



## ОСТАТОЧНОЕ РАСШИРЕНИЕ БАЛЛОНОВ. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Инж. Р. И. Дмитриенко, ([dri1@ukr.net](mailto:dri1@ukr.net)), асп. Масючок О. П., Инж. А. В. Быков.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua).

**Резюме:** Представлены некоторые результаты проводимых в институте электросварки им. Е. О. Патона испытаний цилиндрических баллонов внутренним гидравлическим давлением до разрушения с определением изменения объемных характеристик. Показана устойчивая связь между коэффициентом запаса прочности и отношением остаточного объемного расширения к полному. Предложена идея назначения предельно-допустимого коэффициента остаточного расширения в зависимости от требуемого коэффициента запаса прочности. Показана реальность оценки технического состояния баллонов с использованием степени изменения их остаточного объема. Исследования проводятся в рамках 7-й рамочной программы ЕС «INNOPIRES». Библиогр. 15, рис. 8, табл. 1.

**Ключевые слова:** баллоны, поверка, коэффициент запаса прочности, остаточное расширение, водяная рубашка, деформация, внутреннее давление, изменение объема, испытания баллонов.

### 1. Введение

Коэффициент запаса прочности баллона ( $n_B$ ) определяется как отношение давления разрушения баллона ( $P_B$ ) к рабочему давлению ( $P_R$ ) и он должен быть не ниже установленного соответствующими нормативными документами [1-5]. Разрушающее давление, определяющее предельное состояние баллона, может отличаться от баллона к баллону, даже принадлежащих одной партии, в силу отклонения геометрических параметров и рассеяния механических свойств, а также в силу наличия возможных дефектов полученных во время производства либо при эксплуатации. Фактическое давление разрушения можно получить только при гидравлическом испытании баллона до предельного состояния. В процессе эксплуатации, коэффициент запаса прочности конкретного баллона может несколько снижаться. Степень снижения зависит от многих факторов, связанных с условиями эксплуатации, продолжительностью эксплуатации и т.д.

Баллоны, после их производства, а также в процессе периодического их освидетельствования, подвергаются гидравлическим испытаниям внутренним поверочным давлением, ( $P_{II}$ ), которое превышает рабочее в 1,25 ... 3 раза, в зависимости от материала и конструкции баллонов. При таком нагружении можно однозначно сказать, что коэффициент запаса прочности поверенного баллона не ниже превышения поверочного давления над рабочим, а каким в действительности будет этот коэффициент сказать невозможно. Также невозможно оценить степень остаточных деформаций, если такие имели место. Весьма незначительные деформации невозможно обнаружить визуально. А, как известно, чем остаточные деформации больше, тем ближе предельное состояние, (см. рис. 1). Поэтому в последние годы с целью контроля остаточных деформаций при поверочных испытаниях стали использовать величины полного изменения объема баллона при поверочном давлении ( $\Delta W_{полн}$ ), и остаточного его

изменения ( $\Delta W_{ост}$ ) после сброса поверочного давления до нуля.

Полное изменение объема связано с геометрическими характеристиками конкретного баллона, остаточное изменение - с величиной пластических деформаций, если они имели место в стенке баллона, при поверочном давлении. В силу того что геометрические характеристики баллонов принадлежащих одной партии имеют некоторый разброс, то и  $\Delta W_{полн}$  у них будет неодинаково, не говоря уже о баллонах принадлежащих различным партиям или вообще типам и технологиям производства. Поэтому, с целью единообразия берут отношение остаточного изменения объема баллона, к полному, и называется это отношение коэффициентом остаточного расширения ( $K_{ор}$ ). Этот коэффициент характеризует степень пластических деформаций в баллоне, и является интегральным критерием технического состояния, часто выражается в процентах. По всей вероятности, чем больше отклонение баллона от идеальной формы, и ниже предел текучести материала, тем большим будет коэффициент остаточного расширения при поверочном давлении. В силу разнотолщинности в пределах одного баллона, и локализации возможных дефектов, остаточная деформация может быть и неравномерной. При последующем нагружении баллона поверочным давлением, например при следующей поверке, если с ним не произошло никаких изменений, то коэффициент остаточного расширения должен равняться нулю.

