

14/33527

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Г. М. ТУШЕВА

!

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ВНЕШНЕМ
ДАВЛЕНИИ И ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ
СЛАБОВОГНУТЫХ ОБОЛОЧЕК,
БЛИЗКИХ К ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ
(05. 025. Динамика и прочность машин)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Н. А. Алфутов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Вольмир А. С.
кандидат физико-математических наук — Малютин И. С.
ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан « . . . » 1971 г.

Защита диссертации состоится « » 1971 г.
Ученого Совета по динамике и
Баумана.

вух экземплярах, заве-
ЗТУ (Москва Б-5, 2-я

ься в библиотеке ин-

М133524

Демидов С. П.

НИИ МТИ им. Н. Э. Баумана



1133527

Тушева Г. М. Исследование

Исследованию устойчивости цилиндрических и близких к ним по форме оболочек посвящено большое количество работ. Однако, при всём их многообразии, до сих пор еще не решен ряд практически важных задач. В частности, не исследована устойчивость при внешнем давлении и осевом растяжении оболочек отрицательной гауссовой кривизны, близких к цилиндру, или слабоогнутых оболочек. Нагружение внешним давлением и осевым растяжением является типичным, например, для внутренней обечайки торового бака. До настоящего времени в качестве наиболее рациональной конструкции внутренней обечайки в торовом баке часто выбирается цилиндрическая оболочка, подкрепленная шпангоутами. В данной работе доказывается, что в ряде случаев целесообразно применять в конструкциях с такой нагрузкой слабоогнутые оболочки.

С наличием вогнутости меридиана, как правило, связано снижение критической нагрузки у оболочки, имеющей неидеальную цилиндрическую форму. Так, С.С.Кан и Т.Д.Каримов, изучавшие устойчивость при осевом сжатии слабоогнутых оболочек с амплитудой вогнутости меридиана Δ порядка двух-трех толщин стенки оболочки, показали в своих работах, что с увеличением Δ критическое усилие осевого сжатия может снижаться почти в 9 раз по сравнению с этим усилием для идеального цилиндра.

Слабоогнутые шарнирно-опертые оболочки при внешнем радиальном давлении также являются системами, менее жёсткими, чем идеальные цилиндрические оболочки. Этот факт отмечен в работах Штейна М., Макэлмена Ж.А., С.С.Кан и В.И.Мяченкова.

Качественно иным оказалось поведение слабоогнутых оболочек при комбинированном нагружении, а именно, при внешнем давлении и осевом растяжении. Из исследований Р.И.Кшнякина, С.Н.Кана, Л.В.Андреева и других известно, что у цилиндрических оболочек, работающих при таком нагружении, с ростом осевого растягивающего усилия увеличивается значение критического радиального давления. В нашей работе будет показано, что у слабоогнутых оболочек увеличение критического давления с ростом осевого растяжения происходит значительно интенсивнее, чем у цилиндрических оболочек. Это обстоятельство позволяет предполагать, что слабоогнутые оболочки, нагруженные внешним давлением и осевым растяжением, могут быть более эффективными конструкциями, чем оболочки цилиндрические.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей поведения при внешнем давлении и осевом растяжении оболочек отрицательной гауссовой кривизны, близких к цилиндру, а также конструкций,

элементами которых являются слабовогнутые оболочки.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Введение содержит обзор литературы и краткое содержание работы.

В обзоре литературы приведены немногочисленные работы, посвященные изучению устойчивости вогнутых оболочек при внешнем давлении. Это — исследования Н.А.Алумняэ (1956г.), Штейна М., и Макэлмена Ж.А. (1965г.), С.С.Кан (1966г.) и В.И.Мяченкова (1968г.).

В первой главе решается задача об устойчивости шарнирно-опертой слабовогнутой оболочки, нагруженной внешним давлением q и осевым растягивающим усилием T . Под "слабовогнутой" понимается оболочка, у которой отношение $\frac{\Delta}{\ell}$ есть величина малая, не превышающая 10%; здесь Δ — максимальное отклонение формы меридиана от прямой, ℓ — длина оболочки. Получены уравнения равновесия и выражения, связывающие усилия и моменты с соответствующими деформациями и перемещениями срединной поверхности оболочки.

