3 \cdot 10^{-6} 60^{-n}$; $q=22,07$ МПа. Рассмотрены изменение напряжения в зависимости от радиуса r , давления q , малого параметра δ и различных значения угла θ .

Р и с. 2. Изменение окружной компоненты напряжения $\sigma_\theta = \sigma_\theta^0 + \delta\sigma'_\theta$ при $\delta=0,05b$:

1- $\theta = 0^\circ$; 3- $\theta = 180^\circ$; 2, 4- $\sigma_\theta = \sigma_\theta^0, \theta = 0^\circ, 180^\circ$

Р и с. 3. Изменение окружной компоненты напряжения $\sigma_\theta = \sigma_\theta^0 + \delta\sigma'_\theta$ при $\delta=0,05b$:

1- $\theta = 45^\circ$; 2- $\sigma_\theta = \sigma_\theta^0, \theta = 45^\circ$

Р и с. 4. Изменение окружной компоненты напряжения $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^0 + \delta \sigma'_{\theta}$ при $\delta=0,01b$:

1- $\theta = 0^\circ$; 3- $\theta = 180^\circ$; 2,4- $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^0, \theta = 0^\circ, 180^\circ$

В качестве примера на рис. 2-5 представлены законы изменения напряжений σ_{θ} и $\tau_{r,\theta}$ с учетом первого приближения. Анализ данных позволил установить, что максимальное расхождение между решением краевой задачи для несоосной толстостенной трубы и решением краевой задачи [1] для симметричной толстостенной трубы для σ_{θ} при $\delta=10\%$ составляет не более 8%. Модельные вычисления были выполнены при следующих параметрах: внутренний радиус $a=11,5$ см.; внешний радиус $b=15$ см.; $n=5,3$ и $10,96$; $A=1,12959E-15$ и $9,58E-23$; $\delta=5\%, 10\%$; внутреннее давление $q=22,07$, значения угла θ принимаются равными $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$. Погрешность относительно невозмущенного состояния для σ_{θ} приведена в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Отношения $\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_{\theta}^0}{\sigma_{\theta}^0}$ при $n=5,3$:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^0 + \delta \sigma'_{\theta}$$

$\delta \backslash \theta$	0°	180°	90°	45°	135°
0,05	0,06	0,06	0	0,04	0,04
0,1	0,11	0,11	0	0,08	0,08

Т а б л и ц а 2

Отношения $\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_{\theta}^0}{\sigma_{\theta}^0}$ при $n=10,96$:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^0 + \delta \sigma'_{\theta}$$

$\delta \backslash \theta$	0	180	90	45	135
0,05	0,03	0,03	0	0,02	0,02
0,1	0,06	0,06	0	0,04	0,04

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752с.
2. Ивлев Д.Д., Ершов Л.В. Метод возмущений в теории упругопластического тела. М.: Наука, 1978. 208с.
3. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1975. 431с.