

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧЕК*

В.Н. Скопинский, Н.А. Берков, А.Б. Сметанкин

Рассмотрены вопросы упругопластического анализа конструктивных соединений в виде пересекающихся эллипсоидальной и цилиндрической оболочек. Определено предельное пластическое давление на основе критерия максимума скорости возрастания относительной пластической работы. Проведен упругопластический расчетный анализ с применением метода конечных элементов в двумерной постановке и теории пластичности. Приведены результаты параметрического анализа, показывающие влияние основных геометрических параметров соединения на предельное давление в нем.

Ключевые слова: пересекающиеся оболочки, сосуд давления, эллиптическое днище с патрубком, упругопластический анализ, критерий определения предельной пластической нагрузки.

Введение

Конструктивные соединения в виде пересекающихся эллипсоидальной и цилиндрической оболочек используются в качестве расчетных моделей для исследования напряженного состояния днищ сосудов и аппаратов давления с патрубками или штуцерами, которые широко применяются в различных областях техники (химическое и нефтегазовое машиностроение, энергетическое машиностроение, атомная техника и т.д.). В технической литературе публикации по этой тематике встречаются достаточно редко. Чаще всего в них рассматривается только упругое деформирование подобных конструктивных узлов [1].

Для прочностного анализа штуцерных узлов на корпусе или днище аппаратов и сосудов давления, а также выбора допускаемой нагрузки применяют два подхода: на основе расчета упругих напряжений и разделения их по категориям и на основе упругопластического расчета и использования характеристической кривой для определения предельной нагрузки по приня-

му критерию. Если в зарубежных нормах прочности отражены оба подхода [2–4], то в российских нормах – только первый [5, 6]. Однако для рассматриваемых конструкций определение предельного пластического давления с использованием упругопластического анализа является более адекватным подходом при назначении соответствующей допускаемой нагрузки.

Цель данной работы – использование методики упругопластического конечно-элементного анализа пересекающихся оболочек для соединений эллипсоидальной и цилиндрической оболочек и представление результатов определения предельного пластического давления на основе критерия, приведенного в работе [7].

Упругопластический расчетный анализ соединений

Расположение патрубка на эллипсоидальном днище в общем случае показано на рис. 1. Представленная геометрия соединения соот-

* Статья подготовлена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы», проект № 16.740.11.0134.

ветствует пересечению срединных поверхностей эллипсоидальной и цилиндрической оболочек. Через точку пересечения оси патрубка и поверхности эллипсоидального днища (точку O) проведена нормаль $\mathbf{n}_0$, которая соответствует радиальному положению оси патрубка. Угол α характеризует отклонение оси патрубка от радиального положения в главной плоскости соединения (плоскости, проходящей через оси обеих оболочек), расстояние x_0 – относительное смещение оси патрубка (точки O) от оси вращения эллипсоида.

В зависимости от конкретных параметров α и x_0 для пересекающихся эллипсоидальной и цилиндрической оболочек могут быть рассмотрены следующие типовые соединения [1]: с центральным ($x_0 = 0$) или смещенным ($x_0 \neq 0$) патрубком; с радиальным ($\alpha = 0$) или нерадиальным ($\alpha > 0$) патрубком.

На напряженное состояние оболочек рассматриваемых соединений главное влияние оказывает комплекс основных геометрических параметров [1]:

$$\frac{d}{D}, \frac{D}{H}, \frac{h}{H}, \bar{b} = \frac{b}{a}, \alpha, \bar{x}_0 = \frac{x_0}{a}, \quad (1)$$

где d, h – диаметр срединной поверхности и толщина стенки патрубка; D, H – диаметр срединной поверхности и толщина стенки днища; a, b – большая и малая полуоси эллипсоида.

Параметр d/D характеризует степень ослабления днища вырезом, параметр h/H – относительную жесткость оболочек. Эти параметры свойственны соединению в целом.

Традиционное для теории оболочек отношение D/H является параметром тонкостенности эллипсоидальной оболочки (аналогично d/h – параметр тонкостенности патрубка). Отношение b/a является параметром эллипсоидальности

днища. Эти параметры свойственны отдельным оболочкам. Параметр $\bar{x}_0$ характеризует относительное смещение патрубка от центрального положения.

На практике преимущественно используют так называемые «стандартные» эллиптические днища 2:1 ($\bar{b} = 0,5$). Для днищ с нецентральным патрубком наибольшее распространение получили соединения с вертикальным патрубком (ось патрубка параллельна оси вращения эллипсоида).

