

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

Р. М. КИРАКОСЯН

ОБ ОДНОМ ПРИБЛИЖЕННОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
БЕЗМОМЕНТНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ОБОЛОЧЕК В РАМКАХ
ТЕОРИИ СТАРЕНИЯ*

Хорошо известно, что соотношения ползучести для большинства конструкционных материалов характеризуются сильной нелинейностью, что приводит при решении даже простейших задач к значительным математическим трудностям. Это обстоятельство заставляет искать эффективные методы приближенного решения задач ползучести. В настоящее время существует много вариантов приближенного решения, основанных на различных линеаризациях уравнений ползучести [1-7]. Ниже рассматривается неустановившаяся ползучесть в рамках теории старения [1].

Доказывается, что задачу ползучести можно свести к задаче неоднородного изотропного линейно упругого тела с переменными во времени параметрами упругости. Этот метод имеет некоторое преимущество по сравнению с методом „дополнительных деформаций“ [6], однако его применение не всегда возможно. В работе показывается, что предложенный метод „переменных параметров упругости“ с успехом можно применять к задачам ползучести стержневых систем и оболочек по безмоментной теории. В конце работы дается решение задачи безмоментной ползучести и релаксации трехслойных оболочек вращения.

1. Пусть компоненты полной деформации $\varepsilon_x, \dots, \gamma_{xy}, \dots$ определяются уравнениями теории старения [1]

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_x^e + \varepsilon_x^c = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \frac{1}{6} f(\sigma_i, t) (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z), \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^e + \gamma_{xy}^c = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} + f(\sigma_i, t) \tau_{xy} \quad (xyz) \\ &\left(f(\sigma_i, t) = \frac{\varepsilon_i^c}{\sigma_i} \right),\end{aligned}\quad (1.1)$$

* Работа доложена на V Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек (Москва, 3-6 февраля 1965 г.).

где E , ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, ε_i^c и σ_i — интенсивности деформаций сдвига ползучести и касательных напряжений.

Символ (xyz) означает, что недостающие уравнения получаются круговой перестановкой букв x, y, z . Запишем уравнения (1.1) в виде

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E^*} [\sigma_x - \nu^* (\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu^*)}{E^*} \tau_{xy}, \quad (xyz), \quad (1.2)$$

где обозначено

$$E^* = \frac{3E}{3 + Ef(\sigma_i, t)}, \quad \nu^* = \frac{6\nu + Ef(\sigma_i, t)}{2[3 + Ef(\sigma_i, t)]}. \quad (1.3)$$

Уравнения (1.2) характеризуют некоторое *неоднородное* изотропное упругое (приведенное) тело с переменными во времени параметрами E^* и ν^* .

Попутно заметим, что при несжимаемости материала $\nu^* = 0.5$.

Таким образом, задачу ползучести теории старения можно свести к задаче *неоднородного* изотропного линейно упругого тела с переменными во времени параметрами упругости (1.3).

Если известно решение задачи произвольно неоднородного упругого тела, то с использованием формул (1.3) можно получить решение той же задачи с учетом ползучести материала, определяя при этом значения параметров упругости E^* и ν^* методом последовательных приближений

$$\begin{aligned} E^{(n)} &= \frac{3E}{3 + Ef^{(n-1)}(\sigma_i, t)}, & \nu^{(n)} &= \frac{6\nu + Ef^{(n-1)}(\sigma_i, t)}{2[3 + Ef^{(n-1)}(\sigma_i, t)]}, \quad (n = 1, 2, \dots)^* \end{aligned} \quad (1.4)$$

Принимая за исходное приближение решение задачи без учета ползучести материала, получим $E^{(0)} = E$, $\nu^{(0)} = \nu$. Как известно [6], по методу „дополнительных деформаций“ величины ε_x^c , γ_{xy}^c , (xyz) следует рассматривать как дополнительные, для отыскания которых применяется метод последовательных приближений (при этом за исходное приближение опять принимается решение упругой задачи). Преимущество этого метода по сравнению с методом „переменных параметров упругости“ заключается в том, что задачи ползучести по этому методу сводятся к задачам того же однородного линейно упругого тела с дополнительными деформациями. Однако, для получения n -ого приближения по методу „дополнительных деформаций“ следует приближенно вычислить деформации ползучести целиком

$$\varepsilon_x^c = \frac{1}{6} f^{(n-1)}(\sigma_i, t) (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z), \quad \gamma_{xy}^c = f^{(n-1)}(\sigma_i, t) \tau_{xy}, \quad (xyz) \quad (1.5)$$

* В скобках наверху обозначается номер приближения.

