

УДК 539.4; 621.643
DOI: 10.15372/PMTF202215070

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ОТНОШЕНИЯ ДЛИНЫ СОСУДА К ЕГО ДИАМЕТРУ

Ч. Лу, Я. Цуй, Х. Сюй, Ш. Линь, Х. Лян

Чжэцзянский технологический университет, Ханчжоу, Китай
E-mails: lzm@zjut.edu.cn, 673346567@qq.com, xu3409@qq.com,
2961238404@qq.com, huan1015@foxmail.com

Выполнены численное моделирование и экспериментальное исследование процесса разрушения тонкостенных сосудов высокого давления, изготовленных из углеродистой стали. Исследовано разрушение сосудов при различных значениях отношения длины сосуда к его диаметру. Проведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: формула Барлоу, разрушающее давление, сосуды высокого давления, численное моделирование, теория упругопластического деформирования

Введение. Сосуды высокого давления широко используются в нефтяной, химической, атомной и других отраслях промышленности. Для обеспечения безопасной работы сосуда необходимо прогнозирование давления, при котором происходит разрушение (разрушающего давления). Результаты исследования процесса разрушения сосудов высокого давления могут быть использованы при их проектировании.

Когда давление в сосуде достигает определенного значения, материал его внутренней стенки переходит в пластическое состояние. При дальнейшем увеличении давления зона пластичности распространяется в направлении внешней поверхности. В тот момент, когда материал всей стенки сосуда переходит в пластическое состояние, толщина стенки быстро уменьшается и сосуд разрушается. Получить аналитическое решение упругопластической задачи практически невозможно [1].

В настоящее время существует три основных способа определения разрушающего давления: теоретический расчет, экспериментальное исследование и численное моделирование [2, 3]. Для тонкостенных сосудов разрушающее давление обычно вычисляется по формуле Барлоу, полученной с помощью мембранной теории [4]. В работе [5] с использованием теории пластической неустойчивости получена формула для разрушающего давления для толстостенных сосудов и сферических оболочек. При выводе указанных выше формул принят ряд упрощающих допущений.

Для тонкостенных сосудов высокого давления с относительно небольшим отношением толщины стенки к диаметру сосуда ($T/D \leq 1/20$) разрушающее давление, как правило,

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда естественных наук провинции Чжэцзян (грант № LY20E050025).

© Лу Ч., Цуй Я., Сюй Х., Линь Ш., Лян Х., 2023

рассчитывается по формуле Барлоу

$$p_{bv} = 2R_m T / D, \quad (1)$$

полученной с использованием критерия, согласно которому максимальное напряжение в мембране не должно превышать предела прочности материала при растяжении. В формуле (1) D — диаметр срединной поверхности цилиндра; T — толщина цилиндра; R_m — предел прочности материала при растяжении; p_{bv} — разрушающее давление.

Формула Барлоу имеет два недостатка. При выводе этой формулы, во-первых, не учитывается изменение окружного напряжения по толщине сосуда, а также влияние осевого и радиального напряжений, во-вторых, не учитывается влияние обоих днщ.

Экспериментальный метод является прямым методом определения разрушающего давления сосуда. В экспериментах, описанных в работе [6], проведены испытания на разрушение 150 толстостенных сосудов, изготовленных из углеродистой и нержавеющей стали, и предложена эмпирическая формула для разрушающего давления толстостенных сосудов, погрешность расчетов по которой составляет приблизительно 15 % [7]. В [8, 9] приведены результаты экспериментов по разрушению труб различного размера, изготовленных из различных материалов, и предложена упругопластическая модель для определения разрушающего давления, в которую введен коэффициент устойчивости цилиндра [10]. Большое значение имеет определение разрушающего давления сосудов экспериментальным методом, однако результаты таких экспериментов имеют случайный характер вследствие наличия дефектов, возникающих при изготовлении сосудов.

