



ОСТАТОЧНОЕ РАСШИРЕНИЕ БАЛЛОНОВ (краткий обзор)

Р. И. ДМИТРИЕНКО, Э. Ф. ГАРФ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В. П. ЧИЖИЧЕНКО

ООО «Кислород сервис». 01103, г. Киев, ул. Киквидзе, 18, а. E-mail: 4288648@ukr.net

Представлен краткий обзор метода испытания поверочным гидравлическим давлением баллонов с определением коэффициента остаточного расширения. Показано, что существующий в Украине регламент переосвидетельствования баллонов высокого давления, находящихся в эксплуатации, не может гарантировать необходимый запас прочности. Для повышения надежности вновь изготавливаемых, и, особенно, длительное время пребывающих в эксплуатации баллонов в последние годы в ряде стран в регламент испытаний баллонов включается методика, предусматривающая определение коэффициента остаточного расширения. Этот коэффициент является интегральной характеристикой технического состояния баллона. Его использование особенно важно для баллонов, изготовленных и эксплуатируемых в Украине, поскольку, как известно, в силу особенностей технологии производства эти баллоны характеризуются значительной разнотолщинностью, большим рассеянием механических свойств и отношением предела текучести к временному сопротивлению, незначительно превышающим 0,5. Вместе с тем в последние годы на рынке Украины все большее распространение получают баллоны зарубежного производства. Технология их производства такова, что при этом практически исключается разнотолщинность, а используемые для изготовления баллонов стали имеют высокие механические свойства. В этой ситуации контроль за надежностью баллонов как при их поставке, так и в процессе эксплуатации необходим. При этом важным показателем является предельно допустимое значение коэффициента остаточного расширения при испытании пробным давлением. Библиогр. 27, рис. 2.

Ключевые слова: баллоны, освидетельствование, коэффициент запаса, остаточное расширение, водяная рубашка, деформация, внутреннее давление, изменение объема, испытания баллонов

При освидетельствовании баллонов после их производства, а также при периодическом освидетельствовании в процессе эксплуатации их нагружают поверочным давлением P_n , которое превышает рабочее P_p в 1,5 раза, а при отношении временного сопротивления к пределу текучести стали, из которой изготовлен баллон, более двух, может быть снижено до 1,25 раза [1]. В ряде стран для некоторых алюминиевых дыхательных баллонов для дайвинга используют коэффициент 5/3.

После такого испытания можно однозначно сказать, что коэффициент запаса прочности баллона не ниже коэффициента превышения поверочного давления над рабочим, а каким будет действительный коэффициент запаса прочности баллона сказать невозможно. Также невозможно оценить и коэффициент запаса по текучести. Такие испытания не позволяют обнаружить изменение геометрии баллона и оценить его остаточную деформацию, если она имела место. А, как известно, чем больше остаточная деформация, тем меньше запас пластичности, большая склонность к хрупкому разрушению, ближе предельное состояние и т. п.

При испытании баллонов поверочным давлением никаких пластических деформаций в их стенках не должно быть, так как баллоны проектируются таким образом, чтобы напряжения в их стенках при таких испытаниях не превышали 85...90 % предела текучести для данной марки

стали [2]. Иногда задаются и коэффициентом запаса по пределу текучести для случая гидравлических испытаний, например, 1,1 [3]. Теоретически правильно сконструированный сосуд никогда не будет демонстрировать остаточного расширения после нагружения поверочным давлением, однако в силу различных отклонений геометрии и механических свойств возможны некоторые незначительные, но измеримые деформации, которые, как считается, не влияют на безопасность [4].

Предельное состояние баллона связывают с давлением, при котором происходит разгерметизация его корпуса – давлением разрушения баллона P_b . Отношение давления разрушения к рабочему является коэффициентом запаса прочности баллона n_b и оно должно быть не ниже установленного соответствующими НД [3, 5–8]. В некоторых случаях задаются коэффициентом запаса по отношению к поверочному давлению, например 1,6 [9].