Расчетный анализ соединений проводили с использованием метода конечных элементов в двухмерной постановке с использованием четырехугольных оболочечных элементов двойной кривизны. В данной работе для упругопластического анализа соединений пересекающихся оболочек применяли теорию пластического течения с изотропным упрочнением и критерием Хубера – Мизеса. Основными положениями методики упругопластического конечно-элементного анализа пересекающихся оболочек являются [8]: применение систем криволинейных координат для каждой из рассматриваемых оболочек; применение модифицированной смешанной вариационной формулировки; применение теории пластичности с деформационным упрочнением; рациональный вычислительный алгоритм; применение метода начальных напряжений для нелинейного решения.

Итерационная процедура метода начальных напряжений при решении задачи в физически нелинейной постановке позволяет проводить расчеты для любой диаграммы деформирования, в том числе для диаграммы деформирования идеально-пластического материала, или для диаграммы напряжений с площадкой текучести. При численном анализе по МКЭ пересекающихся оболочек с учетом нелинейного распределения напряжений в области упругопластического деформирования оболочек элементы разбиваются по толщине на 10 слоев, для которых учитывается изменение характеристик материала. Таким образом, для определения характеристик конечного элемента проводится численное интегрирование по его объему.

Реализация предложенной методики осуществляется с использованием разработанной специализированной вычислительной программы SAIS. Некоторые результаты верификации программы приведены в работах [8, 9].

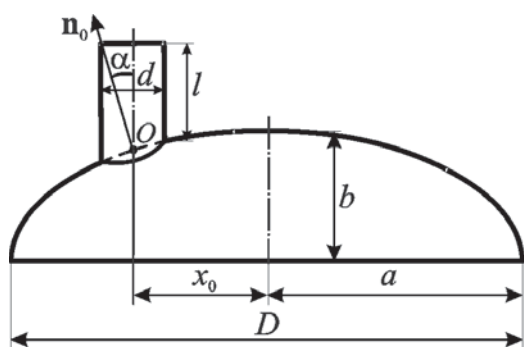


Рис. 1. Эллипсоидальное днище с патрубком

Определение предельного пластического давления

В аппаратах и сосудах давления основной нагрузкой для конструктивных объектов в виде пересекающихся эллипсоидальной и цилиндрической оболочек является внутреннее избыточное давление. Для прочностной оценки таких объектов на основе нелинейного анализа определяется предельное пластическое давление, по которому назначается допускаемая нагрузка.

Для определения предельной пластической нагрузки используют различные способы и критерии, подробное описание которых приведено в работе [9]. В зарубежных нормах прочности [2–4] для этого применяют два способа: способ двойного упругого наклона и способ пересечения касательных, которые являются эмпирическими процедурами. Более обоснованным является применение критериального подхода, основанного на использовании пластической работы конструкции как глобального деформационного параметра и критерия определения предельной нагрузки. В работе [7] предложен новый критерий для определения предельной пластической нагрузки (критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы), результаты апробации которого представлены в работах [7, 10] для соединений пересекающихся цилиндрических оболочек.

Для анализа процесса упругопластического деформирования соединения пересекающихся оболочек используются два параметра:

- относительная пластическая работа

$$C_p = W_p / W ; \quad (2)$$

- скорость возрастания относительной пластической работы при увеличении нагрузки (в данном случае – давления p)

$$C'_p = dC_p / dp , \quad (3)$$

где W_p и W – полная пластическая работа и полная работа деформаций в конструкции.

При расчете по МКЭ величины W_p и W вычисляют для конечно-элементной модели соединения пересекающихся оболочек путем численного интегрирования расчетных соотношений для отдельных конечных элементов и суммирования по всем элементам.

Параметр C_p ($0 \leq C_p < 1$) является интегральным показателем пластического деформирования конструкции, причем функция $C_p(p)$ всегда

монотонно возрастает. Параметром C'_p характеризуется скорость возрастания относительной пластической работы. Как показывают расчеты, функция $C_p(p)$ изменяется не монотонно и имеет локальный максимум при некоторой нагрузке (давлении). Это условие максимума и используется для определения предельной пластической нагрузки:

$$C'_p = \max \Rightarrow p_{пр} , \quad (4)$$

где $p_{пр}$ – предельное пластическое давление.

Практически определение предельной пластической нагрузки осуществляется следующим образом. Задается «программа нагружения» в виде массива значений нагрузки p_j ($j=1, n$), для которой по результатам упругопластического расчета соединения вычисляют параметры $C_{p,j}$. Затем по полученным табличным значениям ($C_{p,j}$, p_j) строят кубическую сплайн-аппроксимацию функции $C_p(p)$ и находят ее производную $C'_p(p)$. Предельное пластическое давление $p_{пр}$, при котором производная достигает максимума, определяется графически или с помощью итерационной процедуры.

