

**УСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ
ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ОСЕВОГО
СЖАТИЯ И ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ**

Л. М. Куришин, В. Т. Щербатов

(Новосибирск)

Проведен расчет критической деформации цилиндрической оболочки в условиях ползучести при комбинированном действии осевого сжатия и внутреннего давления. Предложена методика определения по данным упругих испытаний оболочек значений начальных прогибов для расчета оболочек при ползучести. Приводятся данные экспериментального исследования устойчивости оболочек при ползучести, которые сравниваются с результатами расчета.

1. Для расчета устойчивости цилиндрической оболочки в условиях ползучести в соответствии с методикой, подробно изложенной в [1], должны быть заданы некоторые значения начальных неправильностей срединной поверхности. Для расчета сжатой цилиндрической оболочки методика выбора начальных прогибов рассматривалась в работе [2], где было показано, что сочетания значений симметричной и несимметричной составляющих начального прогиба могут быть выбраны по данным упругого эксперимента, а для расчета деформаций в условиях ползучести следует принимать малые симметричные и большие несимметричные прогибы.

В данной работе исследуется влияние внутреннего давления на критическую деформацию при сжатии оболочки в условиях ползучести.

Для решения задачи устойчивости цилиндрической оболочки при ползучести под действием осевых сжимающих усилий и внутреннего давления необходимо иметь в качестве начального условия решение упругой задачи для оболочки с начальным прогибом. Обозначив через Φ и w соответственно функции напряжений и прогибов, запишем нелинейные уравнения пологой цилиндрической оболочки

$$(1.1) \quad \begin{aligned} (1/B) \Delta \Delta \Phi = & (1/R) (w - w_0)_{xx} + w_{xy}^2 - w_{xx} w_{yy} - \\ & - (w_{0,xy}^2 - w_{0,xx} w_{0,yy}) \\ & - D \Delta \Delta (w - w_0) - (1/R) \Phi_{xx} + \Phi_{yy} w_{xx} + \Phi_{xx} w_{yy} - \\ & - 2\Phi_{xy} w_{xy} + q = 0 \end{aligned}$$

Здесь $B = 2Eh$, $D = (8/9)Eh^3$, E — модуль упругости, $2h$ и R — толщина и радиус оболочки.

Начальный прогиб задаем в виде

$$(1.2) \quad w_0 = f_1^0 \sin^{(1/2)} \alpha x \sin (my/R) + f_2^0 \cos \alpha x$$

Полагая, что при нагружении форма прогиба сохраняется, принимаем

$$(1.3) \quad w = f_1 \sin^{(1/2)} \alpha x \sin (my/R) + f_2 \cos \alpha x + f_3$$

Определив функцию Φ из первого уравнения (1.1) и выполнив интегрирование второго по координатам x и y в смысле Бубнова — Галеркина,

получаем систему нелинейных уравнений относительно безразмерных упругих прогибов $\zeta_1 = f_1 / 2h$ и $\zeta_2 = f_2 / 2h$

