

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

Лях Александр Иванович

624 074 4

ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ КРАЕВОМ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

Автореферат

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ал. Лях

Днепропетровск – 1990

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Институте технической механики АН УССР

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор В.С.Гудрамович

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор В.Г.Зубчанинов

кандидат технических наук,
профессор С.И.Конашенко

Ведущая организация – ГСХТБ Сельхозхиммаш, г.Львов

Защита состоится "26" октября 1990 г. в 15 часов
на заседании Специализированного совета К II4.07.02

НТБ
ДНУЖТ

Актуальность. Тонкостенные оболочечные конструкции имеют широкое применение в различных отраслях техники. Это связано с необходимостью повышения надежности, экономичности и уменьшения материалоемкости конструкций, т.к. именно оболочечные конструкции позволяют обеспечить заданные прочностные и эксплуатационные характеристики при минимальном весе. Одним из направлений решения задач, связанных с обеспечением работоспособности и оптимизацией конструкций является совершенствование и разработка новых методов расчета их прочности и деформируемости на основе эффективных подходов, широкое использование результатов экспериментальных исследований.

В реальных оболочечных конструкциях действие внешних нагрузок зачастую носит ярко выраженный локальный характер. Это характерно для авиастроения, ракетно-космической техники, судостроения, химического машиностроения, строительства и т.д. Локальное нагружение может быть обусловлено контактными взаимодействиями с различного рода жесткими и упругими телами, например, опорными устройствами. Такие нагрузки, как правило, прикладываются к различным подкрепляющим элементам / шпангоутам, накладкам и т.д./ . Локальное нагружение может возникнуть и при действии внешней среды. При этом приходится сталкиваться с проблемой устойчивости элементов тонкостенных конструкций при неоднородном напряженном состоянии. Большая часть исследований по этой проблеме посвящена цилиндрической и сферической оболочкам. Коническая же оболочка исследована в значительно меньшей степени как теоретически, так и экспериментально.

Актуальной задачей является оценка влияния степени неоднородности напряженного состояния конической оболочки на уровень критических усилий при потере устойчивости. Существенный интерес представляет изучение деформирования и устойчивости конических оболочек при краевом локальном нагружении.

Целью работы является разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния и критических усилий при краевом локальном нагружении сосредоточенными силами и при контактном взаимодействии со штампом-ложементом в виде бруса конечной изгибной жесткости на опорах; проведение экспериментальных исследований прочности и устойчивости конических оболочек при краевом локальном нагружении сосредоточенными силами, влияния изгибной жесткости и параметров штампа-ложемента на распределение контактного давления при взаимодействии с оболочкой.

Научная новизна работы.

В диссертационной работе разработаны методика, алгоритм и программа расчета напряженно-деформированного состояния конических оболочек при краевом локальном нагружении.

Проведены экспериментальные исследования деформирования и устойчивости конических оболочек при различных видах краевого нагружения /сосредоточенными силами и при взаимодействии с опорным устройством - ложементом в виде кругового бруса /.

На основании анализа экспериментальных данных предложена методика оценки устойчивости оболочки при краевом локальном нагружении, получены зависимости критических нагрузок от геометрических параметров оболочки и характера нагружения.

Практическая ценность.

Разработанный алгоритм реализован в виде вычислительной программы на ЭВМ / на алгоритмическом языке ФОРТРАН /, позволяющей определить компоненты напряженно-деформированного состояния и критические нагрузки конических оболочек при локальном нагружении и при контактном взаимодействии шпангоута оболочки со шпангоутом-ложементом конечной изгибной жесткости. Алгоритм и программа используются при проектировании и расчетах тонкостенных конструкций с элементами в виде конических оболочек.

Использование разработанного алгоритма позволяет выявить дополнительные резервы прочности конструкций за счет учета влияния характера напряженного состояния на прочность и устойчивость оболочки.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием результатов расчета с экспериментальными данными.

Внедрение результатов.

Результаты диссертационной работы внедрены в расчетную практику, экономический эффект составляет 48 тыс.руб.

Апробация работы.