При этом возможны случаи, когда ошибки определения $f(\sigma_i, t)$ и компонент девиатора напряжений $(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz})$ в решении задачи вызывают ошибки одинакового знака. В таких случаях процесс последовательных приближений или не сходится, или сходится очень слабо.

Очевидно, что такое явление не будет иметь место при применении метода „переменных параметров упругости“, так как по этому методу приближенно вычисляется лишь величина $f(\sigma_i, t)$, а компоненты девиатора напряжений, путем исключения, в процессе последовательных приближений участвуют со своими точными значениями. Поэтому, в смысле точности приближений, предпочтение следует дать методу „переменных параметров упругости“ и при возможности применять именно этот метод как более рациональный.

В задачах ползучести стержневых систем, в силу равномерности напряженного состояния каждого стержня, параметры E^* и ν^* зависят только от времени и характеризуют *однородные* тела с переменными во времени упругими свойствами. Следовательно, в этих задачах применение метода „переменных параметров упругости“ не связано с особыми трудностями.

Нетрудно убедиться в том, что применение этого метода целесообразно и в статически неопределимых задачах безмоментной ползучести оболочек. На самом деле, в статически неопределимых задачах оболочек по безмоментной теории неоднородность упругих свойств материала не влечет за собой особых математических трудностей. При определении искомых функций интегрирования упругие параметры неоднородного материала входят в подынтегральные выражения. Это обстоятельство не мешает проведению последовательных вычислений значений искомых функций. Кстати, применение метода „дополнительных деформаций“ в данном случае не облегчает, а, наоборот, усложняет процесс последовательных приближений, так как в подынтегральные выражения, кроме величин $f(\sigma_i^{(n-1)}, t)$, в этом случае входят и комбинации напряжений $2\sigma_x^{(n-1)} - \sigma_y^{(n-1)} - \sigma_z^{(n-1)}, \tau_{xy}^{(n-1)}, \dots$ (τ_{yz}). Это обстоятельство ниже будет иллюстрировано на конкретном примере.

Таким образом, в задачах ползучести стержневых систем и оболочек по безмоментной теории целесообразно использовать метод „переменных параметров упругости“.

Ниже, в качестве приложения, приводится решение задачи безмоментной ползучести и релаксации трехслойных оболочек вращения.

2. Рассмотрим трехслойную оболочку вращения, слой которой симметрично собраны относительно срединной поверхности. Будем считать, что крайние слои изготовлены из одинакового материала, а средний слой — из другого материала.

Положение какого-либо параллельного круга срединной поверхности оболочки будем определять меридиональной дугой α , отсчитываемой от некоторого параллельного круга $\alpha_0 = 0$.

Пусть рассматриваемая оболочка свободна от поверхностных нагрузок, один конец ее ($\alpha = \alpha_0$) зашпелен, а другой конец ($\alpha = l$) растягивается (сжимается) по направлению меридиана на величину $u_0(t)$. В случае $u_0(t) = u_0 = \text{const}$ произойдет релаксация напряжений в слоях оболочки.

Граничные условия запишутся следующим образом

$$u(0, t) = 0, \quad u(l, t) = u_0(t). \quad (2.1)$$

Как известно [7], усилия оболочки по направлениям меридиан T_1 и параллельных кругов T_2 в данном случае имеют вид

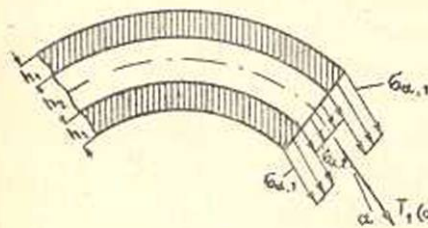
$$T_1(\alpha, t) = \frac{U(t)}{R_2 \cos^2 \vartheta}, \quad T_2(\alpha, t) = -\frac{U(t)}{R_1 \cos^2 \vartheta}, \quad (2.2)$$

где $U(t)$ — искомая функция интегрирования, R_1, R_2 — радиусы кривизны срединной поверхности оболочки, ϑ — угол между касательной к меридиану и осью вращения.

