

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА имени М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

ДОЛГОВ Александр Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ КОНИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ
(01.02.03 - Сопротивление материалов и
строительная механика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1977

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена на кафедре теоретической и строительной механики Днепропетровского ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Артема

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, профессор ОНИЩЕНКО В.И.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук, профессор САЧЕНКОВ А.В.,
кандидат технических наук,
доцент ЗЮБИН В.А.

Ведущее предприятие – Днепропетровское отделение
Института механики АН УССР.

Защита состоится "3" сентября 1977 г. в "14" часов на заседании специализированного совета К ИИ4.07.С2 Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М.И. Калинина.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу:
320629, ГСП, г. Днепропетровск, Ю, ул. Университетская, 2,
ДИИТ, Ученому секретарю совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Зиваря 1977 г.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время наиболее остро ставится вопрос о снижении материалоемкости без потери прочностных характеристик элементов конструкций и, в частности, тонкостенных конических оболочек, нашедших широкое распространение в практике промышленного и гражданского строительства, авиа- и ракетостроения, химическом машиностроении. Одним из возможных путей реализации указанных требований является использование оболочек переменной жесткости. Потребность в достаточных зависимостях при исследовании устойчивости оболочек переменной жесткости вызвана необходимостью построения алгоритмов, позволяющих решать как прямые задачи - отыскание величин критических нагрузок, так и обратные - задачи рационального проектирования.

64-920

Устойчивость конических оболочек постоянной жесткости достаточно полно исследована в работах Х.М.Муштаря, А.В.Саченкова, Э.И.Григалика, А.Н.Алумяэ, И.И.Трапезнича, P.Seide, J.Singer, и др. Что же касается конических оболочек переменной жесткости, то их устойчивость исследована недостаточно как теоретически, так и экспериментально. Более детально изучена устойчивость подкрепленных конусов. Однако, большинство исследований ограничивается рассмотрением оболочек в рамках конструктивно-ортотропной теории, которая в ряде случаев не может обеспечить достаточной для практических расчетов точности решения. В этом случае необходим учет дискретного расположения подкрепляющих элементов. Однако, в настоящее время исследование влияния дискретного расположения подкрепляющих ребер проведено в основном при изучении устойчивости цилиндрических оболочек. В гораздо меньшей степени исследована устойчивость дискретно подкреплен-

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
Імені академіка В.Лазаряна

ных конических оболочек.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в разработке инженерных методов расчета конических оболочек переменной жесткости, обусловленной как переменностью толщины и параметров упругости, так и наличием подкрепляющих элементов.

Цель работы. Разработка приближенных методов расчета статической устойчивости конических оболочек переменной жесткости при некоторых видах внешней нагрузки; учет влияния дискретного расположения шпангоутов на общую неустойчивость оболочек при внешнем давлении и кручении; экспериментальное исследование устойчивости оболочек переменной жесткости.

Научная новизна. Исследована устойчивость конических оболочек с переменной вдоль меридиана толщиной при внешнем давлении, кручении и комбинированном нагружении осевыми усилиями и внешним давлением. Получены расчетные зависимости для оболочек, подкрепленных кольцевыми дискретно расположенными ребрами. В рамках конформно-ортотропной теории изучена устойчивость конусов, подкрепленных стрингерами переменной жесткости при воздействии крутящего момента. Проведено экспериментальное исследование устойчивости конических оболочек переменной толщины при внешнем нормальном давлении и подкрепленных шпангоутами оболочек при кручении.

Практическая ценность. Полученные в диссертационной работе результаты и программы численной реализации предлагаемых алгоритмов на ЭЕМ могут быть использованы при расчете устойчивости тонкостенных конических оболочек, широко используемых в новой технике, судостроении, химическом машиностроении.

Апробация. Результаты работы докладывались: на научном семинаре кафедры теоретической механики Казанского госуниверситета, (1976); научных конференциях Днепропетровского госуниверсите-

та, (1973, 1974, 1975); научно-технической конференции, посвященной 75-летию образования Днепропетровского горного института, (1974); Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек, (Кутаиси, 1975); Всесоюзной конференции "Автоматизация исследований несущей способности и длительной прочности летательных аппаратов", (Харьков, 1975); Всесоюзной конференции "Применение машинных методов для решения краевых задач", (Харьков 1976); а также на научном семинаре кафедры теоретической и строительной механики Днепропетровского горного института.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 4 статьи.

