

Влияние вмятин и толщины оболочек на критические нагрузки ребристых оболочек

Г. Д. Гавриленко^а, В. И. Мацнер^а, О. А. Кутенкова^б

^а Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, Киев, Украина

^б Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск, Украина

Предложен приближенный подход к оценке параметров критических нагрузок несовершенных оболочек, толщина которых может уменьшаться по разным причинам. Рассмотрены цилиндрические оболочки гладкие, подкрепленные только стрингерами, только шпангоутами, стрингерами и шпангоутами. Выполнено сравнение теоретических параметров критических нагрузок с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: аналитический метод, критические нагрузки, вмятины, ребристые оболочки.

Введение. Известно, что изменение толщины оболочек в процессе эксплуатации происходит по разным причинам, в частности из-за наличия агрессивных сред. Методы учета этого фактора описаны в работах [1–9]. Зная закон изменения толщины, можно определить критические нагрузки по ранее разработанной методике [10], где учитывается переменность толщины оболочек.

Настоящая работа посвящена созданию упрощенной методики определения критических нагрузок ребристых оболочек с учетом изменения их толщины и наличия вмятин.

Методика аналитического расчета и результаты определения критических нагрузок ребристых цилиндрических оболочек с осесимметричными вмятинами. Методика определения критических нагрузок изложена ранее [11–14]. Рассматриваются равномерно сжатые оболочки с осесимметричными вмятинами (одиночными или регулярными), имеющими постоянный радиус кривизны ρ , который определяется по формуле $\rho = (dl)^2 / 8w_0$, где $dl = l_0/l$; l_0 – длина вмятины; l – длина оболочки. Амплитуда вмятин может быть переменной и определяется отношениями w_0/r или w_0/t , где r – радиус оболочки; t – ее толщина. Верхние критические напряжения потери устойчивости определяются по формуле

$$(\sigma/E)_{cr} = \frac{1}{A_{33}''} \left[A_{33} + \frac{2A_{12}A_{13}A_{23} - A_{11}A_{23}^2 - A_{22}A_{13}^2}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \right], \quad (1)$$

где величины A_{ij} описаны ранее [11].

В результате расчета определяются минимальные значения параметра критических нагрузок $p_1 = \sigma_{cr}/\sigma_{cl}$, где $\sigma_{cl} = 0,605Et/r$; E – модуль упругости материала оболочки. На рис. 1 представлены зависимости $p_1 = f(r/t)$ для гладкой оболочки при $l/r = 2,25$, $dl = 0,5$ и переменных $r_1 = r/\rho$.

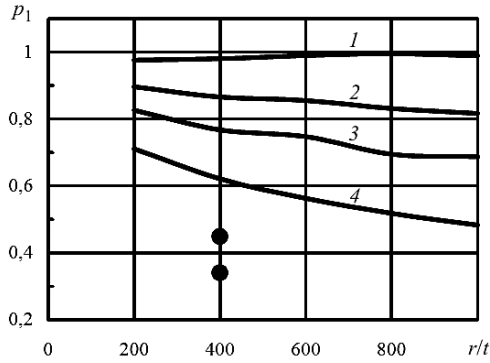


Рис. 1. Зависимость $p_1 = f(r/t)$ для гладкой оболочки: 1 – $r_1 = 0$; 2 – $r_1 = -0,005$; 3 – $r_1 = 0,01$; 4 – $r_1 = -0,02$.