Очевидно, что

$$T_1(\alpha, t) = 2h_1\sigma_{\alpha,1} + h_2\sigma_{\alpha,2}, \quad T_2(\alpha, t) = 2h_1\sigma_{\beta,1} + h_2\sigma_{\beta,2}. \quad (2.3)$$

Здесь h_1 и h_2 — толщины, а $\sigma_{\alpha,1}, \sigma_{\beta,2}$ и $\sigma_{\beta,1}, \sigma_{\alpha,2}$ — напряжения по направлениям меридиан и параллельных кругов крайних (с индексом 1) и среднего (с индексом 2) слоев оболочки (фиг. 1).



Фиг. 1.

Меридиональное перемещение с учетом первого из граничных условий (2.1) выражается через деформации по формуле [8]

$$u(\alpha, t) = \cos \vartheta \int_0^\alpha \frac{1}{\cos \vartheta} \left(\varepsilon_\alpha - \frac{R_2}{R_1} \varepsilon_\beta \right) d\alpha. \quad (2.4)$$

Определяя полные деформации по соотношениям [1]

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha,j} &= \frac{1}{E_j} (\sigma_{\alpha,j} - \nu_j \sigma_{\beta,j}) + \frac{1}{6} f_j(\sigma_j, t) (2\sigma_{\alpha,j} - \sigma_{\beta,j}), \\ \varepsilon_{\beta,j} &= \frac{1}{E_j} (\sigma_{\beta,j} - \nu_j \sigma_{\alpha,j}) + \frac{1}{6} f_j(\sigma_j, t) (2\sigma_{\beta,j} - \sigma_{\alpha,j}), \\ \left(f_j(\sigma_j, t) &= \frac{\varepsilon_j^c}{\sigma_j}, j = 1, 2 \right), \end{aligned} \quad (2.5)$$

для приведенных материалов слоев оболочки получим

$$\varepsilon_{\alpha,j} = \frac{1}{E_j} (\sigma_{\alpha,j} - \nu_j^* \sigma_{\beta,j}), \quad \varepsilon_{\beta,j} = \frac{1}{E_j} (\sigma_{\beta,j} - \nu_j^* \sigma_{\alpha,j}),$$

$$E_j = \frac{3E_l}{3 + E_j f_l(\sigma_l, t)}, \quad \nu_j = \frac{6\nu_l + E_l f_l(\sigma_l, t)}{2[3 + E_j f_l(\sigma_l, t)]} \quad (j = 1, 2). \quad (2.6)$$

Решение задачи сводится к определению пяти неизвестных функций $\sigma_{\alpha, j}$, $\sigma_{\beta, j}$ и $U(t)$, относительно которых имеем следующую систему пяти уравнений

$$2h_1\sigma_{\alpha, 1} + h_2\sigma_{\alpha, 2} = \frac{U(t)}{R_2 \cos^2 \vartheta}, \quad 2h_1\sigma_{\beta, 1} + h_2\sigma_{\beta, 2} = -\frac{U(t)}{R_1 \cos^2 \vartheta},$$

$$\varepsilon_{\alpha, 1} = \varepsilon_{\alpha, 2}, \quad \varepsilon_{\beta, 1} = \varepsilon_{\beta, 2}, \quad u(l, t) = u_0(t), \quad (2.7)$$

(первое и второе—уравнения равновесия, третье и четвертое—условия совместного деформирования слоев, пятое—неоднородное граничное условие оболочки).

