

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

ЧЕРНИКОВ Сергей Павлович

УСТОЙЧИВОСТЬ ОРТОТРОПНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК, ПОДКРЕПЛЕННЫХ ДИСКРЕТНО
РАСПОЛОЖЕННЫМИ ШПАНГОУТАМИ

Диссертация написана на русском языке

(05.025 — Динамика и прочность машин, приборов и
аппаратуры)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

М178253

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор Феодосьев В. И.

Ведущее предприятие — указано в решении Ученого Совета.

Защита диссертации состоится « . . . » . . . 197 г.
на заседании Специализированного Совета по динамике и
проч. . . .

библиотеке учи-

кан Демидов С. П.

M178253

Подкрепленные оболочки находят широкое применение во многих областях современной техники - в строительстве, машиностроении и т.д.

Как правило, работоспособность тонкостенной конструкции определяется ее устойчивостью, поэтому проблема устойчивости подкрепленных оболочек весьма актуальна. Изучению этой проблемы посвящено большое количество работ, наиболее ранние из которых связаны с именами С.П.Тимошенко, В.Флюгге, П.Ф.Папковича, Ю.А.Шименского.

Анализ исследований по устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек показывает, что многие вопросы в этой области можно считать принципиально выясненными. Это, на наш взгляд, в основном, те вопросы, для решения которых допустимо пользоваться теорией конструктивно-ортотропных оболочек. С позиций этой теории выяснено, например, влияние расположения ребер относительно срединной поверхности на критическую нагрузку осевого сжатия и внешнего давления, рациональное соотношение веса обшивки и подкрепления в различных случаях нагружения и т.д. Однако ряд проблем, связанных, прежде всего, с решением задач устойчивости для неоднородного начального состояния, исследован пока недостаточно.

Большинство из известных работ по устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек выполнено в предположении безмоментности начального состояния. В то же время решения аналогичных задач для гнутых оболочек показали, что пренебрежение докритической моментностью приводит в ряде случаев к неточным результатам как в количественном, так и в качественном отношениях. Естественно предположить, что и для подкрепленных оболочек могут иметь место подобные случаи.

Работы, учитывающие моментность начального состояния, стали появляться лишь в самое последнее время. Это, в основном, работы В.И.Мяченкова, В.И.Мяченкова и В.А.Ляскова и некоторые другие.

Другим вопросом, относящимся к устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек при осевом сжатии и требующим, на наш взгляд, дальнейших исследований, является изучение влияния различных трудно контролируемых отклонений в условиях нагружения.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1178253

Черников С.П. Устойчивост

В частности, очевидно, что в реальных условиях нельзя гарантировать приложение осевой нагрузки именно в срединной или нейтральной поверхностях. Поскольку отклонение линии приложения нагрузки от расчётной эквивалентно дополнительному изгибающему моменту, представляет интерес выяснить влияние эксцентриситета нагрузки относительно срединной поверхности на её критическую величину.

Наконец, до сих пор недостаточно исследован вопрос о том в каких случаях допустимо "размазывание" подкрепляющих элементов и применение теории конструктивно-ортотропных оболочек, а в каких случаях необходимо учитывать дискретность ребер. Это в особенности относится к устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек при осевом сжатии.

Перечисленным вопросам посвящена, в основном, данная работа.

В работе рассматривается устойчивость подкреплённых цилиндрических оболочек при действии равномерно распределённых по окружности осевых усилий и радиального давления. Осевые усилия прикладываются к торцам оболочки с эксцентриситетом относительно срединной поверхности. Наличие стрингеров учитывается в рамках теории конструктивно-ортотропных оболочек; шпангоуты считаются дискретными.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении приводится обзор литературы и краткое содержание работы.

При составлении обзора литературы основное внимание уделялось работам, опубликованным в течение последнего десятилетия. Более ранние исследования нашли своё отражение в обширных обзорах, приведенных в докторских диссертациях О.И.Теребушко, С.И. Галкина, а также в книге Э.И.Григолюка и В.В.Кабанова.

