

ПРОЕКТ 7.3

Удосконалення методології визначення технічного стану та обґрунтування терміну безпечної експлуатації кисневих балонів

УДК 621.791:622.692.2

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ СРОКОВ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАЛЛОНОВ

Э.Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, В.П. ДЯДИН, П.С. ЮХИМЕЦ, кандидаты техн. наук,
В.А. НЕХОТЯЩИЙ, Р.И. ДМИТРИЕНКО, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Представлен статистический анализ надежности и экономичности выпускаемых в Украине баллонов высокого давления для технических газов. Определены пути повышения технико-экономических показателей и надежности баллонов при их производстве и эксплуатации.

Ключевые слова: баллоны, предел текучести, временное сопротивление, ударная вязкость, толщина стенки, нормированное распределение, надежность, вероятность разрушения

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 4 случая разрушений кислородных баллонов в Украине. Анализ причин взрыва кислородных баллонов в 2008 г., приведшего к групповому несчастному случаю, описан в работе [4]. Особую опасность представляют разрушения баллонов в связи с тем, что они носят осколочный характер.

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

Целью данной работы является установление уровня надежности производимых в Украине баллонов высокого давления и определение путей повышения их технико-экономических показателей и безопасности при производстве и эксплуатации.

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

Несчастных случаев, связанных с разрушением баллонов в странах Европейского Союза, в литературе не отмечено. Это вызвало необходимость прежде всего 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 предельные отклонения по объему (+5 %) и наружному диаметру в месте перехода от цилиндра к сфере ($\pm 2-2,5$ %), в зависимости от марки стали. Для баллонов повышенной точности предусмотрены более жесткие требования по диаметру в месте перехода от цилиндра к сфере ($\pm 1,5-2$ %), а также ограничения по длине (± 15 мм) и наружному диаметру ($\pm 1,0-1,5$ %). 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 диа-

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

Наименование испытаний	ГОСТ 949–73	ISO 9809–1
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 образцах
Гидравлические испытания пробным давлением	Испытывается каждый баллон	Испытывается каждый баллон
Пневматические испытания	Испытывается каждый баллон. Контролируется герметичность при рабочем давлении	Испытывается каждый баллон. Контролируется герметичность при рабочем давлении
Ультразвуковой контроль	Проводится на трубной заготовке	Проводится на готовом изделии
Испытание на ударную вязкость	Два продольных образца с круглым надрезом. $t_{исп} = 20\text{ }^\circ\text{C}$	Три продольных или три поперечных (в зависимости от диаметра баллона) образца с острым надрезом $t_{исп} = -50\text{ }^\circ\text{C}$
Гидравлические испытания баллона до разрушения	Не предусмотрено	Одно испытание от партии. Контроль прочности и характера разрушения
Испытание циклическим давлением	» »	1 баллон от партии. Давление: $P_{max} = P_{исп}$, $P_{min} \leq 10\% P_{раб}$. База испытаний 12000 циклов. Контроль течи
Испытание на загиб	» »	Два образца от партии. Контроль образования трещин
Испытание на выравнивание кольца	» »	Выравнивание на вальцах. Один образец. Контроль образования трещин

метр зон перехода не должен отклоняться от запроецированного 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 относительно 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 запас прочности баллона. Если этого достичь не удастся, то 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, будет способствовать 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, предусмотренных ГОСТ 949–73 и ISO 9809–1, представлено в табл. 1.

Из приведенной таблицы видно, что объем испытаний и требования, предъявляемые к отдель-

ным испытаниям, по ISO 9809–1 и ГОСТ 949–73 существенно разнятся. 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 сквозной трещины усталости. При статических испытаниях до разрушения особое внимание обращается на характер разрушения. Разрушение должно быть вязким, 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.

Особое внимание обращает на себя различие 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. Совершенно 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 или поперечном направлениях. Об-

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

Контролируемые параметры	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCU при 20 °С, 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

разцы имеют V-образный надрез Шарпи. Испытания проводят при температуре –50 °С. Для образцов, вырезанных в поперечном направлении из баллона диаметром более 140 мм, требования по ударной вязкости дифференцированы в зависимости от толщины его стенки и равны 30 Дж/см² для толщины стенки 3–5 мм, 35 Дж/см² для толщины от 5–7,5 мм и 40 Дж/см² для толщины стенки от 7,5–10 мм. Для продольных образцов, изготовленных их баллонов с диаметром менее 140 мм, 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 значений толщины стенки выпускаемых в Украине баллонов высокого давления для технических газов, поскольку эти показатели предопределяют надежность баллонов в штатных условиях эксплуатации.