В последние годы в ряде стран для вновь производимых баллонов, в частности, газовых, с целью повышения надежности такие испытания проводятся с определением коэффициента остаточного расширения K_{op} . По некоторым НД определение этого коэффициента является обязательным [4, 5], по другим, альтернативным [9, 10]. Также устанавливается предельно-допустимое значение коэффициента остаточного расширения $[K_{op}]$, при превышении которого баллон не допускается к эксплуатации. Обычно K_{op} равен 0,1 (10 %) и 0,05



(5 %) – в России [5]. Согласно требованиям Европейских норм [9], для вновь произведенных баллонов, прошедших окончательную термическую обработку, общее и остаточное расширение, если такие определяются, должны быть выбиты вместе с серийным номером баллона.

В США и Беларуси для дыхательных алюминиевых баллонов марки ZAL производства «Luxfer» и «Catalina», используемых для дайвинга, коэффициент остаточного расширения в обязательном порядке определяют и при переосвидетельствовании баллонов. Поверочное давление при этом равно 5/3 рабочего, а $[K_{op}] < 10 \%$. При периодической проверке бесшовных стальных газовых баллонов K_{op} , согласно [11], предлагается определять в альтернативном порядке. В Северной Америке и Европе для композиционных газовых баллонов с алюминиевым, стальным или неметаллическим лайнером при переосвидетельствовании $[K_{op}] < 5 \%$ [12, 13].

Согласно Австралийскому стандарту [14], метод остаточного расширения используется и в полевых условиях для диагностики сомнительных участков газо- и нефтепроводов.

При назначении времени следующего переосвидетельствования баллонов с пропаном, согласно параграфов 173 и 180 раздела 49 Кодекса федеральных правил Департамента США (DOT CFR 49 173, и DOT CFR 49 180), используют дифференцированный подход. При поверочных испытаниях давлением срок проведения следующих испытаний через 7 лет. Если замеряется коэффициент остаточного расширения и при этом он оказывается меньше предельно допустимого – допускается эксплуатация до 12 лет. Если баллон осмотрен только визуально, без проведения гидроиспытаний, допустимый срок эксплуатации не более 5 лет.

Для некоторых типов баллонов, в частности, для дайвинга, на баллоне выбивается его максимально допустимое упругое расширение при поверочном давлении «REE» в миллилитрах. Если при проверке баллона его $K_{op} < 10 \%$, то баллон проходит гидроиспытания. И если при этом упругое расширение меньше максимально допустимого значения, то на баллоне после даты тестирования ставится знак «+», согласно требованиям и процедурам для тиснения знаков «+» и «*», приведенным в работе [15] § 180.209 и § 173.34.

Расчет и назначение максимально допустимых значений для упругого расширения бесшовных баллонов приведен в рекомендациях Ассоциации сжатого газа [16], которые заключаются в том, чтобы при поверочном давлении не были превышены допустимые напряжения в стенке баллона. Максимально допустимые напряжения приведены в работе [15] § 173,302.

Согласно DOT CFR 49 173,302 баллоны, у которых K_{op} после гидроиспытаний меньше 0,1 и упругое расширение меньше предельно допустимого, могут заправляться давлением на 10 % больше рабочего.

Коэффициент остаточного расширения K_{op} определяется как отношение остаточного изменения объема баллона $\Delta W_{ост}$ к полному его изменению под давлением $\Delta W_{полн}$ (рис. 1) — он характеризует степень пластических деформаций в стенке баллона и является интегральным критерием надежности, часто выражается в процентах.

Преимущество метода испытаний на объемное расширение баллонов (ОРБ) перед методом простого нагружения поверочным давлением заключается в том, что он включает в себя выполнение всех требований, касающихся простого нагружения, и в отличие от него дает интегральную характеристику баллону как конструкции в целом. Иными словами он связывает геометрические характеристики баллона, включающие процент овальности, разнотолщинность и т. д. с пределом текучести материала и внутренним давлением в единое целое. Весьма незначительные деформации невозможно обнаружить визуально при простом нагружении поверочным давлением. Чем больше отклонение баллона от идеальной формы, тем большим будет коэффициент остаточного расширения при поверочном давлении.

Можно предполагать, что для вновь производимых баллонов процент остаточной объемной деформации будет тем больше, чем больше отклонение баллона от идеальной формы (овальность по наружному диаметру, разнотолщинность, изогнутость для цилиндрических баллонов и т. д.) и чем больше у него допускаемых нормативной документацией дефектов. Если эксплуатируемый баллон не претерпевает никаких изменений, то при последующей плановой проверке его остаточная объемная деформация должна равняться нулю.

