



НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОВАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК

В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ

Выполнена на основе деформационной теории оценка несущей способности овалных цилиндрических обечаек с учетом физической и геометрической нелинейности. Проведено сопоставление этих результатов с результатами, полученными с помощью методов, базирующихся на основании теории предельного состояния. Показаны преимущества предложенной методики расчета, позволяющей более полно использовать резервы прочности конструкции и обосновать возможность эксплуатации сосудов с овальностью обечаек, превышающей нормативные значения.

Proceeding from the deformation theory, an estimate was derived of the load-carrying capacity of oval cylindrical shells, taking into account the physical and geometrical non-linearity. These results are compared to those, derived using the methods, based on the theory of limit state. Advantages of the proposed calculation procedure are shown, allowing a more complete use of the structure strength margin, and substantiation of the serviceability of vessels with shell ovality in excess of the standard values.

Рассмотрим сосуды, для которых основной нагрузкой является внутреннее давление. Правила [1] регламентируют предельное значение овальности обечайки $\delta = 1\%$. Анализ данных, полученных в процессе эксплуатации, показывает, что возможна безаварийная работа сосудов с овальностью, превышающей указанное значение. Оценка работоспособности сосуда при таких условиях может быть определена по РД26-6-87 [2], где приводятся коэффициенты снижения несущей способности овалных обечаек. Однако в ряде случаев расчет [2] не позволяет обосновать работоспособность успешно эксплуатируемых объектов. Поэтому нами проведены исследования, позволяющие уточнить оценку работоспособности овалных обечаек.

Консервативную оценку работоспособности овалной цилиндрической обечайки можно получить на основе теории предельного состояния бесконечного тонкостенного цилиндра с эллиптической направляющей, подверженного воздействию внутреннего давления (рис. 1).

В соответствии с теорией предельного состояния [3] несущая способность твердого тела считается исчерпанной, если действующая на него нагрузка приводит к появлению пластических шарниров, преобразующих тело в геометрически изменяемую систему. В данном случае такое состояние достигается тогда, когда пластические шарниры возникают на образующих в вершинах эллипса.

При этом выполняется условие равновесия

$$M(0, b) = -M(a, 0) + \frac{q_e(a^2 - b^2)}{2} \quad (1)$$

и условия образования пластических шарниров

$$\frac{M(a, 0)}{M_T} + \left(\frac{N(a, 0)}{N_T}\right)^2 = 1, \quad (2)$$

$$\frac{M(0, b)}{M_T} + \left(\frac{N(0, b)}{N_T}\right)^2 = 1,$$

где a, b — большая и малая оси эллипса; $M(a, 0)$, $M(0, b)$, $N(a, 0)$, $N(0, b)$ — соответственно изгибающие моменты и растягивающие усилия на

осях эллипса; $N_T = R_e S$; $M_T = 0,25 R_e S^2$; $N(a, 0) = q_e a$; $N(0, b) = q_e b$; R_e — предел текучести; q_e — предельное давление среды.

Из уравнений (1), (2) получаем коэффициент снижения несущей способности обечайки

$$P_e = \frac{-\delta\gamma + \sqrt{\delta^2\gamma^2 + 1 + 0,25\delta^2}}{1 + 0,25\delta^2} \quad (3)$$

При $(0,5\delta)^2 \ll 1$ $P_e = -\delta\gamma + \sqrt{1 + \delta^2\gamma^2}$.

Здесь $P_e = \frac{q_e}{q_T}$; $q_T = \frac{R_e}{\gamma}$ — давление, соответствующее пределу текучести R_e ; $\gamma = r/S$ — коэффициент податливости цилиндрической обечайки; $\delta = 2\frac{a-b}{a+b}$.

Зависимость (3) показана на рис. 2, а. При этом диапазон овальности принят в соответствии с [2]. На рис. 2, б представлена зависимость от величин δ и γ относительного коэффициента снижения несущей способности обечайки $P'_e = \frac{P_e}{P_e(0,01)}$, где $P_e(0,01)$ — значение коэффициента снижения несущей способности обечайки при $\delta = 1\%$.