Из работ, выполненных на основе применения теории конструктивно-ортотропных оболочек, отмечаются исследования О.И.Теребушко, С.Н.Кана, А.И.Маневича, В.И.Мяченкова, В.В.Кабанова, Штульмана и Делудзио, Соонга и др. Анализируются полученные результаты, касающиеся влияния на критические нагрузки различных факторов - жесткости стрингеров и шпангоутов, их расположения относи-

тельно срединной поверхности, граничных условий и т.д.

При рассмотрении работ, посвященных устойчивости оболочек, подкрепленных дискретными ребрами, обращается внимание на методы, применяемые при учете дискретности подкреплений, и на работы, в которых сравниваются "конструктивно-ортотропное" и "дискретное" решения. Отмечаются исследования С.А.Амбарцумяна, В.А.Постнова, А.З.Локшина, И.С.Малютина, И.Я.Амиро, В.М.Рябова, А.И.Маневича, Зингера и Хафтки и др.

В первой главе с позиций конструктивной ортотропии выводятся уравнения устойчивости упругой цилиндрической оболочки, подкрепленной эксцентрично расположенными стрингерами, при действии равномерно распределенных по окружности осевых усилий и радиального давления. Осевые усилия приложены к торцам с эксцентриситетом относительно срединной поверхности, к которой приврдаются все силовые факторы. Учитывается моментность начального состояния.

При замене исходной подкрепленной оболочки конструктивно-ортотропной учитывается жесткость стрингеров на растяжение - сжатие и изгиб в продольной плоскости, перпендикулярной к срединной поверхности.

Уравнения устойчивости, представленные в перемещениях, с помощью разложения решений в ряды по окружной координате приводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, имеющей восьмой порядок. В этой же главе строится алгоритм решения полученной системы, основанный на применении конечноразностного метода прогонки.

Решение уравнения, описывающего начальное состояние, представляется в аналитическом виде.

Во второй главе приводятся результаты решения ряда задач устойчивости стрингерных цилиндрических оболочек, полученные на основе разработанного алгоритма. Здесь рассматривается устойчивость шарнирно опертых (на торцах $U=0$, $V=0$, $W=0$,

$M_x = 0$) и жестко заделанных (на торцах $U = V = W = W' = 0$) оболочек при действии осевого сжатия и радиального давления. Сравниваются решения, полученные с учётом и без учёта моментности начального состояния. Исследуется влияние эксцентриситети

приложения осевой сжимающей нагрузки на её критическую величину.

Форма поперечных сечений стрингеров принималась в расчётах прямоугольной и характеризовалась двумя безразмерными параметрами — относительной площадью сечения $\tilde{F} = (1 - \nu^2) F / b h$ (где b — расстояние между стрингерами) и расстоянием центра тяжести сечения стрингера от срединной поверхности $\tilde{z} = z / h$.

Решение уравнений устойчивости показало, что в случае стрингерной оболочки, так же, как и в случае гладкой, критическая нагрузка при постоянном значении $\gamma = L / \sqrt{R h}$ практически не зависит от отношения R / h . Поэтому геометрия обшивки может быть описана одним параметром γ .

В работе приводятся зависимости критических параметров осевого сжатия $\rho(\gamma)$ и внешнего давления $q(\gamma)$ для различных $\tilde{F}$ и $\tilde{z}$.

Сравнение результатов, полученных с учётом и без учёта моментности начального состояния, показало, что пренебрежение докритической моментностью может в некоторых случаях привести к весьма существенной погрешности определения критической нагрузки. Так, например, в случае шарнирно опертой оболочки с параметрами $\gamma = 15$, $\tilde{F} = 0,5$, $\tilde{z} = 5$, подкреплённой наружными ребрами и нагруженной осевыми сжимающими усилиями, приложенными к срединной поверхности, пренебрежение начальной моментностью ведет к занижению критической нагрузки примерно в два раза. При тех же параметрах γ , $\tilde{F}$, $\tilde{z}$, но внутренних стрингерах критическая нагрузка, полученная без учёта моментности начального состояния, оказывается примерно в полтора раза завышенной.