Рассмотрим эту процедуру для нагруженного внутренним избыточным давлением p эллиптического днища с центральным радиальным патрубком ($x_0 = 0$, $\alpha = 0$) при $D = 600$ мм, $d = 60$ мм, $H = h = 6$ мм, $b = 150$ мм, $l = 180$ мм, где l – длина патрубка (см. рис. 1).

Принимаем, что днище и патрубок изготовлены из малоуглеродистой стали 20пс, для которой механические свойства и диаграмма условных напряжений, имеющая площадку текучести, получены при испытании стандартных образцов в лаборатории сопротивления материалов ФБГОУ ВПО «МГИУ»: модуль Юнга $E = 210$ ГПа, предел текучести $\sigma_T = 309$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 465$ МПа. В расчете используется диаграмма истинных напряжений $\sigma_n - \epsilon_n$, которая аппроксимируется в виде кусочно-линейной функции, используя 12 точек реальной диаграммы (до точки пластической неустойчивости). Напряжения σ_n и деформации ϵ_n в этих точках приведены в таблице.

Полученные в результате упругопластического расчета графические зависимости $C_p(p)$ и $C'_p(p)$ приведены на рис. 2. Используя условие максимума (4), получим предельное пластическое давление $p_{пр} = 5,78$ МПа.

Диаграмма истинных напряжений стали 20пс

Параметр	Номер расчетной точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
σ_n , МПа	0	309	313	318	324	397	437	467	506	531	544	553
ε_n , %	0	0,148	1,76	1,86	2,06	3,94	5,75	7,51	10,82	13,92	15,45	16,76

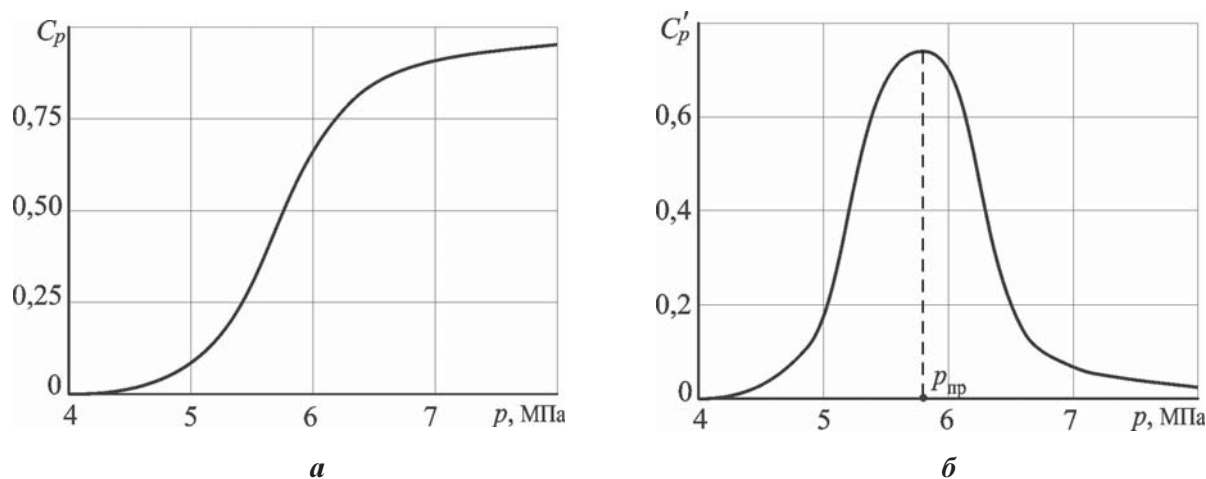


Рис. 2. Функции $C_p(p)$ (а) и $C'_p(p)$ (б) при определении предельного пластического давления $p_{пр}$ для эллипсоидального днища с центральным радиальным патрубком

Параметрический анализ

При упругопластическом анализе на напряжения в пересекающихся эллипсоидальной и цилиндрической оболочках и характер деформирования оболочек кроме параметров (1) оказывают влияние свойства материала, в том числе его интегральная характеристика – диаграмма напряжений.