Для сравнения, ниже приводятся решения по двум методам:

а) по методу „дополнительных деформаций“

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha, 1}^{(n)} &= \frac{D_1(R_1 + \nu_2 R_2) - D_2(R_2 + \nu_2 R_1)}{R_1 R_2 \cos^2 \vartheta} \frac{E_1}{D_1^2 - D_2^2} U(t) + \\ &+ \frac{E_1 E_2 h_2}{D_1^2 - D_2^2} \left[D_1(\varepsilon_{\alpha, 2}^{(n)} - \varepsilon_{\alpha, 1}^{(n)}) - D_2(\varepsilon_{\beta, 1}^{(n)} - \varepsilon_{\beta, 2}^{(n)}) \right], \\ \sigma_{\beta, 1}^{(n)} &= \frac{D_2(R_1 + \nu_2 R_2) - D_1(R_2 + \nu_2 R_1)}{R_1 R_2 \cos^2 \vartheta} \frac{E_1}{D_1^2 - D_2^2} U(t) + \\ &+ \frac{E_1 E_2 h_2}{D_1^2 - D_2^2} \left[D_2(\varepsilon_{\alpha, 2}^{(n)} - \varepsilon_{\alpha, 1}^{(n)}) - D_1(\varepsilon_{\beta, 1}^{(n)} - \varepsilon_{\beta, 2}^{(n)}) \right], \\ \sigma_{\alpha, 2}^{(n)} &= \frac{U(t)}{R_2 h_2 \cos^2 \vartheta} - \frac{2h_1 \sigma_{\alpha, 1}^{(n)}}{h_2}, \quad \sigma_{\beta, 2}^{(n)} = -\frac{U(t)}{R_1 h_2 \cos^2 \vartheta} - \frac{2h_1 \sigma_{\beta, 1}^{(n)}}{h_2}, \quad (2.8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U(t) &= U_0(t) \left\{ 1 - \frac{\cos \vartheta_1}{u_0(t)} \int_0^t \frac{1}{\cos \vartheta} \left[A_1 \varepsilon_{\alpha, 1}^{(n)} + A_2 \varepsilon_{\beta, 1}^{(n)} + (1 - A_1) \varepsilon_{\alpha, 2}^{(n)} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{R_2 + A_2 R_1}{R_1} \varepsilon_{\beta, 2}^{(n)} \right] d\alpha \right\}, \quad (2.9) \end{aligned}$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} U_0(t) &= \frac{u_0(t)}{\cos \vartheta_1} (D_1^2 - D_2^2) \left\{ \int_0^t \frac{1}{R_1^2 R_2 \cos^3 \vartheta} \{ D_1 [(1 + \nu_1 \nu_2) (R_1^2 + R_2^2) + \right. \\ &\quad \left. + 2(\nu_1 + \nu_2) R_1 R_2] - D_2 [(\nu_1 + \nu_2) (R_1^2 + R_2^2) + 2(1 + \nu_1 \nu_2) R_1 R_2] \} d\alpha \right\}^{-1}, \quad (2.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 1 - \frac{E_2 h_2}{R_1 (D_1^2 - D_2^2)} [D_1 (R_1 + \nu_1 R_2) - D_2 (R_2 + \nu_1 R_1)], \\
 A_2 &= -\frac{R_2}{R_1} - \frac{E_2 h_2}{R_1 (D_1^2 - D_2^2)} [D_2 (R_1 + \nu_1 R_2) - D_1 (R_2 + \nu_1 R_1)], \quad (2.11) \\
 D_1 &= E_2 h_2 + 2E_1 h_1, \quad D_2 = \nu_1 E_2 h_2 + 2\nu_2 E_1 h_1, \quad \vartheta_1 = \vartheta(t) \neq \frac{\pi}{2},
 \end{aligned}$$

