

RZ DRI - 050417		
Начало работы над материалом	Первая публикация в сети	Последние исправления
январь 2017 г.	05.04.2017 г.	06.09.2018 г.
Примечания: рукопись. Размещение: http://www.dri1.cc.ua/RZ.htm . Резервное размещение: _____. Размещение ссылки: «Новые идеи и гипотезы». Техника. http://new-idea.kulichki.net .		
		Страниц: 27

u[↑]a

Рабочая записка:

Из опыта проведения гидравлических испытаний сосудов внутренним давлением.

Ведущий инженер-технолог ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев, Р. И. Дмитриенко,
 E-mail: dri1@ukr.net.

Ключевые слова: *гидроиспытания, баллон, сталь, внутреннее давление, поверка, ресивер, деформации, изменение объема, бюретка, поджатие, разрушение.*

Представлены некоторые особенности при проведении гидравлических испытаний сосудов внутренним давлением. Приводятся некоторые показательные диаграммы нагружения внутренним давлением во времени. Показаны влияния ресивера, а также поджатия воды и имеющегося воздуха в системе на диаграммы нагружения. Приведен принцип определения погрешности метода измерений изменения объема баллонов при использовании фиксированной бюретки. Результаты отражают практический опыт. Библиогр. 3, рис. 19.

Введение.

Гидравлические испытания внутренним давлением являются, как правило, заключительной стадией технического освидетельствования сосудов давления. Процедуры испытаний указаны в соответствующих нормативных документах (НД). Требования к скоростям нагружения внутренним давлением, времени выдержки под давлением и т.п. на разные типы баллонов могут существенно различаться. При гидроиспытаниях также оговаривается температура воды.

В целом, гидроиспытания можно разделить на несколько основных типов.

1. Нагружение поверочным давлением и выдержка под этим давлением некоторое время. Затем для осмотра объекта испытаний, давление сбрасывается либо до рабочего, либо до нуля. Если осмотр производился при рабочем давлении, то после осмотра оно сбрасывается до нуля. В некоторых случаях при испытаниях поверочным давлением определяют полное и возможное остаточное изменение объема баллона. Режимы: максимально-допустимая скорость нагружения, допуск на выдерживаемое давление, время выдержки.

2. Нагружение возрастающим давлением вплоть до разрушения объекта испытаний. Режимы: максимально-допустимая скорость нагружения в упругой и пластической областях.

Иногда после достижения требуемого коэффициента запаса прочности давление выдерживают некоторое время, а затем продолжают нагружение до разрушения.

3. Нагружения переменным во времени давлением. Либо до образования циклической трещины, либо заданное количество циклов, с последующим нагружением возрастающим давлением вплоть до разрушения объекта испытаний. Режимы: максимально-допустимая частота нагружения, максимальное и минимальное давление с допусками. Обычно циклические испытания проводят рабочим или поверочным давлением.

Первому виду гидроиспытаний, как правило, подвергаются все новые баллоны, и все баллоны, проходящие периодическую поверку. Целью испытаний поверочным давлением является проверка прочности баллона. Второй и третий вид, приводят к разрушению объекта испытаний и проводятся для некоторых, выбранных из партии баллонов. Обычно эти испытания проводят для новых баллонов, но в некоторых случаях и для баллонов после длительного срока их эксплуатации. Как правило, перед испытаниями 2-го и 3-го вида, баллон подвергается испытаниям 1-го вида. Не останавливаясь на нормативных требованиях, рассмотрим только некоторые физические принципы нагружения внутренним давлением, взятые из опыта. Нижеприведенные результаты получены автором в лаборатории испытаний сосудов давлением, ИЭС им. Е. О. Патона, НАНУ. Например, газовый баллон является частным случаем сосуда под давлением. Испытываемый баллон называется объектом испытаний. В данном материале речь в основном будет идти об особенностях гидравлических испытаний внутренним давлением газовых баллонов.

Давление измеряется с помощью манометров. Манометр должен ставиться на объект испытаний. Гидравлическая схема должна выдерживать давление как минимум в 1,5 раза больше, чем максимальное давление при испытаниях.

1. Нагружения давлением упругого гидравлического ресивера.

При испытании сосудов давлением, в нагнетательной цепи между насосом и объектом испытаний устанавливают один или несколько специальных, технологических сосудов высокого давления, называемых гидравлическим ресивером, далее ресивер, см. например рисунок 5б. Как правило, подключение осуществляется последовательно. У ресивера есть вход и выход. Но ресивер, можно, но не желательно, подключить и в качестве «аппендицита», если в качестве специального технологического сосуда высокого давления используется баллон(ы) с единственным подключением. Ресивер должен работать упруго, по крайней мере, до максимального давления, которым предполагается нагружать объект испытаний. К ресиверу выдвигаются такие же требования, как и к гидравлической арматуре. Чем больше объем ресивера, тем значимей его эффект.

Использование ресивера обусловлено несколькими причинами:

- увеличение объема нагнетательной гидросистемы, благодаря эффекту сжимаемости воды, уменьшается скорость роста давления при одном и том же расходе насоса. Время нагружения до заданного давления увеличивается;
- увеличивается плавность нагружения - сглаживаются скачки давления (демпфирование пульсаций) при работе поршневых насосов;
- при выключении, насос сохраняет некоторую инерцию, но при этом, если это необходимо, можно перекрывать вентиль перед объектом испытаний, не дожидаясь полной остановки насоса;
- при выдерживании под давлением, возможные незначительные утечки меньше влияют на снижение давления;

- погашение гидроударов. При разрушении объекта испытаний давление падает не так резко, что важно для систем измерения;
- увеличение срока службы насосов.

На нижеприведенных рисунках, в том случае, когда ресивер состоял из одного специального сосуда высокого давления обозначено $P(1c)$, а когда из двух, то $P(2c)$. При статических нагружениях использовался насос с постоянной подачей составляющей ~ 60 л/час, а при циклических испытаниях см. рисунок 12 и табл. 1 п. 8 и при статических см. табл. 1 п. 5 $\sim 800\dots 1000$ л/час.

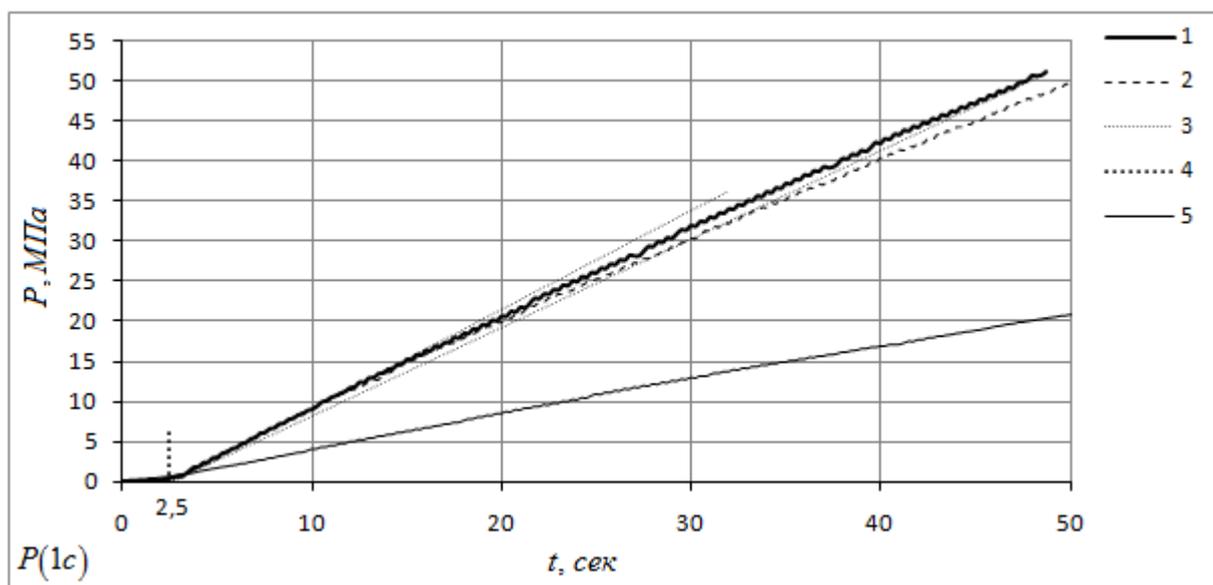


Рис. 1. Диаграмма нагружения ресивера гидравлическим внутренним давлением:

1 - реальная диаграмма нагружения ресивера состоящего из одного сосуда; 2 - тоже, но при наличии незначительных утечек в подводящей арматуре; 3 - прямые: линеаризующая начальный участок диаграммы и условно соединяющая начало и конец; 4 - значение, от которого идут прямые линии 3; 5 - диаграмма нагружения ресивера состоящего из двух сосудов, (в качестве примера).