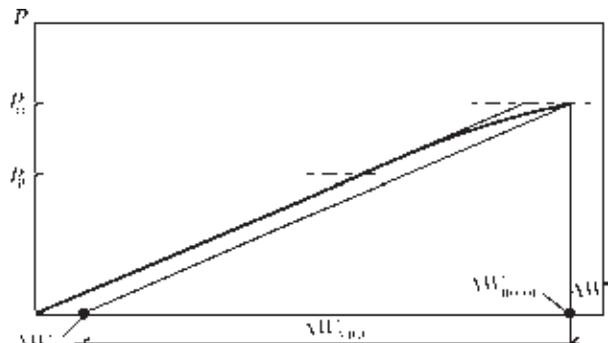


Рис. 1. Определение коэффициента остаточного расширения: P_p, P_n – рабочее и поверочное внутреннее давление; $\Delta W_{полн}$ – полное изменение объема баллона, находящегося под поверочным давлением; $\Delta W_{ост}$ – остаточное изменение объема баллона после сброса поверочного давления до нуля; $\Delta W_{упр}$ – упругое изменение объема баллона при нагружении его поверочным давлением



Каких-либо данных о теоретическом расчете коэффициента остаточного расширения, о выборе предельнодопустимого его значения и его связи с другими параметрами, характеризующими геометрию, работоспособность и надежность баллонов, а также его механические свойства не имеется. Не оговариваются различия между допускаемым коэффициентом остаточного расширения для случая производства и для случая периодической поверки баллонов в процессе их эксплуатации. Также не удалось найти информацию, связанную с процессом накопления остаточного расширения при последующих периодических поверках.

Существует несколько альтернативных схем, по которым можно определять коэффициент остаточного расширения баллонов:

- схема водяной рубашки (используется для баллонов объемом до 260 л). Реализация этой схемы осуществляется погружением баллона в герметически закрываемую емкость, заполненную водой (водяную рубашку), и определением объема воды, вытесненной из водяной рубашки при расширении баллона под действием поверочного давления (полное изменение объема баллона) и объема воды, который не возвратился в водяную рубашку после снятия давления (остаточное изменение объема). Данная схема по сравнению с остальными отличается наибольшей точностью;

- схема прямого расширения (для больших сосудов). Определяется объем воды, закачанной в баллон для достижения поверочного давления, и объем воды, вытесненной из баллона при снижении давления до атмосферного. Остаточную объемную деформацию сосуда определяют по разности объемов воды с учетом ее сжимаемости при температуре окружающей среды;

- с использованием высокоточных весов (для баллонов малого объема). Определяется масса закачанной в баллон воды для достижения поверочного давления и масса воды, вытесненной из баллона при снижении давления до атмосферного. Остаточную объемную деформацию баллона определяют по разности массы воды с учетом ее сжимаемости при температуре окружающей среды.

Следует полагать, что самая высокая точность будет у первой схемы. Ею может быть охвачена и наиболее широкая номенклатура изделий. При испытаниях по остальным двум рассмотренным схемам используются коэффициенты поджатия воды и также возможны ее утечки внутри самого насоса. Разрешается использовать и другие методы, если они отработаны и дают приемлемую точность. Например, в последнее время практикуется схема замены бюретки на специально сконструированную чашу «Bowl» [17], которая устанавливается на весах.

Проведение испытаний по каждой схеме оговариваются специальными процедурами. Например, требования к испытаниям давлением по схемам водяной рубашки и прямого расширения содержатся в работе [15] § 180 и материалах Ассоциации сжатого газа [18]. Процедуры испытаний также оговариваются и в тех НД, где выдвигаются требования к оборудованию.

Первыми нормативными документами с использованием схем водяной рубашки и прямого расширения с указанием требований к оборудованию и методам испытаний являются [19, 20]. В этих документах также приведены и коэффициенты поджатия воды.

Приведенные выше схемы реализуются с помощью соответствующих установок, к которым выдвигаются определенные требования, касающиеся их конструкторского исполнения и точности [11, 20]. На мировом рынке представлены различные специализированные и универсальные стенды, позволяющие определять полную и остаточную объемную деформацию баллонов, некоторые стенды изготавливаются в промышленных масштабах. На некоторых стендах имеется возможность подключения и помещения в водяную рубашку одновременно нескольких баллонов, причем испытываются они последовательно.

