Валерий Игнатюк
Брестский инженерно-
строительный институт

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДКРЕПЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ НАГРУЖЕНИИ БЫСТРО ВОЗРАСТАЮЩИМ ВО ВРЕМЕНИ ВСЕСТОРОННИМ ДАВЛЕНИЕМ

Цилиндрические оболочки, являясь конструкциями тонкостенными, обладают достаточно высокой прочностью и исчерпание их несущей способности происходит чаще всего в результате потери устойчивости. Повышение критических нагрузок таких конструкций возможно путем их усиления ребрами жесткости. При этом следует стремиться к наиболее рациональному варианту подкрепления, отвечающему минимальному весу оболочек.

Относительно простой и эффективный метод определения рациональных параметров подкрепления цилиндрических оболочек для случая их статического нагружения осевым сжатием предложен и излагается в работе [I]. Метод основан на сопоставлении критических нагрузок для подкрепленной и гладкой оболочек равного веса посредством коэффициента относительной эффективности. Здесь этот метод развит для случая нагружения цилиндрических оболочек быстро возрастающим во времени всесторонним давлением.

Рассматриваются стальные тонкие замкнутые круговые подкрепленные цилиндрические оболочки, состоящие из собственно оболочки (обшивки) и жестко с ней соединенных по линиям контакта продольных и кольцевых ребер (стрингеров и шпангоутов). Оболочки шарнирно оперты по краям и загружены равномерно распределенным по поверхности всесторонним давлением, быстро возрастающим во времени по линейному закону до некоторой величины q_0 . Принимается, что напряженно-деформированное состояние обшивки можно полностью определить в рамках линейной теории тонких упругих оболочек, основанной на гипозезах Кирхгофа-Лява, а для расчета ребер применима теория криволинейных стержней Кирхгофа-Клебша. Докритическое состояние оболочки принимается безмоментным.

Задача устойчивости решается [2] энергетическим методом при одночленной аппроксимации перемещений с учетом дискретности расположения ребер и их эксцентриситетов. В выражении кинетической энергии учитываются только силы инерции, действующие в радиальных направлениях. Уравнение движения оболочки получено с помощью уравнения Лагранжа второго рода, а выражение для динамической критической нагрузки (коэффициента динамичности) - с использованием аналитического критерия устойчивости при быстро возрастающем во времени нагружении [I] , соответствующего моменту начала интенсивного развития прогибов. Как статические, так и динамические критические нагрузки получаются путем минимизации соответствующих выражений по параметрам волнообразования.

Несложно показать [3] , что минимуму веса оболочки для заданных её генеральных размеров (радиуса R и длины L)и заданной величины всестороннего динамического давления q_g соответствует максимум произведения $\mu_{ст} k_g$, где $\mu_{ст}$ - коэффициент относительной эффективности подкрепления при статическом нагружении, равный отношению соответствующих критических давлений для ребристой и гладкой оболочек равного веса; k_g - коэффициент динамичности ребристой оболочки, равный отношению динамического критического давления к статическому критическому давлению для рассматриваемой оболочки. При постоянном же весе оболочки величины динамических критических нагрузок прямо пропорциональны величинам $\mu_{ст} k_g$ (при статическом нагружении - величинам $\mu_{ст}$ [I]). Последнее позволяет выполнять исследование влияния параметров подкрепления на критические нагрузки через их влияние на величины $\mu_{ст} k_g$ и $\mu_{ст}$. Для удобства исследований введем безразмерные независимые параметры подкрепления: φ_1 - отношение веса всех ребер к весу обшивки; φ_2 - отношение веса стрингеров к весу шпангоутов; a_1 - отношение расстояния между стрингерами к толщине обшивки; a_2 - величина, совпадающая с отношением расстояния между шпангоутами к толщине обшивки; ψ_1 , ψ_2 - отношения высот стенок к их толщинам соответственно для стрингеров и шпангоутов. Тогда выражение для $\mu_{ст} k_g$ получим в виде

$$\mu_{ст} k_g = k_g \frac{\bar{q}}{\bar{q}_0} \frac{1}{(1+\varphi_1)^2}, \qquad (I)$$

где $\bar{q}$ и $\bar{q}_0$ – безразмерные параметры критических давлений для ребристой и гладкой оболочек равного веса, определяемые в соответствии с соотношением $\bar{q} = q^{ст}_{кр} R^2 / E h^2$; $q^{ст}_{кр}$ – статическое критическое давление; E – модуль упругости материала оболочки; h – толщина обшивки.

Для оболочек из идеально упруго-пластических материалов максимальные напряжения при динамическом нагружении определяются динамическими пределами текучести этих материалов. В соответствии с этим при заданной величине всестроннего динамического давления q_g максимально возможное значение произведения $\mu_{ст} k_g$ для рассматриваемых оболочек определяется зависимостью

$$(\mu_{ст} k_g)_т = \min\left[(\mu_{ст} k_g)_{1т}, (\mu_{ст} k_g)_{2т}\right] \qquad (2)$$

где $(\mu_{ст} k_g)_{1т}$ и $(\mu_{ст} k_g)_{2т}$ – предельные величины произведения $\mu_{ст} k_g$, отвечающие достижению соответственно продольными и окружными напряжениями динамических пределов текучести материала и определяемые выражениями

$$(\mu_{ст} k_g)_{1т} = \frac{4\sigma_т^2}{E\bar{q}_0 q_g}\left[\frac{1+\varphi_1+\varphi_1\varphi_2}{(1+\varphi_1)(1+\varphi_2)}\right]^2; \qquad (3)$$

$$(\mu_{ст} k_g)_{2т} = \frac{\sigma_т^2}{E\bar{q}_0 q_g}\left[\frac{1+\varphi_1+\varphi_2}{(1+\varphi_1)(1+\varphi_2)}\right]^2. \qquad (4)$$

Здесь: $\sigma_т$ – динамический предел текучести материала оболочки.