Диаграмму нагружения ресивера можно, например, аппроксимировать степенной зависимостью вида: $P=a \cdot (t-b)^c$. Для кривой 1 см. рисунок 1 имеем $P=1,45(t-2,5)^{0,93}$.

На рисунке 2 приведены диаграммы нагружения ресивера состоящего из двух специальных сосудов высокого давления в зависимости от объема воздушной подушки в нем. На рисунке 2а значение времени $t=0$, соответствует включению насоса, а на рисунке 2б все диаграммы смещены к крайней правой, таким образом, чтобы значения времени при 5 МПа у них совпадали. Значение давления в 5 МПа взято условно. Указанные на рисунке 2 значения 0...2 соответствуют объему воздушной подушки для каждой диаграммы в литрах.

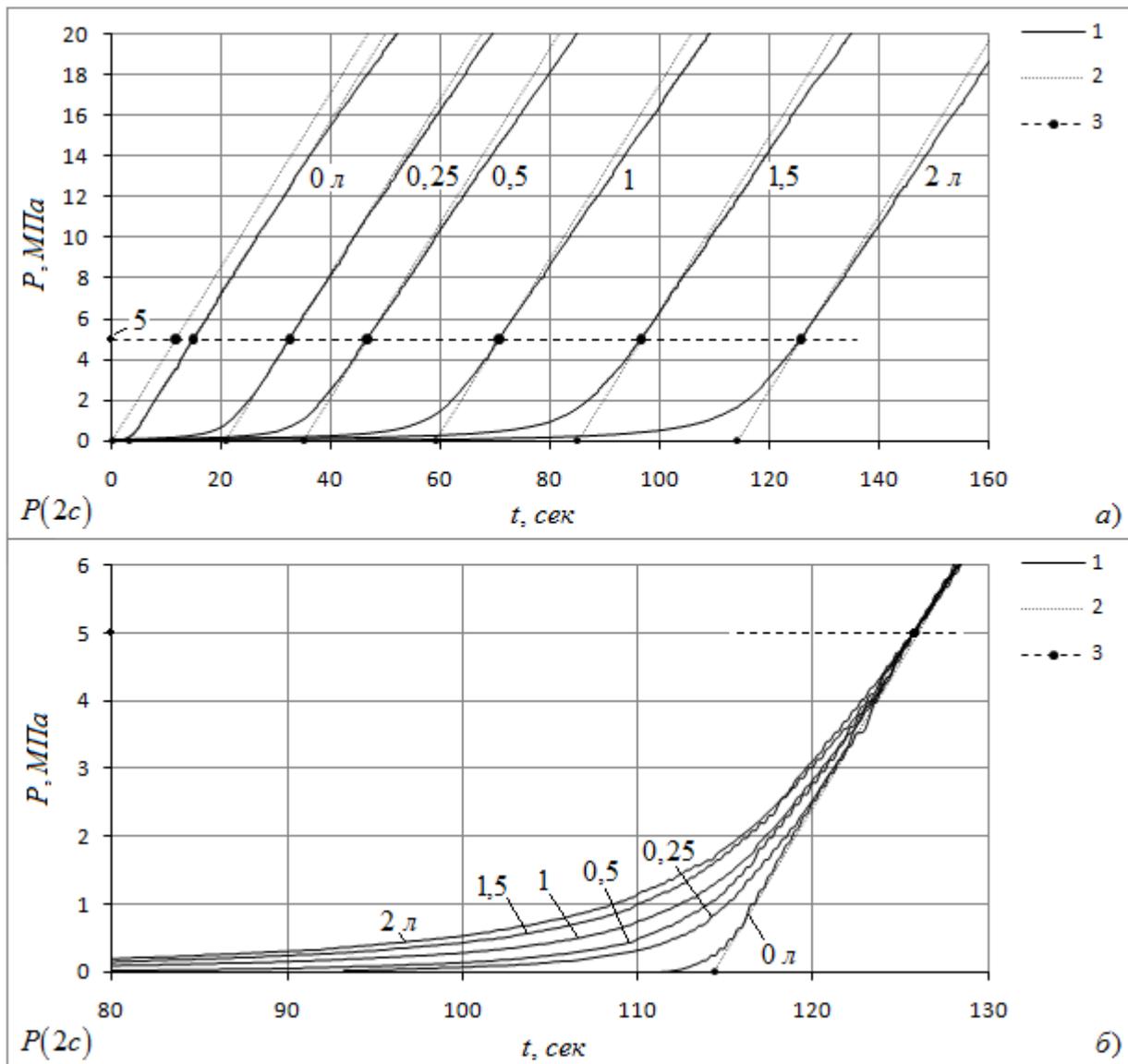


Рис. 2. Влияние объема воздуха в ресивере на начальный участок его диаграммы нагружения:

a - диаграммы от момента пуска насоса ($t=0$); *б* - смещенные к крайней правой, по уровню 5 МПа диаграммы.

1 - экспериментальные зависимости; *2* - прямые линии, (на рис. *a* параллельны друг другу); *3* - линия соответствующая давлению 5 МПа.

На рисунке 3, по данным рисунка 2, приведена зависимость времени достижения 5 МПа от объема воздуха в ресивере. Видно, что эта зависимость практически линейная.

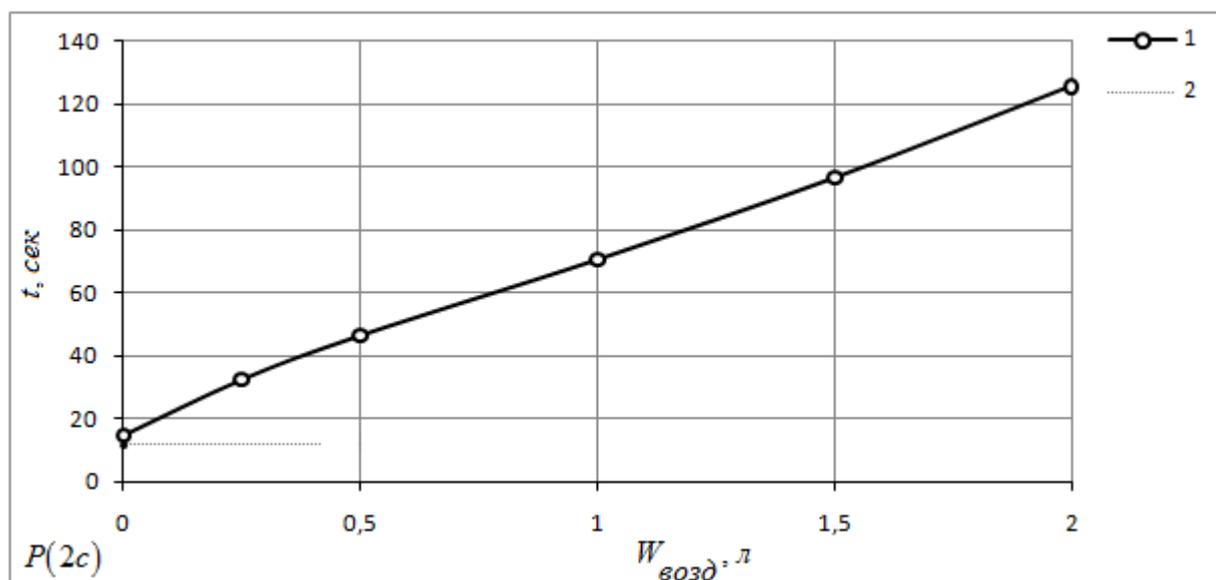


Рис. 3. Зависимость времени достижения 5 МПа от объема воздуха в ресивере. Данные соответствуют рисунку 2.

1 - сама зависимость; 2 - условная прямая соответствующая значению времени достижения 5 МПа крайней левой прямой 2 на рисунке 2а.

При совместном нагружении нескольких сосудов давления, общая диаграмма нагружения получается как сумма (по времени) диаграмм каждого из сосудов. Для достижения определенного давления насосу требуется, как бы нагрузить каждый из сосудов, что в принципе логично. Пример см. на рисунке 4. Диаграммы сдвинуты таким образом, чтобы время отсчитывается от значения соответствующего началу прямых 5.

