

НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДИМЫХ В УКРАИНЕ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, Р. И. ДМИТРИЕНКО, А. А. ПЕРЕПЕЧАЙ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины), А. П. ДЕНЬГИН, канд. техн. наук, В. А. ПЛЕТНЕВ, инж. (ННИИ промбезопасности и охраны труда)

Представлен статистический анализ надежности и экономичности выпускаемых в Украине баллонов высокого давления для технических газов. Показана необходимость совершенствования нормативной базы, регламентирующей производство баллонов

The paper presents statistical analysis of reliability and cost-effectiveness of high pressure cylinders for technical gases, manufactured in Ukraine. The need to improve the normative base regulating cylinder manufacture is shown.

Надежность и экономичность баллонов высокого давления предопределяется прежде всего нормативной базой и технологией их производства.

В Украине, как и в России, производство баллонов регламентируется ГОСТ 949–73, который введен взамен ГОСТ 949–57 и мало чем от него отличается. В 1991 г. снято ограничение на срок действия ГОСТ 943–73. Таким образом, более 35 лет указанный документ не пересматривался.

Эксплуатация баллонов высокого давления сопряжена с определенным риском. Так, по данным «Сваркомплект», в России ежегодно взрывается около 30 баллонов, 25 из которых стандартные 40-литровые баллоны, и это несмотря на то, что при переосвидетельствовании отбраковывается от 2 до 7 % баллонов [1, 2]. В публикации [3] приведены четыре случая разрушений кислородных баллонов в Украине, а также анализ причин взрыва кислородных баллонов в 2008 г. Разрушение баллонов носит осколочный характер (рис. 1), что особенно опасно.

В этой связи вопросы надежности и безопасности эксплуатации баллонов высокого давления в Украине представляются весьма актуальными.

Целью данной публикации является установление уровня надежности производимых в Украине баллонов высокого давления и определение путей повышения их безопасности при эксплуатации.

К сожалению, статистика по возрасту и принадлежности разрушившихся баллонов отсутствует. Возможно, что здесь и нет определенных закономерностей, поскольку чаще всего причиной взрывов является нарушение техники безопасности, однако осколочный характер разрушения неизбежно приводит к поражению персонала, обслуживающего баллоны.

Несчастных случаев, связанных с разрушением баллонов в странах Европейского Союза, в литературе не отмечено. Это вызвало необходимость сопоставить технические требования к таким изделиям в Украине и Евросоюзе.

В Европе требования к баллонам высокого давления для технических газов регламентируются документом ISO 9809–1. Эти требования касаются стальных бесшовных баллонов из материалов с временным сопротивлением до 1100 МПа.

Согласно ГОСТ 949–73 различают баллоны обычной и повышенной точности изготовления. Для баллонов обычной точности нормируются

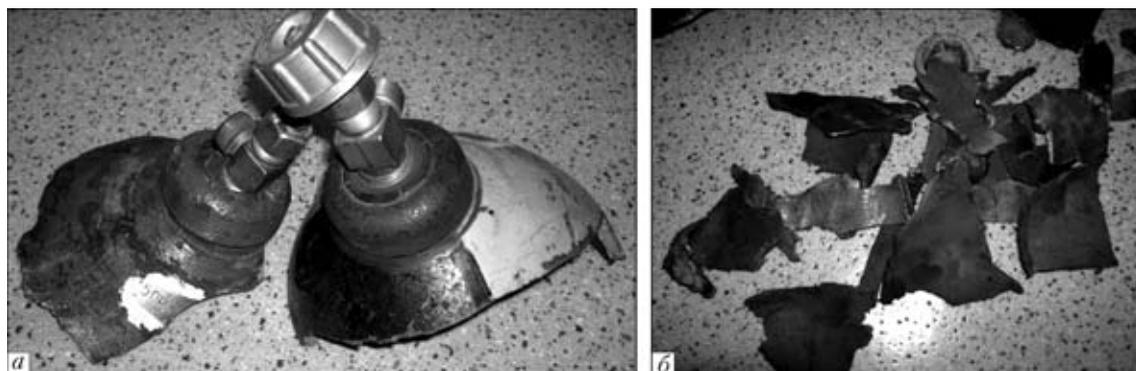


Рис. 1. Характер разрушения баллонов при взрыве [4]: а — части горловины; б — осколки корпуса