Исследования проводили путем статистического анализа механических свойств стали и значений 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 формировали две выборки. В первую включались результаты для партий баллонов, 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} и 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. 1–4. Как видно из рисунков, гистограммы и теоретические распределения достаточно хорошо согласуются. Исходя из того, что выборки включают большое количество результатов, их можно рассматривать как генеральные совокупности и математическое ожидание (m) принимать равным среднему значению по выборке (на рисунках это значение с чертой сверху). На рисунках приняты следующие обозначения: t – принимаемая ширина интервала; n_i – число интервалов; σ – стандартное отклонение.

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

Прежде всего обращает внимание тот факт, что очень высока вероятность производства заготовок для баллонов с пределом текучести ниже нормированного значения. Поскольку контроль осуществ-

Таблица 3. Результаты статистического анализа механических свойств стали в баллонах

Статистические параметры	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCU при 20 °С, 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
$(\sigma/m) \cdot 100$ %	7,3	5,29	11,59	20,41
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
$(\sigma/m) \cdot 100$ %	8,35	5,62	12	20,97
% брака	17,36	0,65	1,39	0,26

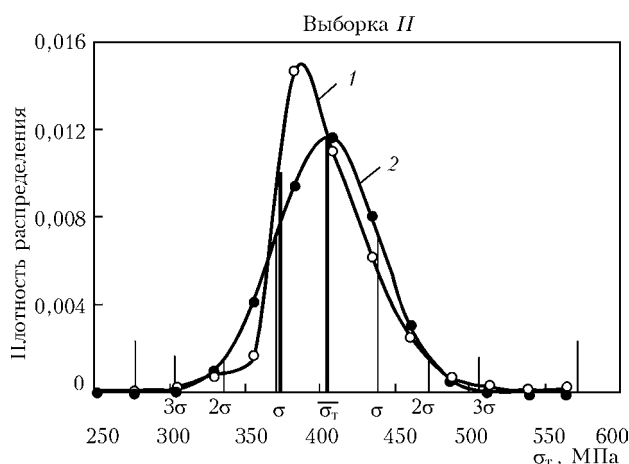


Рис. 1. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела текучести (2): min по ГОСТ 949-73=373; $n = 942$; $\sigma = 33,799$; min = 278; max = 571; $\bar{\sigma}_T = 404,749$; $t = 26$; $n_n = 12$

ляется на стадии изготовления собственно баллонов, это чревато высоким процентом отбраковки баллонов. 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 баллонах. Измерения толщиномером УТЭ-04-ЭМА проводили в более чем 400 точках, равномерно расположенных на наружной поверхности цилиндрической части каждого из баллонов.

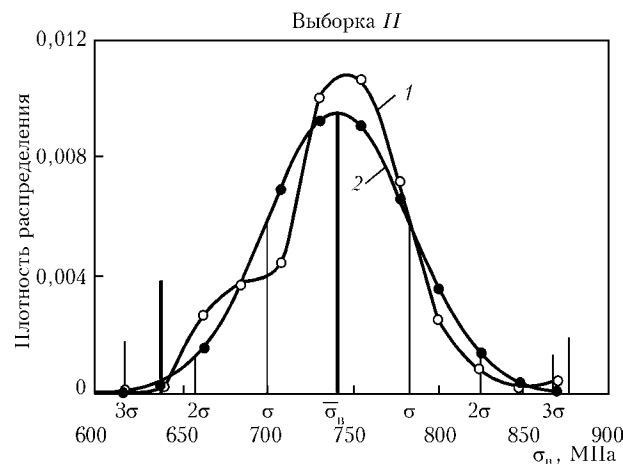


Рис. 2. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела прочности (2): min по ГОСТ 949-73=638; $n = 942$; $\sigma = 41,641$; min = 616; max = 876; $\bar{\sigma}_n = 741,231$; $t = 23$; $n_n = 12$

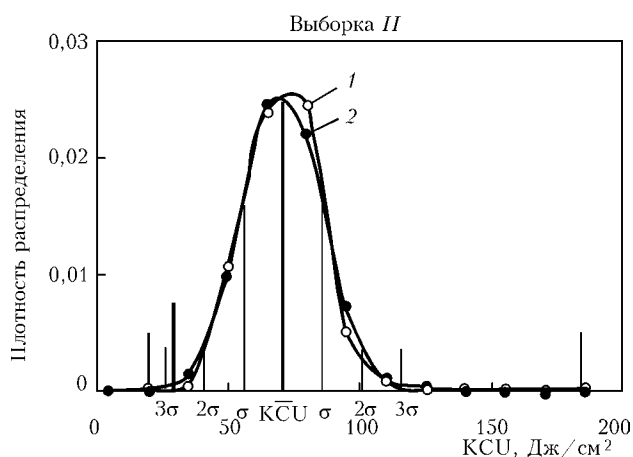


Рис. 3. Гистограмма (1) и нормированное распределение ударной вязкости (2): min по ГОСТ 949-73=29,4; $n = 930$; $\sigma = 14,851$; min = 20; max = 184; $\bar{KCU} = 70,816$; $t = 15$; $n_n = 12$

Результаты статистического анализа приведены в табл. 4, а на рис. 5 и 6 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 масса баллонов и их стоимость, а, следовательно, технологические и экономические показатели.