Уравнения равновесия имеют вид:

$$z \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + a \sin \theta (N_\theta - N_\varphi) + a \frac{\partial S}{\partial \varphi} - z Q_\theta = 0$$

$$a \frac{\partial N_\varphi}{\partial \varphi} + 2a \sin \theta \cdot S + z \frac{\partial S}{\partial \theta} + a \cos \theta \cdot Q_\varphi = 0$$

$$a \frac{\partial Q_\varphi}{\partial \varphi} + z \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + a \sin \theta \cdot Q_\theta - a \cos \theta \cdot N_\varphi + z N_\theta +$$

$$+ ar (N_\theta^\circ \alpha_\theta + N_\varphi^\circ \alpha_\varphi) = 0 \quad (I)$$

$$a \frac{\partial M_\varphi}{\partial \varphi} + z \frac{\partial H}{\partial \theta} + 2a \sin \theta \cdot H - z a Q_\varphi = 0$$

$$\frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + a \sin \theta (M_\theta - M_\varphi) + a \frac{\partial H}{\partial \varphi} + ar Q_\theta = 0,$$

где θ, φ — угловые координаты, z — текущий радиус параллели, a — радиус кривизны меридиана; N_θ, N_φ — нормальные, S — сдвигающие, Q_θ, Q_φ — перерезывающие погонные усилия; M_θ, M_φ — изгибающие, H — крутящий погонный момент; $\alpha_\theta, \alpha_\varphi$ — параметры изменения кривизны в меридиональном и окружном направлениях. Докритическое напряженное состояние оболочки прини-

мается безмоментным и осесимметричным и характеризуется усилиями N_{θ}° и N_{φ}° .

Усилия и моменты выражаются через перемещения, и система уравнений (I) приводится к трем уравнениям устойчивости, записанным относительно перемещений u , v , w . Далее эта система уравнений устойчивости интегрируется по методу Бубнова-Галеркина. Для слабовогнутой шарнирно-опертой оболочки ($w = v = 0$, $M_{\theta} = 0$, $N_{\theta} = 0$ при $\theta = \pm \theta_0$) решение системы выбрано в виде:

$$w = A \cos \frac{\pi \theta}{2\theta_0} \cdot \cos n\varphi, \quad v = B \cos \frac{\pi \theta}{2\theta_0} \cdot \sin n\varphi, \quad u = C \sin \frac{\pi \theta}{2\theta_0} \cdot \cos n\varphi,$$

где n - число волн, образующихся в кольцевом направлении при потере устойчивости.

В результате интегрирования получено аналитическое выражение критического давления для слабовогнутой оболочки:

$$\frac{q R_0}{E h} = \frac{1-\alpha}{n^2} \left\{ \frac{h^2}{12 R_0^2} \frac{\left[\left(\frac{\pi R_0}{\ell} \right)^2 (1-\alpha)^2 + n^2 \right]^2}{(1-\mu^2)(1-\alpha)^4} + \frac{\left[\frac{n^2 R_0}{\alpha(1-\alpha)} - \left(\frac{\pi R_0}{\ell} \right)^2 (1-\alpha) \right]^2}{\left[\left(\frac{\pi R_0}{\ell} \right)^2 (1-\alpha)^2 + n^2 \right]^2} + \right. \\ \left. + \frac{T}{E h} \left[n^2 \frac{R_0}{\alpha(1-\alpha)} + \left(\frac{\pi R_0}{\ell} \right)^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

где R_0 , h - радиус торца и толщина оболочки, $\alpha = \frac{\Delta}{R_0}$, μ - коэффициент Пуассона.

Для сравнения решение задачи об устойчивости шарнирно-опертой слабовогнутой оболочки проведено энергетическим методом, разработанным Л.И. Балабухом и Н.А. Алфутовым. Энергетический критерий устойчивости, лежащий в основе этого метода, не требует определения начального напряженно-деформированного состояния. Выражение для критического давления, определенное из уравнения энергетического критерия устойчивости, полностью совпадает с (2).

Уравнения устойчивости в перемещениях, полученные в первой главе, очень громоздки и неудобны для инженерного решения. Приближенные методы, такие, как метод Бубнова-Галеркина и энергетический, позволяют получить достаточно достоверные решения лишь в тех случаях, когда правильно заданы выражения для перемещений. Для граничных условий, отличных от шарнирного опирания, это сделать очень трудно.