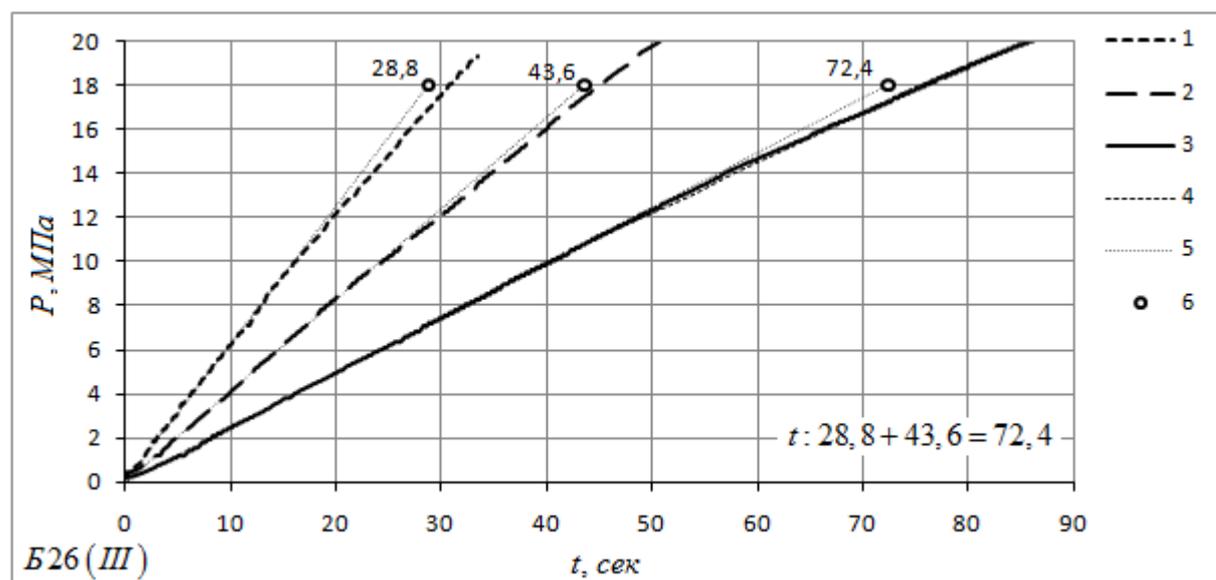


Рис. 4. Принцип суммирования диаграмм нагружения внутренним давлением:

1 - кислородный 40-ка литровый баллон (Б26(III)); 2 - ресивер из двух сосудов; 3 - кислородный баллон совместно с ресивером из двух сосудов; 4 - расчетная, как сумма по времени диаграмм 1 и 2 диаграмма; 5 - прямые, линеаризующие начальные участки экспериментальных 1, 2, 3 диаграмм; 6 - значения времени на прямых 5 при условном давлении $P=18$ МПа.

2. Гидравлические испытания баллонов внутренним статическим давлением, вплоть до разрушения.

В качестве типового примера статических испытаний баллонов внутренним давлением вплоть до разрушения, рассмотрим испытания образца II. Образец представляет собой гильзу длиной ~ 1 м. из горячедеформированной трубы 219×6 сталь 20, с приваренными плоскими пластинами в качестве днищ.

Деформирование цилиндрической части образца эквивалентно деформированию боковой стенки цилиндрического баллона. Приведенные диаграммы испытаний образца II аналогичны диаграммам, получаемым при испытаниях кислородных 40-ка литровых баллонов.

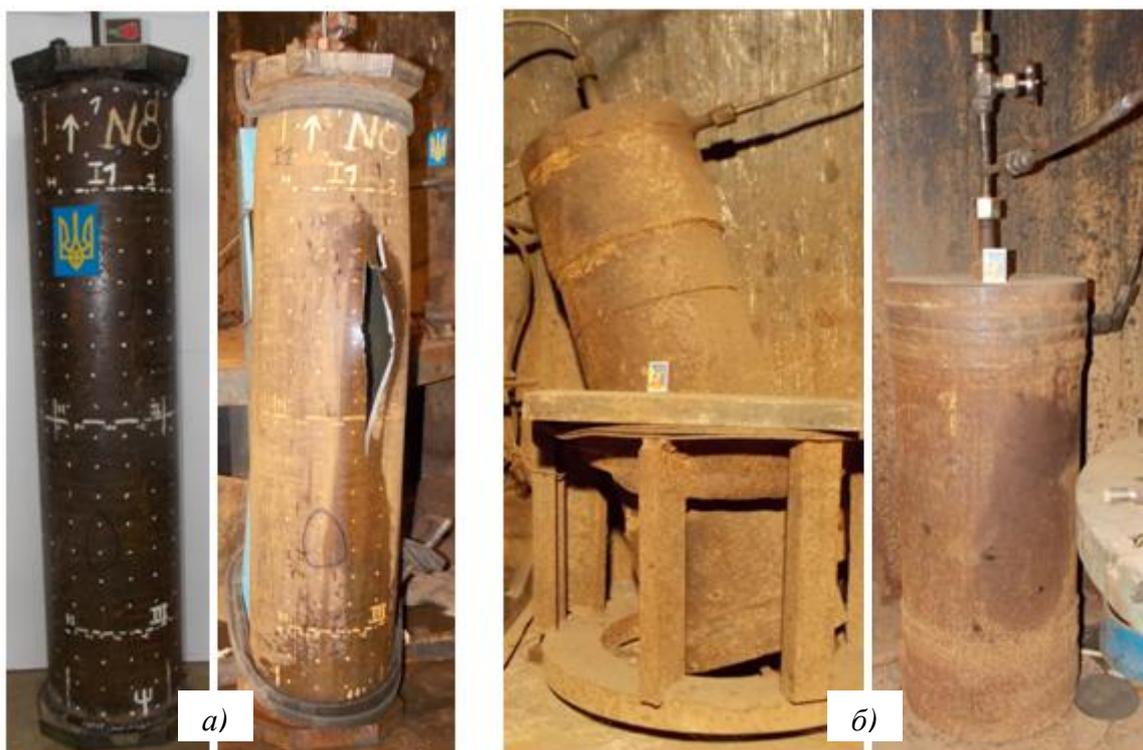


Рис. 5. Образец II в качестве объекта испытаний и ресивер:
а - Образец II до испытаний и после разрушения внутренним давлением; б - два специальных сосуда высокого давления (ресивер).

На рисунке 6 приведен один из промежуточных этапов нагружения образца II за пределы упругой области. Показаны изменения давления в образце и его объема во времени. Поскольку нагружения образца производилось совместно с ресивером, то диаграмма нагружения давлением во времени является «суммарной» диаграммой. На диаграмму изменения объема образца ресивер не влияет, т.к. измерения изменения объема осуществлялось только для образца находящегося в ВР.

