

Б.Я. КАНТОР, д-р техн. наук, профессор, ИПМаш НАН Украины, Харьков;
А.Н. ШУПИКОВ, д-р техн. наук, профессор, ИПМаш НАН Украины,
Харьков;

Р.Л. ОНАЦКИЙ, науч. сотр., ХФ ПАО «Укрнефтехимпроект», Харьков

РАЗРУШЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ЗОНЕ ВМЯТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

У статті розглянуто руйнування циліндричної оболонки в зоні вм'ятини, яка навантажена внутрішнім тиском. Виконано співставлення напружень та деформацій під дією руйнівного тиску для оболонки з вм'ятиною і без. Розв'язання проведено на основі методу скінченних елементів, з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності.

Ключові слова: циліндрична оболонка, внутрішній тиск, фізична та геометрична нелінійність.

В статье рассмотрено разрушение цилиндрической оболочки в зоне вмятины нагруженной внутренним давлением. Выполнено сопоставление напряжений и деформаций под действием разрушающего давления для оболочки с вмятиной и без. Решение проведено на основе метода конечных элементов, с учетом физической и геометрической нелинейности.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, внутреннее давление, физическая и геометрическая нелинейность.

There was examined the process of destruction of the cylindrical shell in the area of dent loaded by internal pressure in the article. It was made a comparison of the stresses and strains of shells either with or without a dent under the stress of destructive pressure. The solution was made on basis of the finite-element analysis, with an allowance for physical and geometric nonlinearity.

Keywords: cylindrical shell, internal pressure, physical and geometric nonlinearity.

Введение. Как известно, на химических и нефтеперерабатывающих производствах наиболее часто встречающимися элементами технологического оборудования являются сосуды и аппараты цилиндрической формы. Основной нагрузкой на эти элементы производственных схем является внутреннее давление среды. Множество аппаратов содержат различного рода дефекты, одним из которых есть вмятина.

Влияние вмятин на несущую способность сосудов было рассмотрено в статье [1]. В статье было показано, что работоспособность сосуда нарушается вследствие пластического коллапса [10]. То есть, при повышении давления на 10 % выше давления текучести в аппарате возникают необратимые изменения формы, в результате чего, как было показано в [1], нарушается работоспособность аппарата вследствие разгерметизации присоединенной аппаратуры. При сопоставлении работоспособности двух аналогичных аппаратов, один из которых содержал вмятину, а другой нет, было показано, что вмяти-

на несущую способность сосуда не влияет.

В работе [2] было показано, что при статическом нагружении сосуда, содержащего вмятину, внутренним рабочим давлением, его прочность не снижается по сравнению с сосудами, не имеющими указанных дефектов формы.

Целью данной статьи является определение влияния вмятин на разрушение сосуда, нагруженного внутренним давлением. Для этого рассмотрим, что произойдет в цилиндрической оболочке с вмятиной, нагруженной разрушающим давлением.

Постановка задачи. Под разрушающим давлением будем понимать давление, под действием которого в сосуде без вмятины возникают напряжения или деформации равные предельным значениям. То есть условия разрушения можно записать в следующем виде:

$$\sigma_i = \sigma_B, \quad \varepsilon_i = \varepsilon_B.$$

Здесь σ_i, ε_i – интенсивность напряжений и деформаций, σ_B, ε_B – предельные напряжения и деформации.

Для определения интенсивности напряжений воспользуемся критерием Мизеса [7] записанным через главные напряжения.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)},$$

где σ_i – интенсивность напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Поскольку $\sigma_3 \ll \sigma_2$, а $\sigma_2 = \sigma_1/2$ [8], получаем следующую зависимость:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_\varphi = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{PR}{h}, \quad (1)$$

где σ_φ – окружные напряжения, p – внутреннее давление, R и h – радиус и толщина оболочки соответственно.

Рассматривая материал с линейным упрочнением, зависимость между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций записывается следующим образом [7, 10]:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_T}{E} + \frac{(\sigma_i - \sigma_T)}{E_T}, \quad (2)$$

здесь, σ_T – предел текучести материала, E – модуль упругости, E_T – модуль упрочнения.

Согласно (1) можно получить давление текучести $P_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_T h}{R}$, при котором оболочка находится на пределе упругости. При дальнейшем повышении давления в сосуде возникают пластические деформации, интенсивность которых можно определить из формулы (2).