В нормативных документах, регламентирующих проведение испытаний с определением коэффициента остаточного расширения, указываются предельно-допустимые его значения, они составляют 5 и 10% [2, 6, 7]. Для некоторых типов баллонов этот коэффициент должен назначать сам разработчик [2], при этом не указывается, чем он должен руководствоваться.

Информацию о методах определения коэффициента остаточного расширения, оборудовании, с помощью которого эти методы реализуются, и дифференцированный подход к назначению сроков последующих поверок баллонов можно найти из обзора нормативных документов, приведенным в статье: «Остаточное расширение баллонов (краткий обзор)» [8]. В этой статье также указаны типы

баллонов, для которых уже используется метод остаточного расширения. Данный метод пока широко не применяется к сварным баллонам. При проведении испытаний на остаточное расширение скорость нагружения должна быть менее максимально-допустимой и время выдержки под поверочным давлением должно быть более минимально-допустимого, все это оговаривается в соответствующих НД.

На рис. 1 приведена типовая зависимость между изменением объема и внутренним давлением в баллоне, экспериментальные данные приведены на рис. 6.

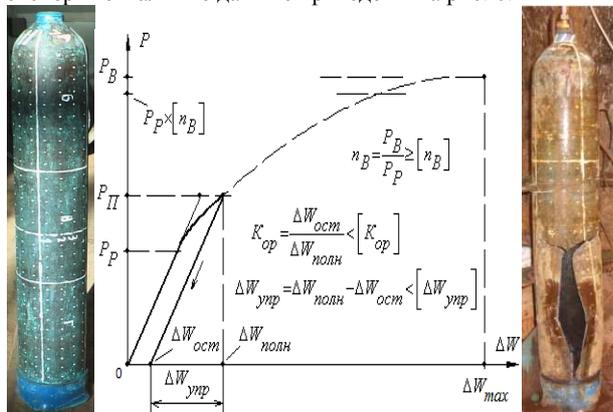


Рис. 1 К определению объемного расширения и коэффициента остаточного расширения баллона.

$P_P, P_П, P_B$  - внутреннее рабочее, поверочное и давление, при котором бы баллон разрушился;  $\Delta W_{полн}$  - полное изменение объема баллона находящегося под поверочным давлением;  $\Delta W_{ост}$  - остаточное изменение объема баллона после сброса поверочного давления до нуля;  $\Delta W_{уст}$  - упругое изменение объема баллона при нагружении его поверочным давлением;  $\Delta W_{max}$  - максимальное изменение объема баллона при возможном доведении его до разрушения. Все указанные характеристики изменения объема измеряются в миллилитрах.

В литературных источниках не удалось найти информацию, связанную с идеологией назначения предельно-допустимого коэффициента остаточного расширения  $[K_{ор}]$  приведенного в нормативных документах. В самих НД нет различия между предельно-допустимым коэффициентом остаточного расширения для случая производства и для случая периодической поверки баллонов в процессе их эксплуатации. Также не оговорен процесс накопления остаточного расширения от одной периодической поверки до другой. Но очевидно, что  $K_{ор}$  конкретного баллона, определяемый после его производства, должен быть связан с его геометрическими параметрами и механическими свойствами. А, определяемый в процессе периодических освидетельствований, проводимых через определенный промежуток времени, с влиянием эксплуатации.

В силу того, что баллоны изготавливаются по различным технологиям, и из различных материалов, у них будут различными допуски на отклонения геометрических форм и рассеяния механических свойств. Что касается разнотолщинности, даже в пределах одного баллона, так этот параметр во многих случаях вообще не оговаривается. Также учитывая, что  $K_{ор}$  используется для оценки дальнейшей эксплуатации и различных композиционных баллонов, имеющих стальной, алюминиевый и даже неметаллический корпус, и вообще охватывает спектр баллонов с различными нормативными коэффициентами запаса прочности, то одинаковый для всех максимально допустимый коэффициент остаточного расширения может не отвечать критериям надежности.