Объем. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, приложения и содержит 132 страницы машинописного текста, 33 рисунка, 17 таблиц и 11 страниц приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дается обзор и анализ современного состояния исследований статической устойчивости круговых конических оболочек постоянной и переменной жесткости, на основании которых обоснована актуальность рассматриваемых в диссертационной работе задач.

Глава I. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ КОНИЧЕСКИХ ОБЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ВНЕШНЕМ ДАВЛЕНИИ

В первой главе изучается возможность применения асимптотического метода Вентцеля, Крамерса, Бриллиана (БКВ) к интегрированию дифференциальных уравнений устойчивости конических оболочек постоянной и переменной толщины при внешнем нормальном давлении. Показано, что для геометрических и жесткостных

параметров конических оболочек, при которых уравнения устойчивости не имеют точек поворота, применение метода ВКБ позволяет свести нахождение параметров критической нагрузки к достаточно простым алгоритмам. С использованием полубезмоментной теории оболочек проведен анализ влияния граничных условий на величину критической нагрузки. Исследовано влияние осевых усилий на несущую способность оболочек постоянной и переменной толщины при внешнем давлении.

Получено асимптотическое решение задачи устойчивости конической оболочки, толщина которой изменяется пропорционально отношению радиусов оснований. Использовано уравнение устойчивости оболочек в форме^{*)}:

$$(s^4 V'')'' - p^4 V = 0, \quad (1)$$

s - продольная координата; V - функция окружных перемещений,

$$p^4 = q \frac{l_0 n^4 (n^2 - 1)}{E h_0 \sin^3 \gamma \cos^3 \gamma} - \frac{h_0^2 n^4 (n^2 - 1)^2}{12 l_0^2 \sin^6 \gamma \cos^2 \gamma}, \quad (2)$$

q - внешнее давление, E - модуль Юнга, l_0 - расстояние по образующей от вершины оболочки до меньшего основания,

2γ - угол при вершине оболочки, n - число окружных волн, образующихся при потере устойчивости, h_0 - толщина оболочки при $s = l_0$

Решение отнесем к виду:

$$V = \exp \left\{ p \sum_{i=1}^{\infty} \int_{l_0}^s \psi_i(t) p^{-i} dt \right\}. \quad (3)$$

С учетом двух членов разложения в (3) получено приближенное решение уравнения (1):

$$V = s^{-\frac{1}{2}} [C_1 \operatorname{sh}(p \ln s) + C_2 \operatorname{ch}(p \ln s) + C_3 \sin(p \ln s) + C_4 \cos(p \ln s)]. \quad (4)$$

*) Печников В.П. Влияние граничных условий на устойчивость ортотропной конической оболочки, нагруженной внешним давлением. Тр. УИ Всес. конф. по теории оболочек и пластмасс. Баку, 1966.

Рассмотрены два вида граничных условий - жесткое защемление и свободное опирание оснoваний оболочки. Проведено сравнение с точным решением и показано удовлетворительное совпадение результатов.

Для конических оболочек постоянной толщины получено асимптотическое решение уравнения устойчивости в виде:

$$W = C_1 \sin l + C_2 \cos l + C_3 \operatorname{sh} l + C_4 \operatorname{ch} l, \quad (5)$$

$$l = \int_0^x \left(\frac{\rho^3 \gamma}{\chi^3} - \frac{\rho^4}{\chi^5} \right)^{\frac{1}{2}} dx, \quad \rho = \frac{\epsilon n^2}{\sin^2 \gamma}, \quad \epsilon = \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \gamma h}{12(1-\mu^2) l_1}}, \quad (6)$$

$\rho = \frac{l_0}{l_1}$, $\chi = \frac{s}{l_1}$, $\gamma = \frac{q l_1 \operatorname{tg}^3 \gamma}{\epsilon^3 E h}$, l_1 - расстояние от вершины оболочки до большого основания, W - функция радиального перемещения.

Полученное решение справедливо для $\gamma > \frac{\rho}{\chi^3}$, то есть для усеченных конических оболочек, достаточно далеких от замкнутых. Учитывая соотношения (6), можно заключить, что решение (5) справедливо для оболочек постоянной толщины, у которых величина критической нагрузки больше, чем для длинной конической оболочки линейно-переменной толщины $(h = h_0 \frac{s}{l_0})$, свободно опертой на одном торце и свободной на другом.

Для конических оболочек, близких к замкнутым, полученное решение приводит к результатам, удовлетворительно согласующимся с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, если переменные коэффициенты уравнения устойчивости зафиксировать, положив их равными для заданного отношения ρ значению соответствующих коэффициентов при $\chi = \frac{1+\rho}{2}$.