б) по методу „переменных параметров упругости“

$$\begin{aligned}
 \varpi_{a,1}^{(n)} &= \frac{D_1^*(R_1 + \nu_2^* R_2) - D_2^*(R_2 + \nu_2^* R_1)}{R_1 R_2 \cos^2 \vartheta} \frac{E_1^*}{(D_1^*)^2 - (D_2^*)^2} U(t), \\
 \varpi_{a,1}^{(n)} &= \frac{D_2^*(R_1 + \nu_2^* R_2) - D_1^*(R_2 + \nu_2^* R_1)}{R_1 R_2 \cos^2 \vartheta} \frac{E_1^*}{(D_1^*)^2 - (D_2^*)^2} U(t), \\
 \varpi_{a,2}^{(n)} &= \frac{D_1^*(R_1 + \nu_1^* R_2) - D_2^*(R_2 + \nu_1^* R_1)}{R_1 R_2 \cos^2 \vartheta} \frac{E_2^*}{(D_1^*)^2 - (D_2^*)^2} U(t), \quad (2.12) \\
 \varpi_{a,2}^{(n)} &= \frac{D_2^*(R_1 + \nu_1^* R_2) - D_1^*(R_2 + \nu_1^* R_1)}{R_1 R_2 \cos^2 \vartheta} \frac{E_2^*}{(D_1^*)^2 - (D_2^*)^2} U(t),
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \frac{u_0(t)}{\cos \vartheta_1} \left\{ \int_0^t \frac{1}{R_1^2 R_2 [(D_1^*)^2 - (D_2^*)^2]} \left\{ (1 + \nu_1^* \nu_2^*) \left[D_1^* (R_1^2 + R_2^2) - \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - 2 D_2^* R_1 R_2 \right] - (\nu_1^* + \nu_2^*) \left[D_2^* (R_1^2 + R_2^2) - 2 D_1^* R_1 R_2 \right] \right\} d\tau \right\}^{-1}, \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

$$D_1^* = 2E_1^* h_1 + E_2^* h_2, \quad D_2^* = 2\nu_2^* E_1^* h_1 + \nu_1^* E_2^* h_2. \quad (2.14)$$

Сравнивая эти решения, легко заметить, что в обоих случаях решение задачи фактически сводится к последовательному уточнению значений неизвестной функции интегрирования $U(t)$ по соответствующим схемам последовательных приближений (2.9) и (2.13). Если по методу „переменных параметров упругости“ в подынтегральное выражение входят только величины $f_1^{(n-1)}(\vartheta_1, t)$, то по методу „дополнительных деформаций“ — приближенные значения деформаций ползучести целиком (см. (2.6), (2.14), (2.13) и (1.7), (2.9)).

$t_{\text{сут}}$	$\langle n \rangle, \frac{\text{кг}}{E_1^* \text{см}^2}$				$\langle n \rangle, \frac{\text{кг}}{E_2^* \text{см}^2}$			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
0	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$0,5 \cdot 10^8$	$0,5 \cdot 10^8$	$0,5 \cdot 10^8$	$0,5 \cdot 10^8$
10	0,93	0,97	0,95	0,96	0,36	0,43	0,41	0,42
30	0,89	0,94	0,93	0,93	0,30	0,40	0,39	0,40
60	0,85	0,93	0,91	0,91	0,26	0,38	0,38	0,38
100	0,82	0,91	0,89	0,88	0,23	0,38	0,36	0,37
150	0,78	0,89	0,86	0,87	0,17	0,37	0,33	0,36

Таким образом, применение метода „дополнительных деформаций“ в данном случае не облегчает, а, наоборот, усложняет процесс последовательных вычислений значений функций $U(t)$. Следовательно, к рассмотренной задаче целесообразно применять метод „переменных параметров упругости“.

В заключение заметим, что при несжимаемости материалов в слоях конических и цилиндрических оболочек кольцевые напряжения отсутствуют, т. е. слои оболочки не давят друг на друга. В этом нетрудно убедиться, если значения $\nu_1 = \nu_2 = 0,5$, $D_1^* = 2D_2^*$, $R_1 = \infty$ подставить в соответствующие уравнения (2.12).

3. Рассмотрим задачу релаксации напряжений в трехслойных цилиндрических оболочках вращения.

Для конкретности положим

$$R_2 = R = 100 \text{ см}, \quad l = 400 \text{ см}, \quad n_0 = 1 \text{ см}, \quad h_1 = 1 \text{ см},$$

$$h_2 = 4 \text{ см}, \quad \nu_1 = 0,2, \quad \nu_2 = 0,4, \quad E_1 = 10 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \quad (3.1)$$

$$E_2 = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \quad f_j(\sigma_j, t) = Q_j(t) \sigma_j^{m_j},$$

где

$$Q_1(t) = 10^{-14} t^{0,5} \left(\frac{\text{см}^2}{\text{кг}} \right)^3 \frac{1}{(\text{сут})^{0,5}}, \quad m_1 = 2, \quad (3.2)$$

$$Q_2(t) = 3 \cdot 10^{-19} t^{0,5} \left(\frac{\text{см}^2}{\text{кг}} \right)^5 \frac{1}{(\text{сут})^{0,5}}, \quad m_2 = 4.$$