$$(1.4) \quad \begin{aligned} &\gamma_1 \zeta_1^3 + n_1 \zeta_1 + n_2 \zeta_1^0 = 0 \\ &\{({}^{16}/9) \vartheta^2 - 1 / (4\vartheta^2 \eta^2) [(\eta/4) (\zeta_1^2 - \zeta_1^{02}) + \zeta_2^0] + \\ &+ (2/\vartheta^2) \zeta_1 \zeta_1^0 \zeta_2^0 \gamma_3 + [\zeta_1 (\zeta_1 - \zeta_1^0)] / (2\eta \vartheta^2 \lambda_1^2)\} / n_3 \zeta_2 = 0 \\ &n_1 = \gamma_2 + 16 \zeta_2^2 \gamma_3 - (4p\vartheta^2) / (3\eta) + q / \eta - (8\zeta_2) / (\eta \lambda_1^2) - \\ &- \gamma_1 \zeta_1^{02} - (\zeta_2 - \zeta_2^0) / \eta \\ &n_2 = (4 / \eta \lambda_1^2) (\zeta_2 + \zeta_2^0) - \gamma_2 - 16 \zeta_2 \zeta_2^0 \gamma_3 \\ &n_3 = ({}^{16}/9) \vartheta^2 - (4p) / (3\eta) + 1 / (4\vartheta^2 \eta^2) + (2\zeta_1^2 \gamma_3) / \vartheta^2 \\ &\gamma_1 = (\vartheta^2 + 1) / 4, \quad \hat{\vartheta}_2 = ({}^4/9) \vartheta^4 \lambda_1^2 + 1 / (\eta^2 \lambda_1^2) \\ &\gamma_3 = 1 / \lambda_1^2 + 1 / (81 \lambda_2^2), \quad \hat{\lambda}_1 = (\vartheta^2 + 1) / \vartheta^2 \\ &\lambda_2 = (9\vartheta^2 + 1) / (9\vartheta^2) \end{aligned}$$

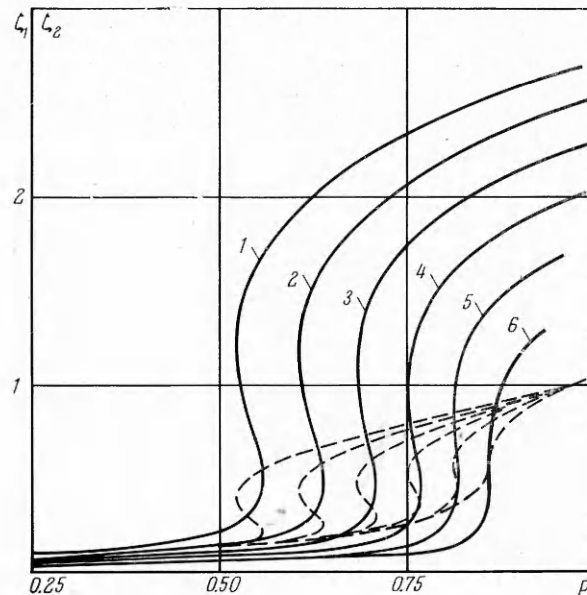
Здесь введены величины

$$\zeta_1^0 = f_1^0 / 2h, \quad \zeta_2^0 = f_2^0 / 2h, \quad \vartheta = (\alpha R) / (2m), \quad \eta = (m^2 h) / R$$

Введены также безразмерные параметры осевого сжатия p и внутреннего давления q

$$p = (3R\sigma) / (4Eh), \quad q = (q^* R^2) / (2Eh^2)$$

где σ , q^* — напряжение осевого сжатия и внутреннее давление.



Фиг. 1

Уравнения (1.4) определяют зависимости прогибов ζ_1 и ζ_2 от нагрузок p и q . При достижении предельных точек на кривых деформирования обращается в нуль определитель

$$(1.5) \quad M = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

В случае больших начальных прогибов величина M в нуль не обращается и в качестве критерия устойчивости используется условие достижения

минимального значения (1.5), что соответствует максимальной скорости деформирования оболочки.

В (1.5) обозначено

$$\begin{aligned} a_{11} &= 2\gamma_1 \zeta_1^2 + n_1, & a_{12} &= n_3 \\ a_{21} &= 32\gamma_3 \zeta_1 \zeta_2 - (1/\eta) (8/\lambda_1^2 + 1) + (4\zeta_1^0) / (\eta\lambda_1^2) - \\ &- 16\gamma_3 \zeta_1^0 \zeta_2^0 \\ a_{22} &= (4/\vartheta^2) \gamma_3 \zeta_1 \zeta_2 - (1/\eta) [1/(\vartheta^2 \lambda_1^2) + 1/(8\vartheta^2)] \zeta_1 - \\ &- (2/\vartheta^2) \zeta_1^0 \zeta_2^0 \gamma_3 + \zeta_1^0 / (2\eta\vartheta^2 \lambda_1^2) \end{aligned}$$