предельные отклонения по объему (+5 %) и наружному диаметру в месте перехода от цилиндра к сфере ($\pm 2 \dots 2,5$ %) в зависимости от марки стали. Для баллонов повышенной точности предусмотрены более жесткие требования по диаметру в месте перехода от цилиндра к сфере ($\pm 1,5 \dots 2$ %), а также ограничения по длине (± 15 мм) и наружному диаметру ($\pm 1,0 \dots 1,5$ %). Ограничивается и кривизна баллонов — не более 0,5 % длины цилиндрической части.

Согласно ISO 9809–1, разница между максимальным и минимальным значениями диаметра в одном сечении не должна превышать 2 %, а диаметр зон перехода не должен отклоняться от запроектированного более чем на 1 %. Максимальное отклонение цилиндрической части баллона от прямой линии не должно превышать 3 мм на 1 м. ISO 9809–1 не предусматривает деление баллонов по точности изготовления, равно как и различий в требованиях к точности в зависимости от марки стали. В целом требования европейских норм в части точности несколько выше отечественных, хотя эта разница не является принципиальной.

Более существенным является то, что в европейских нормах рассмотрен большой перечень возможных производственных дефектов с указанием критериев для ремонта и отбраковки. В частности, такой дефект как продольная риска на наружной поверхности баллона должна ремонтироваться зашлифовкой. При этом толщина стенки после ремонта не должна быть меньше проектной, т. е. должна обеспечивать проектный за-

пас прочности баллона. Если этого достичь не удается, баллон подлежит отбраковке.

Согласно ГОСТ 949–73 риски, если они не выводят толщину стенки за минимально допустимые размеры, ремонту не подвергаются, а это создает значительную концентрацию напряжений, что, в свою очередь, способствует снижению циклической прочности и трещиностойкости баллона.

Наиболее важными при контроле технологического процесса изготовления баллонов являются процедуры испытаний. Они проводятся для каждой партии баллонов. Сопоставление наиболее важных процедур испытаний представлено в табл. 1.

Из таблицы видно, что объем испытаний и требования, предъявляемые к отдельным испытаниям, по ISO 9809–1 и ГОСТ 949–73 существенно различаются. В частности, ISO 9809–1 предусматривает гидравлические испытания до разрушения одного баллона от каждой партии и циклические испытания одного баллона испытательным давлением на базе 12000 циклов. Критерием наступления предельного состояния при циклических испытаниях является разгерметизация баллона (появление течи) в результате образования трещины усталости. При статических испытаниях до разрушения особое внимание обращается на характер разрушения. Разрушение должно быть вязким и трещина не должна разветвляться. Безусловно, что эти испытания способствуют обеспечению высокой надежности баллонов. Испытания до разрушения дают более полное представление о запасе прочности баллонов по сравнению с испытанием на растяжение стандартных образцов.

Таблица 1. Процедуры испытаний и контроля каждой партии баллонов по ГОСТ 949–73 и ISO 9809–1

Номер п/п	Наименование испытаний	ГОСТ 949–73	ISO 9809–1
1	Испытание на растяжение образцов, вырезанных в продольном направлении	Контролируется σ_t , σ_b и δ_5 ($\delta_5 \geq 15$ %). Допускается проводить проверку механических свойств неразрушающими методами контроля	Контролируется σ_t , σ_b и δ_5 ($\delta_5 \geq 14$ %) на плоских образцах и $\delta_5 \geq 16$ % на круглых
2	Гидравлические испытания пробным давлением	Испытывается каждый баллон	Испытывается каждый баллон
3	Пневматические испытания	Испытывается каждый баллон. Контролируется герметичность при рабочем давлении	Испытывается каждый баллон. Контролируется герметичность при рабочем давлении
4	Ультразвуковой контроль	Проводится на трубной заготовке	Проводится на готовом изделии
5	Испытание на ударную вязкость	Два продольных образца с круглым надрезом $t_{исп} = +20^\circ\text{C}$	Три продольных и три поперечных образца с острым надрезом $t_{исп} = -50^\circ\text{C}$
6	Гидравлические испытания баллона до разрушения	Не предусмотрено	Одно испытание от партии. Контроль прочности и характера разрушения
7	Испытание циклическим давлением	-.	Один баллон от партии. Давление: $P_{max} = P_{исп}$, $P_{min} \leq 10\% P_{раб}$. База испытаний 12000 циклов. Контроль течи
8	Испытания на загиб	-.	Два образца от партии. Контроль образования трещин
9	Испытание на выравнивание кольца	-.	Выравнивание на вальцах. Один образец. Контроль образования трещин