Учитывая тот факт, что некоторые баллоны эксплуатируются уже значительно продолжительный срок,

необходимо обеспечить максимально безопасную дальнейшую эксплуатацию этих баллонов и своевременный вывод из эксплуатации баллонов, не отвечающих объективным критериям. Использование оценки изменения объемных характеристик могло бы помочь в решении данных задач.

## 2. Результаты и дискуссия

В институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины ведутся исследовательские работы по установлению взаимосвязей между  $K_{ор}$  и другими параметрами баллона, характеризующими его работоспособность и надежность, а также по объективному назначению предельно-допустимого коэффициента остаточного расширения баллонов при нагружении их поверочным внутренним гидравлическим давлением.

С этой целью была разработана и создана опытная установка «водяная рубашка», позволяющая проводить испытания с определением остаточного расширения баллона, для экспериментального подтверждения теоретических предпосылок и получения фактической зависимости между коэффициентом остаточного расширения баллона и коэффициентом запаса прочности. Установка позволяет так же определять коэффициент поджатия среды, с помощью которой проводятся гидроиспытания. Компоновка и изготовление установки «водяная рубашка» не являются принципиально сложными. А если данный метод по определению коэффициента остаточного расширения использовать для четко конкретных задач, то схема установки может упрощаться. Испытываемый баллон помещается в герметически закрываемый, заполненный водой резервуар, (водяную рубашку), вода из которого при нагружении баллона внутренним давлением вследствие его расширения, вытесняется в оттарированную бюретку, по которой и определяется полное изменение объема. При сбросе давления в баллоне часть воды из бюретки может не возвратиться в водяную рубашку - остаточное изменение объема.

Существует несколько схем, по которым можно определять коэффициент остаточного расширения баллонов. Наибольшей точностью обладает схема, реализуемая с помощью водяной рубашки. Она используется преимущественно для малолитражных баллонов. Средствами ее и проводились представляемые исследования. При использовании других же схем необходимо учитывать эффект поджатия воды [9 - 13].

На рис. 2, приведена принципиальная схема и фото установки: «Водяная рубашка», реализованной в ИЭС им. Е. О. Патона, для испытаний баллонов на остаточное расширение. На рисунке также изображен для примера, кислородный 40-ка литровый испытываемый баллон, изготовленный по ГОСТ 949-73.

Исследования проводятся на 40-ка литровых кислородных баллонах изготовленных по ГОСТ 949-73. ( $P_P=14,7$  МПа,  $P_П=1,5P_P=20,05$  МПа,  $[n_B]=2,6$ ). Для более 30 баллонов была замерена толщина стенки, порядка 400 точек замеров для каждого. Девять баллонов испытаны внутренним давлением до разрушения. Два баллона прошли испытания в водяной рубашке. Мариупольским металлургическим комбинатом представлены данные по механическим свойствам баллонов после их производства. Рассматриваемые баллоны имеют большую разнотолщинность стенки, достигающую 30%, т.к. баллоны изготавливались из горячедеформированных труб, и большой заброс по механическим свойствам стали [14]. Баллоны с одной стороны имеют запас прочности, значительно превышающий нормативные требования (2,6), с другой стороны, завышенный запас прочности исследованных 40-ка литровых баллонов достигается за

счет увеличения минимальной толщины стенки, что в сочетании с неравномерностью толщины стенки по сечению приводит к значительному утяжелению баллона и снижению его технологических качеств.

Экспериментальные зависимости приведены для баллона № I изготовленного в 1963 г. Для баллона № II, изготовленного в 1956, зависимости аналогичны.