На фиг. 1 приведены зависимости симметричного (пунктирные кривые) ζ_2 и несимметричного ζ_1 (сплошные кривые) прогибов от сжимающей на-

грузки p согласно (1.4) при различных значениях параметра внутреннего давления $q = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ (кривые 1—6 соответственно) для $\zeta_0 = \zeta_{0k} = 0.2, \zeta_0 = 3\zeta_2^0, \zeta_{0k} = 3\zeta_1^0$. В расчетах параметры волнообразования были приняты следующими: $\vartheta = 1$ (связан с формой вмятины), $\eta = 0.375$ (характеризует количество вмятин по окружности). Значение параметра $\eta = 0.375$ соответствует форме потери устойчивости идеальной оболочки при чистом сжатии, значение $\vartheta = 1$ соответствует несимметричным вмятинам квадратной формы.

Расчеты при выборе этих параметров из условия минимума критической нагрузки (или критического времени в условиях ползучести) позволяют сделать вывод, что в известном диапазоне результаты слабо зависят от значений этих параметров. Для случая сжатия результаты таких расчетов приводятся, например, в [1] на фиг. 17. Параметры ϑ и η связаны с параметрами волнообразования в [1] следующим образом:

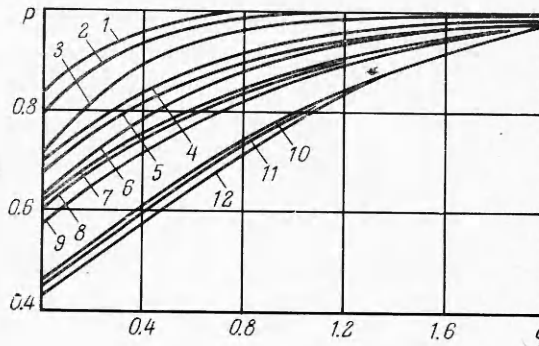
$$\vartheta = \theta, \quad \eta = (\frac{3}{8})\beta^{*2}$$

Для иллюстрации на фиг. 2 приведены зависимости критической нагрузки осевого сжатия для различных сочетаний начальных прогибов. Значения начальных прогибов ζ_0 и ζ_{0k} для кривых 1—12 даны ниже

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ζ_0	0.01	0.01	0.01	0.05	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.6
ζ_{0k}	0.05	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2

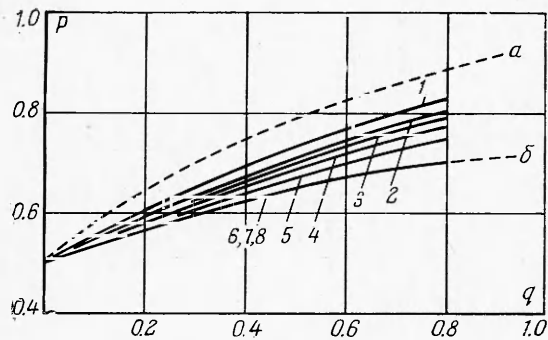
Одному и тому же критическому значению сжимающей нагрузки p при $q = 0$ соответствуют различные сочетания симметричной ζ_0 и несимметричной ζ_{0k} составляющих начального прогиба. Ниже представлен ряд таких сочетаний для случая $p = 0.5$. При расчете критических значений

№	1	2	3	4	5	6	7	8
ζ_0	0	0.09	0.165	0.26	0.39	0.46	0.50	0.51
ζ_{0k}	1.0	0.8	0.6	0.4	0.15	0.06	0.015	0



Фиг. 2

p с учетом внутреннего давления на основе уравнений (1.4) зависимости p от q для этих сочетаний начальных прогибов будут выглядеть в виде веера кривых (фиг. 3). Пунктирными линиями показаны для сравнения кривые из [3], в которых критическая нагрузка разыскивалась при отбрасывании в нелинейных уравнениях типа (1.4) членов, связанных с амплитудами прогибов выше второй степени. Кривая a соответствует несимметричному



Фиг. 3

начальному прогибу ($\xi_0 = 0$), кривая b — симметричному ($\xi_{0k} = 0$). Видно, что это упрощение завышает критическую нагрузку осевого сжатия при несимметричном начальном прогибе.