Особое внимание уделяется различию в требованиях по трещиностойкости стали, используемой для баллонов. Согласно требованиям ГОСТ 949–73 испытания на ударную вязкость проводятся при температуре +20°C на двух образцах с круглым надрезом, вырезанным в продольном направлении. При этом значение ударной вязкости должно быть не ниже 30 Дж/см². Ясно, что форма надреза и температура испытаний не могут гарантировать вязкое разрушение баллонов в реальных условиях температур эксплуатации и динамической нагрузки, вызванной взрывом в баллоне. Поэтому взрыв баллона сопровождается осколочным разрушением с вытекающими из этого последствиями.

ISO 9809–1 предусматривает испытание на ударную вязкость по три образца, вырезанных в продольном и поперечном направлениях. Образцы имеют V-образный надрез Шарпи. Испытания проводятся при температуре –50°C. Для образцов, вырезанных в поперечном направлении требования по ударной вязкости дифференцированы в зависимости от толщины стенки баллона и равны 30 Дж/см² для толщины стенки 3...5 мм и 40 Дж/см² для толщины стенки 10 мм. Для продольных образцов значения ударной вязкости не должны быть менее 60 Дж/см² независимо от толщины стенки баллона. Эти требования учитывают механические свойства сталей и, вместе с тем, видимо, гарантируют безосколочное разрушение в случае взрыва баллона.

Представляет также интерес анализ механических свойств стали и толщины стенки выпускаемых в Украине баллонов высокого давления для технических газов, поскольку эти показатели определяют надежность баллонов в штатных условиях эксплуатации.

Исследования проводили путем статистического анализа механических свойств стали и толщины стенки баллонов. Выборки по механическим свойствам формировались по результатам испытаний, проводимых на заводе для каждой партии баллонов в период с августа 2001 по конец 2008 г. При этом по каждому из показателей механических свойств формировались две выборки. В первую включались результаты для партий баллонов,

Таблица 2. Данные по объему выборок для анализа механических свойств стали

Контролируемые параметры	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_s , %	KCU при 20°C, Дж/см ²
Минимальное значение по ГОСТ 949–73	373	638	15	29,4
Количество результатов, включенных в выборку I	846	846	846	836
Количество результатов, включенных в выборку II	942	942	942	930

прошедших контроль по всем параметрам с первого раза. Во вторую включались все результаты. Исходная информация по выборкам для контролируемых механических свойств приведена в табл. 2.

Для построения гистограмм распределений ширину интервала h определяли по формуле Стерджеса [5]:

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,322 \lg n},$$

где n — количество результатов в выборке; X_{\max} , X_{\min} — максимальное и минимальное значение рассматриваемого параметра.

Распределения всех механических характеристик соответствуют нормальному закону, что подтверждается соответствующими значениями коэффициентов вариации [5].

Результаты статистического анализа по выборкам I и II приведены в табл. 3.

Гистограммы и нормированные распределения по выборке II, которая наиболее полно представляет производственную ситуацию, представлены на рис. 2–5. Как видно из рисунков, гистограммы и теоретические распределения достаточно хорошо согласуются. Исходя из того, что выборки включают большое число результатов, их можно рассматривать как генеральные совокупности.

Анализируя результаты, представленные в табл. 3, необходимо отметить ряд моментов.