Вместе с тем, несмотря на большой разброс показателей толщины стенки, вероятность появления в баллонах минимально допустимого значения толщины стенки составляет $0,1 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-5}$ за счет излишнего запаса по толщине стенки баллонов.

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.

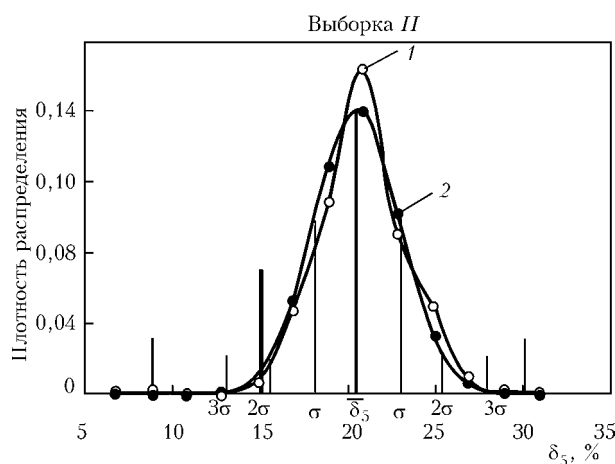


Рис. 4. Гистограмма (1) и нормированное распределение относительного удлинения (2): min по ГОСТ 949-73=15; $n = 942$; $\sigma = 2,454$; min = 8,8; max = 30; $\bar{\delta}_5 = 20,45$; $t = 2$; $n_n = 12$

Таблица 4. Статистические данные результатов измерения толщины стенки баллонов

Номер баллона	Год производства баллонов	Количество измерений, шт.	s_{max} , мм	s_{min} , мм	Математическое ожидание, мм	Стандартное отклонение
758	2007	432	9,66	7,41	8,57	0,44
25	2009	448	8,95	7,3	8,03	0,3
15365	2010	448	8,82	7,3	8,03	0,31
3 баллона	2007–2010	1328	9,66	7,3	8,2	0,437

Известно, что кольцевые напряжения в цилиндрической части баллона определяются выражением

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

где P — давление в баллоне; D_{cp} — средний диаметр баллона; s — 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 F , т.е. $F = \sigma_k$.

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

А.Р. Ржаницын для оценки надежности в таких случаях рассматривает функцию неразрушимости $\psi = R - F$ [6], которая также имеет нормальное распределение, с параметрами математического ожидания $m_\psi = m_R - m_F$ и дисперсией $D_\psi = D_R + D_F - 2k_{RF}$. Здесь k_{RF} — корреляционный момент, который в данном случае равен нулю, так как параметры R и F некоррелируемые.

Следовательно, стандартное отклонение для функции неразрушимости будет иметь вид:

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

Вероятность наступления предельного состояния p 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. 7 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.

Как видно из табл. 5, вероятность не появления зон текучести в новых баллонах дифференцировано по отдельным баллонам и по группе из трех баллонов, составляет не менее 0,999. Вероятность разрушения баллонов с коэффициентом запаса менее 2,6 практически отсутствует. Конечно, все сказанное выше, касается новых баллонов. В процессе эксплуатации, в связи с коррозионными процессами, вероятность наступления предельных состояний будет возрастать. Поэтому необходима разработка мероприятий, позволяющих своевременно выводить из эксплуатации баллоны, надежность которых не соответствует существующим требованиям.

Исходя из сказанного, повышение надежности и безопасности эксплуатации баллонов высокого давления следует рассматривать в двух аспектах: производство новых баллонов и обеспечение безопасности баллонов в процессе их эксплуатации.

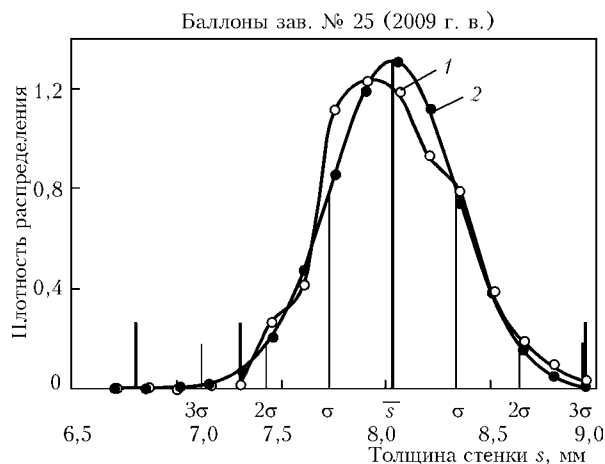


Рис. 5. Гистограмма (1) и нормированное распределение толщины стенки в баллоне (2): $n = 448$; $\sigma = 0,302$; $\min = 7,3$; $\max = 8,95$; $s = 8,028$; $t = 0,15$; $n_u = 12$