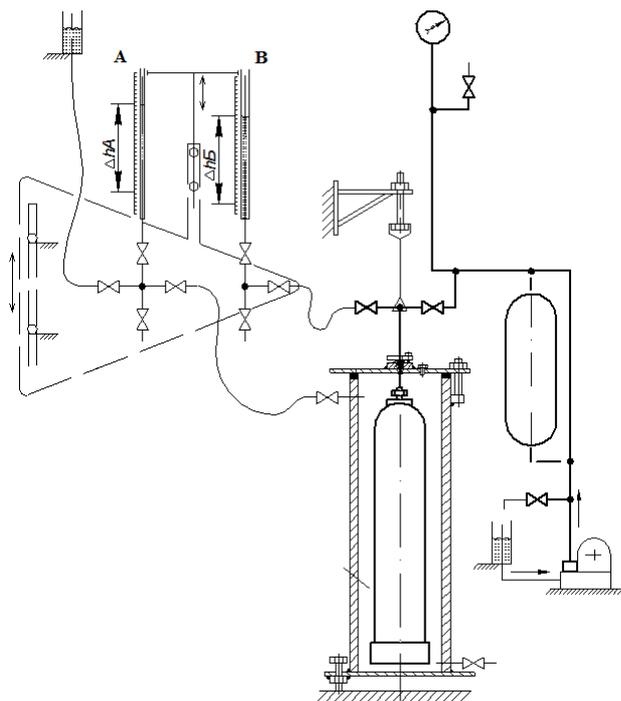


Рис. 2 Принципиальная схема и фото установки: «Водяная рубашка», реализованной в ИЭС им. Е. О. Патона, для испытаний баллонов на остаточное расширение. (А В - бюретки).

Таблица 1 Данные по кислородным баллонам I и II.

		I	II
Год выпуска		1963	1956
Срок эксплуатации, лет		46	57
Средняя толщина стенки, мм	$s_o$	8,43	8,191
Среднеквадратическое отклонение толщины стенки, мм	$\sigma$	0,266	0,308
Наружный диаметр, мм	$D_n$	219,84	220,78
Первоначальный объем, л	$V_o$	39,255	41,04
Изменение объема баллона при 22 МПа, см <sup>3</sup>	$\Delta W$	99,2	109
Закачиваемая насосом вода при 22 МПа, см <sup>3</sup>	$\Delta W_H$	498,2	531
Давление фиксации остаточного расширения, МПа	$P_{кор}$	25,7	26,6
Давление полной текучести, МПа	$P_T$	35,8	36,3
Разрушающее давление, МПа	$P_B$	57,5	59,61
Коэффициент запаса прочности	$n_B$	3,91	4,06

На рис. 3 приведены зависимости объемного расширения баллона № I и количества накачиваемой в него воды от внутреннего давления. В упругой области работы, наблюдаются линейные зависимости, а результаты испытаний совпадают с результатами расчетов для идеально цилиндрической трубы с днищами, объемом, равным объему баллона, и толщиной стенки равной средней по баллону. Количество накачиваемой насосом воды в баллон тоже легко рассчитывается с учетом ее поджатия. Экспериментально найденный изотермический коэффициент объемного сжатия воды совпадает с приведенным в литературных источниках, он зависит от давления и температуры.

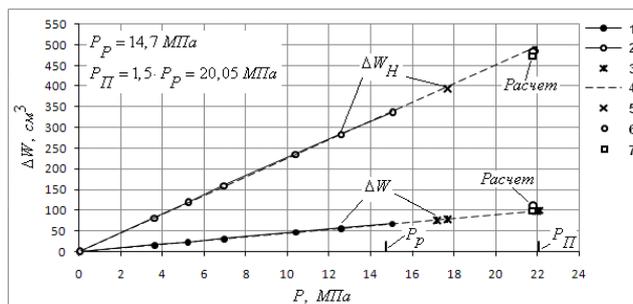


Рис. 3 Результаты упругих испытаний баллона I. Изменение наружного объема баллона при нагружении до рабочего давления - 1, до поверочного - 3, объем

накачанной насосом воды в баллон при нагружении до рабочего давления - 2, до поверочного - 5, линейные аппроксимации изменения наружного объема и объема накачанной насосом воды в баллон - 4 ( $P=22$  МПа,  $\Delta W=99,2$  см<sup>3</sup>,  $\Delta W_H=498,2$  см<sup>3</sup>), расчетные значения с учетом осевой деформации и без учета - 6, 7.