При проведении испытаний на остаточное расширение оговариваются скорость нагружения, например, не более 1,0 МПа/с [5] и время выдержки под поверочным давлением (обычно 0,5 мин [9, 20] или 1 мин [5]). При определении полного и остаточного изменения объема баллона без использования водяной рубашки используют методики, описанные в работах [11, 13, 19–21], учитывающие эффект поджатия воды.

Компания «Hydro-Test Products, Inc» (США) промышленно производит широкий спектр оборудования, более 50 предложений, связанного с испытаниями на остаточное расширение различных типов баллонов (www.hydro-test.com). Эта компания занимается и подготовкой кадров по проведению испытаний на остаточное расширение баллонов.

Для поверки различных установок выпускаются калибровочные баллоны, которые должны давать четко определенные расширения при определенных давлениях (как правило, ряд точек с линейной зависимостью) и возвращаться в нуль. Погрешность определения изменения объема должна быть менее 1 % «Hydro-Test Products, Inc».

На рис. 2 приведены несколько установок для испытаний баллонов на остаточное расширение. Например, установка (рис. 2, в) оснащена комплексным программным обеспечением с графическим отображением давления и расширения. Используется для баллонов длиной от 900 до

2000 мм и диаметром от 110 до 410 мм. Производительность 40 баллонов за 8 ч. Доставка из Китая — 100 комплектов в месяц в течение 30 дней. Имеется и аналогичная установка SY-05 на 50 МПа.

Ориентировочный расчет времени, необходимый для выполнения всех операций двумя рабочими по освидетельствованию на установке (рис. 2, з) и окраске одного 40-литрового баллона — 4 ч 10 мин.