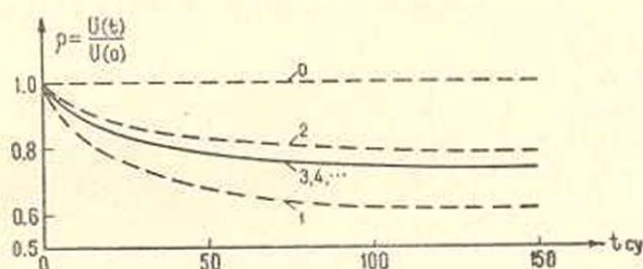
В нижеприведенной таблице представлены результаты вычисления значений искомой функции интегрирования $U(t)$ и параметров приведенных материалов оболочки E_j^* , ν_j .

Из таблицы видно, что разница между значениями искомой функции $U(t)$ при 3-ем и 4-ом приближениях не превышает одного процента.

Таблица

$(\pi) \nu_1^*$				$(\pi) \nu_2^*$				$(\pi) U(t) \text{ кг}$			
I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	$101,11 \cdot 10^4$	$101,11 \cdot 10^4$	$101,11 \cdot 10^4$	$101,11 \cdot 10^4$
0,22	0,21	0,22	0,21	0,45	0,41	0,42	0,41	83,79	92,31	90,62	91,35
0,23	0,21	0,23	0,22	0,44	0,42	0,42	0,42	75,39	88,19	87,11	87,84
0,24	0,22	0,24	0,23	0,45	0,42	0,43	0,42	69,32	85,27	83,74	84,12
0,25	0,22	0,25	0,23	0,45	0,42	0,43	0,43	64,44	82,69	81,61	81,93
0,26	0,23	0,25	0,24	0,46	0,43	0,44	0,43	79,69	78,32	78,32	78,45

На фиг. 2 приведены графики функции $\rho(t) = \frac{U(t)}{U(0)}$ для четырех приближений.



Фиг. 2.

Имея значения $U(t)$, E_j^* и ν_j^* , напряжения вычисляем по формулам (2.12).

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 23 III 1965

Ռ. Մ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ

ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԱՆՄՈՄԵՆՏ ՍՈՂԷԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒՄՄԱՆ ՄԻ
ՄԱՏԱՎՈՐ ՄԵԹՈԴԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո ի մ

Աշխատության մեջ ցույց է տրվում, որ սողքի խնդիրը կարելի է բերել ժամանակի ընթացքում փոփոխվող պարամետրեր ունեցող անհամասեռ, դժավին առաձգական իզոտրոպ մարմնի խնդրին: Առաջադրվող մեթոդը որոշ առավելություն ունի «լրացուցիչ զեֆորմացիաների» հաշվանի [6] մեթոդի նկատմամբ:

Ցույց է տրվում, որ այն հաջողությամբ կարելի է օգտագործել ձողային սխեմաների և անմոմենտ թաղանթների սողքի խնդիրների լուծման համար:

Աշխատության գերջում արվում է պատման երաշխի թողանքների անմիջապես ստորի և ակադեմիայի խնդրի լուծումը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Качанов Л. М. Теория ползучести. Физматгиз, М., 1960.
2. Куратов П. С., Розенблюм В. И. Об интегрировании уравнений неустойчившейся ползучести твердых тел, ПММ, 24, в. 1, 1960.
3. Ключников Ы. Д. О неустойчившейся ползучести. ПМТФ, № 6, 1961.
4. Ильющин А. А., Поспелов И. И. О методе последовательных приближений в задаче о неустойчившейся ползучести. Инж. журнал, 4, в. 4, 1964.
5. Киракосян Р. М. О ползучести слоя стеклопластика при двухосном растяжении. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 18, № 1, 1965.
6. Ильющин А. А. Пластичность, Гостехиздат, М., 1948.
7. Биргер И. А. Методы упругих решений в теории пластического течения. Известия АН СССР, механика и машиностроение, № 2, 1964.
8. Розенблюм В. И. О неустойчившейся ползучести безмоментных оболочек. ПМТФ, № 4, 1960.