

РАСЧЕТ ДВУХСЛОЙНОЙ ЗАГОТОВКИ СФЕРИЧЕСКИХ ДНИЩ ДЛЯ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. С. ПРОКОФЬЕВ¹, Р. С. ГУБАТЮК¹, А. Ф. МУЖИЧЕНКО¹, В. Н. БАРАНОВСКИЙ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Тернопольский нац. техн. ун-т им. И. Пулюя МОН Украины. 46001, г. Тернополь, ул. Русская, 56.

В статье приведены материалы расчетов кольцевых напряжений и радиальных перемещений в стенке двухслойного сферического днища. При этом рассмотрены три модели днищ, в которых используются различные сочетания материалов для изготовления слоев оболочки. Определены рациональные толщины слоев и образующиеся в них кольцевые напряжения и радиальные перемещения в пределах упругих деформаций при различных сочетаниях материалов слоев оболочки. Определение кольцевых напряжений осуществлялось путем расчетов по аналитическим зависимостям и методом компьютерного моделирования. Применение при изготовлении наружной оболочки материала с более высокими прочностными свойствами приводит к эффективному нагружению их общей стенки, уменьшению ее толщины и соответственно росту ее внутренних напряжений и в итоге к рациональному нагружению. Библиогр. 10, табл. 4, рис. 3.

Ключевые слова: сварная конструкция, двухслойная оболочка, сферическое днище, расчетная модель, напряжения, деформации, сварные сосуды

Использование двухслойных и в перспективе многослойных материалов для изготовления оболочковых сварных конструкций в большинстве случаев позволяет получить определенные преимущества. Такими преимуществами является повышение таких показателей как износостойкость, коррозионная стойкость, повышение стойкости к циклическим нагрузкам, а также возможность создания повышенного сопротивления усталостному разрушению. Безопасная эксплуатация такой сварной оболочковой конструкции заключается в достижении рационального распределения напряжений в ее стенках при приложении эксплуатационной нагрузки. Используются также и предварительно напряженные конструкции.

Для двухслойных цилиндрических оболочковых конструкций применяют соединения с натягом, что позволяет уменьшить толщину общей стенки и получить рациональное распределение напряжений, которые образуются в общей стенке при приложении эксплуатационной нагрузки. Также применение в двухслойной оболочковой конструкции материала, стойкого к циклическим нагрузкам, позволяет основную циклическую нагрузку, прилагаемую ко всей сварной конструкции, перераспределить на слой, где применен данный материал и, таким образом, разгрузить слои, которые имеют пониженную стойкость к циклическому нагружению, но имеют иные эксплуатационные или технологические свойства (например, коррозионную стойкость).

Для выполнения требований по коррозионной стойкости в сварных конструкциях типа емкостей, сосудов, баллонов возможно применение защитных покрытий на внутренней поверхности или изготовление двухслойного корпуса, при этом

материал внутреннего слоя изготавливается из металла, имеющего повышенную коррозионную стойкость. Известно, что двухслойные листовые биметаллические материалы возможно получить методом сварки взрывом [1, 2]. Также двухслойные листовые биметаллические материалы возможно получить методом индукционной прессы с сваркой давлением [3–5].

Двухслойные цилиндрические корпуса также возможно получить, осуществив коаксиальную посадку нагретой наружной оболочки на внутреннюю, что обеспечивает получение натяга. Таким путем возможно получить и двухслойные цилиндрические корпуса методом термической усадки наружной оболочки на внутреннюю, осуществляя индукционный нагрев путем постепенного продвижения коаксиально собранных внутренней и внешней оболочек. Данная технология имеет ряд преимуществ, заключающихся в том, что индукционный нагрев существенно дешевле, он не влияет на поверхность нагрева как газовый нагрев и его возможно осуществить в любой, в том числе и защитной атмосфере.