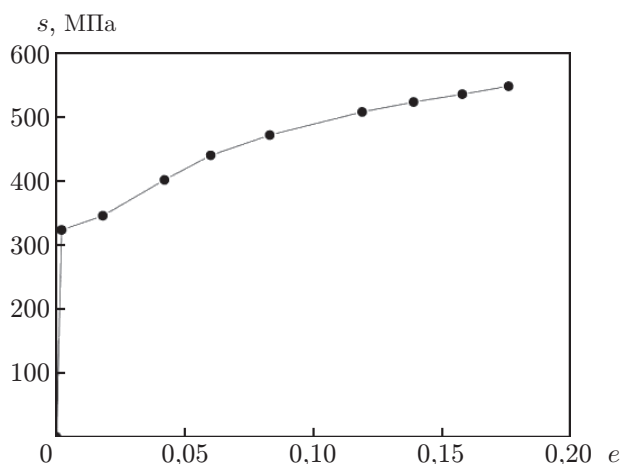
Развитие компьютерных технологий позволило использовать при определении разрушающего давления метод численного моделирования. В работе [11] с помощью метода конечных элементов определено разрушающее давление для двух титановых сосудов высокого давления. В [1] проведено сравнение разрушающего давления, определенного с использованием метода конечных элементов, с давлением, вычисленным по ранее полученным формулам. В работе [12] расчет разрушающего давления выполнен с помощью методов нелинейной механики пластического деформирования и с учетом деформационного упрочнения материала. В [13] отмечается, что при определении разрушающего давления необходимо учитывать деформационное упрочнение.

В данной работе методом численного моделирования с использованием теории упругопластического деформирования и зависимости между истинным напряжением и деформацией определяется разрушающее давление тонкостенных сосудов высокого давления, изготовленных из углеродистой стали.

Модели упругопластического деформирования. В данной работе численное моделирование разрушения сосудов высокого давления проводится с использованием истинных напряжений и деформаций (при построении определяющих соотношений), теории пластического течения при условии текучести Мизеса и геометрически нелинейной теории деформаций. При вычислении предельной нагрузки используется линейная теория малых деформаций, в то время как при определении разрушающей нагрузки решается геометрически нелинейная упругопластическая задача. При этом используются истинная диаграмма σ — ε упрочняющегося материала и критерий текучести Мизеса.

Нелинейная модель упрочняющегося материала. При решении задачи с учетом больших деформаций необходимо использовать истинную диаграмму σ — ε материала, поскольку площадь поперечного сечения образца и его длина при больших деформациях существенно меняются. В предположении несжимаемости материала истинные напряжения и деформации вычисляются по формулам [14]

$$s = \sigma(1 + \varepsilon), \quad e = \ln(1 + \varepsilon),$$

Рис. 1. Истинная диаграмма s – e углеродистой стали марки Q235-B

где s, e — истинные напряжение и деформация; σ, ε — инженерные напряжение и деформация.

Испытывались на разрушение два резервуара, предназначенных для хранения сжатого воздуха. Сосуды изготовлены из углеродистой стали марки Q235-B, имеющей следующий химический состав (значения массовой доли компонентов): C — $\leq 0,2$ %, Si — $\leq 0,35$ %, Mn — $\leq 1,4$ %, P — $\leq 0,035$ %, S — $\leq 0,035$ %. Механические характеристики углеродистой стали марки Q235-B имели следующие значения: предел текучести $R_{el} = 324$ МПа, предел прочности при растяжении $R_m = 460$ МПа, модуль упругости $E = 2,01 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Истинная кривая зависимости s – e материала, полученная при испытании на растяжение, представлена на рис. 1.

Численное моделирование разрушения сосудов. Геометрические параметры сосудов 1 и 2 приведены в табл. 1 (L — длина цилиндра). Толщина днищ сосудов такая же, как толщина цилиндрических частей: для сосуда 1 — 1,5 мм, для сосуда 2 — 3,75 мм. При численном моделировании применялись конечно-элементные 3D-модели (рис. 2, 3), в которых использовался конечный элемент SOLID 95 с 20 узлами и тремя степенями свободы в каждом узле [15].

В итерационной процедуре использовался метод Ньютона — Симпсона. Приращение нагрузки регулировалось автоматически в соответствии с напряженным состоянием конструкции. Деформированные состояния сосудов на различных стадиях нагружения показаны на рис. 4, 5. На стадии упругого деформирования и в начале стадии текучести в области сопряжения цилиндрической части сосуда с днищем появляются большие деформации вследствие разрыва кривизны срединной поверхности сосудов. С увеличением нагрузки деформация цилиндра вдали от днища постепенно увеличивается и становится больше деформации в окрестности днища, поскольку днища усиливают цилиндрическую часть сосуда в области сопряжения. Так как материал, из которого изготовлены сосуды, является упрочняющимся, при дальнейшем нагружении давление в сосуде растет. Перед