2. В условиях ползучести для возмущенного состояния цилиндрической оболочки с начальным прогибом будем использовать уравнения работы [4], учитывающие геометрическую нелинейность. Для случая степенного закона ползучести $\dot{p}_i = A\sigma_i^n$ (где

\dot{p}_i, σ_i — интенсивности скоростей ползучести и напряжения) и действия на оболочку осевого сжатия и внутреннего давления уравнения имеют вид

$$\begin{aligned}
 (2.1) \quad & \Delta\Delta\Phi + (n-1) e^{-\xi} \int_0^{\xi} e^{\xi} \Lambda_1 \Lambda_1 \Phi d\xi - B \left[\Gamma(w, w_0) - \right. \\
 & \left. - e^{-\xi} \int_0^{\xi} e^{\xi} \Gamma(w, w_0) d\xi \right] = 0 \\
 & U(w, w_0, \Phi) + e^{-\xi} \int_0^{\xi} e^{\xi} D (\Delta\Delta - 3/4 \Lambda\Lambda) (w - w_0) d\xi + \\
 & + (3n/4) D e^{-n\xi} \int_0^{\xi} e^{n\xi} \Lambda\Lambda (w - w_0) d\xi + q = 0 \\
 & \Gamma(w, w_0) = w_{xy}^2 - w_{xx}w_{yy} - (w_{0, xy}^2 - w_{0, xx}w_{0, yy}) + \\
 & \quad + (1/R) (w - w_0)_{xx} \\
 & U(w, w_0, \Phi) = -D\Delta\Delta (w - w_0) - (1/R) (q^*R + \Phi_{xx}) + \\
 & \quad + 2h\sigma_i \Lambda w + \Phi_{yy}w_{xx} + \Phi_{xx}w_{yy} - 2\Phi_{xy}w_{xy} \\
 & \Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2, \quad \Lambda = -(1/\kappa) \partial^2 / \partial x^2 + \\
 & \quad + (\lambda/\kappa) \partial^2 / \partial y^2 \\
 & \Lambda_1 = -(1/\kappa) \partial^2 / \partial y^2 + (1/2\kappa) \partial^2 / \partial x^2 + (\lambda/\kappa) \partial^2 / \partial x^2 - \\
 & \quad - (\lambda/2\kappa) \partial^2 / \partial y^2 \\
 & \kappa = \sqrt{1 + \lambda + \lambda^2}, \quad \lambda = (q^*R) / (2h\sigma) = (3q) / (4p)
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{11} = -\sigma, \quad \sigma_{22} = (q^*R) / (2h), \\ \xi = (E p_i) / \sigma_i = EA \sigma_i^{n-1} t$$

Решение уравнений (2.1) будем разыскивать в виде

$$(2.2) \quad w = \varphi_1(\xi) f_1 \sin^{(1/2)} \alpha x \sin(my/R) + \varphi_2(\xi) f_2 \cos \alpha x + \\ + \varphi_3(\xi) f_3 \\ \Phi = \psi_1(\xi) A_1 \cos \alpha x + \psi_2(\xi) A_2 \cos(my/R) + \\ + \psi_3(\xi) A_3 \sin^{(1/2)} \alpha x \sin(my/R) + \psi_4(\xi) A_4 \sin^{(3/2)} \alpha x \sin \times \\ \times (my/R)$$