Баллоны I и II нагружались внутренним давлением этапами, давление от этапа к этапу возрастало, после каждого этапа давление сбрасывалось до нуля. В упругой области и в начале пластических деформаций испытания проводились в водяной рубашке, а на этапах близких к разрушению вне ее. В итоге баллоны были доведены до разрушения. Согласно требованиям к форме и границам разрыва, указанным в ISO [6], испытанные нами, гидравлическим давлением до разрушения баллоны, разрушились хрупко, что касается и испытаний образцов Шарпи вырезанных из баллонов. Согласно теории пластичности [15] процесс пластического деформирования потеряет устойчивость, когда давление в баллоне перестает расти. Из рис. 4 видно, что в области пластических деформаций, с увеличением внутреннего давления в баллоне скорость его роста замедляется и приближается к нулю. Скорость подачи воды насосом в баллон близка к постоянной. Диаграмма нагружения, (зависимость: давление - время), на промежутке глубокой пластики хорошо аппроксимируется уравнением второй степени с вершиной близкой к точке разрушения. Скорость изменения давления при этом падает по линейному закону, и равна нулю там, где наблюдается вершина аппроксимирующей параболы.

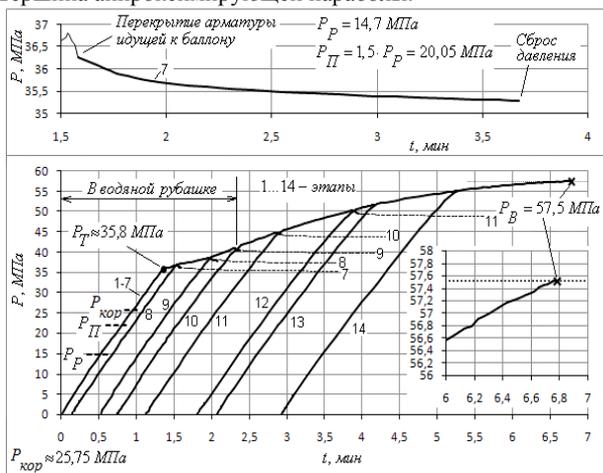


Рис. 4 Диаграмма поэтапного нагружения баллона I внутренним давлением вплоть до его разрушения.

На рис. 4 приведена диаграмма поэтапного нагружения исследуемого баллона до разрушения, где приведены рабочее и испытательное при поверке давления, давление при котором  $K_{op}$  стал отличным от нуля, и давление полной текучести баллона. Сначала нагружения проводились в водяной рубашке, а затем, с целью сохранности, вне ее. Когда баллон находился в водяной рубашке,  $K_{op}$  определялся для каждого этапа, и пересчитывался таким образом, как если бы нагружение производилось за один раз, см. рис. 5.

Интересно также отметить, что после остановки насоса, баллон продолжал некоторое время расширяться, что влекло за собой падение давления. Причем зависимость давления от расширения - линейная, что логично, если нет утечек. Такой эффект стал наблюдаться после того, как  $K_{op}$  стал отличным от нуля - область пластических деформаций. Для расчетов и построения диаграмм бралось максимальное давление этапа.

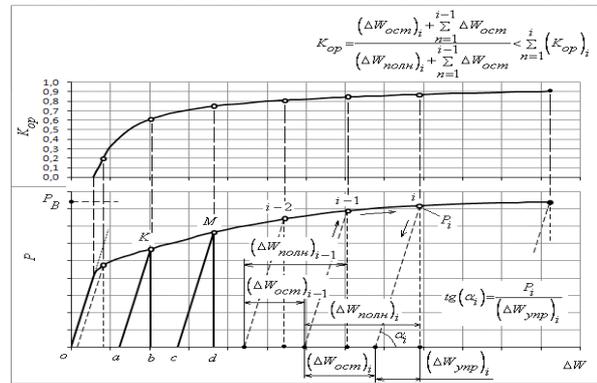


Рис. 5 Принципиальная схема пересчета  $K_{op}$  на промежуточном этапе.