Во второй главе настоящей работы была выбрана более простая и физически наглядная расчётная схема для слабоогнутой оболочки и применена полубезмоментная теория оболочек, позволившая получить несложный метод исследования устойчивости, универсальный в отношении граничных условий.

Согласно гипотезам полубезмоментной теории, принимается, что оболочка нерастяжима в кольцевом направлении $\varepsilon_\varphi = 0$ и деформируется без сдвигов $\gamma = 0$. Формальное перенесение статических гипотез полубезмоментной теории $Q_\theta = 0$, $M_\theta = 0$, $H = 0$ на расчёт нецилиндрических оболочек приводит к противоречивым уравнениям равновесия, а иногда — к противоречивым граничным условиям. Поэтому за расчётную модель слабоогнутой оболочки принята система из бесконечного числа элементарных цилиндрических колец шириной $ad\theta \cdot \cos \theta$ и толщиной $h / \cos \theta$, выделенных из оболочки сечениями, перпендикулярными к продольной оси, и соединённых безмоментной обшивкой. Элементарные кольца имеют изгибную жесткость только в своей плоскости. Такая система колец способна воспринимать окружные изгибающие моменты M_φ^* , векторы которых параллельны оси симметрии оболочки. Векторы нормального N_θ^* и перерезывающего Q_φ^* усилий лежат в плоскости элементарного кольца. Безмоментная обшивка воспринимает нормальные N_θ и сдвигающие S усилия. Такая расчётная модель впервые была предложена и подробно обоснована в диссертации В.П. Печникова для полубезмоментной конической оболочки. Для выбранной расчётной модели полубезмоментной вогнутой оболочки записаны уравнения равновесия в проекциях на главные направления, а также выражения для усилий и деформаций. Закон Гука для усилий N_θ и моментов M_φ^* принимается в виде $N_\theta = E h \varepsilon_\theta$, $M_\varphi^* = -D^* \varepsilon_\varphi^*$, где ε_θ — удлинение вдоль меридиана, ε_φ^* — параметр изменения кривизны элементарного кольца, $D^* = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)\cos^3 \theta}$ — изгибная жесткость,

E — модуль упругости. С использованием геометрических гипотез $\varepsilon_\varphi = 0$ и $\gamma = 0$ все деформации, усилие N_θ и момент M_φ^* выражаются через окружное перемещение v . Далее получено уравнение устойчивости вогнутой оболочки, записанное относительно перемещений v . С помощью соотношений $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{x}{a}$, $ad\theta \approx dx$ осуществлен переход к линейным (для меридиана) координатам. Решение уравнения устойчивости записывается в виде $v = X(x) \cdot \sin n\varphi$.

Подстановка этого решения в уравнение устойчивости приводит к линейному дифференциальному уравнению четвертого порядка с переменными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
& \bar{X}^{IV} + \left[6\eta + 0,605 \frac{T}{T_0} \frac{z^2 n^2}{\bar{a}(1-\mu)} \right] \bar{x} \cdot \bar{X}''' + \\
& + \left[(2n^2+1)\eta - 0,605 \frac{T}{T_0} \frac{z^2 n^2}{(1-\mu)^2} \right] \bar{X}'' + \quad (3) \\
& + \left[4\eta^2(n^2-1) + (2n^2+1) \frac{1-\mu}{\bar{a}} \eta^2 - 0,605 \frac{T}{T_0} \frac{z^2 n^2 (2n^2-1)}{\bar{a}(1-\mu)} \eta + \right. \\
& \left. + 0,92 \frac{q}{q_0} z^3 \frac{n^2(n^2-1)}{\bar{a}(1-\mu)^3} \right] \bar{x} \cdot \bar{X}' + \\
& + \left[\eta^2 + \frac{z^4(n^2-1)^2}{12(1-\mu^2)(1-\mu)^6} + 0,605 \frac{T}{T_0} \frac{z^2(n^2-1)}{(1-\mu)^3} \eta - 0,92 \frac{q}{q_0} z^3 \frac{n^2-1}{(1-\mu)^4} \right] n^4 \bar{X} = 0,
\end{aligned}$$