Необходимо отметить, что расчетный конечно-элементный анализ рассматриваемых соединений является непростой задачей. Эллипсоидальная оболочка является оболочкой двойной кривизны, главные радиусы кривизны которой изменяются в меридиональном сечении. При нагружении внутренним давлением это приводит к изменению напряжений в эллипсоидальной оболочке даже для безмоментного напряженного состояния. Так, окружные напряжения в меридиональном направлении от полюса к краю оболочки изменяются от растягивающих до сжимающих. При возмущенном напряженном состоянии вследствие выреза и присоединенного патрубка (цилиндрической оболочки) напряжения изменяются весьма интенсивно, при этом сказывается и смещение патрубка от центрального положения. Для не-

радиальных соединений наблюдается неравномерность распределения напряжений на наружной и внутренней поверхностях оболочек по линии пересечения.

Рассмотрим некоторые результаты параметрического анализа для предельного пластического давления $p_{пр}$ в соединениях пересекающихся эллипсоидальной и цилиндрической оболочек со следующими геометрическими параметрами:

$$\bar{b} = 0,5; \quad D/H = 100; \quad l/d = 3. \quad (5)$$

Будем считать, что оболочки изготовлены из стали 20пс, характеристики которой приведены выше. Предельное пластическое давление $p_{пр}$ определим с помощью критерия максимума скорости возрастания относительной пластической работы и представим в безразмерной форме:

$$\bar{p}_{пр} = \frac{p_{пр}}{p_T}; \quad p_T = \frac{2\sigma_T H}{D}, \quad (6)$$

где p_T – давление, при котором интенсивность напряжений в эллипсоидальной оболочке без отверстия становится равной пределу текучести.

Давление p_T определяли из условия $\sigma_i = \sigma_T$ для гладкой эллипсоидальной оболочки при безмоментном напряженном состоянии. Наи-

большие напряжения имеют место в полюсе оболочки, где интенсивность напряжений (с учетом $\bar{b} = 0,5$) $\sigma_i = pD/2H$.

Влияние параметра d/D на относительное предельное давление показано на рис. 3 для эллиптического днища с центральным радиальным патрубком ($x_0 = 0, \alpha = 0$). В расчете варьировали этот параметр в пределах $0,1 \leq d/D \leq 0,3$, что соответствует применяющимся в промышленности конструкциям сосудов давления с патрубками. Рассматривались соединения с различным отношением толщин оболочек ($h/H = 1, h/H = 0,6$).

Из рис. 3 видно, что предельное давление при увеличении выреза основной оболочки имеет закономерную тенденцию к снижению.

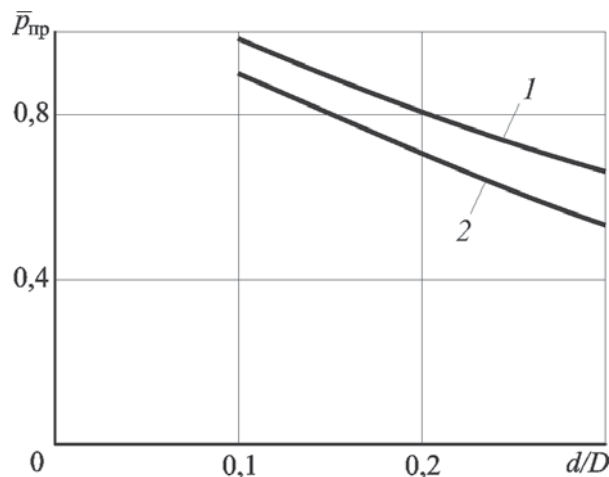


Рис. 3. Влияние параметра d/D ($x_0 = 0, \alpha = 0$) на относительное предельное давление:
1 – при $h/H = 1$; 2 – при $h/H = 0,6$

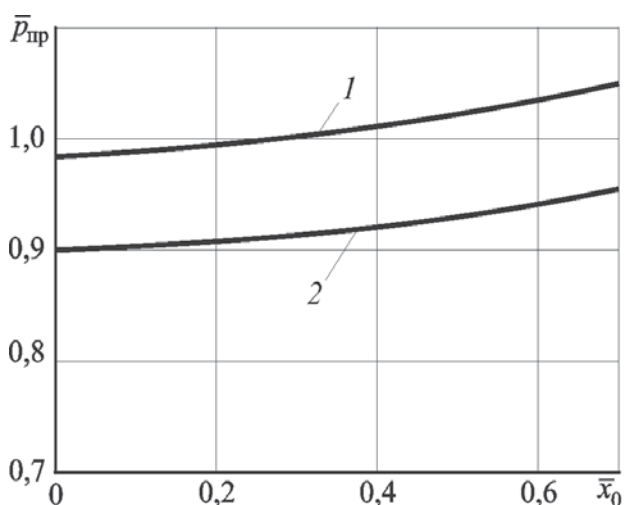


Рис. 4. Влияние параметра $\bar{x}_0$ на относительное предельное давление $\bar{p}_{пр}$:
1 – при $h/H = 1$; 2 – при $h/H = 0,6$

По сравнению с соединениями оболочек равной толщины в соединениях оболочек при $h < H$ интенсификация изгибных эффектов и наибольшие напряжения наблюдаются в оболочке меньшей толщины. Вследствие этого снижается и предельное пластическое давление.