С использованием решения (5) получены значения параметров критической нагрузки γ и волнообразования в поперечном направлении ρ для граничных условий жесткого защемления.

свободного опирания и их комбинаций. Получено удовлетворительное согласование с результатами других авторов.

При исследовании устойчивости конических оболочек с переменной вдоль меридиана толщиной при комбинированном нагружении внешним давлением и осевой силой используется уравнение, аналогичное (1): $V^{iv} + \left[\frac{6}{s} + 2 \frac{f'(s)}{f(s)} \right] V''' + \left[6 \frac{f'(s)}{sf(s)} + \frac{f''(s)}{f(s)} + \frac{6}{s^2} \right] V'' + \frac{l_1 \gamma P^2 f(s)}{s^3} V' + \left[\frac{P^4 l_1^2 f^2(s)}{s^6} - \frac{\gamma P^3}{l_1 s^3 f(s)} \right] V = 0$, (7)

$$\eta = \frac{T \sin \gamma}{2\pi l_1 e^2 E h \cos^3 \gamma} \quad T - \text{осевая сила.}$$

Возможность упрощений, связанных с использованием уравнения (7), основана на рассмотрении форм потери устойчивости, отвечающих преобладающему влиянию внешнего давления, когда волнообразование по длине оболочки выражено намного слабее, чем в окружном направлении. Предполагается, что функция изменения толщины оболочки $f(s)$ непрерывна вместе со своими производными до второго порядка включительно.

С использованием асимптотического метода в частном случае оболочки постоянной толщины получены значения параметров критической нагрузки и числа волны в окружном направлении.

Анализ полученных результатов приводит к выводу о возможности использования полубезмоментной теории до величины осевой сжимающей нагрузки, приблизительно равной половине верхней критической.

При исследовании устойчивости конических оболочек с толщиной, меняющейся произвольным образом, в общем случае не удается определить область, в которой решение уравнения (7) представимо в виде, аналогичном (5). Решение поставленной задачи в рассматриваемом случае нагружения проведено методом конечных разностей.

В итоге получены достаточно простые зависимости, позволя-

ше проанализировать влияние разнотолщинности оболочки на величину критической нагрузки. В качестве примера на рис. I представлены результаты расчета оболочек, толщина которых изменяется по закону

$$h = h_0 f(s) = h_0 \left[1 + \frac{k}{l_1 - l_0} (s - l_0) \right]^c \quad (8)$$

при $C = 1, 2$ и $K = 0,5$.

$\Psi(T, \rho)$

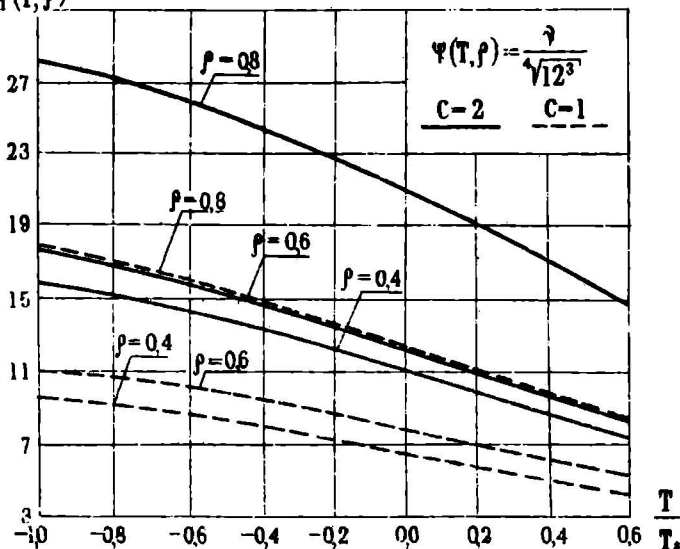


Рис. I.

По оси абсцисс отложено отношение величины осевой силы к ее критическому значению для оболочки постоянной толщины.

Численный анализ результатов показывает, что расчет устойчивости конических оболочек с относительно небольшой разнотолщинностью ($C = 1, K = 0,5$) можно свести к расчету оболочки с постоянной толщиной, равной среднему значению \bar{h} . При этом погрешность, вносимая в расчетную величину критического усилия, не превышает 5%. С увеличением разнотолщинности ($C = 2$) усреднение толщины оболочки приводит к существенно завышен-

ныи результатам.