Основные результаты исследований докладывались на VI Всесоюзной конференции "Экспериментальные исследования инженерных сооружений" /Новополоцк, 1986/, Всесоюзной конференции по механике неоднородных структур /Львов, 1987/, III Всесоюзной конференции "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" /Казань, 1988/, Северо-Кавказской научно-практической конференции по пространственным конструкциям /Ростов-на-Дону, 1988/, III Всесоюзном симпозиуме "Прочность

материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии /Житомир, 1989 /.

Публикации.

Основные результаты работы опубликованы в семи печатных работах.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы /121 наименование/, приложения и содержит 166 страниц машинописного текста, 21 таблицу и 31 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы, ее научная новизна и практическая ценность, кратко излагается содержание диссертации.

Первая глава посвящена обзору и анализу состояния исследований по прочности и устойчивости оболочек при локальном нагружении, дан анализ методов расчета тонкостенных конструкций и особенности их применения с учетом характера нагружения. Дана постановка задачи, приведены основные уравнения для тонких упругих оболочек и круговых колец, используемые в дальнейшем в работе. Приведено описание методов решения.

Вопросы исследования оболочечных конструкций при локальном нагружении нашли свое отражение в работах В.З.Власова, С.И.Галкина, А.Л.Гольденвейзера, Э.И.Григорюка, Я.М.Григоренко, В.С.Гудрамовича, В.М.Даревского, В.В.Кабанова, А.В.Кармишина, Я.Б.Львина, В.И.Моссаковского, В.И.Мяченко, В.В.Нерубайло, В.В.Новожилова, И.Т.Образцова, С.Н.Сухинина, В.И.Федосеева,

Особый интерес представляют работы основанные на использовании экспериментальных исследований, позволяющих учесть влияние совокупности различных факторов на деформирование и устойчивость оболочек. Такой подход рассматривался в работах Б.М.Броуде, Е.Г.Коноплева, В.М.Кулакова, Е.М.Макеева, J.Singez и др.

Анализ рассмотренных работ показал, что существуют определенные противоречия в оценке влияния характера нагружения на уровень критических усилий, что находит отражение в различных подходах к расчету и проектированию оболочечных конструкций. Отмечается недостаточность теоретических и экспериментальных исследований прочности и устойчивости конических оболочек.

Выполненный обзор позволил сделать аргументированные выводы об актуальности темы и сформулировать основные цели работы.

Для решения задачи определения напряженно-деформированного состояния конических оболочек, подкрепленных круговыми кольцами используется линейная теория упругих тонких оболочек в форме В.В. Новожилова (рис.1).

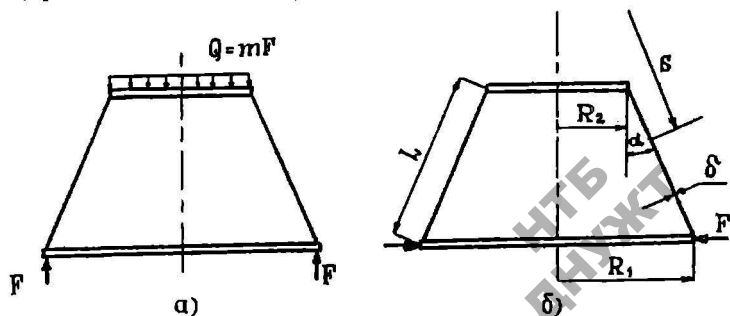


Рис. 1

Деформирование подкрепляющих колец описывается дифференциальными уравнениями для круговых стержней.

Для неоднородного напряженного состояния, вызванного локальными нагрузками характерно наличие в исследуемых уравнениях как быстро убывающих, так и быстро возрастающих функций, определяющих решения, в пределах интервала интегрирования. При числовом расчете с некоторого значения независимой переменной решения с одинаковой возрастающей частью, но с разной убывающей становятся линейно зависимыми. Это приводит к тому, что система алгебраических уравнений для определения постоянных интегрирования становится плохо обусловленной. Кроме того, при наличии быстро возрастающих по модулю и часто меняющих знак функций резко снижается точность численного интегрирования.

Для преодоления этих трудностей используется метод дискретной ортогонализации С.К.Годунова, который основан на том, что весь интервал интегрирования разбивается на участки на каждом из которых проводится численное интегрирование. Длины участков выбираются такими, чтобы в пределах участка решения однородного уравнения оставались линейно независимыми. При переходе от участка к участку матрица решений подвергается линейному преобразованию, так что векторы частных решений однородного и неоднородного уравнений становятся ортогональными. Используемый метод является устойчивым к ошибкам округления и позволяет получать решения при наличии быстро возрастающих и убывающих решений дифференциальных уравнений.