Здесь f_1, f_2 — решение системы уравнений (1.4), отвечающее упругой деформации оболочки. Для уравнений (2.1), описывающих процесс ползучести, имеем начальные условия

$$(2.3) \quad \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = \varphi_3(0) = \psi_1(0) = \psi_2(0) = \psi_3(0) = \psi_4(0) = 1 \\ \text{при } \xi = 0.$$

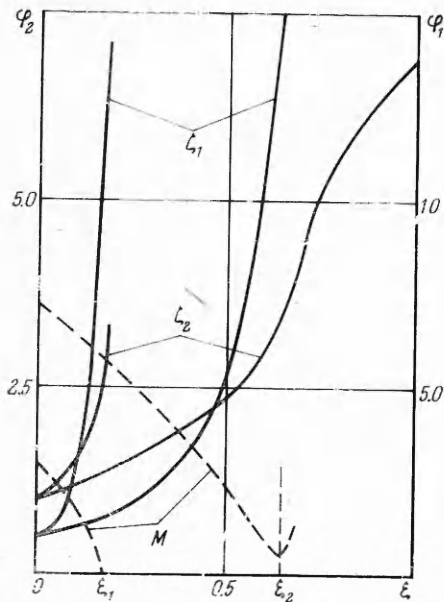
Интегрируя (2.1) по координатам x и y в смысле Бубнова — Галеркина, получаем систему нелинейных интегральных уравнений для функций $\varphi_i(\xi)$

$$(2.4) \quad a_1 \varphi_1 + a_2 \varphi_2 + a_3 = 0, \quad b_1 \varphi_1 + b_2 \varphi_2 + b_3 = 0 \\ a_1 = -\zeta_1 [g_1 - (4/3)p - (\eta/4)g_2 \zeta_1^{02} + (1/\vartheta^2)\zeta_2^0 + q/\vartheta^2] \\ a_2 = [(4\zeta_1^0 \zeta_2) / \vartheta^2] g_3 \\ a_3 = -\zeta_1^0 [g_1 - (4\zeta_2^0) / (\vartheta^2 \lambda_1^2)] - (1/\vartheta^2) g_4 \varphi_1 \varphi_2 \zeta_1 \zeta_2 + \\ + (\eta/4) g_2 \varphi_1^3 \zeta_1^3 + (16\eta/\vartheta^2) \gamma_3 \varphi_1 \varphi_2^2 \zeta_1 \zeta_2^2 - (k_2/4) g_8 \varphi_1 \zeta_1 J_{22} + \\ + (2k_3/\vartheta^2 \lambda_1^2) [2\varphi_2 \zeta_2 - 1/(2\eta)] g_5 + (k_1/\vartheta^2) g_6 \varphi_1 \zeta_1 - \\ - (16k_4 \eta) / (81 \vartheta^2 \lambda_2^2) \varphi_2 \zeta_2 J_{44} - (g_8/3) [(4/3)\lambda_1^2 - \\ - \lambda_3^2/\kappa^2] J_{53} - [(ng_8)/3] (\lambda_3^2/\kappa^2) J_{23} \\ b_1 = (2\zeta_1^0 \zeta_1 g_3) / \vartheta^2, \quad b_2 = \zeta_2 [g_7 - (16/3)p] \\ b_3 = -g_7 \zeta_2^0 + \zeta_1^{02} / (4\vartheta^2) - (g_4 \varphi_1^2 \zeta_1^2) / (4\vartheta^2) + \\ + (8\eta \gamma_3 \varphi_1^2 \varphi_2 \zeta_1^2 \zeta_2) / \vartheta^2 + (2k_3 \varphi_1 \zeta_1 g_5) / (\vartheta^2 \lambda_1^2) - (k_1 g_6) / g_8 - \\ - (8\eta k_4 \varphi_1 \zeta_1 J_{44}) / (81 \vartheta^2 \lambda_2^2) - (16g_8/9) [(4-3/\kappa^2) J_{51} + \\ + (3n J_{21}) / \kappa^2] \\ g_1 = (4\vartheta^2 \eta \lambda_1^2) / 9 + 1 / (\vartheta^2 \eta \lambda_1^2), \quad g_2 = \vartheta^2 + 1 / \vartheta^2 \\ g_3 = 1 / \lambda_1^2 - 4\eta \zeta_2^0 \gamma_3, \quad g_4 = 1 + 8 / \lambda_1^2 \\ g_5 = J_{33} - 4\eta J_{34}, \quad g_6 = J_{11} - (\eta/4) J_{12} \\ g_7 = (64\vartheta^2 \eta) / 9 + 1 / (\vartheta^2 \eta), \quad g_8 = \vartheta^2 \eta \\ \lambda_3 = (\vartheta^2 - \lambda) / \vartheta^2, \quad J_{ij} = e^{-k_i \xi} \int_0^\xi e^{k_i \xi} H_j(\xi) d\xi \\ H_1 = \varphi_2 \zeta_2 - \zeta_2^0, \quad H_2 = \varphi_1^2 \zeta_1^2 - \zeta_1^{02} \\ H_3 = \varphi_1 \zeta_1 - \zeta_1^0, \quad H_4 = \varphi_1 \varphi_2 \zeta_1 \zeta_2 - \zeta_1^0 \zeta_2^0 \\ k_1 = 1 + (n-1) (1/2 + \lambda)^2 / \kappa^2 \\ k_2 = 1 + (n-1) (1 + \lambda/2) 2 / \kappa^2 \\ k_3 = 1 + (n-1) (1/2 + \lambda) \vartheta^2 - (1 + \lambda/2)^2 / [\kappa^2 (\vartheta^2 + 1)^2] \\ k_4 = 1 + (n-1) (1/2 + \lambda) 9\vartheta^2 - (1 + \lambda/2)^2 / [\kappa^2 (9\vartheta^2 + 1)^2]$$