Для идеальных оболочек ($r_1 = 0$) величина p_1 близка к единице, и критические напряжения σ_{cr} пропорциональны t/r . Как известно, с уменьшением толщины оболочки t они снижаются при неизменном ее радиусе r . Если в оболочке есть, например, центральная вмятина, размещенная посредине длины ($dl = 0,5$), и амплитуда ее повышается, что приводит к увеличению r_1 ($r_1 = \frac{8}{dl^2 l_r^2} \frac{w_0}{r}$, здесь $l_r = l/r$), то p_1 снижается. Причем с ростом r/t и r_1 величина p_1 уменьшается от 0,7 до 0,5 при переходе от $r/t = 400$ до 1000 (на рис. 1 кривая 4). На рис. 1, 4–6 темными точками нанесены экспериментальные данные, полученные в работе [15]. Они дают представление о соотношении порядков p_1 для теоретических и экспериментальных величин. Теоретические значения p_1 для кривых 3 и 4 существенно ближе к данным для ребристых цилиндрических [15], чем для идеальной оболочки (кривая 1) – рис. 1

Если толщина неидеальной оболочки уменьшается, то параметр p_1 снижается с ростом w_0/t и уменьшением dl (рис. 2,а).

Длина гладкой оболочки прежняя ($l/r = 2,25$), а r_1 растет от $-0,158 \times 10^{-2} w_0/t$ при $dl = 1$ до $-0,158 w_0/t$ при $dl = 0,1$. Максимальное снижение p_1 наблюдается при $w_0/t = 2$ ($p_1 = 0,5$). Зависимость p_1 от dl представлена на рис. 2,б. Рассмотрим влияние величин амплитуд вмятин w_0/t на поведение параметра p_1 для различных типов подкрепленных оболочек.

Поведение стрингерных оболочек отличается от поведения гладких. Рассмотрим оболочку, подкрепленную 32 ($k_s = 32$) стрингерами. Оболочка имеет следующие относительные размеры: $l/r = 2,25$; $r/t = 400$ и 1000. Подкрепляющие ребра уголкового поперечного сечения следующие: $\angle 4 \times 3,5 \times 0,5$ мм. На рис. 3 представлены зависимости $p_1 = f(w_0/t)$ и $p_1 = f(dl)$ для стрингерной оболочки.

При $0 \leq dl \leq 0,2$ величина p_1 уменьшается, при $0,2 \leq dl \leq 1$ – увеличивается. Минимальное значение p_1 получено при $w_0/t = 2$ и $dl = 0,1$.

Результаты сравнения величин p_1 с данными эксперимента [15] для стрингерных оболочек приведены на рис. 4 ($k_s = 0, 16, 32, 48, 64$). Рассматривали четыре типа вмятин. При $dl = 0,6$ исследуется одиночная вмятина с амплитудой $w_0/t = 2$ (кривая 1), при $dl = 0,2$ – вмятина с той же амплитудой

(кривая 2), при $dl = 0,6$ – три регулярные вмятины с $w_0/t = 2$ (кривая 3), при $dl = 0,6$ – три вмятины длиной 0,2 с амплитудами $w_0/t = 1$ каждая (кривая 4). Теоретические значения для трех типов вмятин (кривые 1, 2, 3) очень близки к экспериментальным данным [15]. Кривая 0 на рис. 4–6 соответствует идеальной оболочке.