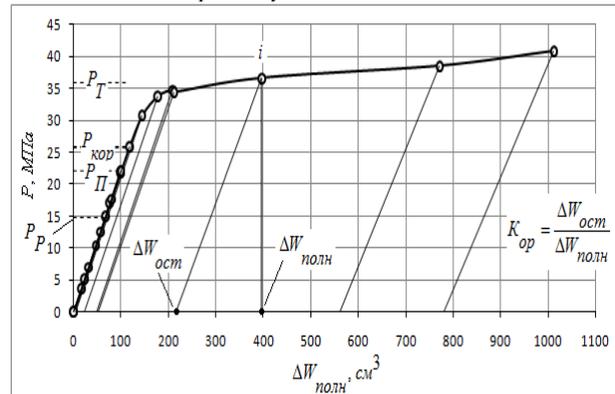


Рис. 6 Экспериментальная зависимость давления и действительного полного расширения баллона I, полученная в водяной рубашке.

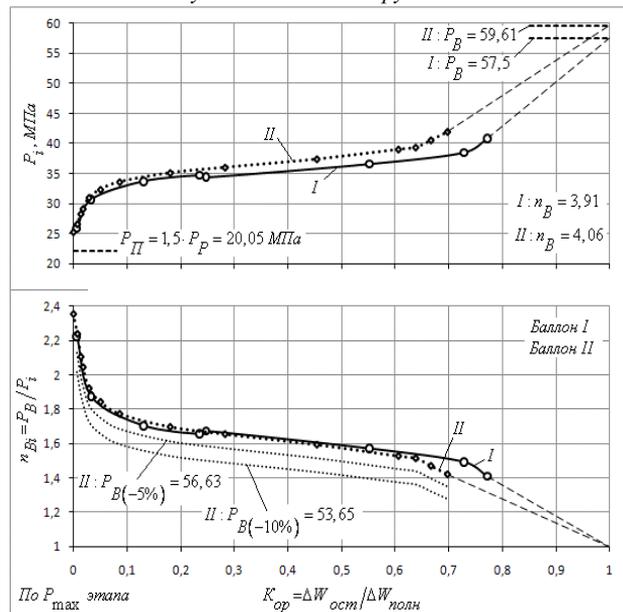


Рис. 7 Экспериментальные данные по баллонам I и II.

На рис. 7 -  $K_{op}$  - давление, видно, что  $K_{op}$  стал отличным от нуля при давлении немногим больше, чем поверочное, но меньшим чем давление полной текучести баллона - это свидетельство влияния в первую очередь разнотолщинности.

По предложению Э. Ф. Гарфа (ИЭС), коэффициент запаса прочности для каждого этапа нагружения определялся как давление разрушения баллона, отнесенное к давлению, достигнутому на этапе. И такой коэффициент запаса прочности ставился в соответствие с коэффициентом остаточного расширения баллона, на данном этапе. В пределе эта зависимость стремится к единице.

Видно, что  $K_{op}$  при упругом нагружении баллона равен нулю, наиболее чувствительный он, на начальных этапах пластической деформации, а затем слабо реагирует на дальнейшую деформацию, что понятно из определения этого коэффициента.

На рис. 7 также приведены результаты испытания баллона № II. Хотя давление разрушения для него оказалось выше, тем не менее, зависимость запаса прочности от коэффициента остаточного расширения практически совпала с аналогичной зависимостью для баллона № I. На рис. 7 приведены случаи, если бы давление разрушения баллона II оказалось на 5 или на 10 % ниже. Баллоны выбирались случайным образом, и разрушились от внутреннего давления вследствие истощения несущей способности металла - скорость роста давления в предельном состоянии была близкой к нулю. При умножении ординат зависимости коэффициента запаса прочности от  $K_{op}$  на полтора, получаем диаграмму, для случая проверки баллона полуторным давлением. Т.е. чем большее остаточное расширение покажет баллон при его переосвидетельствовании, тем меньший у него будет коэффициент запаса по прочности. По всей видимости, определяющие характеристики этой диаграммы будут слабо меняться от баллона к баллону, при условии, если они имеют одинаковый механизм достижения предельного состояния. А это справедливо, если баллоны не имеют расслоений, закатов, и прошли визуальный контроль.