Метод решения. Определение разрушающего давления для сосуда с вмятиной выполним сопоставив значения полученных деформаций и напря-

жений в зоне вмятины при нагружении разрушающим давлением для цилиндрической оболочки. Для этого выполним расчет методом конечных элементов сосуда, нагруженного внутренним давлением без вмятины и с вмятиной.

В качестве примера выбран типовой сосуд, расчетная схема которого показана на рис. 1. Сосуд представляет собой цилиндрическую оболочку, замкнутую двумя полусферическими днищами. Диаметр сосуда $D = 3000$ мм, длина обечайки $l = 7000$ мм, толщина $h = 15$ мм, глубина вмятины $a = 15.9$ мм. Материал сосуда сталь Ст3, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, модуль упрочнения $E_T = 2 \cdot 10^3$ МПа (использовалась схематизация диаграммы растяжения диаграммой с линейным упрочнением), предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 460$ МПа, предельная деформация $\varepsilon_B = 0.25$ [9].

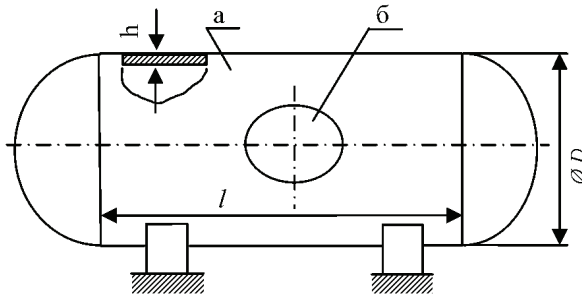


Рисунок 1 – Расчетная схема: а – сосуд под давлением; б – вмятина глубиной 15,9 мм

Сосуд без вмятины. Для определения разрушающего давления для сосуда без вмятины выполнен расчет методом конечных элементов. Задача решена в физически и геометрически нелинейной постановке (теория малых упруго-пластических деформаций с линейным кинематическим упрочнением).

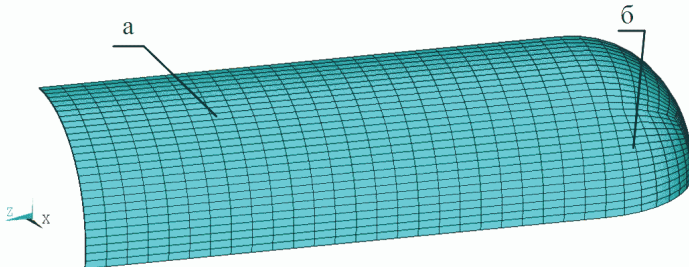


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель 1/8 части сосуда: а – обечайка; б – днище

Конечно-элементная модель сосуда приведена на рис. 2. При решении учтена симметрия: рассмотрена 1/8 часть сосуда, при этом на его краях заданы условия симметрии. Для решения задачи использовались объемные

20 - узловые конечные элементы (КЭ) с тремя степенями свободы (U_x, U_y, U_z) в каждом узле [3]. Выбор КЭ связан с тем, что нас интересует локальное напряженное состояние в зоне вмятины.

Нагружение оболочки проводилось, плавно наращивая давление до величины, при которой интенсивность деформаций в оболочке равна величине разрушающей деформации $\epsilon_B = 0.25$.

В ходе решения было получено значение разрушающего давления для гладкой оболочки равным $P_p = 3.49$ МПа. На рис. 3 показаны распределение интенсивности (по Мизесу) напряжений и деформаций.

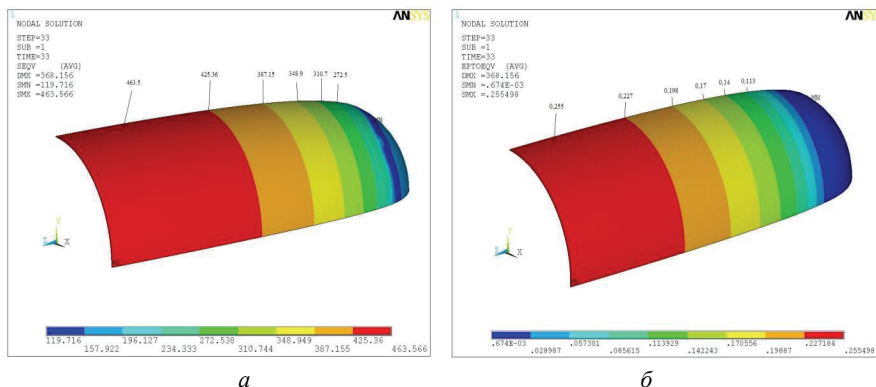


Рисунок 3 – Результирующие значения напряжений, МПа (а) и деформаций (б) в сосуде под действием разрушающего давления