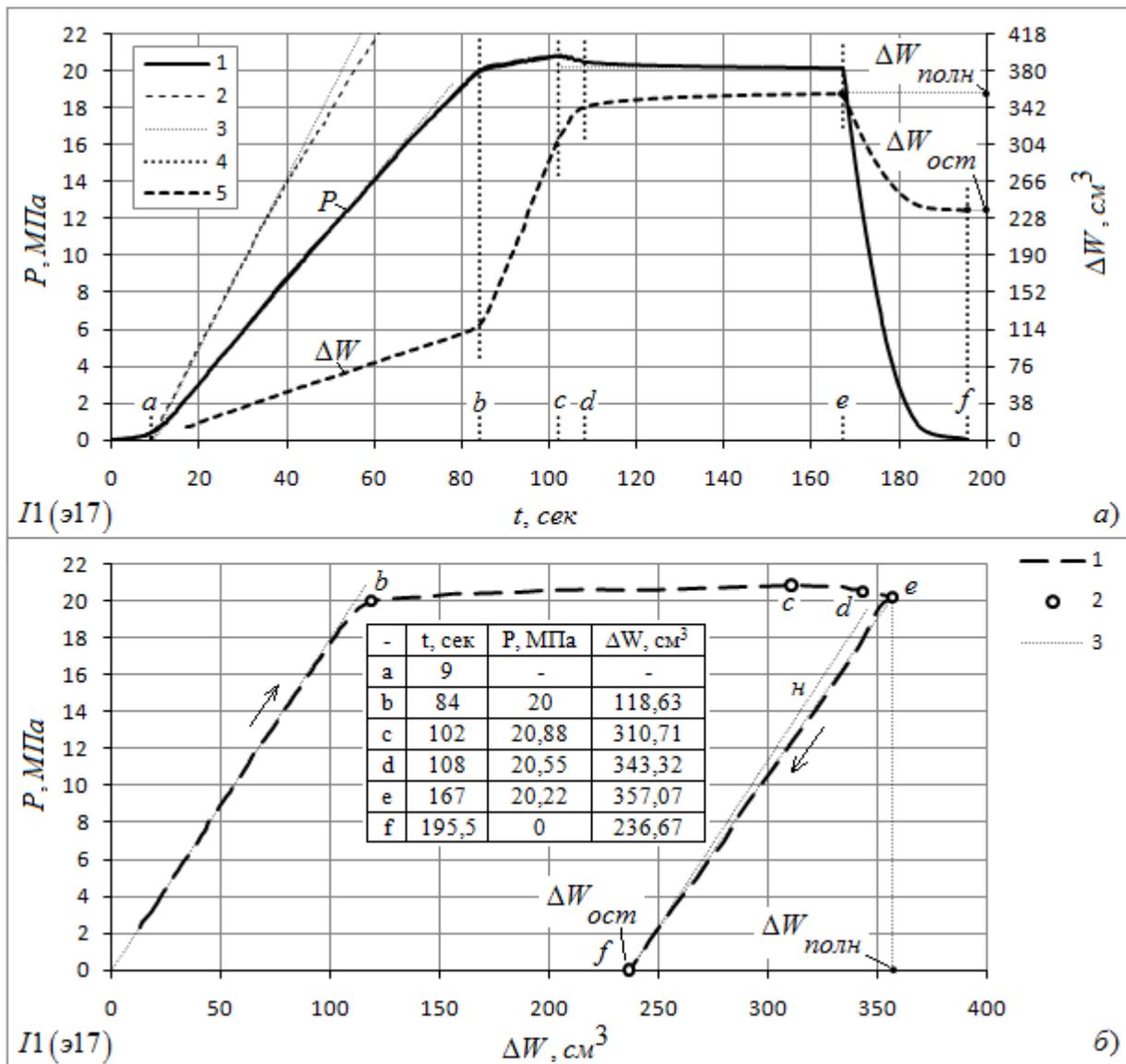


Рис. 6. Этап нагружения образца II внутренним давлением, этап 17:

a - диаграмма нагружения внутренним давлением образца и изменение его объема во времени:

1 - изменение давления во времени; 2 - диаграмма нагружения ресивера из двух сосудов без объекта испытаний; 3 - прямые линии; 4 - моменты соответствующие:

a - значение, от которого идут прямые 3, линеаризующие начальные участки диаграмм 1 и 2; b - перелом диаграммы нагружения; c - выключение насоса; d - перекрытие вентиля арматуры идущей к объекту испытаний; e - начало спуска давления из объекта испытаний; f - окончание этапа - давление в образце спущено до нуля.

5 - изменение объема во времени, (по правой шкале);

\bar{b} - взаимосвязь давления и изменения объема:

1 - взаимосвязь давления и изменения объема; 2 - значения соответствующие b, c, d, e, f , см. выше; 3 - прямые линии. Прямая «н» параллельна линии нагрузки.

Для a и \bar{b} : $\Delta W_{полн}$, $\Delta W_{ост}$ - полное и остаточное изменения объема образца на этапе.

В упругой и пластической областях нагружения, при работе насоса (см. а-б и б-с), производство скоростей изменения давления и изменения объема практически постоянно,

$$\text{т.е.: } \frac{dP}{dt} \cdot \frac{d\Delta W}{dt} = \text{const.}$$

Отношение приращения изменения объема к приращению давления во время нагружения равно $5,571 \text{ см}^3/\text{МПа}$, а во время разгрузки $5,955 \text{ см}^3/\text{МПа}$, (определено по линиям 3, рисунок бб). Можно положить, что разница между полным и остаточным изменением объема образца равна упругому изменению объема, т.е.: $\Delta W_{\text{упр}} = \Delta W_{\text{полн}} - \Delta W_{\text{ост}}$. Отношение упругого изменения объема к максимальному давлению равно $5,753$. От этапа к этапу, с ростом пластических деформаций, отношение приращения изменения объема к приращению давления во время упругого нагружения растет.

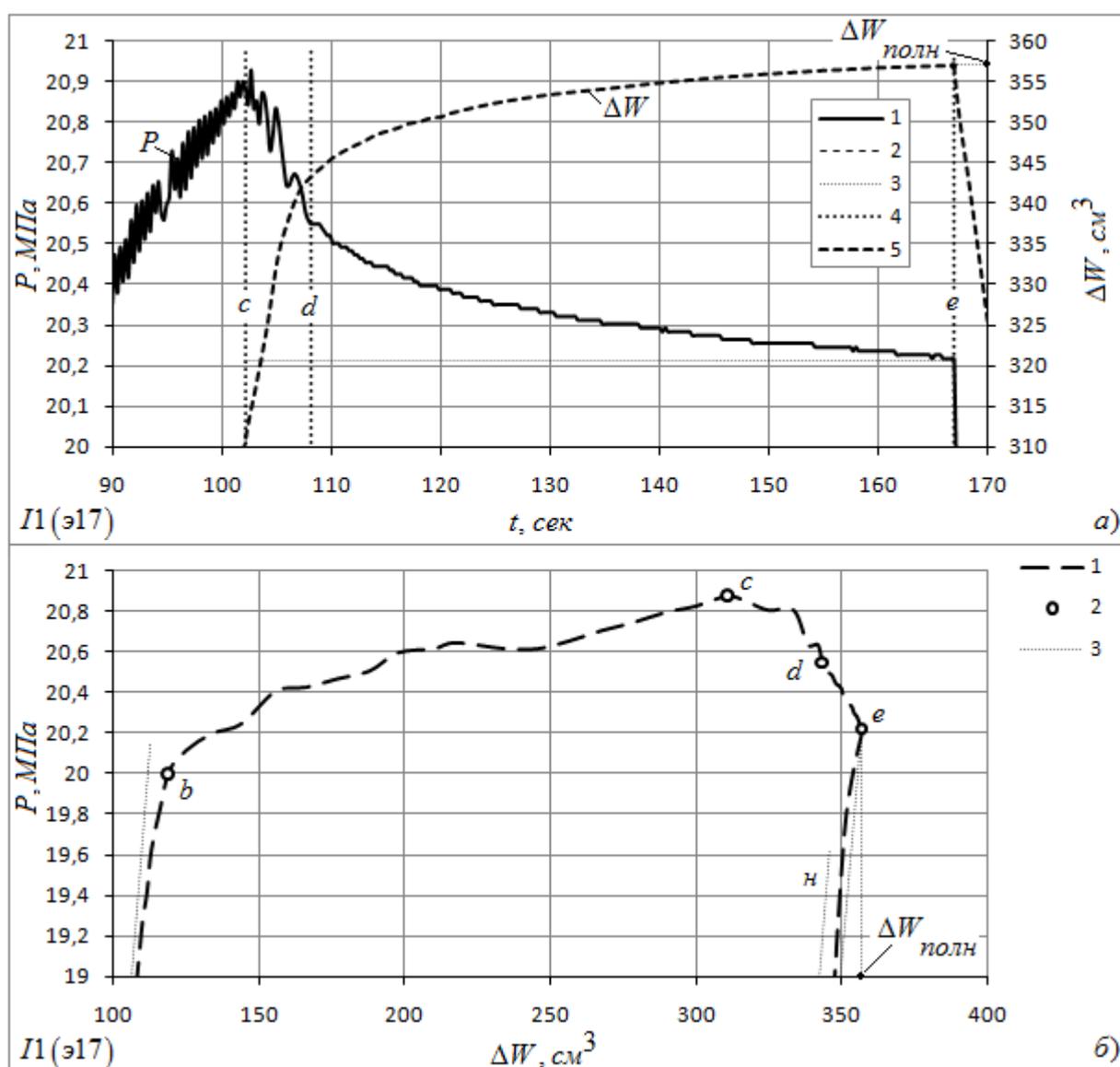


Рис. 7. Фрагменты этапа нагружения образца II внутренним давлением, этап 17: а, б и обозначения см. на рисунке б.

