

П.С. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, **С.А. БЕЛОВ**, канд. техн. наук,
ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПЕРЕГОРОДОК И ПЛОСКИХ ДНИЩ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ ИЛИ АППАРАТОВ

За допомогою методу граничних навантажень виведені розрахункові формули, які дозволяють обчислити мінімальну необхідну товщину стінки перегородки чи плоского днища горизонтальної циліндричної посудини або апарата під дією гідростатичного тиску.

Используя метод предельных нагрузок получено расчетные формулы, позволяющие вычислить минимальную необходимую толщину стенки перегородки или плоского днища горизонтального цилиндрического сосуда или аппарата под действием гидростатического давления.

With the help of a method of maximum loads settlement formulas which allow to calculate the minimal necessary thickness of a wall of a partition or the flat bottom of a horizontal cylindrical vessel or the device under action of hydrostatic pressure are deduced.

При расчете на прочность перегородки, установленной внутри горизонтального цилиндрического сосуда или аппарата (рис. 1), возникает необходимость учитывать гидростатическое давление, которое можно вычислить по формуле:

$$p_x = p_0 + \gamma r \cos \alpha, \quad (1)$$

где p_0 – давление, возникающее на уровне оси обечайки, γ – удельный вес жидкости, H – высота перегородки. Предполагается, что высота $H > R$ и заполнение одной из полостей жидкостью производится на всю высоту перегородки; R – радиус окружности присоединения перегородки к цилиндрической обечайке; D – внутренний диаметр цилиндрической обечайки сосуда или аппарата; α – координата цилиндрической системы координат, помещенной на оси обечайки (в точке O на рис. 1,а):

$$p_0 = \gamma (H - R); \quad (2)$$

$$R = D / 2;$$

Будем полагать, что в предельном состоянии перегородка приобретает коническую форму, приведенную на рис. 1,б. При этом на границах каждого из участков перегородки длиной $d\alpha$ возникает предельный изгибающий момент интенсивностью:

$$M_T = \frac{\sigma_T h^2}{4}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала перегородки; h – толщина перегородки.

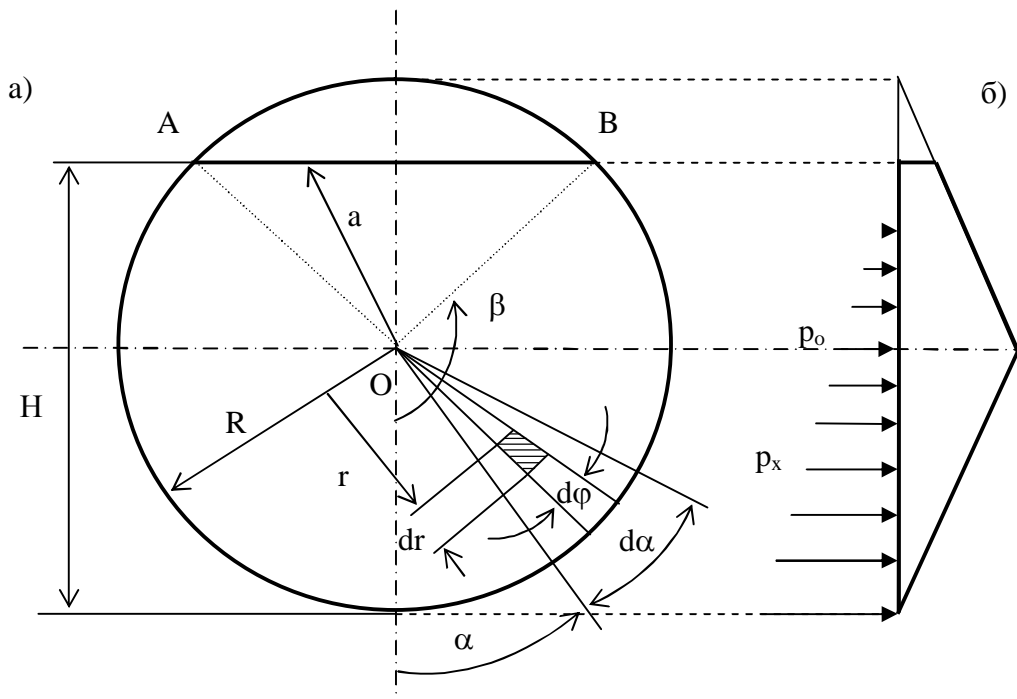


Рис. 1. Расчетная схема перегородки

Чтоб вычислить предельную нагрузку рассматриваемой перегородки, составим условия равновесия выделенного элементарного участка перегородки (рис. 2):