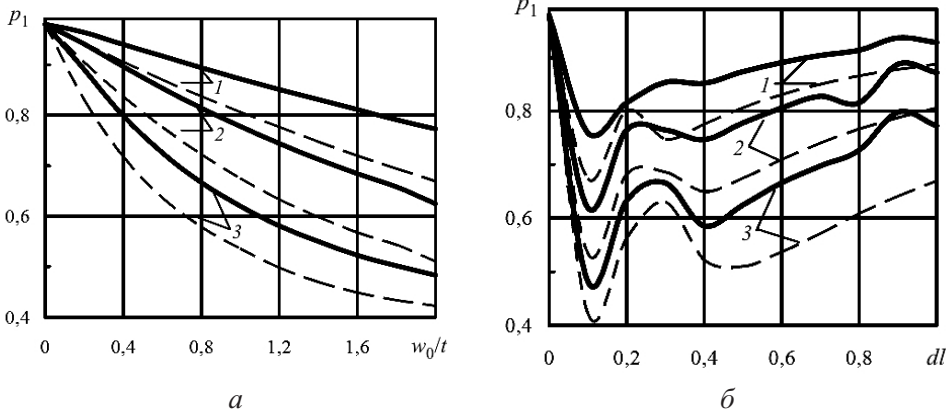


Рис. 2. Зависимости $p_1 = f(w_0/t) - a$ и $p_1 = f(dl) - б$ (а: 1 - $dl = 1$; 2 - $dl = 0,5$; 3 - $dl = 0,1$; б: 1 - $w_0/t = 0,5$; 2 - $w_0/t = 1$; 3 - $w_0/t = 2$). Сплошные линии – при $r/t = 1000$, штриховые – при $r/t = 400$).

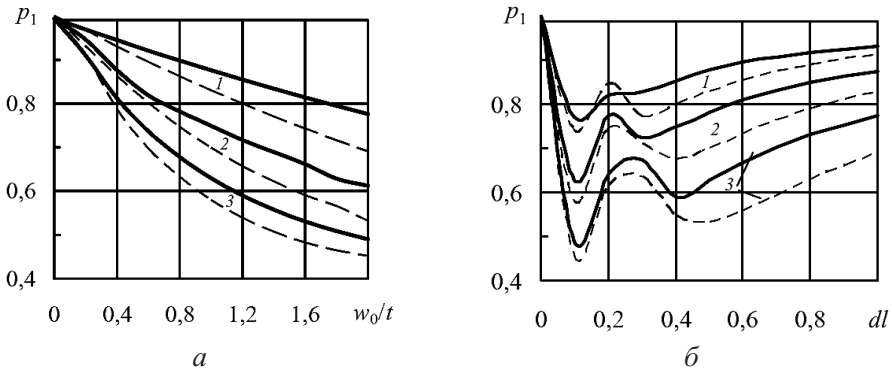


Рис. 3. Зависимости $p_1 = f(w_0/t) - a$ и $p_1 = f(dl) - б$. (Сплошные линии – при $r/t = 1000$, штриховые – при $r/t = 400$)

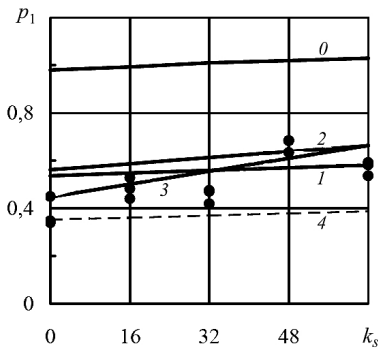


Рис. 4. Зависимость $p_1 = f(k_s)$ для стрингерных оболочек.

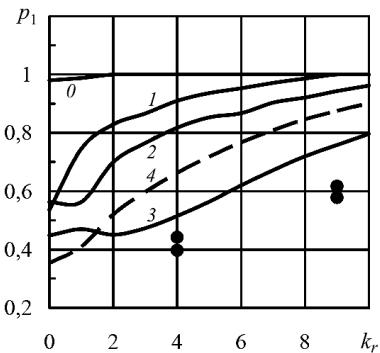


Рис. 5. Зависимость $p_1 = f(k_r)$ для шпангоутных оболочек.

На рис. 5 представлена зависимость $p_1 = f(k_r)$ для оболочек, подкрепленных шпангоутами (k_r – число шпангоутов), с типом вмятин, что и на рис. 4. С ростом амплитуды вмятины теоретические значения p_1 уменьшаются и приближаются к экспериментальным для оболочек с четырьмя и девятью шпангоутами. Размеры шпангоутов уголкового поперечного сечения следующие: $\angle 4 \times 8 \times 0,5$ мм.

На рис. 6 приведены зависимости $p_1 = f(k_s)$ для оболочек, подкрепленных стрингерами ($k_s = 32$) и шпангоутами ($k_r = 4$ и 9), с четырьмя типами вмятин. Сечения стрингеров и шпангоутов соответствуют ранее описанным. Видно явное сближение теоретических и экспериментальных величин p_1 при росте w_0/t . При большом числе стрингеров ($48 < k_s \leq 64$) экспериментальные величины p_1 расположены значительно ниже теоретических, ибо при проведении эксперимента оболочка переходит в упругопластическое состояние, а в теории это не учитывается.