При испытании других баллонов, включая и образец с кольцевой намоткой по всей цилиндрической части (условное обозначение И4) см. таблица 1, п. 6, зависимости аналогичные приведенным.

На рисунке 8 приведены фрагменты диаграммы нагружения образца И1 внутренним давлением, этап 17.

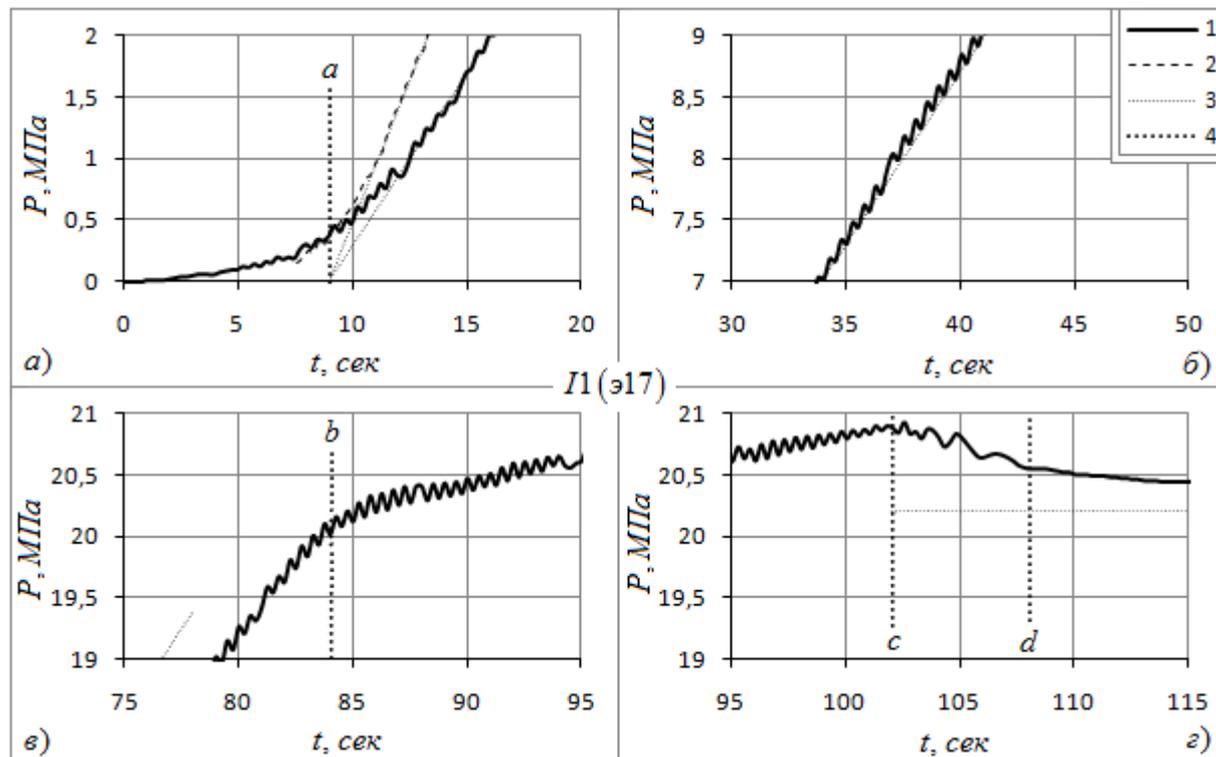


Рис. 8. Фрагменты диаграммы нагружения образца И1 внутренним давлением, этап 17:
а - начало нагружения; *б* - нагружение в упругой области; *в* - перелом диаграммы нагружения; *г* - выключение насоса и перекрытие арматуры. Приведенные линии означают то же, что и на рисунке 8а.

На рисунке 9, на примере образца И1, приведен принцип состыковки диаграмм следующих друг за другом этапов нагружения. Максимальное давление каждого следующего этапа, выше, чем максимальное предыдущего этапа. Видно, что область перелома диаграммы нагружения каждого последующего этапа выше, чем у предыдущего.

Состыковка диаграмм осуществляется визуально по областям нагружения в пластической области.

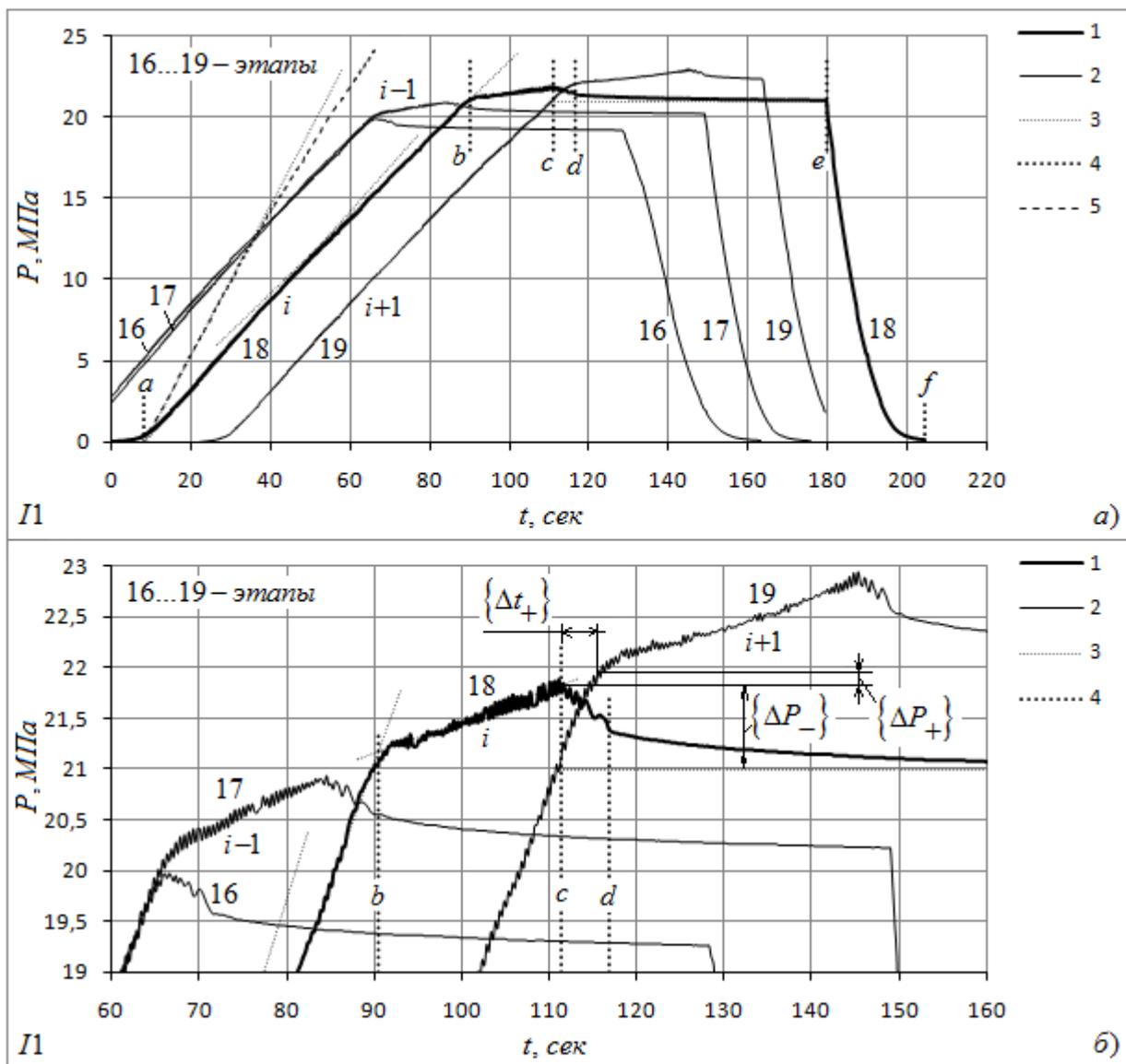


Рис. 9. Диаграмма нагружения внутренним давлением на некотором этапе, в сравнении с предыдущим и последующим. (Образец II, этапы 16, 17, 18, 19):

a - полное представление этапа; b - состыковка диаграмм.

1 - i -ый этап, (18); 2 - предыдущие и последующий этапы; 3 - прямые, линеаризующие соответствующие участки диаграмм; 4 - моменты, разграничивающие режимы этапа; 5 - диаграмма нагружения ресивера из двух сосудов без объекта испытаний.