Прежде всего обращает внимание тот факт, что очень высокая вероятность производства заготовок для баллонов с пределом текучести ниже нор-

Таблица 3. Результаты статистического анализа механических свойств стали в баллонах

Статистические параметры	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_s , %	KCU, Дж/см ²
Параметры по выборке I				
min	373	643	15	29,4
max	571	870	30	184
Математическое ожидание (m)	409,23	745,05	20,44	70,48
Стандартное отклонение (σ)	29,92	39,47	2,37	14,385
(σ/m)×100 %	7,3	5,29	11,59	20,41
Брак, %	11,3	0,35	1,07	0,19
Параметры по выборке II				
min	278	616	8,8	20
max	571	876	30	184
Математическое ожидание (m)	404,75	741,23	20,45	70,82
Стандартное отклонение (σ)	33,8	41,64	2,45	14,85
(σ/m)×100 %	8,35	5,62	12	20,97
Брак, %	17,36	0,65	1,39	0,26

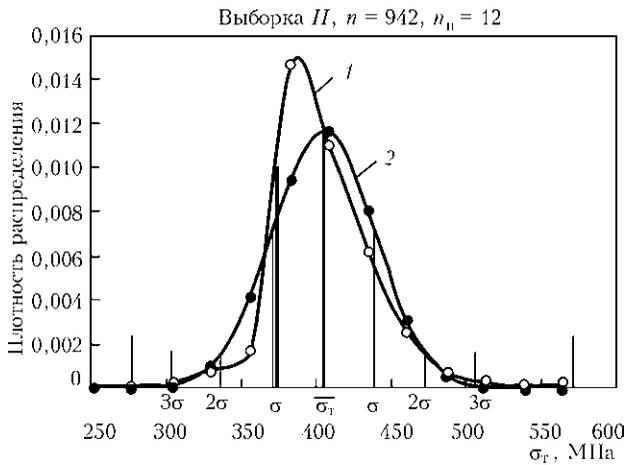


Рис. 2. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела текучести (2): min по ГОСТ 949-73 — 373; min — 278; max — 571; σ — 33,799; σ_T — 404,749; $t = 26$

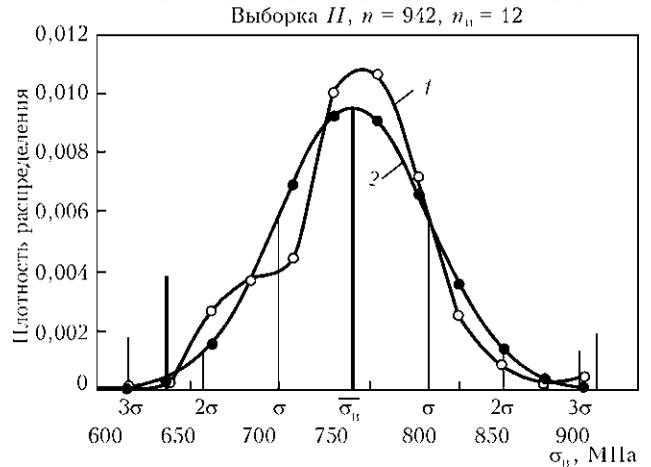


Рис. 3. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела прочности (2): min по ГОСТ 949-73 — 373; min — 616; max — 876; σ — 41,641; σ_B — 741,231; $t = 23$

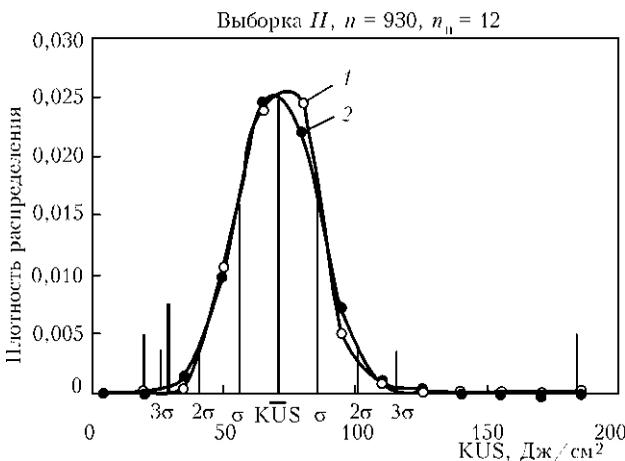


Рис. 4. Гистограмма (1) и нормированное распределение ударной вязкости (2): min по ГОСТ 949-73 — 294; min — 20; max — 184; σ — 14,851; KCV — 70,816; $t = 15$