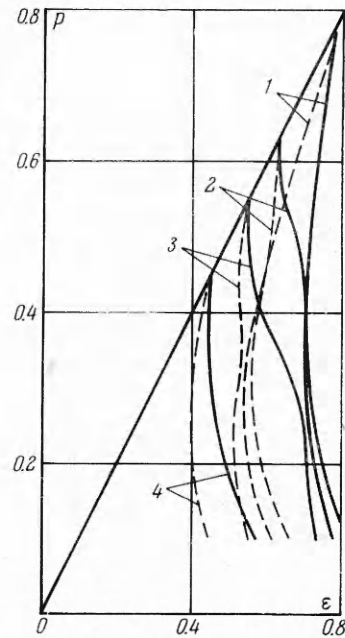
Продифференцировав систему (2.4) по ξ , находим выражение для определителя

$$(2.5) \quad M = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$$

равенство нулю которого соответствует предельной точке на кривых прогибов при ползучести и определяет безразмерный критический параметр $\xi_h = EA\sigma_i^{n-1}t$, связанный со временем. Значения прогибов φ_1 , φ_2 получаются численным интегрированием уравнений (2.4) в зависимости от безразмерного времени. Для иллюстрации на фиг. 4 показаны зависимости симметричного $\varphi_2(\xi)$ и несимметричного $\varphi_1(\xi)$ прогибов для двух значений осевой нагрузки p при одном и том же давлении $q = 0.075$ ($\xi_0 = 0.2$, $\xi_{0h} = 0.05$, $n = 3$). Пунктирными линиями показаны значения определителя M (ξ_1 соответствует предельной точке, ξ_2 — точке перегиба).