$$M_T R d\alpha = \int_0^{Rd\alpha} \int_0^R (R-r) p_x r d\varphi dr - 2 \int_0^R \frac{d\alpha}{2} M_T dr. \quad (4)$$

Подставляя (1) в (4) после интегрирования последнего уравнения получаем следующее условие равновесия элементарного участка:

$$M_T R d\alpha = \left(\frac{p_0 R^3}{6} + \frac{\gamma R^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha - M_T R d\alpha.$$

Вначале не будем учитывать воздействие гидростатического давления на участок OAB (рис. 1,а). В таком случае для определения предельного давления на рассматриваемую перегородку следует просуммировать нагрузки всех выделенных элементарных участков:

$$2 \int_0^\beta M_T R d\alpha = 2 \int_0^\beta \left(\frac{p_0 R^3}{6} + \frac{\gamma R^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha - 2 \int_0^\beta M_T R d\alpha, \quad (5)$$

где β – угловая координата, соответствующая высоте перегородки

$$H = R (1 - \cos \beta).$$

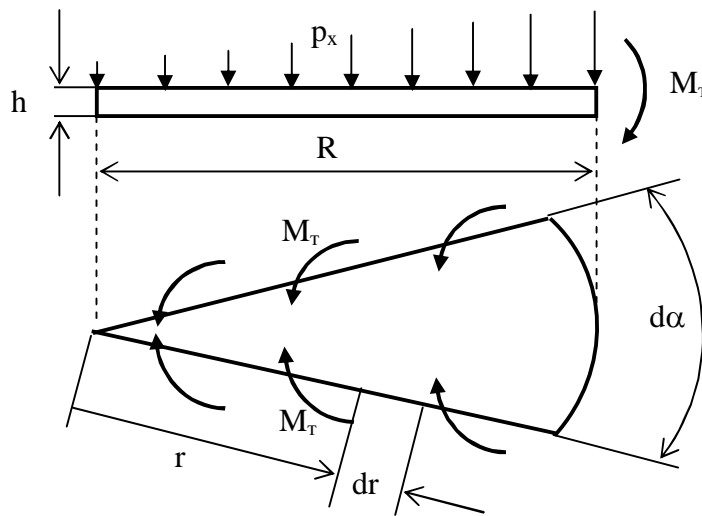


Рис. 2 Схема нагружения элементарного участка перегородки

После интегрирования уравнения (5) можно получить:

$$M_T = \frac{p_0 R^2}{12} + \frac{\gamma R^3}{24} \frac{\sin \beta}{\beta}. \quad (6)$$

Для определения расчетной толщины перегородки h_p необходимо в зависимости (3) заменить предел текучести σ_T на допускаемое напряжение $[\sigma]$.

Подставляя (2, 3) в уравнение (6) можно получить следующую расчетную формулу:

$$h_p = KR \sqrt{\frac{\gamma R}{[\sigma]}},$$

где h_p – расчетная толщина перегородки; K – безразмерный коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$K = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{\sin \beta}{2\beta} - \cos \beta \right)}. \quad (7)$$

Пусть, например, требуется определить толщину перегородки, изготовленной из проката стали 08X18H10T и установленной в цилиндрической емкости диаметром $D = 2200$ мм, которая работает при температуре 80 °С. Остальные исходные данные: $H = 1445$ мм, $\gamma = 0,00001$ Н/мм³, $[\sigma] = 159$ МПа. При этом имеем: $R = 1100$ мм, $\beta = 1,88982$ рад., $K = 0,433921$, $h_p = 3,97$ мм.