Для частного случая $h = h_0 \frac{S}{l_0}$ значения критического усилия практически совпадают с точным решением. Полученные результаты показывают, что при внешнем давлении равнопрочные конические оболочки, теряющие устойчивость, не являются рациональными. В этом случае оболочки постоянной толщины такого же веса воспринимают большую нагрузку, чем равнопрочные. При рассмотрении граничных условий жесткого зацебления и свободного опирания показано, что с увеличением осевой силы влияние граничных условий на величину критического давления уменьшается при растяжении и увеличивается при сжатии. При жестком зацеблении торцов оболочки, в рассматриваемом диапазоне осевых усилий конусность оболочки практически не влияет на комбинацию нагрузок, при которой происходит потеря устойчивости. В случае свободного опирания конусность существенно влияет на зависимость $\frac{q}{q_s} = f\left(\frac{r}{r_s}\right)$ при действии растягивающих усилий.

Следует отметить, что с увеличением осевого растягивающего усилия число окружных волн увеличивается. Увеличение сжимающей нагрузки приводит к их незначительному уменьшению.

Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ КРУЧЕНИИ

Рассматривается устойчивость конических оболочек переменной толщины и с переменным модулем упругости вдоль образующей при воздействии крутящего момента. Выводится уравнение полубезмоментной теории оболочек, решение которого получено методом БКБ.

В качестве исходных используются уравнения равновесия полых оболочек вращения переменной толщиной^(*):

$$\Delta(D\Delta W) - (1-\mu)L(D,W) - \Delta_k \varphi - (k_1 + k_2)U + L(\varphi, W) + X_3 = 0,$$

$$\Delta(H\Delta \varphi) - (1+\mu)L(H,\varphi) - (1-\mu)\Delta(H,U) + \Delta_k W + \frac{1}{2}L(W,W) = 0.$$

Вводятся следующие безразмерные параметры:

$$\lambda = \frac{M}{\pi \Gamma_1^2 E h_0 \varepsilon^{5/2} \cos^2 \tau}, \quad \chi = \frac{S}{\Gamma_1}, \quad y = \beta(1-\chi) + \pi\theta, \quad \beta = \frac{\pi a}{1-\rho},$$

θ - окружная координата, π - число полуоборотов в продольном направлении оболочки.

Исходная система уравнений интегрируется по координате θ от 0 до 2π методом Бубнова-Галеркина. Дальнейшее упрощение уравнений производится с учетом того, что для достаточно широкого класса оболочек имеет место сильное неравенство $\varepsilon \ll 1$. В итоге получено уравнение устойчивости в следующем виде:

$$(\xi W'')'' - 2\beta^2(\xi W')' - QW = 0, \quad (9)$$

$$\text{где } \xi = \chi^3 f(\chi), \quad Q = \frac{\lambda \rho^{5/2} \beta}{\chi^2} - \frac{\rho^4 \Gamma^2}{\chi^3} - \beta^4 \xi + \beta^2 \xi''$$

Решение уравнения (9) ищется в виде (3). В качестве "большого" принимается параметр волнообразования в поперечном направлении ρ . При удовлетворении решения граничным условиям жесткого закрепления получена достаточно простая формула:

$$M_x = 0,665 \lambda \cdot E \Gamma_1^{\frac{3}{2}} h_0^{\frac{9}{4}} (\sin \tau)^{\frac{1}{2}} (\cos \tau)^{\frac{3}{2}} / (1-\mu^2)^{\frac{5}{8}}, \quad (10)$$

Γ_1 - радиус большого основания; функция λ_x зависит от крутости и характера изменения толщины оболочки.

В частном случае оболочки постоянной толщины полученные результаты удовлетворительно согласуются с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

В качестве примера приведены зависимости $\lambda_x = \lambda_x(\rho)$ для

*) Lukaszewicz S., The equations of the technical theory of shells of variable rigidity. Arch. mech. stosowanej. 1961, 13, №1.

оболочек с толщиной, изменяющейся по закону (8) при $C = -2, -1, 1, 2$ для различных значений k . Из анализа полученных результатов следует, что с уменьшением конусности влияние разнотолщинности на величину критического момента увеличивается. С другой стороны, влияние конусности оболочки увеличивается с увеличением разнотолщинности, когда толщина возрастает к большому основанию и уменьшается в противном случае. В отличие от нагружения оболочки внешним давлением, при кручении средние толщины приводит к существенной погрешности даже при незначительной разнотолщинности. Исключение составляют лишь оболочки с большим отношением радиусов оснований ($\rho > 0,8$).

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о целесообразности увеличения толщины конических оболочек к меньшему основанию при воздействии крутящего момента.