Таблица 1

Геометрические параметры сосудов

Сосуд	D , мм	T , мм	L , мм
1	161,4	1,50	380
2	323,0	3,75	935

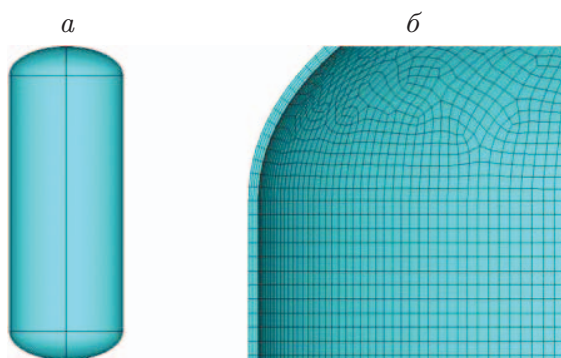


Рис. 2. Конечно-элементная модель сосуда 1:
a — общий вид, *б* — увеличенный фрагмент

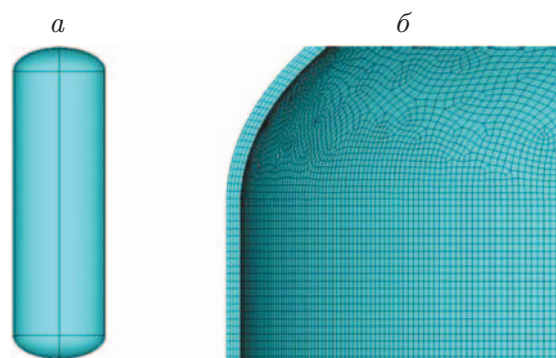


Рис. 3. Конечно-элементная модель сосуда 2:
a — общий вид, *б* — увеличенный фрагмент

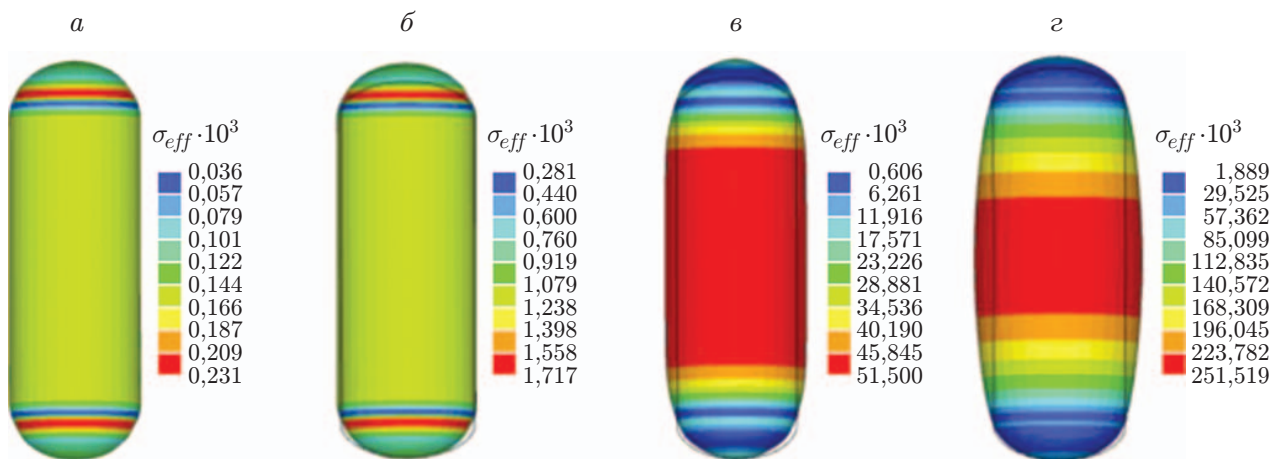


Рис. 4. Интенсивность деформаций в сосуде 1 на различных стадиях нагружения:
a — упругое деформирование, *б* — начало стадии текучести, *в* — стадия упрочнения, *г* — разрушение