Вторая глава посвящена разработке методики и алгоритма расчета прочности и устойчивости конических оболочек при не-

однородном напряженном состоянии, вызванном краевым локальным нагружением.

Для удобства численного решения на ЭВМ, уравнения в частных производных, используя метод тригонометрических рядов Фурье, приводятся к системе обыкновенных линейных дифференциальных уравнений. Соответствующие усилия, внешние нагрузки и перемещения представляются в виде

$$\{T_1, T_2, N_1^*, M_1, M_2\} = \sum_{n=0}^{\infty} \{T_{1n}, T_{2n}, N_{1n}^*, M_{1n}, M_{2n}\} \cos n \Theta,$$

$$\{S_1, H_1\} = \sum_{n=1}^{\infty} \{S_{1n}, H_{1n}\} \sin n \Theta,$$

$$\{q_1, q_n, p_1, p_n, m_k\} = \sum_{n=0}^{\infty} \{q_{1n}, q_{nn}, p_{1n}, p_{nn}, m_{kn}\} \cos n \Theta,$$

$$\{q_2, p_2\} = \sum_{n=1}^{\infty} \{q_{2n}, p_{2n}\} \sin n \Theta, \quad \{v, V\} = \sum_{n=1}^{\infty} \{v_n, V_n\} \sin n \Theta$$

$$\{u, w, U, W\} = \sum_{n=0}^{\infty} \{u_n, w_n, U_n, W_n\} \cos n \Theta$$

Окончательно разрешающая система обыкновенных дифференциальных уравнений восьмого порядка приводится к виду $\frac{dy}{ds} = A(s)y + f$, где $y = \{u_n, v_n, w_n, \Theta_{nn}, T_{1n}, S_{1n}, N_{1n}^*, M_{1n}\}$, $A(s)$ - квадратная матрица коэффициентов системы, f - вектор нагрузки.

Условия сопряжения кольца и оболочки для соответствующих гармоник записываются следующим образом :

$$p_{nn} = N_{1n}(s_1) \cos \alpha + T_{1n}(s_1) \sin \alpha, \quad U_n = w_n(s_1) \sin \alpha - u_n(s_1) \cos \alpha,$$

$$p_{2n} = S_{1n}(s_1), \quad V_n = v_n(s_1),$$

$$p_{1n} = -N_{1n}^*(s_1) \sin \alpha + T_{1n}(s_1) \cos \alpha; \quad W_n = -w_n(s_1) \cos \alpha - u_n(s_1) \sin \alpha,$$

$$m_{kn} = -M_{1n}(s_1), \quad \Theta_{kn} = \Theta_{nn},$$

где $\xi(l=1,2)$ — меридиональные координаты краев оболочки.

В дальнейшем решается своеобразная задача контактного взаимодействия, для которой реактивные усилия являются внешними для оболочки и кольца, рассматриваемых как изолированные системы, а сами эти усилия определяются из условий совместности деформаций.

Таким образом, решение задачи об определении компонентов напряженно-деформированного состояния конических оболочек сводится к интегрированию системы линейных дифференциальных уравнений восьмого порядка. Для решения задачи необходимо знать нагрузки, действующие на кольца, подкрепляющие края оболочки. В случае, когда закон распределения нагрузки заранее неизвестен необходимо решить контактную задачу.

Одним из часто используемых в технике является опорное устройство — ложемент, в виде кругового бруса на опорах. В месте опирания оболочечные конструкции обычно из соображений прочности подкреплены кольцом (рис. 2).

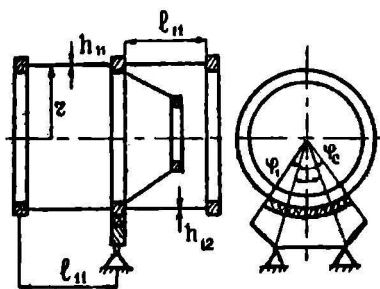


Рис. 2

Задачу методом последовательных приближений. Коэффициенты бурье радиальных перемещений, через которые можно выразить все ком-

Контакт шпангоута с ложементом осуществляется через упругую прокладку. При определенных параметрах системы и характере нагружения неучет прогибов бруса может привести к значительным погрешностям при определении контактного давления. В этом случае предлагается решать за-

поненты напряженно-деформированного состояния, определяются из бесконечной системы линейных алгебраических уравнений.