где $q_0 = 0,92 E \frac{R_0}{\ell} \left(\frac{h}{R_0} \right)^{5/2}$ - критическое давление для шарнирно-опертой цилиндрической оболочки, $T_0 = 0,605 E \frac{h^2}{R_0}$ - критическое усилие осевого сжатия для цилиндра (здесь $\mu = 0,3$),

$$\bar{X} = \frac{X}{R_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\ell}, \quad \bar{a} = \frac{a}{R_0}, \quad \eta = \frac{\delta a}{1-\mu}, \quad z = \frac{\ell}{R_0} \sqrt{\frac{h}{R_0}}.$$

Сначала рассмотрен упрощенный вариант уравнения устойчивости (8) в предположении, что влияние переменных коэффициентов в этом уравнении мало настолько, что им можно пренебречь (возможность такого упрощения подтверждается в третьей главе). Тогда (8) приводится к уравнению с постоянными коэффициентами типа балочного. Из решения балочного уравнения для шарнирно-опертой слабоогнутой оболочки получена формула для определения критического давления, по структуре аналогичная (2):

$$\begin{aligned}
\frac{q}{q_0} = \frac{(1-\mu)^2}{0,92 z^3 (n^2-1)} \left\{ \frac{z^4 (n^2-1)^2}{12(1-\mu^2)(1-\mu)^4} + \frac{(1-\mu)^2}{n^4} (\pi^2 - \eta n^2)^2 + \right. \\
\left. + 0,605 \frac{T}{T_0} z^2 \left[\pi^2 + \eta \frac{n^2-1}{1-\mu} \right] \right\}. \quad (4)
\end{aligned}$$

Результаты расчётов по формулам (2) и (4) хорошо совпадают. Это обстоятельство подтверждает возможность применения полубезмоментной теории к расчёту слабоогнутых оболочек. Кроме того, выражение (4) универсально для широкого диапазона геометрических параметров оболочек средней длины.

В третьей главе исследуется устойчивость отдельных и составных оболочек с помощью разложения решения уравнения (3) в матричные ряды. Для этого строится матричный алгоритм, позволяющий исследовать устойчивость изолированной вогнутой оболочки при любых граничных условиях.

Полное уравнение устойчивости (3) записывается в матричном виде:

$$[X'] = A(x) \cdot [X], \quad (5)$$

где $X = X(\bar{X}, \bar{X}', \bar{X}'', \bar{X}''')$ - вектор-столбец, $A(x)$ - матрица коэффициентов уравнения (3). Начало координат взято в центре меридиана оболочки. Участок интегрирования $-0,5 \leq \bar{x} \leq 0,5$ разбивается на "m" равных участков величиной $\Delta \bar{x}$, таких, что в пределах каждого участка коэффициенты уравнения (3) можно считать постоянными. Тогда нормированное решение уравнения (5), или матрициант, записывается в виде:

$$\Omega_{-0,5}^{0,5} = [E + A(\tau_m) \Delta \bar{x}] [E + A(\tau_{m-1}) \Delta \bar{x}] \dots [E + A(\tau_1) \Delta \bar{x}], \quad (6)$$

где τ_m - координаты центров участков интегрирования, E - единичная матрица.

Матрициант (6) устанавливает связь между граничными условиями на правом и левом торцах оболочки:

$$[X_{q5}] = \Omega_{-0,5}^{0,5} [X_{-q5}]. \quad (7)$$

При подстановке граничных условий конкретной задачи из уравнения (7) получается характеристическое уравнение для определения искомого параметра критического давления q/q_0 . Например, для шарнирно-опертой оболочки подстановка в (7) граничных условий $X_{q5} = X_{-q5} = 0$ и $X''_{q5} = X''_{-q5} = 0$ приводит к уравнению:

$$b_{12} \cdot b_{34} - b_{32} \cdot b_{14} = 0,$$

где $b_{12}, b_{14}, b_{32}, b_{34}$ - элементы матрицианта (6). Далее строится матричный алгоритм для исследования устойчивости конструкции, составленной из N слабовогнутых оболочек, соединенных между собой шпангоутами.