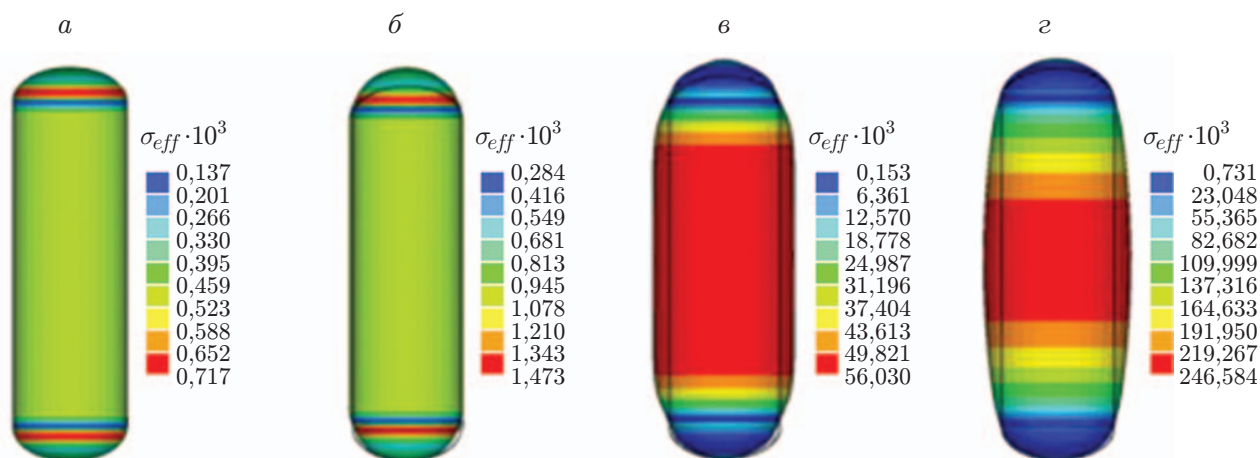


Рис. 5. Интенсивность деформаций в сосуде 2 на различных стадиях нагружения:
a — упругое деформирование, *б* — начало стадии текучести, *в* — стадия упрочнения, *г* — разрушение

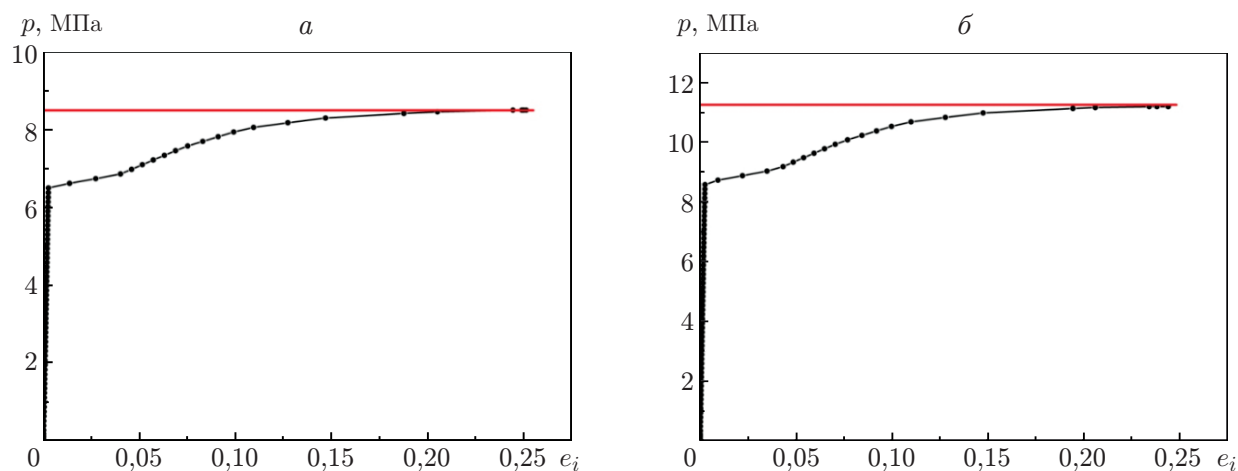


Рис. 6. Зависимость нагрузка — деформация для сосуда 1 (а) и сосуда 2 (б)

разрушением сосуда деформации резко увеличиваются. При этом максимальные деформации имеют место вдали от дна (см. рис. 4, 5).

Зависимости нагрузка p — деформация e_i в области максимальных деформаций приведены на рис. 6. Существует два критерия, на основе которых определяется разрушающее давление сосудов с использованием кривой нагрузка — деформация: критерий двойного “упругого” наклона (double elastic slope method) и критерий “нулевой кривизны” (zero-curvature criterion). Согласно первому критерию разрушающее давление соответствует точке пересечения линии с углом наклона, равным углу наклона участка кривой нагрузка — деформация, соответствующего упругому деформированию, с касательной, проведенной в точке кривой нагрузка — деформация на участке упругопластического деформирования. Этот критерий дает нижнюю оценку разрушающего давления. Согласно критерию “нулевой кривизны” в качестве разрушающего давления принимается давление, соответствующее горизонтальной асимптоте кривой нагрузка — деформация. В этом случае разрушающее давление является предельной нагрузкой, при незначительном увеличении которой материал всего сосуда переходит в состояние текучести. Этот критерий, используемый в данной работе, дает более точную оценку разрушающего давления.