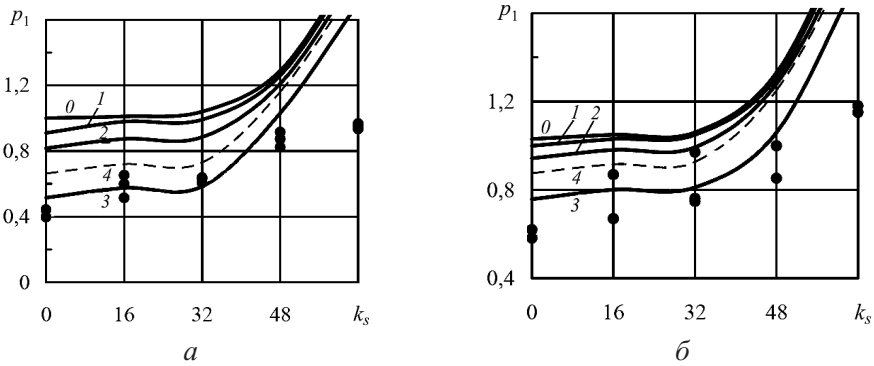


Рис. 6. Зависимости $p_1 = f(k_s)$ при $k_r = 4$ (а) и 9 (б).

На рис. 7 приведена зависимость $p_1 = f(w_0/t)$ для оболочек, подкрепленных шпангоутами ($k_r = 4$), аналогичная представленной на рис. 5. Кривые 1, 2 построены для оболочек с центральными вмятинами и $dl = 0,2$, кривые 3, 4 – для оболочек с вмятинами посередине их длины и $dl = 0,2$.

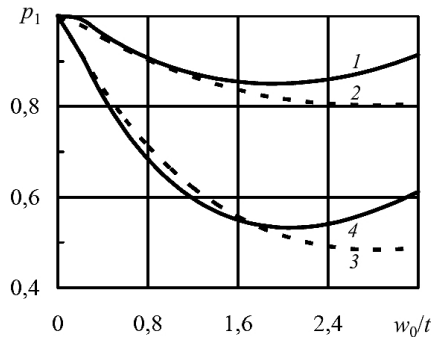


Рис. 7. Зависимость $p_1 = f(w_0/t)$ для оболочек, подкрепленных шпангоутами ($k_r = 4$), с двумя типами вмятин при $r/t = 200$ (сплошные кривые) и $r/t = 400$ (штриховые кривые).

Как следует из рис. 7, величина p_1 уменьшается с ростом отношения w_0/t как для оболочек с одной вмятиной, так и для оболочек с тремя вмя-

тинами. Во втором случае уменьшение p_1 происходит более резко. При определенных амплитудах $1,6 \leq w_0/t \leq 3$ значение p_1 достигает минимума. Оболочке с $r/t = 200$ соответствует форма потери устойчивости с $m = 5$ (m – число полуволн по длине) и $n = 11$ (n – число волн по окружности); при $w_0/t \leq 1,2$ имеем $m = 5$, $n = 12$. Оболочке с $r/t = 400$ отвечает форма с $m = 5$ и $n = 14$.

Главными факторами, влияющими на p_1 , являются амплитуда w_0/t и количество вмятин. С уменьшением толщины оболочек уменьшается величина p_1 , особенно при $r/t = 400$.

Более полного соответствия между теоретическими и экспериментальными величинами p_1 можно достичь, используя лишь теорию, учитывающую нелинейное и неоднородное докритическое состояние при определении критических сил [16, 17]. При этом необходимо добиваться соответствия между формами начального прогиба, полученными теоретически и экспериментально, учитывать нелинейные эффекты и трансформацию формы оболочки при нагружении.