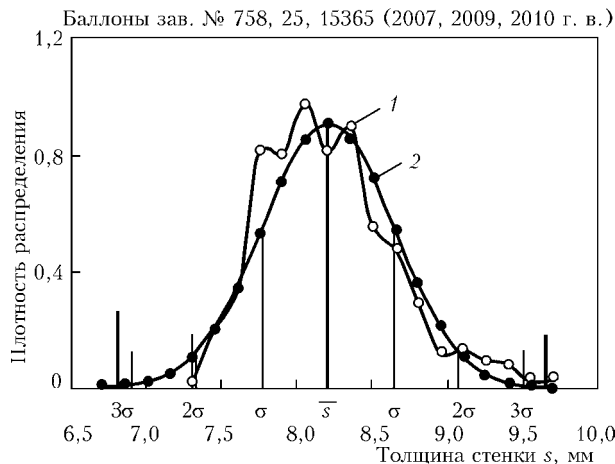


Рис. 6. Гистограмма (1) и нормированное распределение толщины стенки по трем баллонам (2): $n = 1328$; $\sigma = 0,437$; $\min = 7,3$; $\max = 9,66$; $s = 8,2$; $t = 0,15$; $n_u = 17$

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

Номер баллона	Вероятность наступления текучести при давлении 22,07 МПа			Вероятность разрушения при давлении 38,26 МПа		
	Статистические параметры					
	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

Что касается производства баллонов, то необходима его коренная реконструкция, которая за счет современных технологий позволит свести до минимума разнотолщинность стенки баллонов и повысить их экономические показатели. Необходим переход на применение новых современных материалов, имеющих значительно более высокие механические и вязкие свойства, что приведет к дополнительному снижению массы изделий. Крайне необходимо согласование отечественных технических требований к изготовлению баллонов с обще-европейскими, изложенными в ISO 9809-1 и других документах, что исключит хрупкое разрушение баллонов, в том числе и при внутреннем давлении, возникающем при взрыве.

Процесс вывода из эксплуатации баллонов, изготовленных по нынешней технологии, займет длительный период времени. Поэтому для повышения их безопасности необходима разработка как организационных мероприятий, направленных на строгое соблюдение требований техники безопасности при работе с баллонами высокого давления, так и технических, обеспечивающих более высокий и объективный уровень оценки их технического состояния при переосвидетельствованиях, и на этой основе своевременное выведение баллонов из эксплуатации. Примером может служить использование интегрального подхода к оценке технического состояния баллонов при их испытании пробным давлением, основанного на выявлении начала пластических деформаций в стенке баллона. Такой подход апробирован в рамках рассматриваемой проблемы.

Выводы

1. 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.

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

3. Сталь, из которой изготавливаются баллоны, имеет значительное рассеяние по всем показателям механических свойств. Особенно большое рассея-

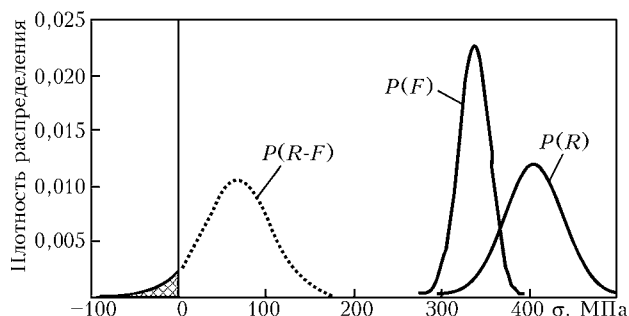


Рис. 7. Нормированные распределения функций R , F и $R - F$: распределение R : $m = 404,749$, $\sigma = 33,799$; F : $m = 336,55$, $\sigma = 17,5$ $R - F$: $m = 68,2$, $\sigma = 38,04$

ние и низкая обеспеченность нормативного значения по пределу текучести. Процент отбраковки по σ_T превышает 17 %. Отношение максимальных значений σ_T к минимальным в представительной выборке составило более двух.

4. 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.

5. 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.

6. Повышение технико-экономических показателей баллонов и их безопасности требует пересмотра нормативной базы, реконструкции производства, перехода на современные материалы и совершенствования оценки технического состояния эксплуатируемых изделий.

1. Рубан А.Г. Инновационное обеспечение лидерства на рынке газовых баллонов // Техн. 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 // Техн. 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. — 240 с.
7. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. — М.: Стройиздат, 1961. — 202 с.