Полученный результат (рис. 2, б) совпадает с диаграммой, приведенной в [2]. Однако известны случаи, когда приведенная оценка предельной нагрузки дает заведомо заниженные результаты и не

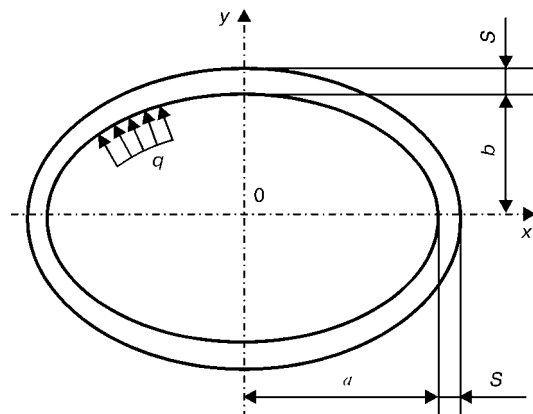


Рис. 1. Расчетная схема обечайки: S — толщина стенки; q — давление среды

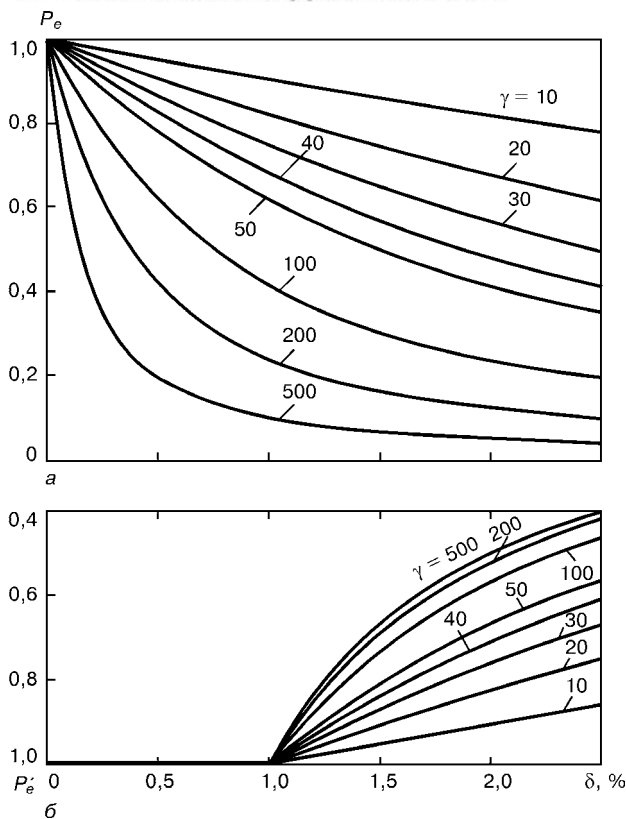


Рис. 2. Зависимости коэффициента снижения несущей способности обечайки P_e (а) и относительного снижения несущей способности P'_e (б) от овальности обечайки δ при различных γ

может оправдать практику эксплуатации сосудов. Проведенные в УкрНИИХиммаш эксперименты [4] также показали, что расчетная оценка [3] носит

