DOI: 10.17117/na.2016.06.02.069

<http://ucom.ru/doc/na.2016.06.02.069.pdf>

Поступила (Received): 24.06.2016

Исуткина В.Н., Дедов Н.И.**Проектирование сосудов давления при упругих и локальных пластических деформациях****Isutkina V.N., Dedov N.I.****Design of pressure vessels in elastic and plastic deformations of local**

Широкое применение тонкостенных оболочечных конструкций при проектировании нефтехимического оборудования вызывает необходимость разработки надежных и достаточно точных, для практического применения, методов расчета на прочность с учетом локальных пластических деформаций. Пластические деформации, возникающие в соединениях оболочек, имеют местный характер и практически не снижают несущую способность тонкостенных конструкций, что позволяет упростить расчетную схему при наличии пластического шарнира в стыке оболочек

Ключевые слова: краевой эффект, тонкостенные оболочечные конструкции

The widespread use of thin-walled shell structures in the design of petrochemical equipment makes it necessary to develop reliable and accurate enough for practical use, methods of calculation taking into account the strength of the local plastic deformation. Plastic deformation arise in membranes compounds are local in nature and do not substantially reduce the load carrying capacity of thin-walled structures, to simplify the design scheme if the plastic hinge in the joint casings

Key words: edge effect, thin-shell structure

Исуткина Вера Николаевна

Кандидат физико-математических наук, доцент
Самарский государственный технический университет
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Isutkina Vera Nikolaevna

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor
Samara state technical university
Samara, Molodogvardeiskaya st., 244

Дедов Николай Иванович

Кандидат технических наук, профессор
Самарский государственный технический университет
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Dedov Nikolai Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Professor
Samara state technical university
Samara, Molodogvardeiskaya st., 244

Цилиндрические сосуды давления со сферическими днищами используются при проектировании резервуаров, колонн и другого нефтехимического оборудования. При действии давления в цилиндрических и сферических оболочках возникают мембранные напряжения, кроме зон резкого изменения толщин, фланцев, опор и зон сопряжения оболочек, в которых возникают мембранные и изгибные напряжения. В сечениях стыка оболочек, заделки края оболочек, соединения с фланцами, опорами возникают краевые силы и моменты.

Причиной возникновения краевых сил и моментов является также скачкообразное изменение распределенных нагрузок, температур по длине, приложение сосредоточенных сил и моментов, изменение механических свойств материалов в местах соединения конструкций из разных материалов.

Для определения мембранных напряжений используется безмоментная теория оболочек. Изгибные напряжения, вызываемые краевыми силами и моментами, определяются по моментной теории оболочек, имеют местный характер и быстро затухают по мере удаления от зоны краевого эффекта. На небольшом расстоянии от стыка краевые напряжения и деформации настолько малы, что их допускается не учитывать и расчет ведут только по безмоментной теории оболочек. Для цилиндрических оболочек это расстояние по данным различных источников от $x = 1,1\sqrt{r\delta_y}$ до $x = 2,5\sqrt{r\delta_y}$. Оболочки, у которых краевые силы и моменты, приложенные к одному краю, практически не влияют на напряженно – деформированное состояние другого края называются длинными. Все рассматриваемые в данной работе оболочки будем считать длинными.

При отсутствии связей между оболочками их края при нагружении давлением получают, в общем случае неравные между собой линейные и угловые перемещения. В реальных конструкциях края оболочек соединены между собой и, следовательно, линейные и угловые перемещения их будут одинаковыми.

Вследствие разных жесткостей сферического днища и цилиндра в стыке двух оболочек возникают краевые силы и моменты, равномерно распределенные по краям оболочек: меридиональная сила N , поперечная сила P_0 и изгибающий момент M_0 .

За счет действия краевых сил и моментов обеспечивается равенство линейных и угловых перемещений краев стыка оболочек.

Результаты решения краевой задачи необходимы для назначения оптимальных геометрических размеров и форм оболочек при проектировании резервуаров, сосудов, корпусов аппаратов.

Рис. 1. Расчетная схема сосуда, нагруженного газовым давлением

На рис.1 показана расчетная схема сосуда, состоящего из цилиндра со сферическим днищем, нагруженного газовым давлением.

Вследствие разных жесткостей сферического днища и цилиндра в стыке двух оболочек возникают краевые силы и моменты, равномерно распределенные по краям оболочек: меридиональная сила N , поперечная сила P_0 и изгибающий момент M_0 . [1, с.175].

Для определения поперечной силы P_0 и изгибающего момента M_0 составляются уравнения совместности деформаций, выражающие равенство радиальных перемещений и углов поворота краев сферической и цилиндрической оболочек от действия сил газового давления, краевых сил и краевых моментов [2, с.199]

$$\Delta_{\text{вн}}^c + \Delta_{P_0}^c + \Delta_{M_0}^c = \Delta_{\text{вн}}^u + \Delta_{P_0}^u + \Delta_{M_0}^u,$$

$$V_{\text{вн}}^c + V_{P_0}^c + V_{M_0}^c = V_{\text{вн}}^u + V_{P_0}^u + V_{M_0}^u,$$

где $\Delta_{\text{вн}}^c, \Delta_{P_0}^c, \Delta_{M_0}^c, \Delta_{\text{вн}}^u, \Delta_{P_0}^u, \Delta_{M_0}^u$ - радиальные перемещения краев сферической и цилиндрической оболочек, $V_{\text{вн}}^c, V_{P_0}^c, V_{M_0}^c, V_{\text{вн}}^u, V_{P_0}^u, V_{M_0}^u$ - углы поворота краев оболочек.