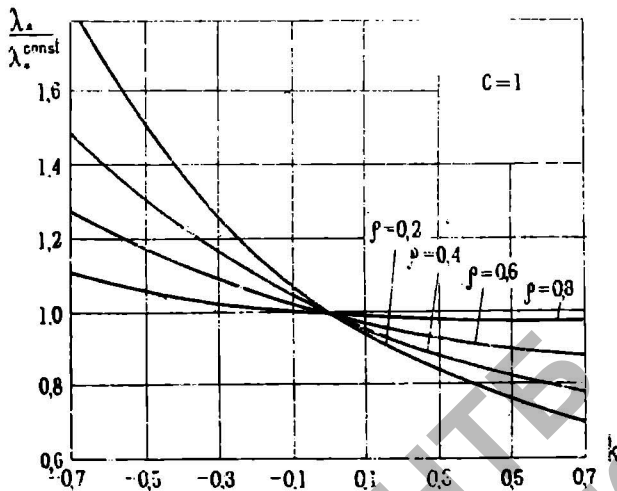


Рис. 2.

В частности, на рис.2 представлено отношение параметров критического усилия для оболочек переменной и постоянной толщины одинакового веса в зависимости от разнотолщинности и ко-

нустности, откуда следует, что за счет перераспределения материала оболочки к меньшему основанию может быть достигнуто значительное увеличение критического момента. При этом возрастание критической нагрузки более существенно для оболочек большей конустности. С другой стороны, за счет увеличения толщины к меньшему основанию может быть достигнут существенный выигрыш в весе, который при прочих равных условиях растет с увеличением разнотолщинности и конустности оболочки. К примеру, при одинаковой критической нагрузке вес оболочки переменной толщины ($\nu = 1$, $K = 0,7$, $\beta = 0,2$) на 30% меньше веса конической оболочки постоянной толщины.

Исследована устойчивость ортотропных конических оболочек с переменным модулем упругости вдоль образующей. Получено разрешающее уравнение устойчивости аналогичное (9), где

$$\lambda = \frac{M}{\pi \left[\frac{2}{3} E_2^{5/6} [E_1(\rho)]^{3/6} h c^{5/2} \cos^2 \gamma \right]}, \quad \rho = \frac{E_2 \varepsilon \pi^2}{E_1(\rho) \sin^2 \gamma}.$$

Формула для определения критического момента имеет вид (10), где вместо E необходимо подставить E_2 и ввести дополнительный множитель $\left[\frac{E_1(\rho)}{E_2} \right]^{3/6}$

С использованием ЭВМ получены зависимости, $\lambda_c = \lambda_c(\rho)$ для различных законов изменения E_1 . Проведен анализ влияния переменности модуля упругости на величину критического момента.

Показано, что в рассматриваемом случае нагружения конические оболочки с модулем, возрастающим к меньшему основанию, более эффективны в восприятии внешней нагрузки, чем оболочки постоянной жесткости.

Проведенные расчеты показывают, что предлагаемый подход не требует больших затрат машинного времени и может быть использован при оценке влияния переменности жесткостных пара-

метров оболочки на величину критической нагрузки.

Глава III. УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДКРЕПЛЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Исследуется общая неустойчивость конических оболочек, подкреплённых кольцевыми дискретно расположенными ребрами жесткости при нагружении внешним давлением и крутящим моментом. Оценивается влияние жесткости шпангоутов на изгиб из плоскости начальной кривизны. С использованием конструктивно-ортогруппной теории изучается устойчивость конусов, подкреплённых стрингерами переменной жесткости, при кручении.

Влияние жесткости шпангоутов из плоскости исследовано на примере конических оболочек линейно-переменной толщины при внешнем давлении, уравнения устойчивости которых можно проинтегрировать точно. Считается, что одна из осей симметрии шпангоутов совпадает со срединной поверхностью оболочки. Условия сопряжения кольца и оболочки представлены в виде:

$$u^+ = u^-, \quad v^+ = v^-, \quad N_1^+ = N_1^- + Q_s, \quad N_{12}^+ = N_{12}^- + Q_\theta,$$

u, v - продольное и окружное перемещение; N_1, N_{12} - продольные и касательные усилия соответственно; Q_s, Q_θ - определяются из уравнений равновесия кольца. Учет дискретности расположения ребер проведен методом начальных параметров.