На рисунке 10 приведена состыкованная диаграмма поэтапного нагружения образца II. Этапы 1...20 проводились в водяной рубашке. Разрушение образца произошло на 25 этапе.

При состыковке диаграмм можно проследить следующую некую закономерность: чем больше $\{\Delta P_-\}$, тем больше и $\{\Delta P_+\}$ и, соответственно $\{\Delta t_+\}$, см. рисунок 9б. Величина $\{\Delta P_-\}$ в данном случае определяет разницу между максимальным давлением и давлением начала сброса давления из объекта испытаний. В принципе для упрощения построений можно принять $\{\Delta t_+\} \approx 0$, строить так, чтобы график следующего этапа проходил через

точку максимального давления предыдущего, в таком случае огибающая состыкованной диаграммы нагружения будет ступенчатой.

При продолжительном выдерживании под давлением после пластических деформаций, скорость падения давления со временем уменьшается, а само давление стремится к некой горизонтальной асимптоте, естественно, если нет утечек. В таком случае, определяя $\{ \Delta P_- \}$ как разницу между максимальным давлением и асимптотой, можно подметить следующее: - величина $\{ \Delta P_- \}$ тем больше, чем больше скорость нагружения, по крайней мере, в некий промежуток времени перед выключением насоса; - при уменьшении скорости нагружения, $\{ \Delta P_- \} \Rightarrow 0$. Падение давления присуще пластической области нагружения, в упругой же области, независимо от скорости, падения давления практически не наблюдается.

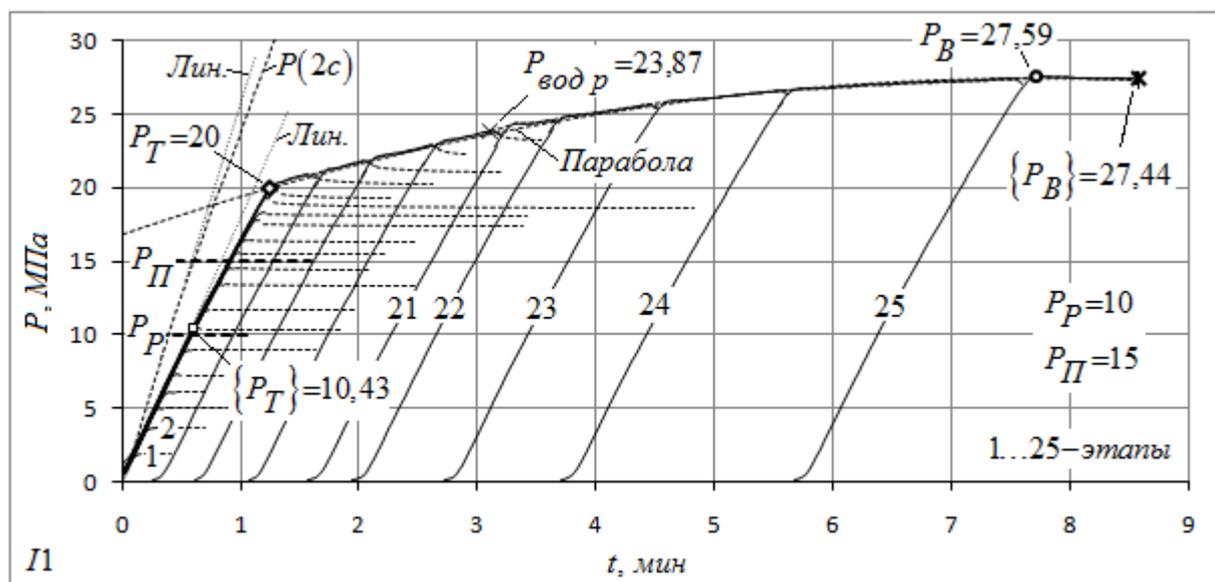


Рис. 10. Типовая состыкованная диаграмма поэтапного нагружения внутренним статическим давлением во времени вплоть до разрушения, на примере образца П1:

P_P, P_{II} - принятые рабочее и пробное давления; $\{ P_T \}$ - давление текучести, определенное по водяной рубашке - объем образца уже перестал возвращаться в первоначальное значение; P_T - давление текучести, определенное как точка перелома диаграммы нагружения внутренним давлением; $P_{вод p}$ - давление, до которого образец нагружался в водяной рубашке; P_B - максимальное давление; $\{ P_B \}$ - давление при котором произошло разрушение образца; тонкие, штриховые, близкие к горизонтальным линии - выдержка на этапах; $P(2c)$ - диаграмма нагружения ресивера, состоящего из двух специальных сосудов высокого давления, без объекта испытаний; Парабола - линия аппроксимации диаграммы нагружения в пластической области уравнением второй степени с вершиной в точке P_B ; Лин. - прямолинейные отрезки.

Из рисунка 10 видно, что статический коэффициент запаса прочности равен: $n_B = P_B / P_P = 2,76$. Если для стального баллона давление разрушения немного ниже, чем максимальное давление, что уместно при низкой скорости нагружения давлением, то это

свидетельствует о том, что разрушение металла баллона произошло в силу исчерпания его несущей способности. В противном случае, либо скорость нагружения завышена, либо разрушение баллона произошло по дефекту.

На рисунке 11 приведена огибающая диаграмм поэтапного нагружения из рисунка 10, и скорость ее изменения, на примере образца П1: Скорость указана в виде дискретной величины, поскольку измерялась как отношение приращения давления к приращению времени. Приращение времени в среднем составляло 2 сек.

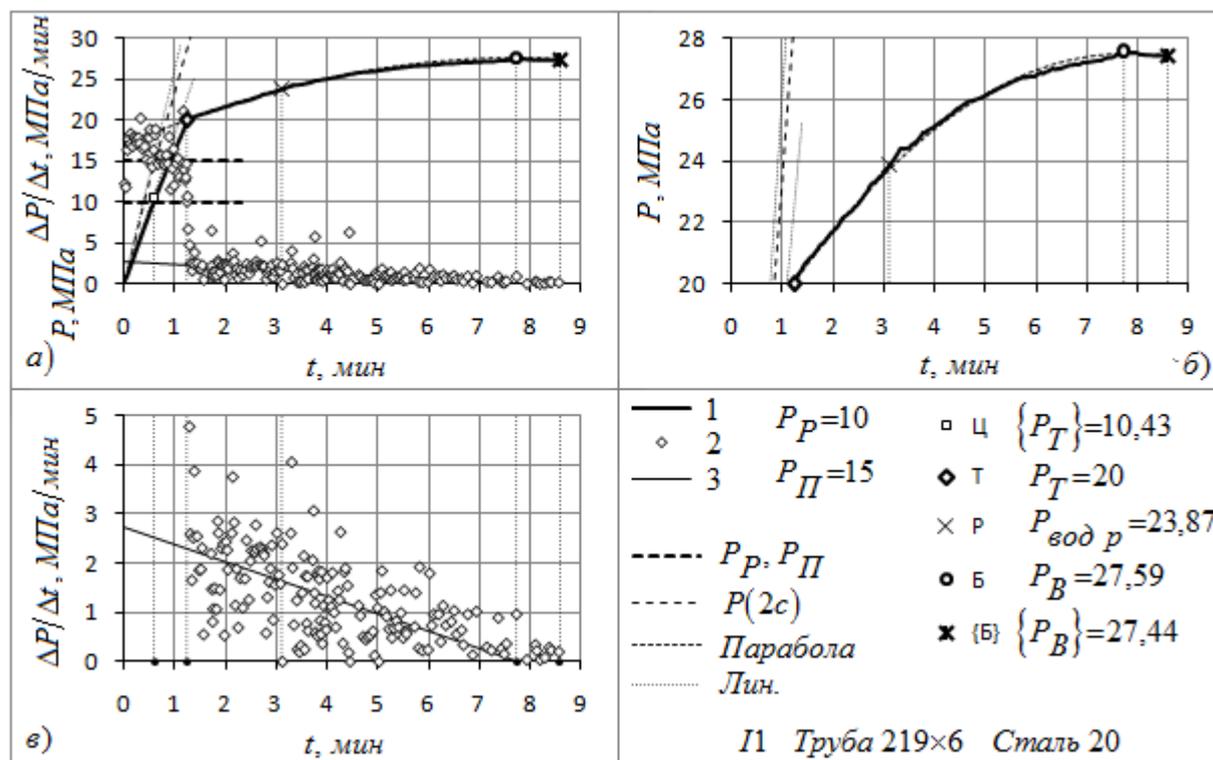


Рис. 11. Огибающая диаграмм поэтапного нагружения и скорость ее изменения, на примере образца П1:

1 - Огибающая диаграмм поэтапного нагружения внутренним статическим давлением во времени вплоть до разрушения; 2 - скорость изменения диаграммы 1; 3 - линейризация зависимости 2 при давлениях превышающих P_T . Остальные обозначения см. на рисунке 10.