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_{kn} w_{1n} = b_k, \quad k=0,1,2,\dots$$

$$a_{00} = \frac{\pi E_k F_1}{C z_1^2} + \beta_{00}; \quad a_{kk} = \frac{\pi E_k I_1}{2C z_1^4} (k^2 - 1)^2 + \beta_{kk}; \quad a_{kn} = \beta_{kn}, n \neq k$$

$$b_0 = \pi C^{-1} (p_0 - \delta_0); \quad b_k = 0.5 \pi C^{-1} (p_k - t_k k^{-1} - \delta_k);$$

$$\beta_{kn} = \sum_{i=1}^m \int_{\varphi_{2i-1}}^{\varphi_{2i}} \cos n \varphi \cos k \varphi d\varphi; \quad \delta_k = 2C \pi^{-1} \sum_{i=1}^m \int_{\varphi_{2i-1}}^{\varphi_{2i}} \Delta \cos k \varphi d\varphi$$

Здесь p_k , t_k - коэффициенты Фурье радиальной и касательной внешней нагрузки на кольцо соответственно; φ_{2i-1} , φ_{2i} углы, ограничивающие i -й участок контакта шпангоута с ложементом, $2m$ - общее число участков контакта; F_1 , I_1 - приведенные площадь и момент инерции на изгиб в плоскости с учетом влияния цилиндрической и конической оболочек; Δ - зазор между шпангоутом и ложементом, β - коэффициент податливости прокладки.

В результате решения системы радиальные перемещения шпангоута определяются суммированием

$$w_1 = \sum_{n=0}^{\infty} w_{1n} \cos n \varphi.$$

По найденному контактному давлению $p^0(\varphi) = C(w_1 - \Delta)$ радиальный прогиб ложемента как кругового бруса определяется при помощи интеграла Мора:

$$w_3^{(0)}(\varphi) = R \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{M(p^0, \varphi) M_1(1, \varphi)}{E_A I_A} d\varphi$$

где $M(p^0, \varphi)$, $M_1(1, \varphi)$ - изгибающие моменты от внешней нагрузки $p^0(\varphi)$ опорных реакций и единичной силы, приложенной в сечении φ_1 соответственно, R - радиус ложемента.

Определенные таким образом радиальные перемещения ложемента принимаются как предварительный зазор между шпангоутом и

ложементом. Итерационный процесс продолжается до тех пор пока разность

$$|p^{(k+1)} - p^{(k)}| < \varepsilon \quad \text{либо} \quad |w_3^{(k+1)} - w_3^{(k)}| < \delta$$

Таким образом алгоритм определения компонентов напряженно-деформированного состояния конической оболочки можно разбить на два этапа: первый - определение нагрузки на кольца, подкрепляющие края оболочки /они могут быть заранее заданы либо определены в результате решения контактной задачи/; второй - формирование системы дифференциальных уравнений, которая решается методом дискретной ортогонализации С.К.Годунова.

Для определения критических усилий предлагается следующий подход. В результате анализа результатов целенаправленного эксперимента, при неоднородном сжатии в качестве критических принимаем силы, соответствующие такому расчетному распределению усилий, при котором средние по ширине вмятины, образующейся при локальной потере устойчивости расчетные значения усилий равны их критическим значениям при равномерном сжатии.