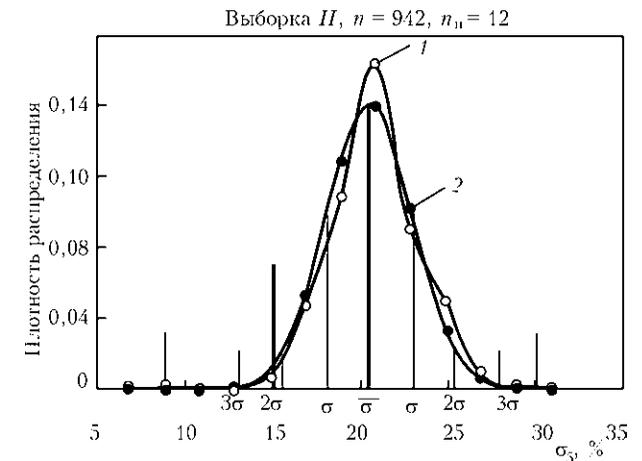


Рис. 5. Гистограмма (1) и нормированное распределение относительного удлинения (2): min по ГОСТ 949-73 — 15; min — 8,8; max — 30; σ — 2,454; δ — 20,45; $t = 2$

мированного значения. Поскольку контроль осуществляется на стадии изготовления собственно баллонов, то это чревато высоким процентом их отбраковки. Если исходить из выборки II, то отбраковка может составлять более 17 % и всегда будет существовать вероятность того, что в эксплуатируемых баллонах фактический предел текучести будет ниже нормируемой величины.

Приходится отметить, что практически по всем показателям механических свойств наблюдается достаточно высокий уровень рассеяния результатов. И это несмотря на то, что весь цикл производства от выплавки стали до выпуска готовой продукции осуществляется в пределах одного предприятия.

Заметим, что прочность баллонов определяется не только механическими свойствами стали, но также и расчетной толщиной стенки. В этой связи при оценке надежности производимых в Украине баллонов значительное внимание уделено анализу толщины стенки в цилиндрической части баллонов. Исследования проводили на трех новых бал-

лонах толщиномером УТЭ-04-ЭМА в более чем 400 точках, равномерно расположенных на наружной поверхности цилиндрической части каждого баллона.

Результаты статистического анализа приведены в табл. 4, а на рис. 6 и 7 представлены гистограммы и нормированные распределения толщин стенки в баллонах.

Обращает внимание значительный разброс по толщине стенки как в отдельных баллонах (20...30 %), так и по группе из трех баллонов (32,3 %). Имеет место значительное превышение минимальной толщины стенки рассматриваемых баллонов в сравнении с толщиной, регламентируемой ГОСТ 949-73 (6,8 мм). Средние значения толщины стенки баллонов на 18...26 % больше нормируемой, а это значит, что примерно на такую же величину увеличивается вес баллонов и их стоимость, а, следовательно, технологические и экономические показатели.

Вместе с тем, несмотря на большой разброс показателей вероятность появления в баллонах



Таблица 4. Статистические данные результатов измерения толщины стенки баллонов

Номер п/п	Номер баллона	Год производства баллонов	Количество измерений, шт.	t_{max} , мм	t_{min} , мм	Математическое ожидание t , мм	Стандартное отклонение
1	785	2007	432	9,66	7,41	8,57	0,44
2	25	2009	448	8,95	7,3	8,03	0,3
3	15365	2010	448	8,82	7,3	8,03	0,31
По трем баллонам			1328	9,66	7,3	8,2	0,437

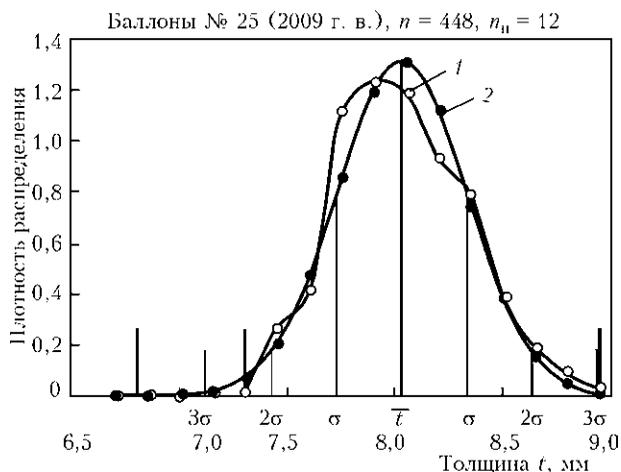


Рис. 6. Гистограмма (1) и нормированное распределение толщины стенки в баллоне (2): min по ГОСТ 949–73 — 6,8; σ — 0,302; min — 7,3; max — 8,95; t — 8,028; $t = 0,15$