На рисунках б), в) приведены увеличенные участки рисунка а).

Маркерами на рисунке 11 указаны значения соответствующих давлений. Буквенные же обозначения маркеров, см. легенду рисунка 11, имеют следующие соответствия: Ц - пределу пропорциональности; Т - уловному пределу текучести; Р - моменту, до которого образец нагружался в водяной рубашке; Б - предельному состоянию тонкостенного баллона; {Б} - разрушению баллона. Обозначения Ц, Т, Б, не случайны, они имеют очень близкий физический смысл.

Диаграмму нагружения - зависимость внутреннего давления от времени $P(t)$, в области больших пластических деформаций, т.е. от значения P_T , можно аппроксимировать уравнением второй степени (параболой) с вершиной в точке P_B . Записывая уравнение параболы в общем виде: $P=at^2+bt+c$, для образца П1 имеем следующие коэффициенты: а= -

0,1781; $b=2,75$; $c=16,9$. Реализацию см. на рисунке 10. Дифференцируя давление по времени имеем: $dP/dt=2at+b$. Это уравнение прямой с угловым коэффициентом $2a$, в нашем случае равным минус 0,3562, см. рисунок 11 прямая 3. Производная равна нулю при $t=7,72$, это определяет абсциссу максимального давления P_B . В принципе парабола не несет никакого физического смысла и поэтому интервал аппроксимации можно уменьшать до интересующего.

3. Циклические испытания внутренним давлением.

Баллоны подвергают циклическим (как правило, малоцикловым) испытаниям внутренним давлением. Как правило, нагружение отнулевое. В качестве максимального давления цикла берут рабочее или пробное давления.

На рисунке 12 в качестве примера приведена диаграмма одного цикла нагружения при циклических испытаниях внутренним давлением. Минимальное давление цикла равнялось $P_{\min}=0,1 \dots 0,2$ МПа. Согласно требованиям ISO 9809-1, частота нагружения не должна превышать 0,25 Гц, (15 циклов/мин), Т.е. продолжительность одного цикла должна быть более 4 сек. Также, температура внешней поверхности баллона не должна превышать 50 °С. Точки на рисунке 11 - снимаемые с частотой 4 Гц значения давления, (то же и в таб. 1, п. 8).

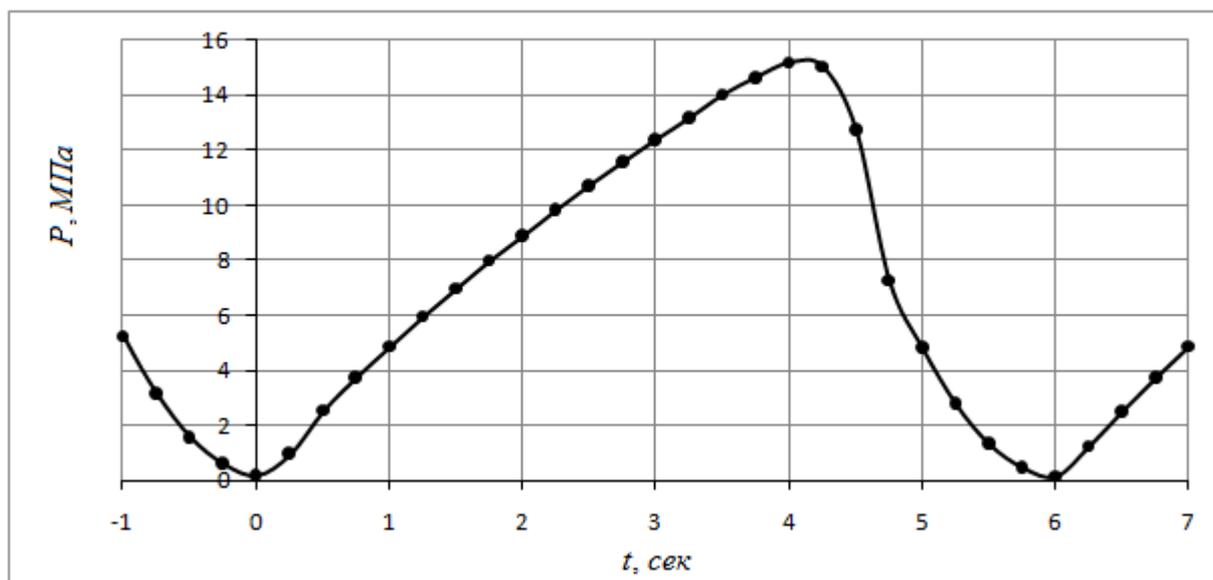


Рис. 12. Пример диаграммы одного цикла нагружения при циклических испытаниях внутренним давлением.

Пульсирование давления осуществляется благодаря клапану, открывание и закрывание которого происходит автоматически в зависимости от давления. А т.к. насос при этом обычно не отключается, то в зависимости от конструктивных особенностей клапана, минимальное давление цикла может полностью не опускаться до нуля. Также считается, что при упругих испытаниях, форма кривой $P(t)$ в районах минимального и максимального давлений, не имеет значения. Главное, чтобы эти давления были достигнуты.

4. Анализ диаграмм нагружения внутренним давлением.

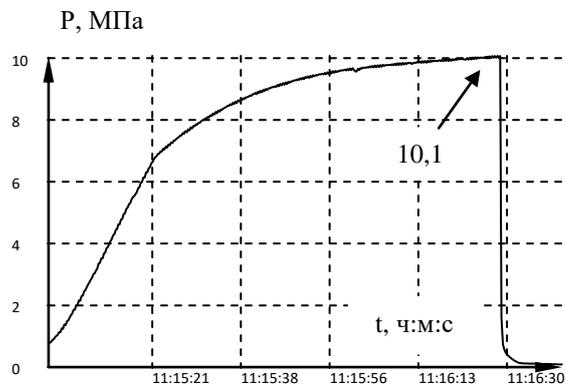
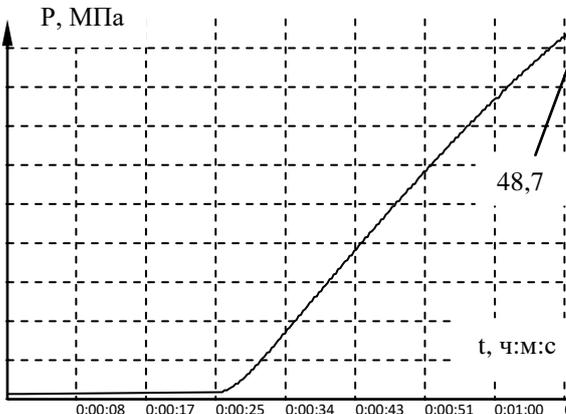
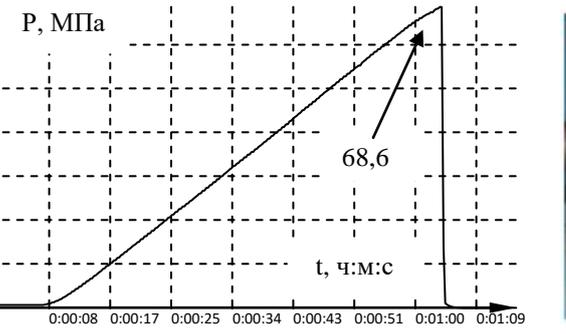
В таблице 1 приведены некоторые типичные диаграммы нагружения баллонов внутренним давлением во времени. На некоторых диаграммах показан участок падения давления после разрушения объекта испытания. Пункты 1...7 - статические нагружения вплоть до разрушения объекта испытаний, п. 8 - примеры циклических нагружений.

При испытании труб до разрушения к ним приваривают днища. Для труб большого диаметра используют полуэллиптические или полусферические см. табл. 1 п. 5, а для труб малого диаметра можно использовать плоские пластины, см. образцы I1 и I4.