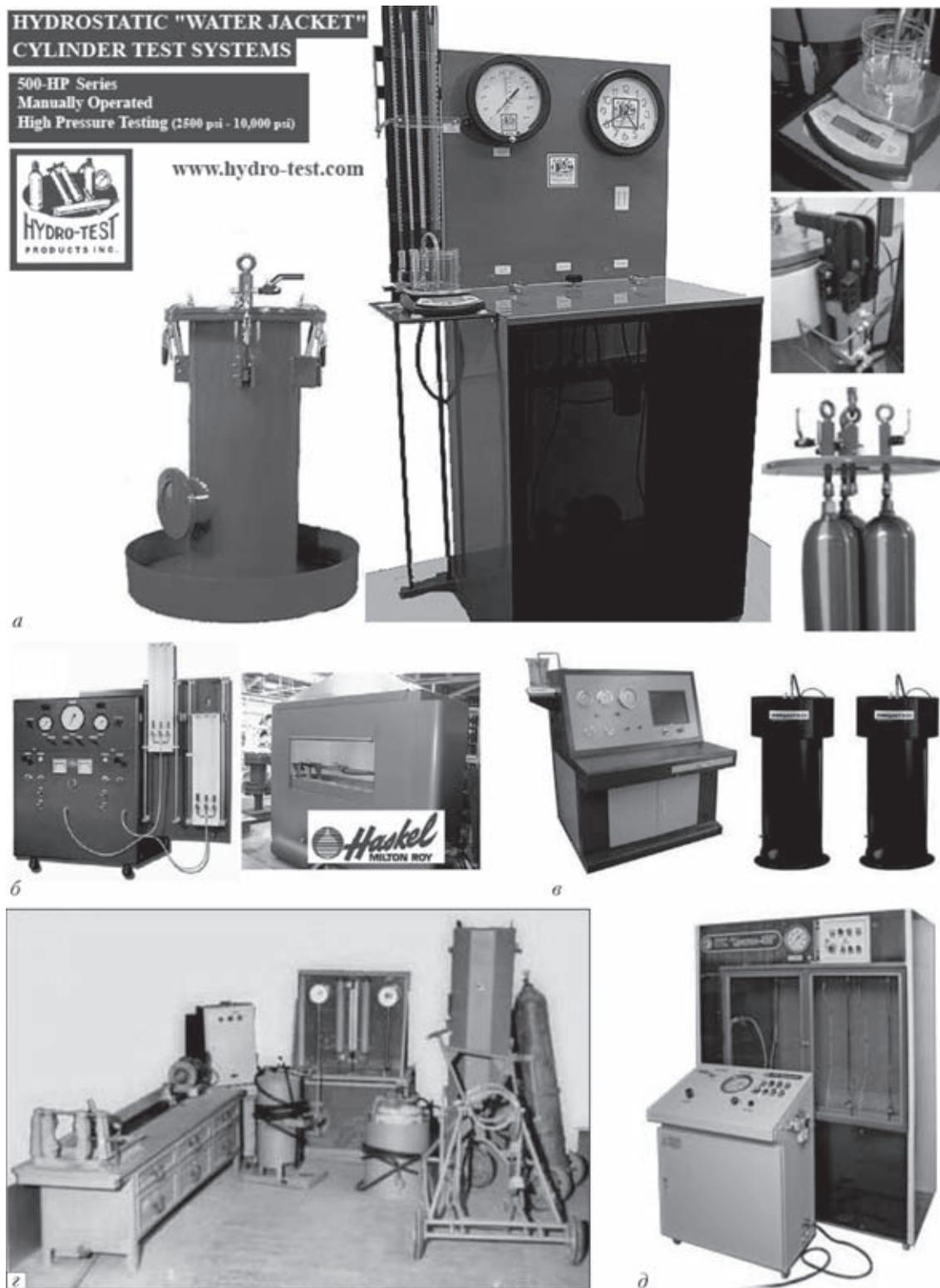


Рис. 2. Установки для гидравлических испытаний баллонов на остаточное расширение: а – установка серии 500-HP («Hydro-Test», США); б – широкопрофильный стенд для испытаний на ОРБ с водяной рубашкой («Haskel Energy Systems Limited», Великобритания); в – двухкамерная установка «водяная рубашка» SHINEEAST SY-04 на 70 МПа (Г. Шаньдун, Китай); з – установка для проверки и опрессовки сосудов высокого давления УПОС-1 (Кизлярский электромеханический завод); д – гидравлическая испытательная установка «Циклон 450» для испытаний баллонов от 2 до 10 л давлением до 45 МПа (ОАО «ПТС2» – объединение «Пожтехсервис», Москва)



Следует отметить гидравлическую испытательную установку «HTG 500» (ОАО «ПТС» – объединение «Пожтехсервис», Москва) для испытания стальных баллонов высокого давления до 50 МПа, с точностью определения объёмного расширения до 1 мл, а также стенд СТ-1 (ООО «Криокомплект», Москва) для освидетельствования и ремонта баллонов вместимостью 40 и 50 л с рабочим давлением до 19,6 МПа.

Метод ОРБ используется для огнетушителей и баллонов для технических газов: кислород, аргон, углекислота, ацетилен, азот и др. объемом 2...50 и более литров. В частности, используется для бесшовных стальных газовых баллонов [9, 11], бесшовных газовых баллонов из алюминиевых сплавов [10, 19, 22], стальных бесшовных и композиционных со стальным лейнером баллонов высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах. Также его можно использовать для баллонов, состоящих из неметаллического лейнера, оболочки из композиционного материала на всей поверхности лейнера и металлических закладных элементов, при этом K_{op} назначает разработчик [5]. Этот метод используется также для композитных газовых баллонов с алюминиевым, стальным или неметаллическим корпусом [12, 13]. Имеются сведения о проведении в США испытаний в водяной рубашке малолитражных пропановых баллонов, имеющих один кольцевой сварной шов [Discovery canal].

В целях защиты населения и снижения риска при эксплуатации баллонов высокого давления Департамент транспорта США (DOT) разработал федеральные правила CFR, раздел 49, для производства, проверки и транспортировки сосудов высокого давления [23]. В них указывается, что несоблюдение требований к гидравлическому оборудованию и методам испытаний влечет за собой крупные штрафы и тюремное заключение. Лица, фальсифицирующие проведение испытаний, в частности, баллонов для дайвинга, а также лица, проводящие необъективное тиснение кодов на баллонах, могут получить до пяти лет лишения свободы и/или штраф в размере \$ 25000, так как это является федеральным преступлением и представляет опасность для общества. Испытательные станции, которые не имеют точного оборудования, либо персонал которых не имеет соответствующих квалификационных удостоверений, могут быть оштрафованы на сумму от \$ 500 до \$ 11000 за каждое нарушение. Разработкой руководящих принципов проверки баллонов для промышленных и медицинских газов, а также обеспечением безопасности их эксплуатации с 1913 г. занимается Ассоциация сжатого газа (CGA).