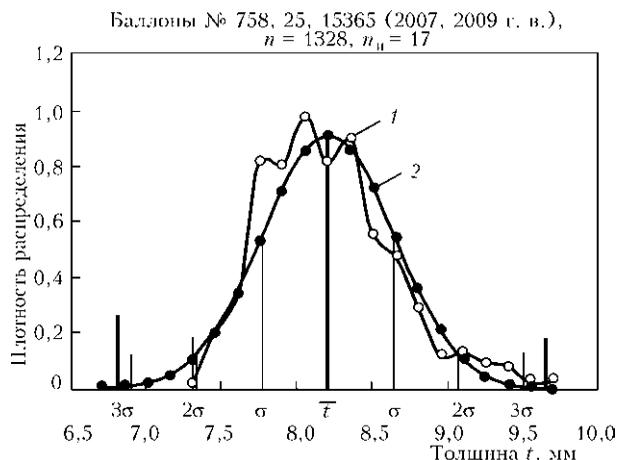


Рис. 7. Гистограмма (1) и нормированное распределение толщины стенки по трем баллонам (2): min по ГОСТ 949–73 — 6,8; σ — 0,437; min — 7,3; max — 9,66; t — 8,2; $t = 0,15$

минимально допустимого значения толщины стенки составляет $0,1 \times 10^{-3} \dots 0,1 \times 10^{-5}$ за счет излишнего запаса по толщине.

Исходя из реальных распределений механических свойств и толщин стенки, можно определить вероятность появления в баллонах текучести при испытательной нагрузке и вероятность разрушения баллонов при коэффициенте запаса менее 2,6.

Известно, что кольцевые напряжения в цилиндрической части баллона определяются выражением:

$$\sigma_k = \frac{PD_{cp}}{2t},$$

где P — давление в баллоне; D_{cp} — средний диаметр баллона; t — толщина стенки.

Для заданного давления выражение $\frac{PD_{cp}}{2}$ может рассматриваться как постоянный коэффициент, следовательно, распределение напряжений σ_k в баллонах будет определяться распределением величины, обратной толщине стенки. Напряжения могут рассматриваться как результат нагруженности баллона S , т. е. $S = \sigma_k$.

Предел текучести σ_T или временное сопротивление σ_B характеризуют несущую способность баллона R .

В работе [6] для оценки надежности в таких случаях рассматривается функция неразрушимости $\psi = R - S$, которая также имеет нормальное распределение, с параметрами математического ожи-

дания $m_\psi = m_R - m_S$ и дисперсией $D_\psi = D_R + D_S - 2k_{RS}$. Здесь k_{RS} — корреляционный момент, который в данном случае равен нулю, так как параметры R и S некоррелируемые.

Следовательно, стандартное отклонение для функции неразрушимости будет иметь вид:

$$\sigma_\psi = \sqrt{\sigma_R + \sigma_S}.$$

Вероятность наступления предельного состояния определяется как площадь кривой распределения функции неразрушимости Ψ от $-\infty$ до нуля.

В качестве примера рассмотрим вероятность появления в цилиндрической части баллона зон текучести при давлении $P = 25,5$ МПа. Такое давление выбрано для наглядности примера. На рис. 8 приведены нормированные распределения для предела текучести по выборке II, для нагруженности баллона и функции неразрушения Ψ для новых баллонов. Вероятность достижения значений текучести в отдельных зонах баллона определяется площадью заштрихованной части кривой распределения функции неразрушения и составляет 3,67 %.