В работе [6] были рассмотрены три однотипные модели цилиндрических корпусов, работающих под давлением, у которых стенка цилиндрического корпуса представляет собой двухслойную оболочку (см. рис. 1 из [6]). Толщина внутренней тонкостенной (отношение диаметра к толщине стенки 10 и более) оболочки для всех трех моделей постоянна. В расчетных моделях наружная оболочка посажена на внутреннюю оболочку с минимальным натягом, близким к нулю, при этом ее внутренний диаметр совпадает с наружным диаметром внутренней оболочки, а ее

наружный диаметр рассчитывается исходя из показателей прочности для каждого применяемого материала. Для всех трех моделей двухслойных цилиндрических корпусов сосудов расчетные значения толщин стенок наружной оболочки и общей стенки, и образовавшихся напряжений в оболочках и в общей стенке, были представлены в работе [6]. В статье представлены расчеты моделей трех однотипных двухслойных сварных конструкций сферических днищ для сварных сосудов, работающих под давлением, при этом внутренняя тонкостенная оболочка сферического днища во всех моделях имеет одинаковые геометрические размеры, которые совпадают со стыковочными размерами для всех трех моделей внутренней тонкостенной оболочки цилиндрического корпуса.

Для определения напряжений, образующихся в стенке оболочки, была рассмотрена сварная конструкция сосуда, работающего под давлением, у которого и цилиндрическая стенка корпуса, и сферические днища выполнены из двухслойного материала. Три однотипные сварные конструкции (табл. 1) сосудов являются расчетными моделями, где с целью выбора оптимальных параметров использовали сочетание (комбинацию) разных марок сталей для внутреннего и наружного слоя. Соответственно, в расчетные модели закладывались прочностные показатели используемых марок сталей для каждого слоя оболочки. Предметом исследования являлись образующиеся напряжения в слоях двухслойного сферического днища и в общей двухслойной стенке, а также определение величины деформаций при приложении эксплуатационного давления для трех моделей.

Толщины стенок наружных оболочек сферических днищ S_2 и цилиндрических корпусов $S_{2к}$ и соответственно толщины общих стенок днища S и цилиндрических корпусов $S_к$ во всех трех моделях могут не совпадать. Однако это позволяет выполнить кольцевой сварной шов, соединяющий цилиндрический корпус со сферическим днищем. При этом достигается обеспечение толщины стенок и совпадения диаметров внутренних оболочек для всех трех моделей и имеется наличие некоторой разнотолщинности стенок наружных оболочек (до 15...20 % от общей толщины стенки наружной оболочки). Это в итоге позволяет на базе полученных расчетных данных сконструировать и сформировать три однотипные модели сварной конструкции – сварного сосуда, с двухслойным цилиндрическим корпусом и двухслойным сферическим днищем. При этом материалы марок сталей слоев корпуса и днища в каждой модели совпадают, а между моделями баллонов совпадения в материалах двухслойных оболочек нет. Расчеты по выбору геометрических параметров однотипных двухслойных конструкций

сферических днищ, для сосудов, работающих под давлением, проводились по известным методикам [7–9]. Сочетание (комбинация) разных марок сталей для внутренней и наружной оболочек в трех моделях сферического днища выбрано в соответствии с работой [6] для трех моделей двухслойного цилиндрического корпуса сварного сосуда.

При этом соблюдались следующие условия:

- расчеты проводили с учетом одного и того же внутреннего эксплуатационного давления $P_p = 20$ МПа и одних и тех же геометрических размерах стенки внутренней оболочки днища ($d_{вн1} = 47,5$ мм; $d_{нар1} = 152$ мм; толщина стенки внутренней оболочки сферического днища постоянная $S_1 = 2,25$ мм) для всех трех моделей сварных сосудов;

- внутренний диаметр сферической наружной оболочки соответствует наружному диаметру стенки внутренней сферической оболочки для всех трех типов сварных сосудов и является постоянным ($d_{нар1} = d_{вн2} = 152$ мм);

- размеры стенки сферической наружной оболочки ($d_{нар}, S_2$) рассчитывали исходя из образующихся в ней (наружной оболочке) напряжений и прочностных показателей используемой марки стали;

- в конструкции сферического днища из расчетных толщин общей стенки днища S принимали ее минимальное значение;

- напряжения в отдельных оболочках сферического днища σ_1, σ_2 , а также суммарные напряжения в общей стенке днища σ определяли без учета натяга;

- расчет проводили в соответствии с действующими нормативными документами и положениями работы [7], при этом эксплуатационное рабочее давление модели сварного сосуда рассчитывали (при коэффициенте запаса прочности $n = 2,7$) по максимальным допустимым значениям образующихся напряжений в металле $[\sigma]_p = \sigma_0/n$, где σ_0 — критически опасное напряжение. В зависимости от марки стали для пластичных материалов $\sigma_0 = \sigma_r$, для хрупких материалов $\sigma_0 = \sigma_B$;