После производства баллонов, согласно данным [21], при испытании контрольного баллона до разрушения определяют отношение приращения объема баллона в момент разрушения к первоначальному его объему, характеризующему неким образом запас пластичности.

Наряду с указанными выше названиями составляющих K_{op} , в НД также употребляются и другие:

- полное изменение объема (полная объемная деформация, полное объемное расширение, англ. TE - total expansion (общее расширение));

- остаточное изменение объема (остаточная объемная деформация, остаточное объемное расширение, PE – permanent expansion (постоянное расширение));

- упругое изменение объема (EE – elastic expansion (упругое расширение));

- максимально допустимое упругое расширение (REE – rejection elastic expansion).

Все указанные характеристики измеряются в миллилитрах.

Выводы

Из изложенного выше становится понятным, что в отличие от подходов, принятых в Украине, за рубежом используют еще и более информационные критерии к оценке безопасности эксплуатации баллонов высокого давления. И эти дополнительные критерии незначительно усложняют процедуру освидетельствования. Целесообразность использования метода ОРБ к баллонам, эксплуатируемым в Украине, не должно вызывать сомнения по нескольким причинам.

В Украине эксплуатируется большой парк баллонов высокого давления и не секрет, что эти баллоны изготавливались по технологиям, уступающим европейским и американским по многим характеристикам [24, 25].

Многие баллоны эксплуатируются более 30 лет. В ряде случаев они находятся в нормальном состоянии и выдерживают поверочное давление. При более жесткой процедуре переосвидетельствования многие из них могут эксплуатироваться еще значительный срок.

Рассмотренные подходы к оценке надежности баллонов должны использоваться при допуске на рынки Украины баллонов, изготовленных за рубежом.

Испытание баллонов с определением K_{op} открывает дополнительные возможности по оценке их запаса прочности, о чем подробно будет изложено в последующих публикациях.

1. *ПБ 03-576-03*. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
2. *Полтев М. К.* Охрана труда в машиностроении: Уч. – М.: Высш. шк. 1980. – 294 с.