Заключение. Несмотря на использование довольно простой расчетной схемы, показано, что учет уменьшения толщины оболочек и наличие осесимметричных вмятин приводит к существенному снижению несущей способности оболочек. Анализ полученного решения свидетельствует, что даже простой учет наличия вмятин и изменения толщины оболочек способствует сближению теоретических и экспериментальных значений критических нагрузок.

Резюме

Запропоновано наближений підхід до оцінки параметрів критичних навантажень недосконалих оболонок, товщина яких може зменшуватись через різні чинники. Розглянуто циліндричні оболонки гладкі, підкріплені тільки стрингерами, тільки шпангоутами, стрингерами і шпангоутами. Проведено порівняння теоретичних параметрів критичних навантажень із відомими експериментальними даними.

1. *Зеленцов Д. Г.* Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах // Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 132 с.
2. *Гутман Э. М.* Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. – 281 с.
3. *Гутман Э. М., Зайнуллин Р. С., Зарипова Р. А.* Долговечность сосудов высокого давления в условиях механохимической коррозии // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – 1977. – № 9. – С. 3 – 5.
4. *Долинский В. М.* Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии // Хим. и нефт. машиностроение. – 1967. – № 2. – С. 9 – 10.
5. *Долинский В. М.* Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии // Исследования по теории оболочек. – 1976. – Вып. 7. – С. 37 – 42.

6. *Криворучко Т. М., Почтман Ю. М.* Устойчивость и долговечность подкрепленных цилиндрических оболочек, находящихся в агрессивной среде // Прикл. механика. – 1988. – 24. – № 9. – С. 51 – 56.
7. *Карпунин В. Г., Клещев С. И., Корнишин М. С.* К расчету пластин и оболочек с учетом общей коррозии // Тр. X Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. – Тбилиси: Мецниереба, 1975. – 1. – С. 166 – 174.
8. *Корнишин М. С., Карпунин В. Г.* К устойчивости пластинок и оболочек с учетом общей коррозии // Тр. семинара по теории оболочек. – Казань, 1975. – Вып. 6. – С. 58 – 66.
9. *Філатов Г. В.* Оптимальне проектування конструкцій методами випадкового пошуку. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. – 132 с.
10. *Гавриленко Г. Д.* Методики численного расчета устойчивости подкрепленных оболочек. – Киев: Наук. думка, 1991. – 176 с.
11. *Гавриленко Г. Д., Мацнер В. И.* Экспериментальное обоснование аналитического метода определения верхних и нижних пределов критических нагрузок в ребристых оболочках // Пробл. прочности. – 2006. – № 2. – С. 59 – 80.
12. *Гавриленко Г. Д., Мацнер В. И.* Аналитический метод определения верхних и нижних критических нагрузок для упругих подкрепленных оболочек. – Днепропетровск: Барвикс, 2007. – 187 с.
13. *Гавриленко Г. Д., Мацнер В. И.* Влияние осесимметричных вмятин в ребристых оболочках на величины минимальных критических нагрузок // Прикл. механика. – 2007. – 43, № 5. – С. 73 – 79.
14. *Гавриленко Г. Д., Мацнер В. И., Кутенкова О. А.* Свободные колебания продольно сжатых подкрепленных оболочек с осесимметричными вмятинами и выпучинами // Пробл. прочности. – 2009. – № 2. – С. 125 – 138.
15. *Амиро И. Я., Заруцкий В. А., Поляков П. С.* Ребристые цилиндрические оболочки. – Киев: Наук. думка, 1973. – 248 с.
16. *Гавриленко Г. Д.* Несущая способность несовершенных оболочек. – Днепропетровск: Барвикс, 2007. – 294 с.
17. *Гавриленко Г. Д., Трубицына О. А.* Колебания и устойчивость ребристых оболочек вращения. – Днепропетровск: Барвикс, 2008. – 155 с.

Поступила 26. 02. 2009