- в расчетных моделях прочность сварных швов принимали равной прочности основного

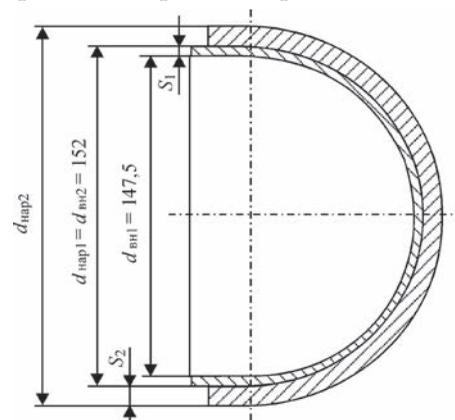


Рис. 1. Конструкция сферического днища

Таблица 1. Сочетание материала и соотношение толщин стенок оболочек сферического днища для моделей

Номер модели	Материалы внутренней S_1 и наружной оболочек S_2 соответственно	$S_1/(S_2 + C)$
1	Ст 08 кп + высокопрочная сталь	$2,25/(1,61 + 0,077) = 1,333$
2	сталь 20 + сталь 20	$2,25/(4,49 + 0,21) = 0,478$
3	сталь 08 кп + сталь 08 кп	$2,25/(8,42 + 0,4) = 0,255$

металла (для данной расчетной математической модели с учетом применения разных марок материалов обеспечение прочности сварных швов достигается путем увеличения суммарной толщины стенки на значение толщины стенки, которая во всех случаях должна быть не менее 0,5 мм [7]).

Материалы расчетов. Исходя из проведенных расчетов в табл. 1 представлены сочетание материалов, геометрические размеры и соотношение толщин стенок S_1 , S_2 оболочек сферического днища и толщины стенки C , где C определяется по формуле работы [7] для трех типов моделей:

$$C = \frac{0,05}{1 + 0,05} S.$$

Результаты расчетов трех моделей конструкций сферических днищ представлены в табл. 2.

Значения рабочих напряжений σ_{p1} , σ_{p2} , σ_{p3} , которые образуются в металле во внутренней наружной оболочке и общей стенке сферического днища от приложенного рабочего эксплуатационного давления P_p , приведены в табл. 3.

Расчет напряжений, образующихся в общей стенке днища, проводили как для однослойного материала суммарной толщины для трех типов моделей. Таким образом, был выполнен прочностной расчет сварной конструкции, в данном случае сварного двухслойного сосуда, у которого двухслойный цилиндрический корпус и сферическое днище выполнены также двухслойными [10].

Кольцевые напряжения и радиальные перемещения, полученные в результате компьютерного моделирования, представлены на рис. 2, 3.

Данные, полученные в результате компьютерного моделирования при нагружении внутренним рабочим давлением трех типов сварной конструкции (сварного сосуда, у которого цилиндрический корпус и сферическое днище выполнены двухслойными), представлены в табл. 4. Сравнение значений кольцевых напряжений (среднего по толщине), определенных в результате компьютерного моделирования (табл. 4, ряд 2), с напряжениями, определенными по аналитическим зависимостям расчетным путем, (табл. 4, ряд 3, первоначально приведено в табл. 3) от приложения рабочего давления к общей стенке для трех моделей, практически совпадают или имеют незначительное расхождение (0,54 ... 3,02 %). Значение напряжений, определенных расчетным путем, оказались выше значений напряжений, определенных в результате компьютерного моделирования.

По результатам компьютерного моделирования установлено, что радиальные перемещения в общей стенке двухслойной оболочки возрастают пропорционально образовавшимся кольцевым напряжениям от модели № 3 к модели № 1 и являются обратно пропорциональными толщине общей стенки двухслойной оболочки.