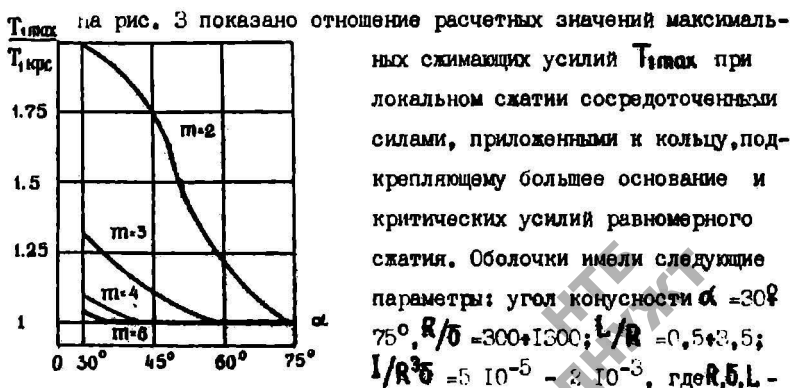


Рис. 3

радиус кривизны, толщина и длина образующей соответственно,

I - момент инерции подкрепляющего кольца, M - число сил.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям деформирования и устойчивости конических оболочек при локальном нагружении сосредоточенными силами, приложенными к штангоуту, подкрепляющему большее основание (рис.1) .

Испытывались конические оболочки, изготовленные из стали 12Х18Н10Т, подкрепленные на краях кольцами прямоугольного поперечного сечения из стали Ст.3. Угол конусности составил $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$. Толщина стенок $\delta = 0,1; 0,2; 0,35$ мм. Радиус торцев у всех оболочек составил $R_1 = 92$ мм, $R_2 = 32$ мм.

Испытания проводились на испытательных машинах ЦД-10, УММ-10 и УММ-50. При продольном локальном нагружении нагрузка передавалась через симметрично расположенные опоры, размещенные на неподвижной траверсе испытательной машины. Локальные нагрузки уравнивались равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к меньшему основанию $Q = mF$ ($m = 2, 3, 4$ - число сил) .

Нагружение оболочек радиальными сосредоточенными силами осуществлялось при помощи специального приспособления, которое преобразовывало растягивающее усилие Q , создаваемое машиной в систему самоуравновешенных радиальных сил $m = 2, 3, 4, 6$

Нагружение проводилось этапами до потери устойчивости оболочек сопровождающейся образованием на ней вмятин. При испытаниях фиксировались меридиональные ϵ_1 , и кольцевые ϵ_2 деформации в сечении оболочки и вдоль образующей в районе действия сосредоточенных сил. Фиксировались значения критической нагрузки и форма потери устойчивости.

Изучен характер деформирования и потери устойчивости конических оболочек при неоднородном сжатии. В табл. I и 2 представлены некоторые результаты испытаний при продольном и поперечном нагружении для оболочек, изготовленных из листа толщиной $\delta = 0,1 \text{ мм}$:

Таблица I

α , град	число сил m	$F_{кр}$, Н		k_{max}		k_1
		расч.	эксп.	расч.	эксп.	
30	2	422	435	4,608	4,888	0,451
	4	532	368	1,120	1,179	0,158
45	2	389	410	2,481	2,482	0,316
	4	286	268	1,100	1,075	0,200
60	2	302	285	1,300	1,326	0,241
	4	157	163	1,050	1,034	0,200
75	2	89	40	1,150	-	
	4	50	40	1,000	1,000	0,187

Таблица 2

α , град	число сил m	$F_{кр}$, Н		k_{max}		k_1
		расч.	эксп.	расч.	эксп.	
30	2	720	620	3,106	3,044	0,683
	3	459	416	2,270	2,982	0,452
45	2	450	450	6,005	5,835	0,842
	3	356	312	2,593	2,646	0,394
60	2	400	350	10,340	10,088	1,297
	3	262	243	3,944	3,903	0,523
75	2	130	130	18,160	18,802	1,556
	3	184	179	4,189	4,046	0,634

Значения коэффициентов меридиональных напряжений k и коэффициента устойчивости k_1 вычислялись по формулам :

$$k(\varphi) = \frac{2\pi R E \delta (\epsilon_1 + \mu \epsilon_2)}{(1 - \mu^2) m F} \omega(\alpha) \quad , \text{ где}$$

$$\omega(\alpha) = \begin{cases} \cos \alpha & - \text{ продольное нагружение} \\ \sin \alpha & \text{ поперечное нагружение} \end{cases}$$

$$k_1 = \frac{m F_{кр} k_{max}}{\pi E \delta^2 \psi(\alpha)} \quad , \text{ где}$$

$$\psi(\alpha) = \begin{cases} 2 \cos^2 \alpha & - \text{ продольное нагружение} \\ \sin 2\alpha & - \text{ поперечное нагружение} \end{cases}$$

Значение k_{max} и k_1 , полученные экспериментально, приведены в табл. I, 2.