Из рис. 6 следует, что вычисленные с использованием критерия “нулевой кривизны” значения давления, при которых происходит разрушение сосудов 1 и 2, составляют 8,507 и 11,191 МПа соответственно.

Испытание на разрушение тонкостенных сосудов. В соответствии с геометрическими размерами, приведенными в табл. 1, были изготовлены два комплекта сосудов для испытаний на разрушение. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 7. Сосуды помещались в защитную камеру и с помощью аксиального насоса нагружались давлением вплоть до разрушения.

С увеличением давления на поверхностях обоих сосудов образовывались выпуклости, максимальная деформация достигалась в середине цилиндрической части сосудов. Результаты испытаний согласуются с приведенными выше результатами численного моделирования. Фотографии разрушенных сосудов приведены на рис. 8.

Экспериментальные значения разрушающего давления для сосудов 1 и 2 составляют 8,75 и 10,80 МПа соответственно. При разрушении образовалась трещина отрыва, длина и ширина которой для сосуда 1 составляют 72,3 и 9,1 мм соответственно, для сосуда 2 — 321,9 и 45,9 мм соответственно.

Значения давления, при которых произошло разрушение сосудов в эксперименте и при численном моделировании, приведены в табл. 2 (p_b — экспериментальное значение

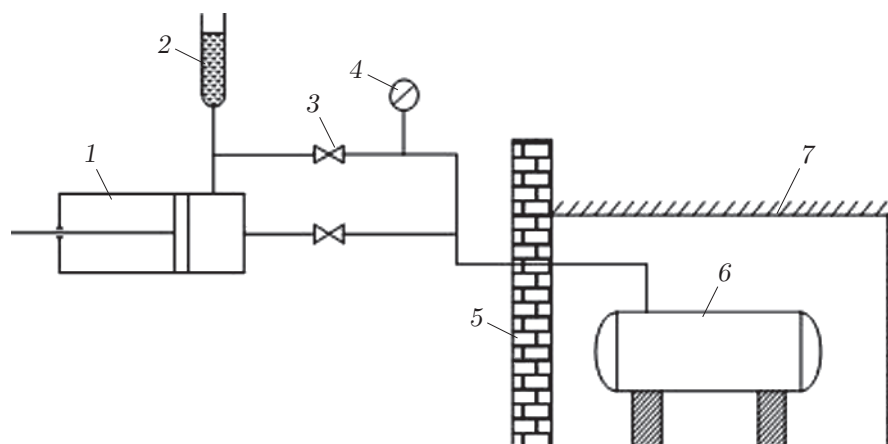


Рис. 7. Схема экспериментальной установки:

1 — аксиально-поршневой насос, 2 — дозирующий бак, 3 — клапан, 4 — манометр,
5 — стенка камеры, 6 — испытываемый сосуд, 7 — защитная камера



Рис. 8. Разрушенные сосуд 1 (а) и сосуд 2 (б)

Таблица 2

Значения разрушающего давления для сосудов 1 и 2

Сосуд	p_b , МПа	$p_b^{\text{МКЭ}}$, МПа	$(p_b^{\text{МКЭ}} - p_b)/p_b^{\text{МКЭ}}$, %
1	8,75	8,51	-2,7
2	10,80	11,19	3,6

Таблица 3

Геометрические параметры сосудов, испытанных в эксперименте

Серия сосудов	D , мм	D/T	L/D
1	161,4	114,47	$1,5 \div 6,0$
2	323,0	107,67	$1,5 \div 6,0$

Таблица 4

Значения разрушающего давления для сосуда диаметром 161,4 мм ($D/T = 114,47$)