Наибольшие радиальные перемещения и самые большие значения кольцевых напряжений в модели

Таблица 2. Результаты расчетов трех моделей конструкций сферических днищ

Параметр	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3
Допустимые напряжения в металле стенки днища, МПа; $\sigma_p = \sigma_o/n$ ($n = 2,7$)			
внутренняя оболочка σ_1	74,0	114,3	74,0
наружная оболочка σ_2	370,4	114,3	74,0
Толщина стенки внутренней оболочки S_1 , мм	2,25	2,25	2,25
Внутренняя оболочка			
диаметр внутренний $d_{вн1}$, мм	147,5	147,5	147,5
диаметр средний $d_{ср1}$, мм	149,75	149,75	149,75
диаметр наружный $d_{нар1}$, мм	152,00	152,00	152,00
Толщина стенки наружной оболочки $(S_2 + C)$, мм	1,687	4,7	8,82
Наружная оболочка			
диаметр внутренний $d_{вн2}$, мм	152,00	152,00	152,00
диаметр средний $d_{ср2}$, мм	153,687	156,7	160,82
диаметр наружный $d_{нар2}$, мм	155,374	161,4	169,64
Толщина общей стенки днища $S = S_1 + (S_2 + C)$	3,937	6,95	11,07
Общая стенка днища			
диаметр внутренний $d_{вн}$, мм	147,5	147,5	147,5
диаметр средний $d_{ср}$, мм	151,437	154,45	158,57
диаметр наружный $d_{нар}$, мм	155,374	161,4	169,64
Отношение $d_{нар}/S$	39,465	23,22	15,324
Отношение $(S_2 + C)/S_1$	0,75	2,088	3,92

Таблица 3. Сравнение расчетных напряжений σ_{p1} , σ_{p2} , σ_p при рабочем давлении $P_p = 20$ МПа с допустимыми напряжениями σ_1 , σ_2 в металле внутренней и наружной оболочек для трех моделей

Параметр		Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3
Допустимые напряжения σ_1 , σ_2 , МПа		$\sigma_1 = 74,0$; $\sigma_2 = 370,4$	$\sigma_1 = 114,3$; $\sigma_2 = 114,3$	$\sigma_1 = 74,0$; $\sigma_2 = 74,0$
Расчетные напряжения σ_{p1} , σ_{p2} ; σ_p , МПа				
внутренняя оболочка (S_1)	σ_{p1} , МПа	$\sigma_{p1} = 4,447 < \sigma_1$	$\sigma_{p1} = 6,869 < \sigma_1$	$\sigma_{p1} = 4,447 < \sigma_1$
наружная оболочка ($S_2 + C$)	P_{p2} , МПа	$\sigma_{p2} = 354,2 < \sigma_2$	$\sigma_{p2} = 109,4 < \sigma_2$	$\sigma_{p2} = 70,9 < \sigma_2$
общая стенка днища $S_1 + (S_2 + C) = S$	σ_p , МПа	$\sigma_p = 192,3 < \sigma_2$	$\sigma_p = 111,1 < \sigma_1 = \sigma_2$	$\sigma_p = 71,6 < \sigma_1 = \sigma_2$

№ 1, имеющей минимальную общую толщину стенки двухслойной оболочки. В самой толстой общей стенке двухслойной оболочки — модели № 3 соответственно наименьшие значения кольцевых напряжений и минимальные радиальные перемещения в

пределах упругих деформаций, что соответствует закону Гука. В данном случае оптимальная толщина общей стенки двухслойной оболочки определяется выбором рационального сочетания в ней кольцевых напряжений и радиальных перемещений в пределах