Во втором параграфе главы II рассматривается влияние эксцентриситета осевой сжимающей нагрузки на устойчивость шарнирно опертой стрингерной оболочки. Это влияние оказывается весьма значительным. В некоторых из рассмотренных случаев смещение линии приложения нагрузки в пределах половины высоты профиля вело к изменению величины критической нагрузки почти вдвое. Повидимому, при достаточно большом эксцентриситете и малой величине сжимающей нагрузки потеря устойчивости происходит в

Основном за счёт окружных сжимающих усилий, возникающих в результате действия краевых моментов, а осевые усилия не играют при этом существенной роли. Это обстоятельство дает возможность предположить, что "критические" краевые моменты могут быть следствием не только осевой сжимающей нагрузки, но и осевой растягивающей нагрузки, если последняя приложена с достаточным эксцентриситетом относительно срединной поверхности.

Расчёты, проведенные для оболочки с параметрами $\bar{F}=0,4$, $\bar{Z}=6$, $\gamma=15$, показали, что, действительно, при смещении растягивающей нагрузки внутрь оболочки на величину $e > 2e_c$ от нейтральной поверхности (e_c - расстояние от срединной поверхности до нейтральной) потеря устойчивости становится возможной. Правда, практически такая потеря устойчивости не представляет опасности, поскольку прогибы не могут сильно возрастать.

Случай потери устойчивости стрингерной оболочки при эксцентричном растяжении интересен тем, что он позволяет в какой-то мере расширить область качественных представлений, относящихся к проблеме устойчивости цилиндрических оболочек.

В третьем параграфе второй главы представлены результаты, относящиеся к осевому сжатию стрингерных жестко заделанных оболочек. Из этих результатов видно, что влияние начальной моментности в случае жестко заделанных оболочек менее значительно, чем в случае шарнирно опертых; однако и здесь при малых γ критические нагрузки, определенные с учётом и без учёта моментности начального состояния, могут быть существенно различны.

В заключительном, четвертом, параграфе рассматривается устойчивость шарнирно опертых стрингерных оболочек при действии внешнего давления и комбинированной нагрузки - осевого сжатия и давления. Из представленных графиков видно, что влияние начальной моментности в случае внешнего давления несущественно. Случай комбинированного нагружения занимает в этом смысле промежуточное положение между осевым сжатием и внешним давлением.

Третья глава посвящена устойчивости конструктивно-ортоотропных оболочек, подкреплённых дискретными шпангоутами.

В первом параграфе выводятся условия сопряжения, которые

должны удовлетворять решения уравнений равновесия участков стрингерной оболочки, заключенных между шпангоутами. Условия сопряжения получаются из рассмотрения равновесия элемента шпангоута, нагруженного усилиями и моментами со стороны оболочки. Шпангоуты регулярны и располагаются эксцентрично относительно срединной поверхности. Учитывается жесткость шпангоута на растяжение - сжатие, кручение и изгиб как в собственной плоскости, так и из плоскости. Начальное состояние моментное.

Во втором и третьем параграфе главы III приводятся алгоритмы перехода через шпангоут решений уравнений устойчивости и уравнения докритического состояния.

В четвертом параграфе представлены результаты, относящиеся к устойчивости шарнирно опертых оболочек, нагруженных осевыми сжимающими усилиями и радиальным внешним давлением. Форма поперечных сечений стрингеров и шпангоутов принималась в расчётах прямоугольной. Варьировалось количество шпангоутов, отношение высоты сечения шпангоута к ширине, жесткость стрингеров и шпангоутов, расположение ребер относительно срединной поверхности.

Для проверки допустимости "размазывания" шпангоутов при осевом сжатии был просчитан ряд вариантов подкрепленных оболочек отличающихся количеством шпангоутов, имеющих неизменную суммарную жесткость. Параметр длины $L/\sqrt{Rh}$ был принят таким, чтобы на величине критической нагрузки сказывалась поставка одного шпангоута.