Фиг. 4



Фиг. 5

На основании проведенных расчетов можно заключить, что при больших нагрузках осевого сжатия в процессе ползучести растут как симметричные, так и несимметричные прогибы. С уменьшением осевой нагрузки при одном и том же внутреннем давлении несимметричный прогиб растет менее интенсивно, чем симметричный. Оболочка теряет устойчивость по осесимметричной форме. До некоторого отношения параметра внутреннего давления q к параметру сжимающей нагрузки p оболочка теряет устойчивость по неосесимметричной форме, с увеличением этого параметра оболочка теряет устойчивость по симметричной форме. Это качественно согласуется с данными экспериментальных исследований [5].

По значению критического параметра ξ_h вычислялась полная критическая деформация ε , складывающаяся из упругой деформации и деформации оболочки, накапливаемой к моменту потери устойчивости в условиях ползучести]

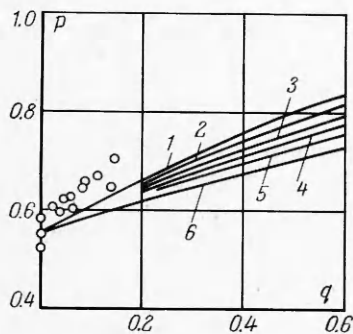
$$(2.6) \quad \varepsilon = p(1 + \xi_h)$$

На фиг. 5 представлены результаты расчета критической безразмерной осевой деформации ε (2.6) в зависимости от осевой нагрузки p , полученные решением уравнений (2.4), с использованием критерия (2.5) при различ-

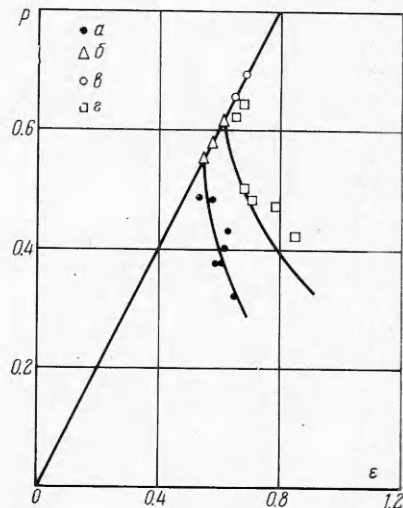
ных значениях параметра внутреннего давления $q = 1, 0.5, 0.25, 0.0$ (кривые 1—4 соответственно). Результаты расчетов соответствуют $\zeta_0 = 0.5$, $\zeta_{0h} = 0.2$. Сплошные кривые относятся к $n = 3$, пунктирные — к $n = 7$.

При увеличении внутреннего давления до значения $q = 0.25$ критическая деформация возрастает для всех значений сжимающих напряжений p . При дальнейшем увеличении внутреннего давления критическая деформация возрастает лишь при больших напряжениях сжатия. Перегибы на кривых критических деформаций связаны со сменой несимметричной формы выпучивания на симметричную. С увеличением показателя ползучести n критические деформации при одном и том же уровне p и q уменьшаются.

3. Для проверки расчетных данных проводилось экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек при ползучести. Испытывались оболочки, точеные из материала Д16Т; геометрические размеры оболочек: толщина $2h = 0.5$ мм, радиус $R = 88$ мм, длина $l = 425$ мм. Температура испытаний $T = 250^\circ \text{C}$. Отклонение температуры вдоль образующей оболочки и по окружности не превышало 5°C . В эксперименте измерялись осевая нагрузка, время и укорочение оболочки, по которому оценивалась деформация ползучести. Тринадцать оболочек были испытаны на устойчивость при осевом сжатии с внутренним давлением без нагрева. При одном и том же внутреннем давлении испытывались по две оболочки. Результаты упругих испытаний представлены точками на фиг. 6. В исследованном диапазоне давлений критическая нагрузка сжатия растет с ростом давления.



Фиг. 6



Фиг. 7

На устойчивость в условиях ползучести при сжатии без внутреннего давления были испытаны десять оболочек. Результаты испытаний представлены на фиг. 7 (а и б). Семь оболочек (а) были испытаны при разных уровнях постоянной сжимающей нагрузки. Три оболочки (б) были испытаны без ползучести при быстром (5—10 сек) нагружении до потери устойчивости ($T = 250^\circ \text{C}$).