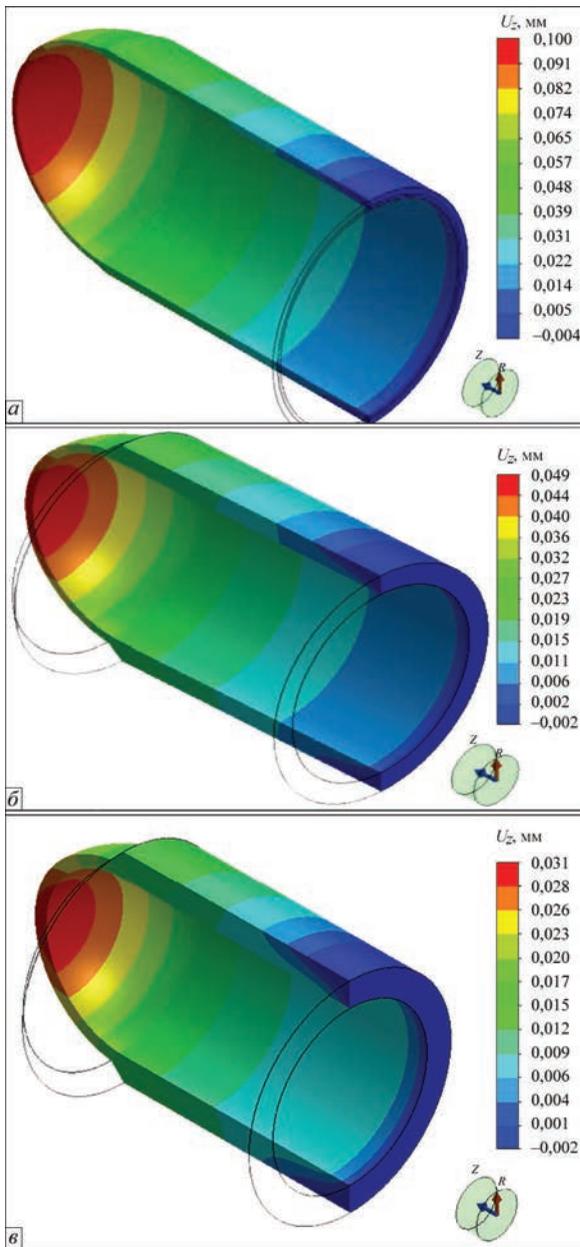


Рис. 2. Поля радиальных перемещений в модели № 1 (а), 2 (б), 3 (е) сосудов при их нагружении рабочим давлением

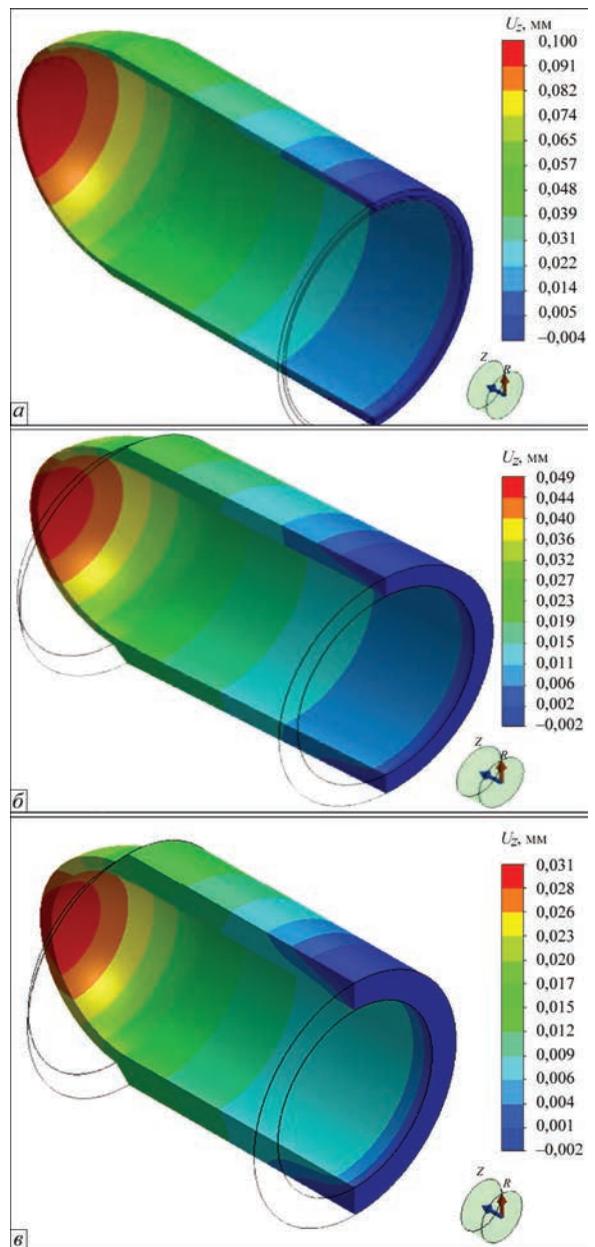


Рис. 3. Распределение кольцевых напряжений в модели № 1 (а), 2 (б), 3 (е) сосудов при их нагружении рабочим давлением

Таблица 4. Перемещения и напряжения при нагружении рабочим давлением для различных моделей