На плоское днище, кроме гидростатического давления, может действовать внутреннее избыточное давление p . Поэтому, при расчете днища следует принимать:

$$p_o = p + \gamma (H - R),$$

где p – расчетное давление.

Кроме того, для днища $H = 2R$ и $\beta = \pi$. Воспользовавшись этими значениями можно получить:

$$h_p = KR \sqrt{\frac{p_{пп}}{[\sigma]}},$$

где

$$p_{пп} = p + \gamma R; \quad K = \sqrt{\frac{1}{3}}.$$

Если вместо рассчитанной ранее перегородки установить днище, то при давлении $p = 0$, имеем: $p_{пр} = 0,011$ МПа, $K = 0,57735$ и расчетная толщина будет больше, чем у перегородки: $h_p = 5,28$ мм.

Если при расчете днища не учитывать гидростатическое давление (положить $\gamma = 0$), то зависимость (6) преобразуется к виду:

$$M_T = \frac{pR^2}{12}. \quad (8)$$

Отметим, что А.С. Калманок [1] для жестко защемленной круглой пластины, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, получил такую же зависимость [8], а Н.Н. Малинин [2], используя условие пластичности Треска-Сен-Венана и дифференциальное уравнение изгиба такой пластины, получил несколько уточненное значение:

$$M_T = \frac{pR^2}{11,3}.$$

После этого учтем влияние гидростатического давления на участок ОАВ (рис. 1,а). На нем при $\beta < \alpha \leq \pi$ вместо зависимости (4) необходимо использовать следующее уравнение равновесия:

$$0 = \int_0^a \int_0^{d\alpha} (a-r)p_x r d\varphi dr - 2 \int_0^a \frac{d\alpha}{2} M_T dr,$$

где a – отрезок

$$a = \frac{H - R}{\cos(\pi - \alpha)}.$$

При интегрировании по всей площади перегородки, вместо уравнения (5), необходимо использовать следующее уравнение:

$$2 \int_0^\beta M_T R d\alpha = 2 \int_0^\beta \left(\frac{p_0 R^3}{6} + \frac{\gamma R^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha + 2 \int_0^\beta \left(\frac{p_0 a^3}{6} + \frac{\gamma a^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha - 2 \int_0^\beta M_T R d\alpha - 2 \int_0^\pi M_T a d\alpha$$

После соответствующих преобразований этих зависимостей, вместо формулы (7), получаем более сложную зависимость:

$$K = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{\sin \beta}{2A\beta} - B \cos \beta \right)}, \quad (9)$$

где

$$A = 1 + \frac{\cos \beta}{2\beta} C; \quad B = 1 + \frac{\sin \beta - C}{4A\beta} \cos \beta; \quad C = \ln \frac{1 + \sin \beta}{\cos(\pi - \beta)} .$$

Если для ранее рассчитываемой перегородки произвести расчет коэффициента K по формуле (9), то получаем: $C = 1,827116$; $A = 0,848385$; $B = 1,0426918$; $K = 0,455785$ и расчетная толщина перегородки $h_p = 4,17$ мм, что почти на 5 % превышает величину, полученную по формуле (7).

Расчеты показали, что коэффициент A имеет минимум $A = 0,8413$ при $\beta = 116^\circ$ и устремляется к $A = 1$ при $\beta = 180^\circ$ и при $\beta \rightarrow 90^\circ$. Коэффициент B имеет максимум $B = 1,04375$ при $\beta = 105^\circ$ и устремляется к $B = 1$ при $\beta = 180^\circ$ и при $\beta \rightarrow 90^\circ$. Значение коэффициента K , полученное по формуле (9), во всем диапазоне $90^\circ < \beta \leq 180^\circ$ не превышает более чем на 5% значения этого коэффициента, полученного по формуле (7).

Вывод.

Для расчетов на прочность перегородок, устанавливаемых в горизонтальных цилиндрических сосудах или аппаратах, не внося больших погрешностей, рекомендуется использовать более простую зависимость (7).

Список литературы: 1. *Калманок А.С.* Расчет пластинок: справочное пособие / *А.С. Калманок.* – М.: Госстройиздат, 1959. – 212 с. 2. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести / *Н.Н. Малинин.* – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10