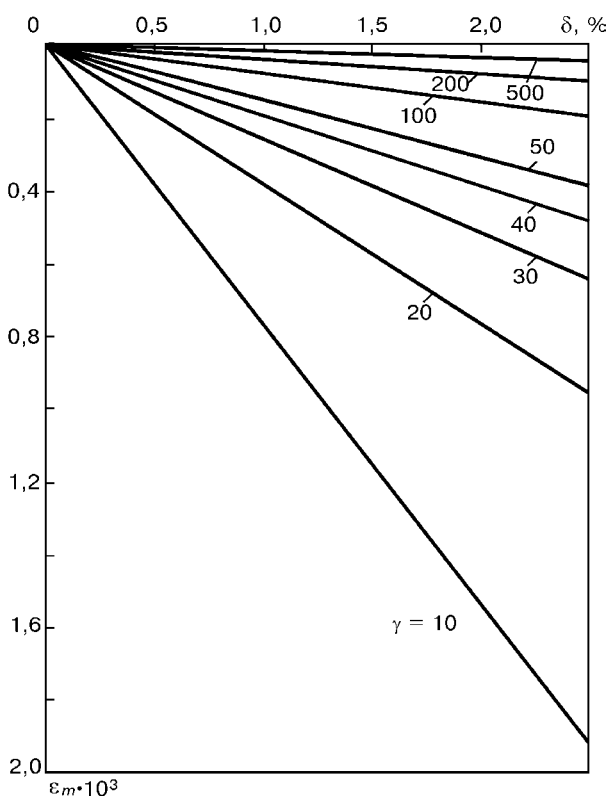


Рис. 3. Зависимости максимальных изгибных деформаций ϵ_m при рихтовке от овальности обечайки δ при различных значениях γ

консервативный характер. Объяснить это может то обстоятельство, что рассматриваемая задача является существенно геометрически (а иногда и физически) нелинейной, что не учитывалось в примененном варианте теории предельного состояния. Поэтому возможные уточнения решения следует ожидать в рамках деформационной теории, которая позволяет рассмотреть напряженно-деформированное состояние обечайки в процессе ее рихтовки под действием внутреннего давления.

Рихтовка обечайки осуществляется за счет изгибных деформаций, уменьшающих овальность и приближающих эллиптическую оболочку к круглой. Таким образом, несущая способность овальной обечайки при нагружении может возрастать. Максимальные изгибные деформации на большой оси эллипса

$$\epsilon_m = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right) \frac{S}{2}, \quad (4)$$

где R, R' — радиусы кривизны эллипса соответственно до нагружения и в состоянии нагрузки, $R = b^2/a$.

Полная рихтовка обечайки достигается при $R = r$. Таким образом, максимально возможные изгибные деформации

$$\epsilon_m = \frac{1}{2\gamma} \left[\frac{1 + 0,5\delta}{(1 - 0,5\delta)^2} - 1 \right] \cong \frac{3}{4} \frac{\delta}{\gamma}. \quad (5)$$

Оценка области упругих изгибных деформаций (рис. 3) может быть получена при сравнении величины ϵ_m с предельными упругими деформациями ϵ_e или с деформациями, соответствующими образованию пластического шарнира ϵ_r :

$$\epsilon_e = \frac{R_e}{E}, \quad \epsilon_r = \frac{3}{2} \frac{R_e}{E},$$

где E — модуль Юнга.

Оказалось, что при овальности менее 2,5 % изгибные деформации при полной рихтовке обечайки внутренним давлением находятся в упругой области. Однако в процессе нагружения жесткость обечайки вследствие геометрической изменчивости последней возрастает. Поэтому полная упругая рихтовка возможна для достаточно податливых обечайки при $\gamma > 35$. Этот результат получен в рамках деформационной теории при пошаговом нагружении, что позволило учесть геометрическую изменчивость обечайки.

В соответствии с работой [5] в области упругих деформаций

$$\Delta\epsilon_i = \frac{6\gamma_0\gamma^2\Delta q_i}{E}. \quad (6)$$

В соответствии с работой [6] в области пластических деформаций при степенном законе деформирования материала

$$\Delta\epsilon_i = \left[(n + 2) \frac{\Delta q_i \gamma^2 \delta}{A} \right]^{-1/n}. \quad (7)$$