Как показал анализ результатов экспериментальных исследований при продольном сжатии сосредоточенными силами локальные значения критических усилий были выше критических усилий равномерного сжатия. При продольном сжатии, когда достигалась максимальная концентрация сжимающих усилий $\alpha = 30^\circ, m = 2$ их амплитудные значения превосходили усилия однородного сжатия примерно в два раза. В случае же малой изменчивости T_1 по окружной координате амплитудные значения критических усилий практически не отличались от усилий равномерного сжатия.

При поперечном нагружении это различие было больше за счет того, что кольцо имело намного меньшую жесткость на изгиб в плоскости, чем из плоскости. Максимальные значения коэффициента устойчивости превосходили коэффициент устойчивости равномерного сжатия приблизительно в пять раз.

В табл. I, 2 представлены результаты расчета критических сил в соответствии с подходом, предложенным во второй главе.

Расхождение расчета и эксперимента составило не более 12%.

При вычислении K_{max} в одном случае в формулы подставлялись значения деформаций ε_1 , ε_2 полученные по результатам тензометрирования, а в другом вычисленные согласно разработанному алгоритму. При этом ε_1 , ε_2 вычислялись по формулам

$$\varepsilon_1 = \sum_{n=0}^N \left[\frac{1}{B} T_1 - M \left(\frac{u_n}{s} + \frac{n v_n}{s \sin \alpha} + \frac{w_n}{s t \cos \alpha} \right) \right] \cos n \varphi,$$

$$\varepsilon_2 = \sum_{n=0}^N \left[\frac{u_n}{s} + \frac{n v_n}{s \sin \alpha} + \frac{w_n}{s t \cos \alpha} \right] \cos n \varphi$$

На рис.4 в качестве примера представлены распределения меридиональных деформаций ε_1 в сечении оболочки вблизи нагруженного края от числа сосредоточенных сил для оболочки с углом конусности 45° /сплошные линии - продольное нагружение; штриховые - поперечное /. Сравнение результатов расчета деформаций с результатами их тензометрирования показывает удовлетворительное совпадение.

Были проведены экспериментальные исследования контактного взаимодействия шпангоута, подкрепляющего оболочечную конструкцию (рис.2) с круглым брусом на опорах. Упругие прокладки между ложементом изготавливались из различных материалов: вакуумной резины, резины ИРП-2007, маслянита -9 С /ТУ 109-80 /.

Испытывались ложементы прямоугольного поперечного сечения со следующими параметрами $H/R = 0,03 \pm 0,15$, где H - высота поперечного сечения; ширина основания 15 мм; угол охвата $\varphi_0 = 120^\circ$; угол опирания $\varphi_1 = 60^\circ, 80^\circ, 120^\circ$.

Анализ результатов тензометрирования и замеров перемещений ложемента показал, что для испытанных ложементов, напряженно-деформированное состояние шпангоута существенно зависит не только от податливости прокладки, но и от жесткостных характеристик и вида его опирания. Минимальные прогибы ложемента дос-

тигались при угле опирания $\varphi_1 = 80^\circ$.

На рис.5 показаны расчетные значения контактного давления $\bar{p}(\varphi) = p(\varphi) R Q^{-1}(\varphi_0 + 0.5 \sin \varphi_0)$ для ложемента с параметрами $H/R = 0,09$; $\varphi_1 = 80^\circ$, $\varphi_0 = 120^\circ$. Сплошные линии соответствуют расчету без учета прогибов ложемента, штриховые - с учетом его прогибов. Кривая 1 - соответствует прокладке из вакуумной резины ($C = 10 \text{ МПа}$), 2 - маслянисту 9С ($C = 1,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$). Для "мягкой" прокладки учет изгиба ложемента практически не влияет на распределение контактного давления, а для "жесткой" такой учет необходим.

Т.к. при испытаниях непосредственно замерить контактное давление невозможно, то сравнивались экспериментальные и расчетные значения прогибов ложемента в характерных точках. На рис.6 показаны расчетные значения прогибов бруса в центре в зависимости от высоты его сечения ($\varphi_0 = 120^\circ$, $\varphi_1 = 80^\circ$) для различных прокладок / вакуумной резины - 1, ИРП-2007 - 2, масляниста 9С - 3 /.