Номер п/п	Параметр	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3
1	Среднее значение перемещения, мм $\Delta_m = (\Delta_{min} + \Delta_{max}) / 2$	$\Delta_m = 0,074$	$\Delta_m = 0,0255$	$\Delta_m = 0,016$
2	Среднее значение кольцевых напряжений в общей стенке двухслойной оболочки, МПа (компьютерное моделирование) $\sigma_m = (\sigma_{min} + \sigma_{max}) / 2$	$\sigma_m = 190$	$\sigma_m = 110,5$	$\sigma_m = 69,5$
3	Среднее значение кольцевых напряжений в общей стенке двухслойной оболочки, МПа (определение расчетным путем, данные табл. 3)	$\sigma_p = 192,3$	$\sigma_p = 111,1$	$\sigma_p = 71,6$

упругих деформаций, исходя из показателей прочности наименее прочного материала оболочки и прочности сварного межслойного соединения. Значения кольцевых напряжений в общей стенке двухслойной оболочки, полученные в результате компьютерного моделирования (при нагружении внутренним рабочим давлением в модели сварной конструкции), коррелируются с кольцевыми напряжениями, определенными ранее расчетным путем для всех трех типов моделей.

Определенные по результатам компьютерного моделирования и расчетным путем для всех трех типов моделей значения кольцевых напряжений также определяют и соответственно требования к прочности сварного соединения оболочек. В данной работе по результатам компьютерного моделирования и расчетным путем для всех трех типов моделей определена толщина сферического днища. Однако в соответствии с правилами расчетов и проектирования [7] толщина стенки днища в реальных сварных конструкциях должна приниматься не менее расчетной толщины стенки цилиндрического корпуса. Для таких сварных конструкций как сосуды, работающие под давлением, при длительном циклическом нагружении минимальные радиальные перемещения в пределах упругих деформаций представляют определенный риск. Это обусловлено возможностью развития усталостных трещин, предшествующих усталостному разрушению, в том числе и в зоне межслойного соединения.

С целью определения оптимальных параметров двухслойной конструкции днища при проектировании считаем, что целесообразно проводить компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при приложении внутреннего рабочего давления, а также внутреннего предельного давления конструкции с целью определения и сравнения полученных при моделировании кольцевых напряжений с напряжениями, определенными расчетным путем по аналитическим зависимостям.

Выводы

1. Определены с использованием компьютерного моделирования, а также расчетным путем по аналитическим зависимостям рациональные геометрические параметры сварной двухслойной оболочки. Для общей стенки тонкостенной двухслойной оболочки установлены рациональные сочетания непределенных кольцевых напряжений и радиальных перемещений.

2. При проектировании должны быть учтены кольцевые напряжения в общей стенке оболочки, среднее значение которых определено в результате компьютерного моделирования, с напряжениями, определенными расчетным путем по аналитическим зависимостям.

1. Конон Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
2. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике / В. Г. Петушков. – Киев: Наукова думка, 2005. – 753 с.
3. Свойства металла шва при индукционной сваркопайке стали 20 / А. С. Письменный, Д. П. Новикова, А. С. Прокофьев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 27–33.
4. Письменный А. С. Свойства сварных соединений трубных заготовок, полученных прессовой сваркопайкой с формирующим устройством / А. С. Письменный, А. С. Прокофьев, А. А. Письменный // Автоматическая сварка. – 2010. – № 7. – С. 25–28.
5. Бакши О. И. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой / О. И. Бакши, Р. З. Шрои // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 6–10.
6. Сварнопаянные трубные заготовки для трубопроводов и сосудов высокого давления / А. А. Письменный, Р. С. Губатюк, А. С. Прокофьев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 10. – С. 41–47.
7. Чернега В. И. Безопасная эксплуатация паровых котлов, сосудов и трубопроводов. – 2-е изд. / В. И. Чернега. – Киев: Техніка, 1976. – 529 с.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд. перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
9. Майзель В. С. Сварные конструкции / В. С. Майзель, Д. И. Навроцкий. – Л.: Машиностроение, 1973. – 304 с.
10. Пат. 107847 Україна. Балон високого тиску, у якому циліндричний корпус має оболонкову конструкцію / О. С. Письменный, М. М. Савицький, О. О. Письменный [та ін.]. – Опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

Поступила в редакцию 22.12.2015