Расчёты показали, что, как и следовало ожидать, существуют предельные значения жесткости шпангоута, выше которых критическая нагрузка практически не увеличивается. При меньшей жесткости величина критической нагрузки мало зависит от количества шпангоутов m , имеющих неизменную суммарную жесткость.

В рассмотренных примерах критическая нагрузка осевого сжатия уже при $m \geq 3$ определялась практически только суммарной жесткостью шпангоутов. Следовательно, начиная с $m = 3$, шпангоуты можно "размазывать".

Критические значения осевой сжимающей нагрузки, получающиеся при больших m , сравнивались с значениями, вычисленными по формулам О.И.Теребушко для "размазанных" шпангоутов. Несмотря

на некоторое различие в граничных условиях (в работе О.И. Теребушко принималось на торцах $N_x=0$, а здесь - $u=0$), результаты совпали, что говорит, по-видимому, о несущественности в данной задаче граничных условий для u .

При жесткости шпангоутов, большей предельной, "конструктивно-ортотропное" решение приводит, естественно, к завышенным критическим нагрузкам.

Сравнение результатов, полученных с учётом и без учёта моментности начального состояния, показало, что в условиях, когда шпангоуты можно "размазывать", учёт начальной моментности не вносит существенных поправок в величины критических нагрузок.

В заключительной части четвертого параграфа приведены критические значения параметра внешнего давления в зависимости от жесткости стрингеров и шпангоутов и количества шпангоутов.

Влияние дискретности шпангоутов на критическую нагрузку носит в этом случае качественно такой же характер, как и в случае осевого сжатия. А именно, если жесткость шпангоутов не превышает некоторой предельной величины, то при наличии трех и более шпангоутов их можно "размазывать". Этот вывод согласуется с полученными ранее результатами А.И.Маневича.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек при осевом сжатии. Исследовалась устойчивость стрингерных оболочек и оболочек, подкрепленных стрингерами и шпангоутами.

Оболочки изготавливались из пленки на основе целлюлозы толщиной 120 мк ; стрингера и шпангоуты вырезались из листов органического стекла толщиной 1 и 2 мм. Шпангоуты приклеивались внутри оболочек, стрингера - снаружи. Количество стрингеров оставалось у всех оболочек неизменным. Варьировалась длина оболочек, количество и жесткость шпангоутов.

Для испытанных оболочек получено удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных результатов. Различие соответствующих критических нагрузок не превышало примерно двадцати процентов.

ВЫВОДЫ.

1. Разработан алгоритм метода прогонки применительно к задачам устойчивости цилиндрических ортотропных оболочек, подкреплённых произвольным количеством шпангоутов.

2. Исследовано влияние моментности начального состояния на критические величины осевых усилий и внешнего давления при различных вариантах нагружения, граничных условий и расположения подкреплений относительно срединной поверхности. Установлено, что пренебрежение начальной моментностью приводит в ряде случаев к значительным погрешностям. В частности, для коротких шарнирно опертых стрингерных оболочек критические величины осевой сжимающей нагрузки, определённые с учётом и без учёта моментности начального состояния, могут отличаться в несколько раз.

3. Показано, что эксцентриситет осевой нагрузки весьма существенно влияет на её критическую величину. При значениях эксцентриситета, превышающих некоторое критическое, возможна потеря устойчивости стрингерной оболочки под действием растягивающих усилий.

4. Рассмотрено влияние дискретности шпангоутов на критические величины осевой сжимающей нагрузки и внешнего давления. Показано, что при определенных условиях "конструктивно-ортотропное" и "дискретное" решения приводят к одинаковым критическим нагрузкам.

5. Проведено экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек, подкреплённых стрингерами и шпангоутами, при осевом сжатии. Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с расчётами.

По теме диссертации опубликованы следующие статьи:

1. Влияние эксцентриситета осевой сжимающей нагрузки на устойчивость цилиндрической оболочки, подкрепленной продольными ребрами.

Изв. ВУЗ"ов, Маш-ие, 1970, № 5.

2. Устойчивость стрингерной цилиндрической оболочки при осевом сжатии.

Изв. ВУЗ"ов, Маш-ие, 1971, № 4.