Для учета особенностей технологии производства, используемых материалов, условий эксплуатации и регламента переосвидетельствования баллонов высокого давления для технических газов, разрабатывается методика испытаний поверочным давлением, позволяющая обеспечивать задаваемый нормативными требованиями коэффициент запаса прочности при освидетельствовании баллонов после их производства, а также при периодическом их переосвидетельствовании. Для повышения надежности вновь изготавливаемых, и, особенно, длительное время пребывающих в эксплуатации баллонов необходимо гарантировать нормативный запас прочности каждого конкретного баллона, не разрушая его. Зависимость коэффициента запаса от остаточного расширения однотипных баллонов, должна по всей вероятности устанавливаться экспериментально по нескольким специально отобранным баллонам, например, для которых отношение внутреннего объема к массе максимально, которые затем доводятся до разрушения по специальной технологии.

После разрушения баллона № I внутренним давлением, из зоны, не подвергшейся пластическим деформациям - месте насадки башмака, были вырезаны и испытаны на растяжение образцы в кольцевом направлении. Имея диаграмму растяжения  $\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}$ , ее можно перестроить в действительную диаграмму деформирования по зависимостям:

$\epsilon_i = \ln(1 + \bar{\epsilon}), \sigma_i = \bar{\sigma}(1 + \bar{\epsilon})$ , см. рис. 8. Внутреннее давление (P), интенсивности напряжений ( $\sigma_i$ ) и деформаций ( $\epsilon_i$ ) можно связать уравнением:

$$P = \frac{2s\sigma_i}{\sqrt{3}r} = \frac{2s_0}{\sqrt{3}r_0} \cdot \frac{\sigma_i}{e^{\sqrt{3}\epsilon_i}}$$

где  $s_0$  - среднее значение толщины стенки в первоначальном состоянии,  $r_0$  - радиус средней поверхности до пластических деформаций. На рис. 8 приведены расчетные зависимости и результаты, полученные посредством замеров периметров баллона между этапами.

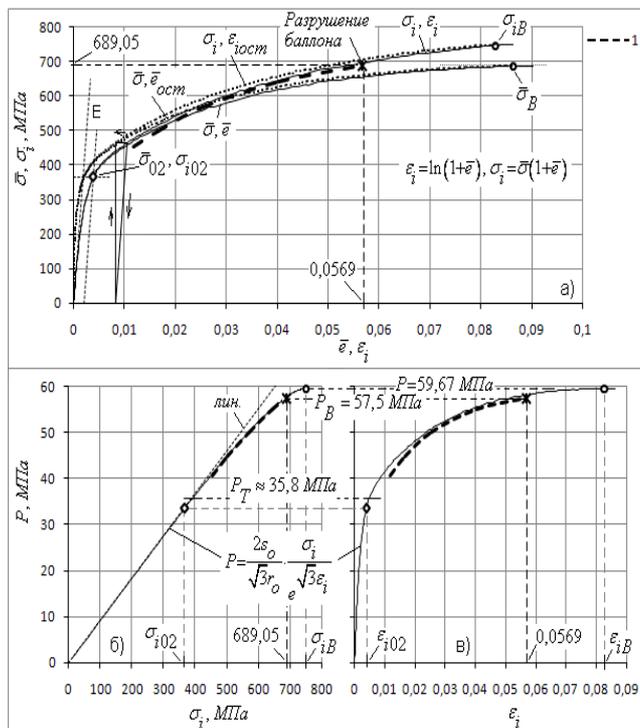


Рис. 8 Зависимость внутреннего давления в баллоне I от интенсивностей напряжений и деформаций построенная по действительной диаграмме деформирования (кольцевое направление), и по результатам замеров изменения периметра - I.

Сравнением упругого объемного расширения элемента трубы с днищами, до установки на него бандаж по всей длине, и после установки, можно определять степень снижения деформаций в стенке трубы и эффективную толщину бандаж в пересчете на материал трубы.