Также были проведены испытания на сжатие сосредоточенными силами цилиндрических оболочек по схеме аналогичной приведенной на рис. 1а. Оболочки, изготовленные из сплава АМг-6 имели следующие параметры (I - $z/b = 330$; $L/z = 1,45$; $I(z^3 b)^{-1} = 1,9 \cdot 10^{-7}$; II - $z/b = 275$; $L/z = 1,45$; $I(z^3 b)^{-1} = 5,7 \cdot 10^{-6}$; III - $z/b = 123$; $L/z = 2,00$; $I \cdot (z^3 b)^{-1} = 5,25 \cdot 10^{-3}$.

Аналогично, как для конических оболочек предполагалось, что потеря устойчивости наступает, когда некоторые "осредненные" значения сжимающих напряжений на ширине вмятины достигают величины критических напряжений равномерного сжатия.

В качестве "осредненных" принимаются напряжения

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{k(m, 0 + k(m, \pi/m))}{2} \frac{mF}{2\pi z b}$$

Критическая нагрузка при этом определяется из равенства

$$Q_{кр} = \frac{Q_{кpo}}{k(2m, 0)},$$

где $k(2m, 0)$ - коэффициент концентрации сжимающих усилий от $2m$ сосредоточенных сил.

Результаты расчета и эксперимента приведены на рис.7.

Максимальная разница между расчетом и экспериментом составила 7 %.

В случае, когда параметр $\beta_n = \frac{(n^2 - 1)^2}{n^2(n^2 + d^2)}$, характеризующий жесткость шпангоута, здесь n - номер гармоники, $d = 2(1 + \mu) I_{кр}^{-1}$,

$I, I_{кр}$ - моменты инерции шпангоута на изгиб из плоскости, кручение, соответственно, близко к единице, коэффициент $f(2m, \varphi)$ можно записать в виде $f(2m, \varphi) = \frac{1 - \operatorname{sh} \alpha \pi (1 - z) \operatorname{sh}^2 \alpha \pi}{z}$,

где $z = \frac{2m\varphi d}{\pi}$; $\alpha^2 = \frac{1}{4m^2 K}$; $K = \frac{z^2 \delta (z \delta)^{1/2}}{I [3(1 - \mu^2)]^{1/4}}$

Расчет, проведенный согласно полученной формуле для конических оболочек показал, что удовлетворительное совпадение с экспериментом для конических оболочек с углом конусности меньшим 30° . При этом вместо z подставляется радиус кривизны соответствующей конической оболочки $R / \cos \alpha$.

В заключении сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

I. На основе теории тонких упругих оболочек разработана методика и алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния подкрепленных кольцевыми ребрами жесткости конических оболочек при краевом локальном нагружении.

2. С применением метода дискретной ортогонализации С.К. Годунова создана на алгоритмическом языке ФОРТРАН программа расчета компонентов напряженно-деформированного состояния оболочки при локальном нагружении.

3. Получены зависимости, характеризующие деформирование и устойчивость оболочек при различных геометрических и жесткостных параметрах в зависимости от характера локального нагружения.

4. Проведен цикл экспериментальных исследований прочности и устойчивости конических оболочек при различных видах краевого нагружения / поперечном, продольном сосредоточенными силами и при контактном взаимодействии со штампом-ложементом /.

Испытано 92 оболочки. Получены соотношения, характеризующие зависимость значений критических усилий от характера напряженного состояния. Получено, что критические усилия при неоднородном сжатии выше, чем при однородном. Результаты исследований позволяют проводить расчеты критических усилий конических оболочек при краевом локальном нагружении.

5. Разработана и реализована в виде программы для ЭВМ БЭСМ-6 методика расчета контактного давления при взаимодействии системы подкрепленных шпангоутом оболочек с ложементом в виде бруса конечной жесткости на опорах с учетом его деформирования и характера опирания.