Для оболочек, подкреплённых одним шпангоутом, рассмотрены четыре варианта граничных условий: жесткое закрепление, свободное опирание и их комбинации, для каждого из которых получены соответствующие трансцендентные уравнения. Следует отметить, что в отличие от цилиндрических оболочек, из полученных зависимостей не удастся выделить уравнения, характеризующие местную и общую формы потери устойчивости.

Получены значения параметра критической нагрузки в зависи-

мости от конусности оболочки, места расположения шпангоута и его жесткости. Из анализа полученных результатов следует, что с увеличением конусности оболочки влияние жесткости шпангоутов на величину критической нагрузки увеличивается. В частности, при свободном опирании оснований оболочки и $f = 0,1$ пренебрежение конечной жесткостью шпангоута из плоскости приводит к занижению критической нагрузки больше, чем на 10%. При смещении шпангоута к большему основанию это влияние увеличивается. Для жесткого закрепления торцов оболочки влияние жесткости ребер из плоскости на величину критического давления значительно меньше, чем при граничных условиях свободного опирания.

Используемый подход позволяет приблизительно определить жесткость шпангоута, обеспечивающего равноустойчивость оболочки и местной и общей форме выпучивания, в зависимости от конусности и места расположения шпангоута.

Исследована устойчивость конических оболочек с упругим шпангоутом на большем основании для свободного опирания обоих торцов и жесткого закрепления меньшего и свободного опирания большего. Поскольку при использовании полубезмоментной теории жесткое защемление отличается от свободного опирания лишь ограничением осевого смещения u , а учет конечной жесткости из плоскости β равносильен введению упругого закрепления в продольном направлении, то рассматриваемые граничные условия при $\beta = 0$ соответствуют случаю свободного опирания меньшего и жесткого защемления большего основания и жесткому защемлению обоих краев оболочки. Численный анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением конусности оболочки и увеличением жесткости шпангоута в плоскости начальной кривизны влияние упругого закрепления в осевом направлении на величину

критической нагрузки уменьшается.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что пренебрежение жесткостью на изгиб из плоскости, как правило, не приводит к значительной погрешности. Однако, в некоторых случаях закрепления торцов конической оболочки и места расположения шпангоута пренебрежение указанной жесткостью может привести к существенной погрешности при определении критической нагрузки.

При исследовании устойчивости оболочек постоянной толщины, подкрепленных дискретно расположенными шпангоутами и нагруженных крутящим моментом, используется асимптотический метод интегрирования уравнения (9). В этом случае решение представлено в виде (5), где $l = \int_p^z \sqrt{\frac{Q}{x^2}} dx$. Дальнейшее решение проведено методом начальных параметров в матричной форме. В общем случае длины пролетов и жесткость шпангоутов вдоль образующей могут изменяться. Формула для определения критического момента имеет вид (10), где λ_c зависит от конусности оболочки, жесткостных параметров шпангоутов и их места расположения.

В качестве примера рассмотрены жестко заделанные конические оболочки, подкрепленные одним, двумя и тремя равностоящими шпангоутами, имеющими следующие параметры: $\frac{b}{L} = \frac{1}{30}$
 $\frac{\delta}{h} = 1$ и $\frac{\delta}{h} = 2$ b и δ соответственно ширина и толщина шпангоутов, L - длина оболочки по образующей.

Для рассмотренных значений жесткостей шпангоутов потеря устойчивости оболочки соответствует общей форме выпучивания. При относительно слабом подкреплении ($\frac{\delta}{h} = 1$) величина критической нагрузки возрастает незначительно. С увеличением жесткости шпангоутов возрастание параметра критического момента существенно даже при подкреплении оболочки одним шпангоутом. В этом случае при одинаковых критических условиях и габаритных

размерах вес подкрепленной конической оболочки ($2\tau = 30^\circ$, $\rho = 0,67$; $\frac{\Gamma_m}{h} = 410$, $\frac{L}{\Gamma_m} = 1,54$, $\frac{\delta}{h} = 2$, Γ_m - средний радиус оболочки) на 11% меньше веса гладкой. С увеличением числа равностоящих шпангоутов выигрыш в весе увеличивается. Для указанного случая и подкрепления оболочки тремя шпангоутами выигрыш в весе составляет 15%.

Исследовано влияние места расположения шпангоута на величину критической нагрузки. Показано, что смещение шпангоута к меньшему основанию оболочки приводит к существенному увеличению критического момента. В этом случае даже для относительно небольшой жесткости шпангоута, при одинаковой критической нагрузке, вес подкрепленной оболочки ($2\tau = 60^\circ$, $\rho = 0,52$, $\frac{\Gamma_m}{h} = 800$, $\frac{L}{\Gamma_m} = 1,26$, $\frac{\delta}{h} = 1$, $\frac{l}{L} = 0,33$, l - длина пролета от меньшего основания до шпангоута) на 10% меньше веса гладкой.