В процессе поиска взаимосвязей между коэффициентом остаточного расширения баллона и другими параметрами, характеризующими его работоспособность и надежность, были решены следующие задачи:

- аналитическое построение эпюр изгибающих моментов, растягивающих и перерезывающих усилий и нахождение напряжений, в случае упругого нагружения внутренним давлением трубы с днищами имеющей эллиптическое поперечное сечение;
- отношение давлений начала текучести эллиптической трубы с днищами и идеальной, в зависимости от процента овальности;
- теоретическое построение диаграммы, зависимости коэффициента запаса прочности от коэффициента остаточного расширения идеальной трубы с днищами по диаграмме растяжения материала, экспериментальное ее подтверждение;
- экспериментальное определение изотермического коэффициента объемного сжатия жидкости, и сравнение его с литературными данными;
- аналитическая и экспериментальная проработка равномерных упругих, пластических и остаточных деформаций идеального баллона, при нагружении его медленно повышающимся внутренним давлением вплоть до его разрушения;
- нахождение аналитической взаимосвязи между коэффициентом остаточного расширения и равномерными деформациями идеальной трубы с днищами, экспериментальное ее подтверждение, и т.д.

### 3. Выводы

1. Испытания баллонов поверочным давлением не дают достаточно полного представления об их надежности в эксплуатации. Такие испытания позволяют лишь утверждать, что запас прочности у баллонов прошедших испытания не менее чем превышение поверочного давления над рабочим. Однако этого недостаточно для гарантии безопасности эксплуатации.

2. Теоретические исследования показали, что остаточное расширение баллона может служить интегральной характеристикой его надежности. Для учета особенностей технологии производства используемых материалов и условий эксплуатации, зависимость коэффициента запаса от остаточного расширения баллона, должна определяться экспериментально.

3. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить испытания баллонов внутренним давлением с определением коэффициента остаточного расширения, характеризующего степень пластических деформаций в стенке баллона.

4. Проведены экспериментальные исследования на установке и установлена взаимосвязь между степенью пластической деформации в стенке баллона и коэффициентом запаса прочности.

5. Разрабатывается методика, позволяющая по результатам испытаний поверочным давлением и измерению коэффициента остаточного расширения баллона устанавливать его истинный запас прочности и производить отбраковку баллонов по уровню их надежности.

6. Дано теоретическое обоснование реальности оценки технического состояния баллона через интегральный критерий - коэффициент остаточного расширения баллона.

В целом, метод ОРБ дает интегральную характеристику баллону как конструкции, и предоставляет реальную возможность оценки технического состояния баллонов как на стадии их производства, так и на стадии их периодического освидетельствования.

### 4. Литература

1. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
2. ГОСТ Р 51753-2001. Баллоны высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве

моторного топлива на автомобильных транспортных средствах.

3. НПБ 190-2000. Техника пожарная. Баллоны для дыхательных аппаратов со сжатым воздухом для пожарных. Общие технические требования. Методы испытаний.

4. ГОСТ Р 53258-2009. Техника пожарная. Баллоны малолитражные для аппаратов дыхательных и самоспасателей со сжатым воздухом. Общие технические требования. Методы испытаний.

5. ГОСТ Р ИСО 11439, ISO 11439:2000. Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения на транспортном средстве природного газа как топлива. Технические условия.

6. 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.

7. ISO 7866:1999(E). Gas cylinders - Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders - Design, construction and testing. (This standard has been revised by: ISO 7866:2012).

8. Остаточное расширение баллонов (краткий обзор) / Р. И. Дмитриенко, Э. Ф. Гарф, В. П. Чижиченко // Техн. диагностика и неразрушающий контроль . - 2014. - № 1. - С. 23-28. - Библиогр.: 25 назв. - рус. УДК 620.19.30.

9. ISO 6406:2005(E). Gas cylinders. Seamless steel gas cylinders. Periodic inspection and testing.

10. ISO 11623:2002(E). Transportable gas cylinders - Periodic inspection and testing of composite gas cylinders.

11. 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. BS EN 1802:2002.

12. GB 9251-88, GB/T 9251-1997 и GB/T 9251-2011. Methods for hydrostatic test of gas cylinders, (China).

13. GB 15385-94. Method for hydraulic burst test of gas cylinders, (China).

14. 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.

15. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1975. - 400 с. с ил.