Кольцевые шпангоуты в докритическом состоянии считаются ненагруженными, а в результате потери устойчивости на них переходят

сдвигающие усилия от прилегающих к шпангоутам участков обшивки. Окружные перемещения V_i в шпангоуте определяются из уравнения изгиба кольца под действием тангенциальной нагрузки. Условие сопряжения шпангоута с прилегающими обшивками записывается в следующем виде:

$$[X_{i+0}] = [F_i][X_{i-0}], \quad (8)$$

где $[X_{i+0}], [X_{i-0}]$ - векторы-столбцы граничных условий на правом и левом торцах шпангоута, $[F_i]$ - переходная матрица шпангоута.

Для оболочки, состоящей из N отсеков, соединенных шпангоутами, условие сопряжения отдельных элементов конструкции сводится к формальному перемножению переходных матриц этих элементов:

$$[X_N] = [B_N^*][F_{N-1}][B_{N-1}^*][F_{N-2}] \dots [F_1][B_1^*] \cdot [X_L]; \quad (9)$$

где $[X_N], [X_L]$ - векторы-столбцы граничных условий на правом и левом торцах оболочки; $[B_1^*], [B_2^*], \dots [B_N^*]$ - переходные матрицы промежуточных отсеков, для каждого отсека переходная матрица есть матрицант (6); $[F_1], [F_2], \dots [F_{N-1}]$ - переходные матрицы шпангоутов. Полученный алгоритм просто реализуется на ЭЦВМ и позволяет исследовать устойчивость оболочек с любым числом отсеков и при любых граничных условиях. Дано описание реализации матричного алгоритма на ЭЦВМ "Минск-22".

С помощью полученного алгоритма исследовалась устойчивость изолированных и составных оболочек, нагруженных внешним давлением и осевым растяжением. Решение этих задач проводилось для двух типов граничных условий - шарнирного опирания и защемления.

Отдельные слабовогнутые оболочки, шарнирно опертые по торцам, при действии только внешнего давления являются системами, менее жесткими, чем цилиндрические оболочки. С увеличением параметра вогнутости $\frac{\Delta}{\ell} \sqrt{\frac{R_0}{h}}$ значение критического давления существенно снижается: при $\frac{\Delta}{\ell} \sqrt{\frac{R_0}{h}} = 0,4$ почти в 3 раза, а при $\frac{\Delta}{\ell} \sqrt{\frac{R_0}{h}} = 1,0$ - почти в 8 раз по сравнению с верхним критическим давлением идеальной цилиндрической оболочки. Наличие небольших растягивающих усилий T на торцах вогнутых оболочек приводит к интенсивному увеличению критического давления q ; причем увеличение q с ростом T у вогнутых оболочек более эффективное, чем у цилиндрических, так что уже при $\frac{T}{T_0} = 0,4$ любая вогнутая оболочка лучше цилиндрической.

Слабовогнутые оболочки, защемленные по торцам, при действии только внешнего давления уже способны воспринимать большую нагрузку, чем цилиндрические оболочки; например, у оболочек с вогнутостью $\frac{\Delta}{\ell} \sqrt{\frac{R_0}{h}} = 0,6$ критическое давление q почти в 2 раза выше, чем у цилиндра. Зависимости, полученные для шарнирно-опертых и защемленных оболочек при $T = 0$, хорошо согласуются с результатами исследований Штейна М., Макэлмена Ж.А. и В.И.Мяченко. С ростом осевой растягивающей нагрузки T значение q для защемленных вогнутых оболочек увеличивается более интенсивно, чем у цилиндрических.

Расчётные зависимости, полученные в координатах $\frac{q}{q_0}$ и $\frac{T}{T_0}$, для фиксированных значений параметра вогнутости меридиана $\frac{\Delta}{\ell} \sqrt{\frac{R_0}{h}}$, оказались почти линейными. Это значит, что в конструкциях с пропорциональным нагружением (когда с увеличением q линейно возрастает T) можно так выбрать вогнутость меридиана, что потеря устойчивости оболочки будет вообще исключена.

Исследование влияния переменных коэффициентов в уравнении устойчивости (3) показало, что для слабовогнутых оболочек оно мало и при решении задач устойчивости таких оболочек можно пользоваться балочным уравнением.

Далее исследуется устойчивость оболочек, подкреплённых одним и двумя шпангоутами; в пролётах между шпангоутами обшивка имеет форму цилиндра или слабовогнутой оболочки. Расчёты показали, что составные оболочки, элементами которых являются обечайки вогнутой формы при определенных значениях параметра вогнутости меридиана представляют собой конструкции более эффективные, чем цилиндрические подкреплённые оболочки.