Расчетный анализ для эллиптического днища с центральным нерадиальным патрубком ($x_0 = 0, \alpha > 0$) показал, что влияние углового параметра α на предельное давление незначительно.

Для эллиптического днища со смещенным патрубком вертикальное положение оси патрубка определяется углом:

$$\alpha_b = \arctg \left(\frac{\bar{x}_0 \cdot \bar{b}}{\sqrt{1 - \bar{x}_0^2}} \right).$$

Влияние параметра $\bar{x}_0$ на предельное давление для соединений с геометрическими параметрами (5) и $d/D = 0,1$ со смещенным вертикальным патрубком показано на рис. 4.

В целом наблюдается относительно небольшое увеличение предельного давления при смещении патрубка от центрального положения. Это можно объяснить увеличением неравномерности распределения напряжений в области пересечения оболочек, изменением характера действующих напряжений (преобладающими становятся изгибные напряжения, которые в меньшей степени влияют на развитие пластических деформаций, чем мембранные напряжения). Кроме того, при смещении патрубка область пересечения оболочек характеризуется меньшими значениями главных радиусов кривизны эллипсоидальной оболочки, т.е. в этой области эллипсоидальная оболочка становится более жесткой.

Таким образом, проведенный параметрический анализ показал, что из геометрических параметров наибольшее влияние на предельное пластическое давление оказывают параметры d/D и h/H .

Заключение

Применение упругопластического анализа с целью определения предельных нагрузок для конструктивных соединений пересекающихся оболочек является современным подходом, обеспечивающим получение обоснованных результатов. Показано практическое применение разработанного метода определения предельной пластической нагрузки на основе критерия максимума скорости возрастания относительной

пластической работы, являющегося объективным интегральным показателем процесса упругопластического деформирования конструкции. Результаты проведенного параметрического анализа могут быть использованы при проектировании и прочностных расчетах днищ сосудов давления с патрубками или штуцерами.

Список литературы

1. Скопинский В.Н. Напряжения в пересекающихся оболочках. – М.: Физматлит, 2008. – 400 с.
2. ASME. Boiler and Pressure Vessel Code. Sections II and VIII. – New York, 2004.
3. BSI. PD 5500:2006 Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels. – London: British standards Institution, 2006.
4. EN 13445. Unfired Pressure Vessels. Part 3. Design: European Committee for Standardisation (CEN), 2002.
5. ГОСТ Р 52857.1–2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. – М.: Стандартинформ, 2008. – 26 с.
6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатом-энергонадзор. – М.: Энергоиздат, 1989. – 525 с.
7. Скопинский В.Н., Берков Н.А., Возова Н.В. Новый критерий определения предельной нагрузки в сосудах давления с патрубками // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 3. С. 50–57.
8. Берков Н.А., Скопинский В.Н. Упругопластическое деформирование пересекающихся цилиндрических оболочек // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 4. С. 44–51.
9. Скопинский В.Н., Берков Н.А., Емельянова А.Д. Упругопластический расчет сосуда с патрубком при нагружении изгибающим моментом // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 4. С. 52–60.
10. Скопинский В.Н., Берков Н.А., Емельянова А.Д. Способ определения предельной пластической нагрузки в пересекающихся цилиндрических оболочках // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 1. С. 11–14.

Материал поступил в редакцию 15.03.2012

СКОПИНСКИЙ Вадим Николаевич

E-mail: skopin-j@mail.msiu.ru
Тел.: +7 (495) 620-39-89

Профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой сопротивления материалов ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – механика тонкостенных оболочек, численные методы анализа. Автор монографии и более 120 научных трудов.

БЕРКОВ Николай Андреевич

E-mail: berkov@mail.ru
Тел.: +7 (495) 620-39-28

Кандидат технических наук, доцент кафедры общей и прикладной математики ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов — теория упругости и теория оболочек, численные методы анализа. Автор 26 научных трудов.

СМЕТАНКИН Андрей Борисович

E-mail: smetankin@live.ru
Тел.: +7 (495) 620-39-89

Кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – прочностной анализ сосудов и аппаратов, численные методы анализа. Автор 16 научных трудов.