Эксперимент	L/D	$p_b^{\text{МКЭ}}$, МПа	p_{bv} , МПа	$(p_b^{\text{МКЭ}} - p_{bv})/p_b^{\text{МКЭ}}$, %
1	1,5	8,91	8,04	-9,80
2	1,6	8,82	8,04	-8,88
3	1,7	8,75	8,04	-8,15
4	1,8	8,69	8,04	-7,52
5	1,9	8,64	8,04	-6,98
6	2,0	8,60	8,04	-6,55
7	2,1	8,57	8,04	-6,22
8	2,2	8,54	8,04	-5,89
9	2,3	8,52	8,04	-5,67
10	2,5	8,49	8,04	-5,34
11	3,0	8,43	8,04	-4,67
12	5,0	8,37	8,04	-3,98
13	6,0	8,36	8,04	-3,87

Таблица 5

Значения разрушающего давления для сосуда диаметром 323 мм ($D/T = 107,67$)

Эксперимент	L/D	$p_b^{\text{МКЭ}}$, МПа	p_{bv} , МПа	$(p_b^{\text{МКЭ}} - p_{bv})/p_b^{\text{МКЭ}}$, %
1	1,5	9,47	8,54	-9,77
2	1,6	9,38	8,54	-8,91
3	1,7	9,31	8,54	-8,22
4	1,8	9,24	8,54	-7,53
5	1,9	9,19	8,54	-7,02
6	2,0	9,15	8,54	-6,61
7	2,1	9,11	8,54	-6,21
8	2,2	9,08	8,54	-5,90
9	2,3	9,05	8,54	-5,58
10	2,5	9,01	8,54	-5,17
11	3,0	8,96	8,54	-4,64
12	5,0	8,91	8,54	-4,10
13	6,0	8,89	8,54	-3,88

давления, при котором происходит разрушение, $p_b^{\text{МКЭ}}$ — полученное методом конечных элементов (МКЭ) значение давления, при котором происходит разрушение). Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что различие экспериментальных значений разрушающего давления и значений, полученных при численном моделировании, для сосудов 1 и 2 составляет $-2,7$ и $3,6$ % соответственно. Таким образом, МКЭ и модель материала, в которой используются истинные напряжение и деформация, можно применять для эффективного прогнозирования разрушающего давления тонкостенных сосудов.

Отношение длины сосуда к его диаметру является важным параметром сосудов высокого давления, который изменяется в диапазоне $L/D = 2 \div 5$. В данной работе $L/D = 1,5 \div 6,0$.

В эксперименте исследовались две серии сосудов, геометрические параметры которых приведены в табл. 3.

На практике разрушающее давление для тонкостенных сосудов обычно рассчитывается по формуле Барлоу, в которой усиливающее воздействие днища на цилиндрическую часть сосуда не учитывается. В табл. 4, 5 приведены значения разрушающего давления, вычисленные по формуле Барлоу и с использованием МКЭ. Из табл. 4, 5 следует, что относительное различие результатов находится в диапазоне $-3,87 \div -9,80$ %.

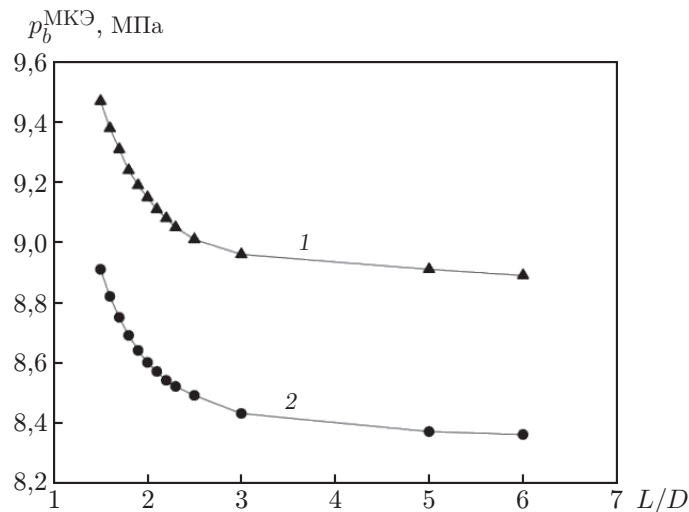


Рис. 9. Зависимость разрушающего давления от отношения длины сосуда к его диаметру:
1 — $D/T = 107,67$, 2 — $D/T = 114,47$

На рис. 9 приведена зависимость разрушающего давления от отношения длины сосуда к его диаметру при различных значениях отношения диаметра сосуда к его толщине.