Значения максимумов интенсивности напряжений и деформаций для некоторых шагов нагружения приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Максимумы интенсивности напряжений и деформаций для сосуда без вмятины

Давление, МПа	σ_i^{\max} , МПа	ϵ_i^{\max}
$P_T = 2,88$	250	0,0013
$1,05 P_T = 3,02$	276,3	0,0326
$1,1 P_T = 3,16$	310,7	0,0735
$1,15 P_T = 3,31$	356,8	0,1284
$1,2 P_T = 3,45$	434,9	0,2214
$1,21 P_T = 3,49$	463,3	0,255

Сосуд с вмятиной. Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) сосуда с вмятиной под действием разрушающего давления $P_p = 3.49$ МПа выполнен расчет методом конечных элементов. Размеры сосуда и материал такие же, как и для сосуда без вмятины. Поскольку нам наиболее интересна картина НДС в локальной зоне вмятины, целесообразно оста-

вить в рассмотрении 1/8 часть сосуда и полагать, что вмятина образуется симметрично с двух сторон оболочки.

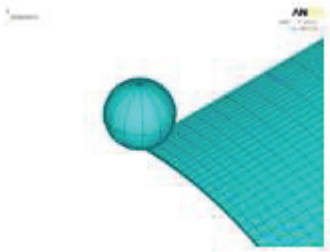


Рисунок 4 – Модель штампа

Вмятина на стенке корпуса формировалась квазистатическим вдавливанием сферического штампа с последующим извлечением его. Геометрическая модель индентора приведена на рис. 4.

После вдавливания штампа на глубину 55,2 мм и последующего извлечения на оболочке образуется вмятина глубиной 20,6 мм. Более подробно процесс образования вмятины под действием различной формы штампов показан в статье [4].

При образовании вмятины в оболочке возникают остаточные напряжения и деформации, оценка влияния которых на разрушение оболочки и является основной задачей этой статьи.

После извлечения штампа в зоне вмятины наблюдается неоднородность напряженно-деформированного состояния, вызванная наличием остаточных деформаций. Интенсивность напряжений и деформаций приведена на рис. 5 и рис. 6.

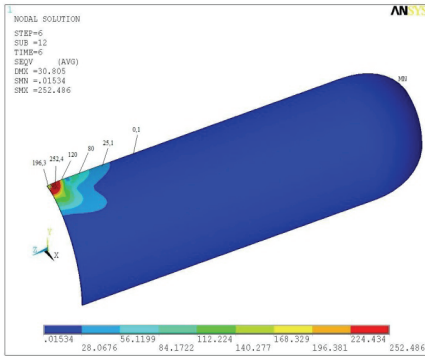


Рисунок 5 – Напряжения после снятия штампа, σ_i МПа

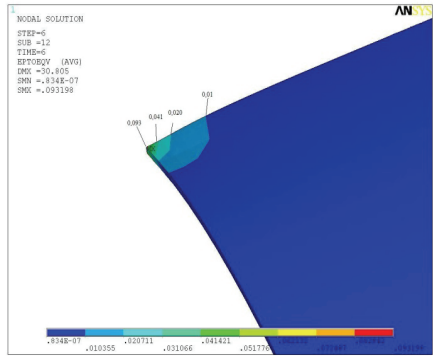


Рисунок 6 – Деформации после снятия штампа, ϵ_i

После формирования вмятины выполнено нагружение оболочки внутренним разрушающим давлением. Нагружение оболочки проводилось, плавно наращивая давление до величины $P_p = 3.49$ МПа. Распределение интенсивности напряжений и деформаций под нагрузкой, приведено на рис. 7-8.

Значения максимумов интенсивности напряжений и деформаций для сосуда с вмятиной для аналогичных (приведенным выше) шагов нагружения показаны в табл. 2.