Восемь оболочек были испытаны на устойчивость при ползучести с осевым сжатием и внутренним давлением $q^* = 1 \text{ кг/см}^2$ ($q = 0.11$). После нагрева оболочки до $T = 250^\circ \text{C}$ подавалось внутреннее давление, затем прикладывалась осевая нагрузка. Две оболочки (в) быстро (5—10 сек) нагружались до потери устойчивости, остальные (г) испытывались при ползучести с осевыми нагрузками, составляющими часть нагрузки при

потере устойчивости. Видно, что внутреннее давление значительно увеличивает критическую деформацию ползучести.

Полученные результаты позволяют высказать соображения о методике расчета оболочек на устойчивость в условиях ползучести при действии осевого сжатия и внутреннего давления. Основная трудность состоит в правильном выборе вводимых в расчет значений составляющих начального прогиба (симметричной ζ_0 и несимметричной ζ_{0k}).

Если имеются результаты испытаний оболочек на упругую устойчивость при сжатии без внутреннего давления, то можно определить сочетания значений начальных прогибов. Имея данные упругих испытаний с внутренним давлением и осевым сжатием из множества сочетаний начальных прогибов, можно найти сочетание симметричного ζ_0 и несимметричного ζ_{0k} начальных прогибов, наилучшим образом соответствующее данным упругого эксперимента с внутренним давлением. Выбранные таким образом прогибы вводятся затем в расчет оболочек, работающих в условиях ползучести при комбинированном нагружении.

Определим начальные прогибы и затем критические деформации по предлагаемой методике для оболочек, данные испытаний которых при ползучести приведены выше.

Величина критической нагрузки при упругой потере устойчивости без внутреннего давления для испытанных оболочек составляет $p = 0.55$ (фиг. 6). Этой критической нагрузке соответствуют сочетания начальных прогибов, приведенные ниже, которые выбираются по результатам решения упругой задачи осевого сжатия цилиндрической оболочки [1]. Для этих сочетаний начальных прогибов по уравнениям (1.4) получены зависимости критической нагрузки осевого сжатия от внутреннего давления. Серия таких кривых, полученных расчетным путем, приведена на фиг. 6 и соответствует сочетаниям начальных прогибов (см. ниже).

№	1	2	3	4	5	6
ζ_0	0	0.03	0.075	0.12	0.22	0.35
ζ_{0k}	0.68	0.60	0.51	0.40	0.20	0.03

Испытанным оболочкам (фиг. 6) наилучшим образом соответствуют начальные прогибы $\zeta_0 = 0$, $\zeta_{0k} = 0.68$. Этим значениям начальных прогибов соответствуют рассчитанные по уравнениям (2.4) — (2.6) зависимости полной критической деформации оболочки при ползучести, показанные кривыми 1, 2 на фиг. 7 для случаев $q = 0$ и 0.11 соответственно.

Соответствие результатов расчета оболочек при ползучести по принятой методике данным эксперимента удовлетворительное.

Поступила 14 VI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Куршин Л. М. Устойчивость в условиях ползучести. В сб. «Расчет пространственных конструкций», вып. 13. М., Стройиздат, 1970.
2. Куршин Л. М., Щербаков В. Т. К расчету на устойчивость цилиндрических оболочек при сжатии в условиях ползучести. В сб. «Проблемы строительной механики корабля». Л., «Судостроение», 1973.
3. Hutchinson J. Axial buckling of pressurized imperfect cylindrical shells. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 8.
4. Куршин Л. М. К постановке задачи о выпучивании оболочки при ползучести. Докл. АН СССР, 1965, т. 163, № 1.
5. Огибалов П. М., Грибанов В. Ф. Термоустойчивость пластин и оболочек. М., Изд. МГУ, 1968.