Оценка вероятности появления зон текучести в баллонах при испытательном давлении и вероятности разрушения новых баллонов с коэффициентом запаса менее 2,6 приведены в табл. 5. Из таблицы видно, что вероятность не появления зон текучести в новых баллонах как дифференцированно по отдельным баллонам, так и по группе из трех баллонов, составляет не менее 0,999. Вероятность разрушения баллонов с коэффициентом

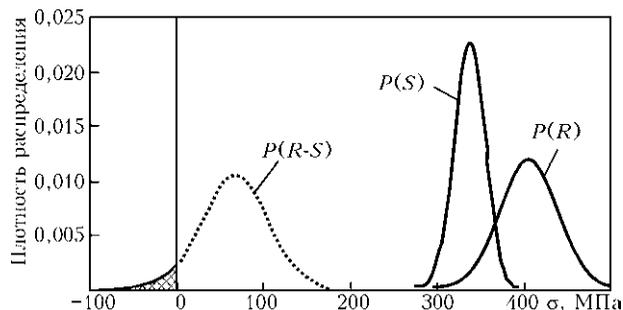


Рис. 8. Нормированные распределения функций параметров R : $m = 404,749$, $\sigma = 33,799$; S : $m = 336,55$, $\sigma = 17,5$; $R-S$: $m = 68,2$, $\sigma = 38,04$

Таблица 5. Вероятности (%) наступления текучести при пробном давлении и разрушения при запасе прочности менее 2,6

Номер баллона	Вероятность (p) наступления текучести при давлении 22,07 МПа			Вероятность разрушения при давлении 38,26 МПа		
	m	σ	p	m	σ	p
1	130,75	36,54	0,02	265,13	48,13	1,91E-6
2	112,01	35,52	0,08	232,58	45,76	1,97E-5
3	112,01	35,68	0,1	232,58	46,13	2,44E-5
1–3	119,04	36,91	0,07	244,79	48,96	3,03E-5

Примечание. m , σ , p — статистические параметры

запаса менее 2,6 практически отсутствует. Конечно, все сказанное выше касается новых баллонов. При эксплуатации в связи с коррозионными процессами вероятность наступления предельных состояний будет возрастать. Чтобы оценить насколько этот процесс будет интенсивным, необходимо исследовать баллоны с разными сроками эксплуатации. Причем эти исследования в основном должны касаться толщины стенки баллонов, поскольку предел текучести и временное сопротивление с течением времени практически не меняются.

Выводы

Производимые в Украине баллоны высокого давления для технических газов имеют высокую надежность в части появления зон текучести при испытательном давлении, а их запас прочности

по отношению к рабочему давлению существенно превышает требования норм.

Высокие уровни надежности баллонов при штатных режимах эксплуатации достигаются за счет завышенных значений толщины стенки, что приводит к утяжелению баллонов и повышению их себестоимости.

Сталь, из которой изготавливаются баллоны, имеет значительное рассеяние по всем показателям механических свойств. Особенно большое рассеяние и низкая обеспеченность нормативного значения по пределу текучести. Процент отбраковки по σ_T превышает 17 %. Отношение максимальных значений σ_T к минимальным значениям в представительной выборке составило более двух.

Трубные заготовки для баллонов имеют значительную разнотолщинность. В одном баллоне толщина стенки меняется в пределах 30 %. Средние значения толщины стенки на 18...26 % больше минимально допустимых нормами, что приводит к существенному перерасходу стали.

Нормативные требования по трещиностойкости стали, применяемой для баллонов, не обеспечивают надежности эксплуатации баллонов при отрицательных температурах, приводят к осколочным разрушениям при взрывах и не отвечают современным условиям обеспечения безопасности.

1. Рубан А. Г. Инновационное обеспечение лидерства на рынке газовых баллонов // Технические газы. — 2008. — № 2. — С. 49–55.
2. Рубан А. Г. Международный опыт обновления газобаллонного парка производителей промышленных газов // Там же. — 2009. — № 6. — С. 54–63.
3. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. М. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
4. Чижиченко В. П. Анализ причин взрыва кислородных баллонов, приведшего к групповому несчастному случаю // Технические газы. — 2008. — № 6. — С. 62–64.
5. Математическая статистика / Под ред. А. М. Длинна. — М: Высш. шк., 1975. — 400 с.
6. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — М.: Стройиздат, 1978. — 239 с.
7. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. — М: Стройиздат, 1961. — 202 с.

Поступила в редакцию
04.04.2012