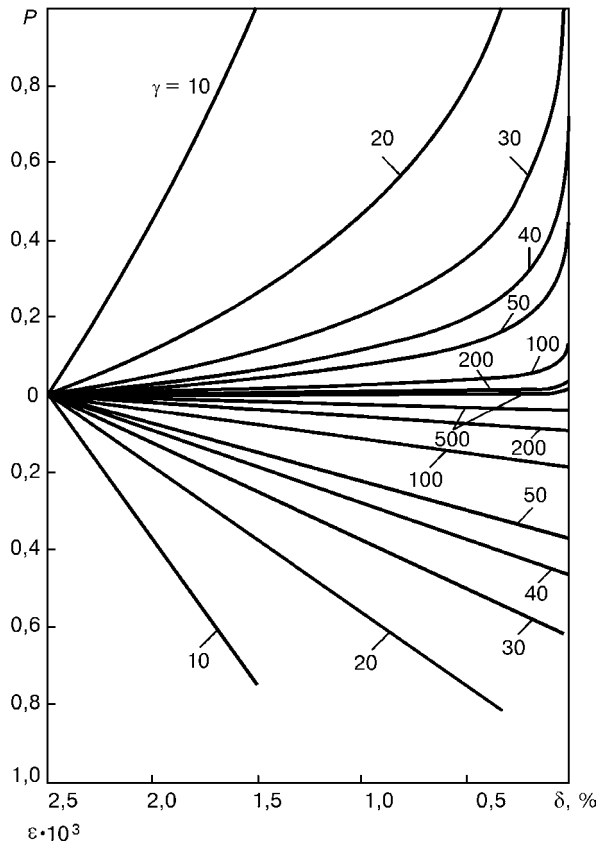


Рис. 4. Зависимости относительного давления P и изгибных деформаций ϵ при рихтовке обечаек от овальности δ при различных значениях γ

Здесь Δq_i , $\Delta \epsilon_j$ — приращение давления и соответствующее ему приращение изгибных деформаций.

Величину γ определяем из соотношения

$$2\gamma_0 = 1 - \frac{a}{L} \left(\frac{f_2}{\beta^2} + f_1 - \frac{f_1}{\beta^2} \right)$$

где

$$L = \frac{\pi r}{2} \frac{64 - \frac{3}{16} \delta^4}{64 - 4\delta^2}; \quad r = \frac{a+b}{2}; \quad a = r(1 + \delta/2);$$

$$b = r(1 - \delta/2);$$

$$f_1 = \frac{1}{3B^2} [(1 + B^2)E(\pi/2, B) - (1 - B^2)F(\pi/2, B)];$$

$$f_2 = E(\pi/2, B); \quad B = \sqrt{1 - \beta^2}; \quad \beta = \frac{b}{a};$$

$F(\pi/2, B)$, $E(\pi/2, B)$ — эллиптические интегралы 1- и 2-го порядка; A , n — параметры степенной зависимости диаграммы растяжения образца.

Относительное давление P и изгибные деформации ϵ вычисляем следующим образом:

ОАО «УкрНИИХиммаш»,
Харьков

$$P = \frac{1}{q_T} \sum_{i=1}^k \Delta q_i, \quad \epsilon = \sum_{i=1}^k \Delta \epsilon_i, \quad (8)$$

где k — число ступеней нагружения.

Результаты расчетов по выражениям (6)–(8) представлены на рис. 4, из которого следует, что для жестких обечаек полная упругая рихтовка возможна при пластическом деформировании срединной поверхности обечайки. Однако уже при допустимом давлении $P[n_T]$ (здесь $[n_T]$ — допускаемый запас прочности) обечайки с исходной овальностью 2,5 % во всем диапазоне изменения геометрических параметров [7] рихтуются до овальности, не превышающей допускаемое значение [1].

Оценка работоспособности овальных обечаек при статическом нагружении может быть выполнена в соответствии с ДСТУ 4003-2000 [8]:

$$\epsilon + \epsilon_p \leq [\epsilon], \quad (9)$$

где ϵ_p — окружные деформации растяжения срединной поверхности; $[\epsilon]$ — допускаемые деформации.

При циклическом нагружении оценка работоспособности обечаек может быть выполнена по ГОСТ 25859-83 [9]:

$$K_\sigma \frac{E}{2} (\epsilon + \epsilon_p) \leq [\sigma_A], \quad (10)$$

где K_σ — эффективный коэффициент концентрации напряжений; $[\sigma_A]$ — их допускаемая амплитуда.

1. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. — Киев: Ком. Госназорохрантруда Украины, 1994. — 373 с.
2. РД 26-6-87. Методические указания. Сосуды и аппараты стальные. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек. — М.: Минхиммаш, 1987. — 26 с.
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.
4. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. Н. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33-36.
5. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — 363 с.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. В 3 т. — М.: Машиностроение. — Т. 1 / Под общ. ред. И. А. Бергера, Я. Г. Пановко. — 831 с.
7. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
8. ДСТУ 4003-2000. Сосуды и аппараты. Выбор параметров упрочняющей обработки.
9. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.

Поступила в редакцию
07.08.2002