3. *ГОСТ Р 52857.1-2007*. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
4. *ECE/TRANS/WP.15/AC.1/2010/15*. Совместное совещание Комиссии экспертов МПОГ и рабочей группы по перевозкам опасных грузов. Предложения о внесении поправок в МПОГ/ДОПОГ/ВОПОГ (СМГС) в пункте 6.2.3.4.1. – Берн, 22-26 марта 2010 г. (Изменения, касающиеся [2]).
5. *ГОСТ Р 51753-2001*. Баллоны высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах.
6. *НПБ 190-2000*. Техника пожарная. Баллоны для дыхательных аппаратов со сжатым воздухом для пожарных. Общие технические требования. Методы испытаний.
7. *ГОСТ Р 53258-2009* Техника пожарная. Баллоны малолитражные для аппаратов дыхательных и самоспасателей со сжатым воздухом. Общие технические требования. Методы испытаний.
8. *ГОСТ Р ИСО 11439, ISO 11439:2000*. Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения на транспортном средстве природного газа как топлива. Технические условия.
9. *ISO 9809-1:2010(E)*. Gas cylinders – Refillable seamless steel gas cylinders – Design, construction and testing – Part 1: Quenched and tempered steel cylinders with tensile strength less than 1 100 MPa. (Газовые баллоны – Бесшовные стальные газовые баллоны многоразового использования – Проектирование, изготовление и испытания. Часть 1: Баллоны из закаленной и отпущенной стали с прочностью на растяжение менее 1100 МПа).
10. *ISO 7866:1999*. Gas cylinders – Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders – Design, construction and testing. (This standard has been revised by: ISO 7866:2012). (Газовые баллоны – Бесшовные газовые баллоны из алюминиевого сплава многоразового использования. – Проектирование, изготовление и испытания. (Пересмотрен ISO 7866:2012)).
11. *ISO 6406:2005(E)*. Gas cylinders. Seamless steel gas cylinders. Periodic inspection and testing. (Газовые баллоны. Бесшовные стальные газовые баллоны. Периодическая инспекция и испытание).
12. *Guidance for the use, inspection, care and periodic Testing of sci composite cylinders*. Issue 5, July 2010. (Руководство по использованию, проверке, уходу и периодических испытаний баллонов из композитных материалов. Выпуск 5, июль 2010 г.).
13. *ISO 11623:2002*. Transportable gas cylinders – Periodic inspection and testing of composite gas cylinders. (Переносные газовые баллоны. – Периодические проверки и испытания композитных газовых баллонов).
14. *Australian standard AS/NZS 2885.5:2002 Pipelines – Gas and liquid petroleum: Part 5: Field pressure testing*. (Австралийский стандарт. Трубопроводы – газа и жидких нефтепродуктов: Ч. 5. Полевые испытания под давлением).
15. *DOT CFR 49 – U.S. Department of Transportation, Code of Federal Regulations*. (Департамент транспорта США (DOT), кодекс федеральных правил (CFR), раздел 49, для производства, проверки и транспортировки сосудов высокого давления).
16. *CGA C-5: Cylinder Service Life-Seamless Steel High Pressure Cylinders*. (Compressed Gas Association, pamphlet C-5). (Ассоциация сжатого газа, брошюра C-5: Баллоны. Срок службы бесшовных стальных баллонов высокого давления).
17. *FSS Fire System Services SA Pty Ltd. National Hydro Cylinder Testing Services* (Австралия).
18. *CGA pamphlet C-1-2009. Methods for pressure testing compressed gas cylinders*. (Методы испытания под давлением баллонов со сжатым газом).
19. *BS 5430-3:1990*. Periodic inspection, testing and maintenance of transportable gas containers (excluding dissolved acetylene containers). – Part 3: Specification for seamless aluminium alloy containers of water capacity 0.5 litres and above. (Периодическая проверка, испытания и обслуживание переносных газовых баллонов (за исключением баллонов растворенного ацетилена). Ч. 3. Спецификация для бесшовных баллонов из алюминиевых сплавов вместимостью 0,5 л и выше). Заменен на BS EN 1802:2002.
20. *GB 9251-88, GB/T 9251-1997 и GB/T 9251-2011*. Баллоны. Методы гидростатических испытаний газовых баллонов (Китай). (Относятся к бесшовным стальным и из алюминиевых сплавов газовым баллонам).
21. *GB 15385-94*. Баллоны. Методы испытания гидравлическим давлением до разрушения (Китай).
22. *BS EN 1802:2002*. Transportable gas cylinders. Periodic inspection and testing of seamless aluminium alloy gas cylinders. (Переносные газовые баллоны. Периодические проверки и испытания бесшовных газовых баллонов из алюминиевых сплавов).
23. *Bob Sheridan President of UDT International. Hydrostatic Cylinder Testing 101*.
24. *ГОСТ 949-73*. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_p \leq 19,6$ МПа (200 кгс/см²).
25. *Надежность и экономичность производимых в Украине баллонов высокого давления для технических газов / Э. Ф. Гарф, Р. И. Дмитриенко, А. А. Перепечай и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2012. – № 12. – С. 36–41.*

A brief review is given of the method of bottle testing by reference hydraulic pressure with determination of residual expansion coefficient. It is shown that re-examination procedure of high-pressure bottles in service, applied in Ukraine, cannot guarantee the required strength margin. To increase the reliability of new bottles, and, particularly, bottles in long-term service, over the recent years in a number of countries bottle testing procedure has included a procedure, envisaging determination of residual expansion coefficient. This coefficient is an integral characteristic of bottle technical condition. Its application is particularly important for bottles, made and operating in Ukraine, as in view of a number of features of manufacturing technology these bottles are known to be characterized by considerable difference in thickness, large scatter of mechanical properties and ratio of yield point to tensile strength slightly higher than 0.5. On the other hand, over the recent years foreign-made bottles are becoming ever wider accepted in the Ukrainian market. Their manufacturing technology is such that difference in thickness is practically eliminated, and steels used for bottle manufacturing have high mechanical properties. In such a situation monitoring bottle reliability is required, both at their delivery and in service. Here an important parameter is limit admissible value of the coefficient of residual expansion at trial pressure. References 27, Figures 2.

Keywords: bottles, examination, strength margin, residual expansion, water jacket, deformation, inner pressure, volume change, testing

Поступила в редакцию
07.10.2013