Предлагаемый алгоритм позволяет определить требуемую жесткость шпангоута, обеспечивающего равноустойчивость оболочки к местной и общей форме потери устойчивости. К примеру, при подкреплении конической оболочки с углом конусности 30° посредине, местная форма потери устойчивости реализуется при $\frac{\delta}{h} = 2,2$. При этом теряется устойчивость отсек оболочки от меньшего основания до шпангоута.

Исследована устойчивость конструктивно-ортоотричных оболочек, нагруженных крутящим моментом. Считается, что жесткость стрингеров есть непрерывная функция осевой координаты. Получено уравнение устойчивости полубезмоментной конической оболочки, решение которого проведено методом ВКБ. Формула для определения критического момента имеет вид (10). При рассмотрении граничных условий жесткого заземления получены значения λ_1 в зависимости от жесткостных параметров ребер, меняющихся по закону (8), и конусности оболочки.

Полученные результаты, в частности, показывают, что при кручении подкрепление оболочки продольными ребрами эффективнее, чем при действии внешнего давления, однако, и в этом случае возрастание критической нагрузки за счет подкрепления шпангоутами существеннее. Из анализа полученных результатов следует, что за счет увеличения жесткости стрингеров к меньшему основанию в ряде случаев может быть достигнут существенный выигрыш в весе.

Сравнение результатов расчета по конструктивно-ортотропной теории и с учетом дискретного расположения шпангоутов показывает, что при малом числе ребер ($n < 4$) необходим учет их дискретного расположения. При $n = 3$ различие в величине критического момента для рассмотренных параметров оболочек и шпангоутов составляет 8-12%.

Глава IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Для проверки полученных теоретических результатов проведено экспериментальное исследование устойчивости конусов переменной толщины при равномерном внешнем давлении, а также гладких и подкрепленных кольцевыми ребрами оболочек при действии крутящего момента.

Для изготовления оболочек с переменной вдоль образующей толщиной методом электролитического осаждения меди использовалась специальная установка. Разнотолщинность оболочек достигалась за счет взаимного перемещения электродов в процессе осаждения. В следствие равномерного вращения катода, геометрические размеры которого соответствовали заданным параметрам оболочек, достигался незначительный разброс толщины в окружном направлении (0,5-2,5%). Закон изменения толщины оболочек аппроксимировался полиномом третьей степени.

При испытаниях внешнее давление создавалось вакуумированием внутренней полости оболочек с помощью форвакуумного насоса. В ходе испытаний реализовались два вида граничных условий. При условиях, близких к жесткому закреплению, оболочки клеєм на основе эпоксидной смолы приклеивались к торцевым приспособлениям. При этом, перемещение торцов по всем направлениям практически исключалось. Второй вид, в силу небольшой высоты поверхности опирания оболочек о торцевые приспособления, соответствовал условиям, близким к свободному опиранию. В этом случае края оболочек имели возможность свободно перемещаться в продольном направлении.

Экспериментальному исследованию подвергались 48 оболочек с углами при вершине, равными 30° , 40° , 50° и 60° , из них половина испытывалась при условиях жесткого закреплениа. Граничные условия второй серии соответствовали свободному опиранию оснований оболочек. Полученные экспериментальные результаты сопоставлены с теоретическими, рассчитанными с использованием алгоритма, предложенного в первой главе. Получено достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов как по числу волнообразования, так и по величине критических нагрузок. Границы разброса составляют 81 и 105% от теоретического значения критического давления.

Исследование устойчивости конических оболочек при действии крутящего момента проводилось на машине вертикального типа КМ-50-1. Крутящий момент от нагружающего устройства на испытываемую оболочку передавался следующим образом: оболочка клеєм на основе эпоксидной смолы приклеивалась к торцевым приспособлениям, которые жестко соединялись с шестигранными стержнями. Последние закреплялись в клиновых захватах машины, после чего производилось главное нагружение. Сближение торцов

6790 а

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
 Дніпропетровського національного
 університету заліничного транспорту
 імені академіка В. Лазарюка

оболочек в момент потери устойчивости не приводило к появлению значительного растягивающего усилия, поскольку нижний, активный захват машины имел возможность перемещаться в вертикальном направлении.