Нетрудно рассчитать разрушающее давление сосуда с помощью формулы Барлоу, но при этом получается заниженное значение давления, поскольку в формуле Барлоу не учитывается усиливающее воздействие двух днищ. Наличие днищ приводит к уменьшению окружной деформации, поэтому разрушающее давление, полученное при конечно-элементном моделировании, больше вычисленного по формуле Барлоу.

Заключение. В работе выполнены численное моделирование и экспериментальное исследование процесса разрушения тонкостенных сосудов высокого давления, изготовленных из упрочняющегося материала. Предложены модель разрушения сосудов высокого давления, основанная на использовании зависимости между истинными напряжениями и деформациями, и метод численного решения задачи с помощью метода конечных элементов. Проведено экспериментальное исследование процесса разрушения сосудов при различных геометрических параметрах. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными. Предложенные модель и численный алгоритм могут быть использованы для определения значений давления, при которых происходит разрушение тонкостенных сосудов высокого давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dwivedi N., Kumar V., Shrivastava A., Nareliya R. Burst pressure assessment of pressure vessel using finite element analysis: A review // J. Press. Vess. Technol. 2013. V. 135, N 4. P. 1–5. DOI: 10.1115/1.4023422.
2. Subhananda Rao A., Venkata G., Nageshwara Rao B. Effect of long-seam mismatch on the burst pressure of maraging steel rocket motor cases // Engng Failure Anal. 2005. V. 12, N 2. P. 325–336. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2004.01.004.
3. Majzoobi G. H., Farrahi G. H., Mahmoudi A. H. A finite element simulation and an experimental study of autofrettage for strain hardened thick-walled cylinders // Materials Sci. Engng: A. 2003. V. 395, N 1/2. P. 326–331. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00398-8.
4. Xue L. Elastic and inelastic finite element analysis of cylindrical shell intersections: Ph. D. thesis. Milwaukee: Marquette Univ., 2006.

5. **Svensson N. L.** Bursting pressure of cylindrical and spherical vessels // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1958. V. 80, N 25. P. 89–96.
6. **Faupel J. H.** Yielding and bursting characteristics of heavy-walled cylinders // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1956. V. 78, N 23. P. 1031–1064.
7. **Zheng C. X., Lei S. H.** Research on bursting pressure formula of mild steel pressure vessel // J. Zhejiang Univ. Sci. A. 2006. V. 7. P. 277–281. DOI: 10.1631/jzus.2006.as0277.
8. **Zhu X. K., Leis B. N.** Average shear stress yield criterion and its application to plastic collapse analysis of pipelines // Intern. J. Press. Vess. Piping. 2006. V. 83, N 9. P. 663–671. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2006.06.001.
9. **Zhu X. K., Leis B. N.** Evaluation of burst pressure prediction models for line pipes // Intern. J. Press. Vess. Piping. 2012. V. 89. P. 85–97. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2011.09.007.
10. **Law M., Bowie G.** Prediction of failure strain and burst pressure in high yield to tensile ratio line pipes // Intern. J. Press. Vess. Piping. 2007. V. 84, N 8. P. 487–492. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.04.002.
11. **Christopher T., Rama Sarma B. S. V., Govindan Potti P. K., et al.** A comparative study on failure pressure estimations of unflawed cylindrical vessels // Intern. J. Press. Vess. Piping. 2002. V. 79, N 1. P. 53–66. DOI: 10.1016/S0308-0161(01)00126-0.
12. **Langer B. F.** PVRC interpretive report of pressure vessel research. Sect. 1. Design considerations // Welding Res. Council Bull. 1964. V. 95. P. 1–53.
13. **Upitis E., MoKhtarian K.** Evaluation of design margins for section VIII, division 1 and division 2 of the ASME boiler and pressure vessel code // Welding Res. Council Bull. 1998. V. 435. P. 1–85.
14. **Jin C. W., Wang L. Z., Zhang Y. Q.** Strength differential effect and influence of strength criterion on burst pressure of thin-walled pipelines // Appl. Math. Mech. 2012. V. 33, N 11. P. 1361–1370. DOI: 10.1007/s10483-012-1628-7.
15. **Kaptan A., Kisioglu Y.** Determination of burst pressures and failure locations of vehicle LPG cylinders // Intern. J. Press. Vess. Piping. 2007. V. 84, N 7. P. 451–459. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.02.004.

*Поступила в редакцию 27/I 2022 г.,
после доработки — 12/IV 2022 г.
Принята к публикации 26/V 2022 г.*