Таким образом, задача расчета оболочки минимального веса сводится к отысканию такого сочетания безразмерных независимых параметров подкрепления φ_1 , φ_2 , a_1 , a_2 , ψ_1 , ψ_2 , для которого величина $\mu_{ст} k_g$ будет максимальной. Расчетное максимальное значение $\mu_{ст} k_g$ определяется как наименьшее из всех $\mu_{ст} k_g$, соответствующих различным случаям деформации оболочки, и величины $(\mu_{ст} k_g)_т$ (2). При этом в результате анализа форм деформирования ребристых оболочек обычно различают [I] общий случай деформации, для которого все ребра и изгибаются, и закручиваются, и частные случаи деформации, для которых ребра одного из направлений, либо обоих направлений только закручиваются, либо только изгибаются.

Отыскание указанного сочетания безразмерных независимых параметров подкрепления, соответствующего минимуму веса оболочки, может быть осуществлено путем непосредственного перебора этих параметров с выполнением анализа их влияния на величины $\mu_{ст} k_g$ на каждом шаге перебора и внесением соответствующей корректировки. Одна из возможных схем перебора таким путем достаточно подробно изложена в работе [3] . Там же приведены формулы для получения по безразмерным параметрам подкрепления действительных размеров ребристых оболочек. В соответствии с кратко изложенной здесь методикой расчета составлена вычислительная программа на языке ФОРТРАН -IУ.

Заметим, что в зависимости от величины динамического всестороннего давления q_g здесь, как и при динамическом нагружении осевым сжатием [3] , следует различать слабо, средне и сильно нагруженные оболочки. Для сильно нагруженных оболочек оптимальным вариантом является гладкая оболочка, то есть подкрепление не требуется. Для слабо нагруженных оболочек любое практически допустимое изменение безразмерных независимых параметров подкрепления не приводит к достижению динамических пределов текучести материалов и потеря устойчивости происходит в пределах упругости (максимальное значение расчетной величины $\mu_{ст} k_g$ будет всегда ниже величины ($\mu_{ст} k_g)_т$). Для средне нагруженных оболочек максимальная расчетная величина $\mu_{ст} k_g$ будет определяться предельной величиной ($\mu_{ст} k_g)_т$, в связи с чем для такого случая существенный интерес представляет анализ изменения максимальных значений ($\mu_{ст} k_g)_т$ в зависимости от величин безразмерных независимых параметров подкрепления φ_1 и φ_2 (от остальных параметров подкрепления величина ($\mu_{ст} k_g)_т$ не зависит - см. (2) ÷ (4)).

Получено, что для средне нагруженных оболочек также следует различать два уровня нагрузки. Для более высокого уровня нагрузки максимальное расчетное значение величины $\mu_{ст} k_g$, равное $(\mu_{ст} k_g)_т$, будет достигаться в области изменения φ_1 от 0 до I при φ_2 равном нулю, что соответствует подкреплению оболочек только шпангоутами при весе их не превышающем веса обшивки. Для более низкого уровня нагрузки средне нагруженных оболочек минимуму их веса будет отвечать такое подкрепление, при котором общий вес ребер всегда больше веса обшивки и при котором должно выполняться условие равнонапряженности оболочки в продольном и окружном направлениях, определяемое следующей зависимостью между безразмерными независимыми параметрами подкрепления:

$$\varphi_2 = (\varphi_1 - 1)/(2\varphi_1 + 1), \tag{5}$$

для выполнения которой вес шпангоутов должен быть более чем в два раза больше веса стрингеров ($\varphi_2 < 0{,}5$).

Исследование влияния безразмерных параметров подкрепления на величины $\mu_{ст} k_g$ позволяет также ориентировочно оценить области изменения этих параметров, в пределах которых расчетная величина $\mu_{ст} k_g$ для стальных оболочек может достигать своих наибольших значений ($1{,}0 < \varphi_1 < 1{,}8$; $0 < \varphi_2 < 0{,}3$; $30 < a_1 < 70$; $70 < a_2 < 120$; $7 < \psi_1$ и $\psi_2 < 14$), а вес оболочек – минимума.

Изложенная методика позволяет выполнять определение оптимальных параметров подкрепления, соответствующих минимуму веса стальных цилиндрических оболочек при нагружении их быстро возрастающим во времени всесторонним давлением.

ЛИТЕРАТУРА

I. Амиро И.Я., Заруцкий В.А. Теория ребристых оболочек. – К.: Наук. думка, 1980, – 368 с. – (Методы расчета оболочек: В 5-ти т.; Т.2).

2. Игнатюк В.И. Устойчивость многослойных цилиндрических ребристых оболочек при динамическом нагружении / Брест. инж.-строит. ин-т. – Брест, 1980. – 23 с. – Деп. в ВИНИТИ 12.01.81, № 135-81.

3. Игнатюк В.И. К расчету подкрепленных цилиндрически оболочек минимального веса при динамическом нагружении осевым сжатием / Брест. инж.-строит. ин-т. – Брест, 1986. – 18 с.– Деп. во ВНИИИС Госстроя СССР 27.11.86, № 7469.