Радиальные и угловые перемещения для края цилиндрической оболочки запишем в виде

$$\Delta_{\text{вн}}^u = A_1 p, \Delta_{P_0}^u = A_2 P_0, \Delta_{M_0}^u = A_3 M_0,$$

$$V_{\text{вн}}^u = 0, V_{P_0}^u = A_4 P_0, V_{M_0}^u = A_5 M_0,$$

$$\text{где } A_1 = \frac{2-\mu}{2\delta_1 E} r^2, A_2 = \frac{2k_1}{\delta_1 E} r^2, A_3 = \frac{2k_1^2}{\delta_1 E} r^2, A_4 = \frac{2k_1^2}{\delta_1 E} r^2, A_5 = \frac{4k_1^3}{\delta_1 E} r^2,$$

$$k_1 = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{r\delta_1}} - \text{коэффициент затухания кривой напряжений для цилиндрической оболочки, } r, \delta_1 - \text{радиус и толщина цилиндрической оболочки.}$$

Радиальные и угловые перемещения для края сферической оболочки запишем в виде

$$\Delta_{\text{вн}}^c = B_1 p, \Delta_{P_0}^c = -B_2 P_0, \Delta_{M_0}^c = B_3 M_0,$$

$$V_{\text{вн}}^c = 0, V_{P_0}^c = B_4 P_0, V_{M_0}^c = B_5 M_0,$$

$$\text{где } B_1 = \frac{1-\mu}{2\delta_2 E} R^2, B_2 = \frac{2k_2}{\delta_2 E} R, B_3 = \frac{2k_2^2}{\delta_2 E}, B_4 = \frac{2k_2^2}{\delta_2 E}, B_5 = \frac{4k_2^3}{\delta_1 E} r^2, k_2 = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \sqrt{\frac{R}{\delta_2}} -$$

коэффициент затухания напряжений для сферической оболочки, R, δ_2 - радиус и толщина сферической оболочки.

Подставим линейные и угловые перемещения для цилиндрической и сферической оболочек в уравнение совместности деформаций стыка оболочек

$$A_1 p + A_2 P_0 + A_3 M_0 = B_1 p + B_2 P_0 + B_3 M_0,$$

$$A_4 P_0 + A_5 M_0 = B_4 P_0 + B_5 M_0.$$

Решая уравнения совместности деформаций, получим выражения для краевой силы и краевого момента

$$P_0 = - \frac{(B_1 - A_1)(A_5 - B_5)}{(A_3 - B_3)(A_4 - B_4) - (A_2 - B_2)(A_5 - B_5)} \cdot p,$$

$$M_0 = - \frac{(B_1 - A_1)(A_4 - B_4)}{(A_3 - B_3)(A_4 - B_4) - (A_2 - B_2)(A_5 - B_5)} \cdot p.$$

От действия краевых сил и моментов в сечениях оболочек возникают внутренние силовые факторы: меридиональная сила, поперечная сила, кольцевая сила, изгибающий меридиональный и кольцевой моменты, которые вызывают дополнительные краевые напряжения. Наибольшие краевые напряжения возникают в сечениях проходящих через края сопрягаемых оболочек.

Полные напряжения в краевом сечении определяются суммированием мембранных напряжений от действия внутреннего давления и дополнительных напряжений от краевого эффекта.

Эквивалентные напряжения, определенные по какой-либо теории прочности, могут превысить предел текучести материала. В этом случае возникает необходимость проведения расчетов при упруго-пластических деформациях. Возникновение в локальных зонах оболочек краевых напряжений изгиба, превышающих предел текучести материала, не приводит к исчерпанию несущей способности материала оболочек. В местах развитых пластических деформаций можно считать, что значение краевого момента достигает момента пластичности и возникает пластический шарнир, приводящий к упрощению расчетной схемы решения краевой задачи. Материал оболочек принимается идеально-упруго-пластическим и краевой изгибающий момент M_0 при дальнейшем увеличении нагрузки остается постоянным

$$M_0 = \text{const.}$$

Определим значения момента пластичности при изгибе [3, с.325]

$$M_T = \sigma_T W_T,$$

где $W_T = \frac{\delta_1^2}{4}$ – погонный осевой момент сопротивления, соответствующий деформации идеально-упруго-пластического материала. Направление момента пластичности совпадает с направлением угла поворота кромки оболочки. Принимая в расчетной схеме краевой задачи $M_0 = M_T$ получим значение краевой силы

$$P_0 = - \frac{A_5 - B_5}{A_4 - B_4} M_T.$$

При проектировании конструкций нефтехимического оборудования из пластичных и хрупких материалов с целью уменьшения краевых сил и моментов необходимо обеспечить плавные

переходы сопрягаемых элементов оборудования. Расчет краевых напряжений является обязательным для конструкций, изготовленных из хрупких материалов, так как пластический шарнир в них образоваться не может.

Список используемых источников:

1. Конторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов. М.: Машгиз, 1960. С. 941.
2. Домашнев А.Д. Конструирование и расчет химических аппаратов. М.: Машгиз, 1961. С. 624.
3. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: ГИТТЛ, 1953. С. 856.

© 2016, Исуткина В.Н., Дедов Н.И.

Проектирование сосудов давления при упругих и локальных пластических деформациях

© 2016, Isutkina V.N., Dedov N.I.

Design of pressure vessels in elastic and plastic deformations of local