Четвертая глава. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических и слабовогнутых оболочек при внешнем давлении и осевом растяжении проводилось на моделях из целлюлоида. Вогнутые оболочки изготавливались формованием в специально спроектированной установке. В процессе эксперимента был реализован лишь один тип граничных условий – защемление. Внешнее давление создавалось в результате вакуумирования внутренней полости оболочки и замерялось водяным манометром. Осевая растягивающая нагрузка была реализована с помощью рычажной системы.

Испытано три серии моделей – по 5 оболочек каждой серии. Кроме того, каждая оболочка испытывалась многократно – при пяти значениях растягивающей осевой нагрузки. Проверка показала, что материал оболочек не «запоминал» предыдущего нагружения.

Экспериментальные значения критического давления у оболочек каждого вида при $T = \text{Const}$ получились достаточно стабильными, поэтому не было необходимости испытывать большее число моделей.

Оболочки первой серии – цилиндрические: $R_0 = 40$ мм, $\ell = 120$ мм, $h = 0,14$ мм. Оболочки второй и третьей серий – вогнутые: $\Delta_1 = 2$ мм, $\Delta_2 = 4$ мм; R_0 , ℓ и h – те же, что у цилиндрических оболочек. При потере устойчивости оболочек наблюдался нерезкий хлопок, сопровождающийся появлением вмятин сначала на небольшом участке, а затем по всему периметру оболочки. Число волн в кольцевом направлении составляло от 7 до 9 и в основном совпадало с расчётным. Вдоль меридиана образовывалась одна полу-волна. После потери устойчивости оболочки были способны воспринимать возрастающую нагрузку q при $T = \text{Const}$. Результаты эксперимента удовлетворительно согласуются с теоретическими.

В пятой главе дан пример расчёта на устойчивость внутренней обечайки типовой конструкции торового бака с цилиндрическими вставками, нагруженного внутренним давлением q . Внутренняя обечайка бака с размерами $\frac{R_0}{h} = 177$, $\frac{\ell}{R_0} = 0,867$, подкреплена тремя шпангоутами и представляет собой типичную конструкцию с пропорциональным нагружением: осевое растягивающее усилие на торцах пропорционально величине давления q $T = qd(1 + q5d/R_0)$, где $2d$ – расстояние между цилиндрическими стенками в баке.

Показано, что подкреплённую цилиндрическую оболочку можно заменить гладкой слабовогнутой оболочкой при $\Delta = 0,062 \ell$, не теряющей устойчивость при расчётном значении давления $q_p = 9 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ и тем самым существенно облегчить конструкцию. Поскольку с ростом давления q на торцах оболочки пропорционально увеличивается натяжение T , вогнутая оболочка с $\Delta = 0,062 \ell$ не потеряет устойчивости и при давлениях, больших, чем q_p . Попутно показано, что вогнутая оболочка в качестве внутренней обечайки в торовом баке является более целесообразной конструкцией, чем цилиндрическая оболочка, и по соображениям прочности.

ВЫВОДЫ

1. Исследована устойчивость при внешнем давлении и осевом растяжении оболочек отрицательной гауссовой кривизны, близких к цилиндру, при различных граничных условиях.

2. Показано, что определенным выбором параметра вогнутости меридиана в ряде случаев можно получить оболочку, более эффективную, чем оболочка цилиндрическая.

3. Для конструкций с пропорциональным нагружением (у которых с увеличением давления линейно возрастает осевое растяжение), например, для внутренней обечайки торового бака, можно так подобрать небольшую вогнутость меридиана, что потеря устойчивости оболочки будет вообще исключена.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в статье :

Тушева Г.М. Устойчивость близких к цилиндру оболочек двоякой кривизны при о совместном действии радиального давления и меридионального усилия. "Известия вузов Машиностроение" № 5, 1970г.

Две статьи по теме диссертации приняты к печати журналом "Известия вузов Машиностроение" для № 8 1971г. :

Тушева Г.М. Влияние осевых растягивающих усилий на устойчивость слабоогнутых оболочек при внешнем давлении.

Тушева Г.М. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических и слабоогнутых оболочек при внешнем давлении и осевом растяжении.