Модели оболочек изготавливались из листовой стали X18H9 контактной сваркой. Шпангоуты прямоугольного поперечного сечения из того же материала приваривались к наружной поверхности конусов. Испытаниям подвергались четыре серии оболочек (по 12 в каждой): гладкие, подкрепленные одним, двумя и тремя равностоящими шпангоутами.

Потеря устойчивости происходила с предварительным образованием одной-двух мелких волн, локализованных у меньшего основания при $M = 0,9 + 0,35 M_c$. Дальнейшее увеличение крутящего момента приводило к общей форме потери устойчивости с захватом покрепляющих колец и образованием одной наклонной волны вдоль образующей в нескольких в окружном направлении. В отличие от цилиндрических оболочек, образующиеся при потере устойчивости волны имеют тенденцию к локализации у меньшего основания конуса, при этом амплитуда критической вмятины с увеличением конусности все больше смещается в сторону меньшего торца. При относительно небольшой конусности оболочек волны практически полностью захватывали образующую.

Получено достаточно хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов как по величине критической нагрузки, так и по числу окружных волн. Экспериментальные результаты лежат несколько ниже расчетных. Максимальное расхождение составляет 19%. Сопоставление результатов испытаний с теоретическими значениями критического момента показывает, что при малом числе шпангоутов расчет устойчивости конических оболочек можно проводить с использованием алгоритма, предложенного в третьей главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Для рассмотренных видов нагружения использование гипотез полубезмоментной теории дает возможность значительно упростить расчет несудей способности конических оболочек переменной жесткости. Полученные при этом на основе асимптотического метода решения представления в достаточно простом виде, что позволяет свести нахождение параметров критической нагрузки к численным алгоритмам, легко реализуемым на ЭЕМ.

2. Построены алгоритмы, позволяющие достаточно просто оценить влияние разнотолщинности конических оболочек на величину критической нагрузки при действии внешнего давления, крутящего момента, а также комбинации внешнего давления и осевых усилий. В последнем случае полученные результаты оправданы до величины осевой силы, равной половине верхней критической. Показано, что при кручении жесткость оболочек целесообразно увеличивать к меньшему основанию. Для случая внешнего давления оценено влияние граничных условий. Получены расчетные зависимости для оболочек с широким диапазоном конусности.

3. Изучено влияние переменности модуля упругости материала ортотропной оболочки вдоль меридиана при воздействии крутящего момента. Получены расчетные зависимости для конструктивно-ортотропных оболочек, подкрепленных стрингерами переменной жесткости.

4. Предложен алгоритм решения задачи устойчивости конических оболочек, подкрепленных кольцевыми дискретно расположенными ребрами при внешнем давлении и кручении. Проведен анализ влияния жесткости шпангоутов из плоскости начальной кривизны на величину критической нагрузки. Для случая действия крутящего момента оценены пределы применимости конструктивно-ортотропной теории.

5. Разработана методика изготовления моделей конических оболочек переменной толщины электролитическим способом. Проведены испытания гладких и подкрепленных шпангоутами конусов при кручении, а также оболочек переменной толщины, нагруженных внешним давлением.

6. Сравнение полученных теоретических и экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о возможности использования предлагаемых в работе алгоритмов при практических расчетах.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

В приложении приведены программы численного решения основных задач, записанные на языке АЛГОЛ-60 и апробированные на ЭВМ БЭСМ-4М (транслятор ТА-1М)

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Грицак В.З., Долгов А.М. Об устойчивости подкрепленной шпангоутами конической оболочки переменной толщины при равномерном внешнем давлении. В сб. "Теоретические и экспериментальные исследования прочности, устойчивости и динамики конструкций", Днепропетровск, ДГУ, 1973.
2. Грицак В.З., Долгов А.М. К расчету устойчивости конических оболочек переменной жесткости. Всес.конф. по автоматизации исследований несущей способности и длительной прочности летательных аппаратов. Тезисы докл., Харьков, 1975.
3. Грицак В.З., Долгов А.М. Исследование влияния жесткости шпангоутов на общую неустойчивость конических оболочек. Прикладная механика, 1976, II, № 12.
4. Долгов А.М. Об устойчивости конических оболочек переменной жесткости при кручении. Всес.конф. по применению машинных методов для решения краевых задач. Тезисы докл. М., 1976. Ретиприприт ДГУ. БТ ЮОЮ8. Подписано к печати 24.1.1977 г. Объем I п.л. Заказ 15. Днепропетровск, ул. Генерала Пушкина, 4.