6. Результаты исследований внедрены в промышленность и использованы при расчетах прочности и устойчивости реальных конструкций.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Василевский В.Е., Лях А.И., Макеев Е.М., Семененко В.П. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния моделей ложементов для оболочечных конструкций // Тез. докл. VI Всес. конф. "Экспериментальные исследования инженерных сооружений". -Новополоцк: Новополоцк. политех. ин-т, 1986. -С. 104.

2. Демешко М.Ф., Лях А.И., Макеев Е.М. и др. Нагруженность, прочность и жесткость кругового ложемента при контактных взаимодействиях // Нагруженность и надежность механических систем: Сб. научн. трудов. -Киев: Наукова думка. -1987. -С. 99-106.

3. Лях А.И., Титаренко Л.М., Яценко А.Ф. Исследование прочности и устойчивости систем оболочек сложной структуры при неоднородном статическом нагружении // Тез. докл. Всес. научн. конф. "Механика неоднородных структур". Т. 2. -Львов: Львовский гос. ун-т, 1987. -С. 181.

4. Лях А.И., Макеев Е.М., Яценко А.Ф. Экспериментальное исследование конических оболочек при неоднородном напряженном состоянии // Пробл. прочности -1987. -№ 11. -С. 100-103.

5. Лях А.И., Макеев Е.М. Исследование деформирования и устойчивости цилиндрических и конических оболочек при нагружении сосредоточенными силами // Тез. докл. III Всес. конф. "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов." -Казань: Казан. авиац. ин-т. -1988. -С. 89.

6. Демешко М.Ф., Лях А.И., Яценко А.Ф. Экспериментальное исследование прочности, устойчивости конических оболочек при локальном нагружении // Тез. докл. Северокавказской научно-практ. конф. по пространственным конструкциям. -Ростов-на-Дону: Ростов. инж. строит. ин-т. -1988. -С. 40.

7.Лях А.И., Макеев Е.М., Яценко А.Ф. Деформирование и устойчивость конических оболочек при краевом локальном нагружении // Тез. докл. III Всес. симп. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии". Ч.2. -Киев:Ин-т пробл.прочн., -С.14.

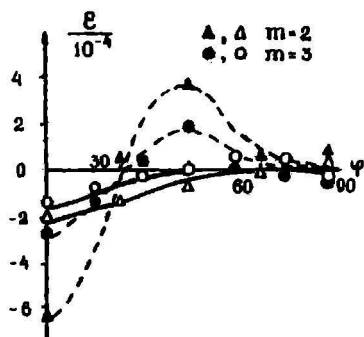


Рис. 4

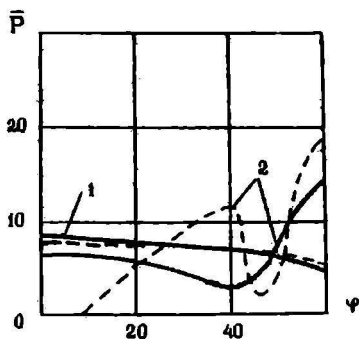


Рис. 5

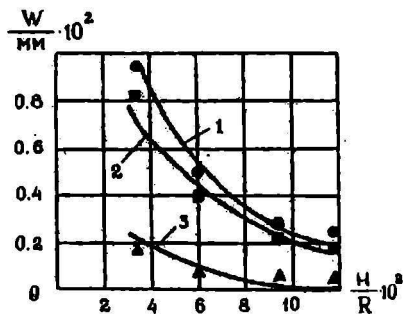


Рис. 6

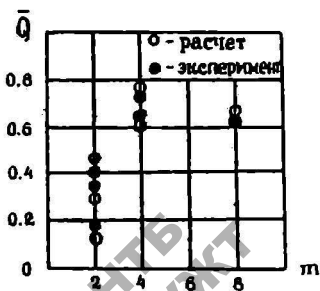


Рис. 7

ЛЯХ Александр Иванович

Прочность и устойчивость конических
оболочек при краевом локальном нагружении

Подписано к печати 2.07.90г. БТ 70030 Формат 60х34 1/16

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт.

Усл.печ.л. 1,2 Уч.-изд.л. 1,0 Тираж 100 экз.

Заказ 662 Бесплатно

Участок оперативной полиграфии ДИИТа. 320700, ГСП, Днепропетровск
10, ул. Академика В.А.Лазаряна, 2.

НТБ
ДНУЖТ

Сканировала Юнаковская В. В.