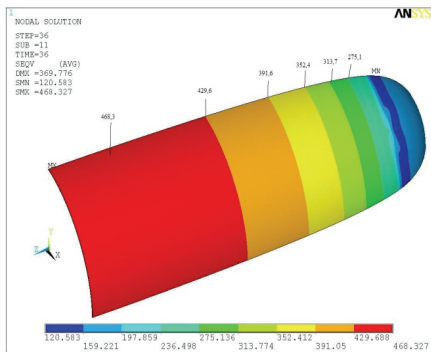


Рисунок 7 – Напряжения при разрушающем давлении σ_i , МПа

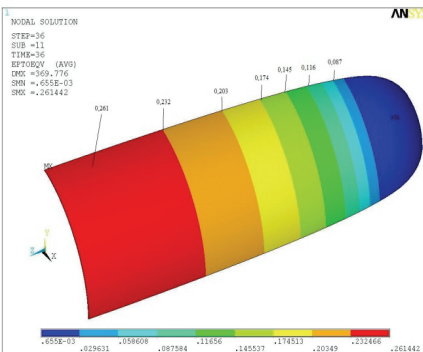


Рисунок 8 – Деформации при разрушающем давлении, ε_i

Таблица 2 – Максимумы интенсивности напряжений и деформаций для сосуда без вмятины

Давление, МПа	σ_i^{\max} , МПа	ε_i^{\max} , %
После снятия штампа	252,4	0.0931
$P_T = 2,88$	258,5	0.0931
$1,05 P_T = 3,02$	285,7	0.0704
$1,1 P_T = 3,16$	319,6	0.0925
$1,15 P_T = 3,31$	363,7	0.139
$1,2 P_T = 3,45$	439,7	0.2276
$1,21 P_T = 3,49$	468,3	0.2614

Из табл. 2 видно, что после образования вмятины были получены значительные остаточные напряжения (252,4 МПа) и деформации (0.0931). Хотя эти напряжения и деформации велики, но, как было показано в статьях [1, 2, 6], они носят локальный характер и условия прочности в этом случае выполняются.

При дальнейшем повышении давления до величины 2,97 МПа вмятина активно выпрямляется, при этом остаточные напряжения снижаются до минимального уровня $\varepsilon_i^{\max} = 0.0693$ %. Этот интересный факт подробно описан в статье [5], в которой показано как меняются напряжения в зоне вмятины при проведении гидрообработки сосуда с целью снятия сварных остаточных напряжений.

При повышении давления свыше 5 % от давления текучести в зоне вмятины замечен рост интенсивности напряжений и деформаций вплоть до разрушающих величин ($\sigma_i^{\max} = 468,3$ МПа; $\varepsilon_i^{\max} = 0.2614$).

Выводы. При сопоставлении значений напряжений и деформаций для сосуда с вмятиной и без вмятины, нагруженных разрушающим давлением

можно, сделать такие выводы:

- хотя в сосуде с вмятиной максимумы напряжений и деформаций выше, чем в сосуде без дефекта, однако разница, особенно по напряжениям, очень мала и составляет меньше одного процента ($\Delta\sigma \approx 5$ МПа, $\Delta\varepsilon \approx 0,64$ %).
- в случае статического нагружения сосуда с вмятиной внутренним давлением вплоть до значений $1,05 P_m = 3,02$ МПа, деформации снижаются.

Исходя из изложенного выше можно сделать основной вывод о том, что разрушающее давление цилиндрических оболочек с вмятиной и без нее отличаются незначительно.

Список литературы: 1. Кантор Б. Я. Влияние вмятин на несущую способность сосудов / Б. Я. Кантор, В. М. Долинский, Р. Л. Онацкий // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2010. – № 14. – С. 99. 2. Кантор Б.Я. Статическая прочность нагруженных внутренним давлением тонкостенных сосудов, содержащих вмятины / Б.Я. Кантор, В.М. Долинский, Р.Л. Онацкий // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 38-43. 3. Басов К.А. Ansys: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс. 2005. – 640 с. 4. Р.Л. Онацкий. Образование круглой вмятины на цилиндрической оболочке вдавливанием штампа // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – № 63. – С. 106-113 с. 5. Р.Л. Онацкий. Остаточные напряжения в сосудах с вмятинами и снятие их в процесс гидрообработки // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – № 52. – С. 135-141 с. 6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с. 7. Малинин. Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с. 8. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки. – М.: 1966. – 636 с. 9. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов : 2-е изд. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с. 10. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: 1969. – 420 с.

Поступила в редколлегию 08.10.2012