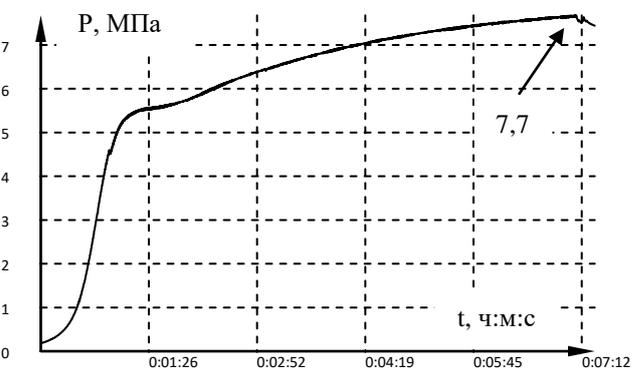
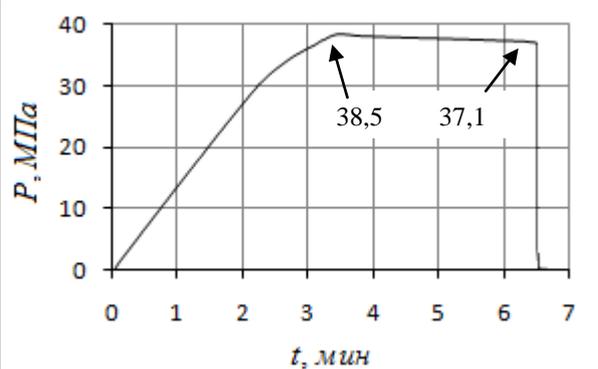
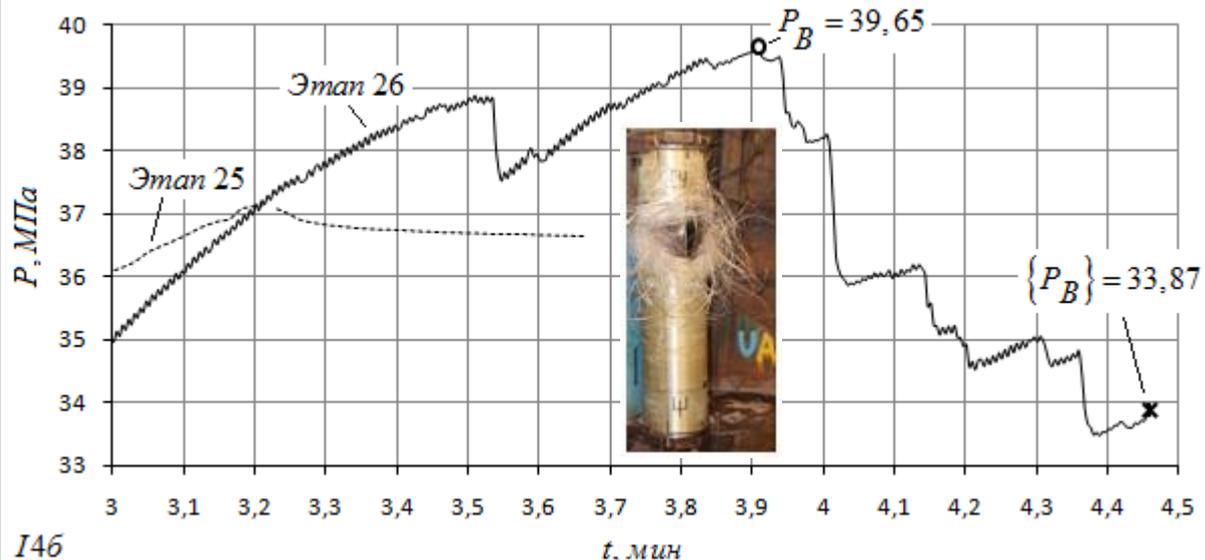
По диаграмме нагружения нельзя отличить цилиндрический баллон от сферического.

Раскрытие цилиндрических баллонов происходит по линии направленной вдоль оси баллона. Исключением являются композитные баллоны.

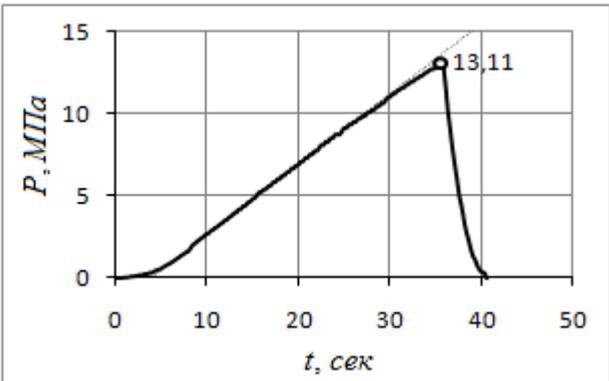
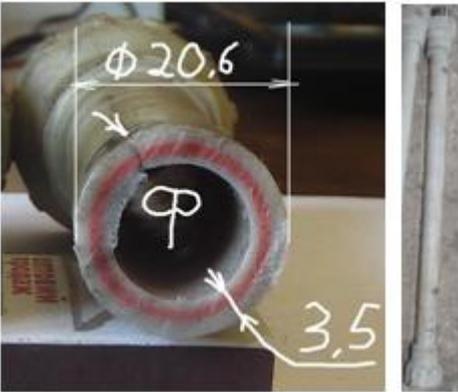
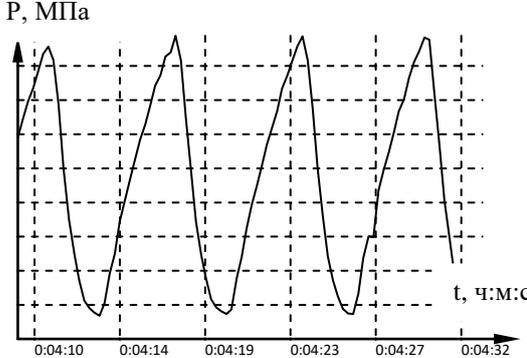
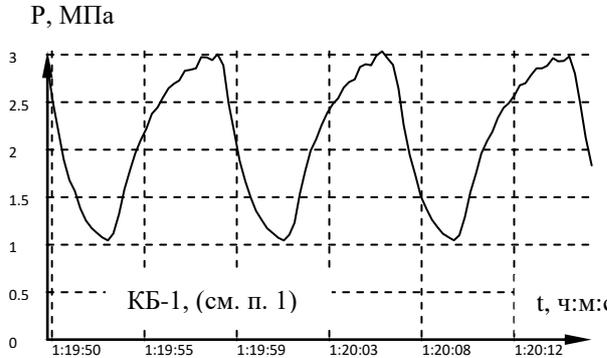
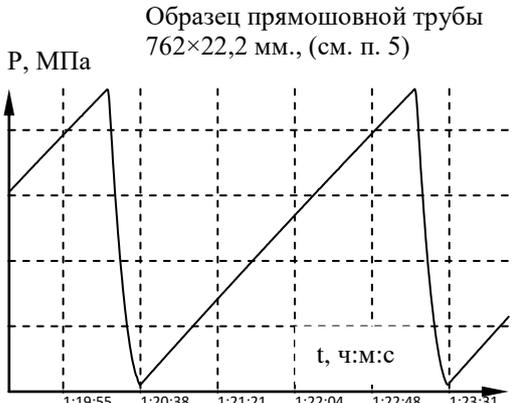
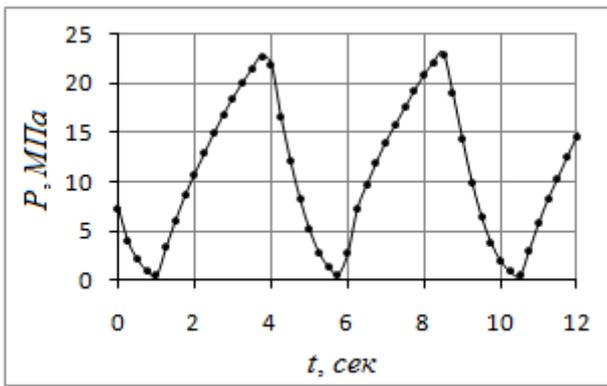
Таблица 1. Типичные диаграммы нагружения баллонов внутренним гидравлическим давлением.

№ пп	Диаграммы нагружений и фото объектов испытаний.	
1	<p>Кислородный баллон КБ-1. $P_p=3,0$ МПа, $P_{II}=4,5$ МПа, срок службы 39 лет.</p> 	
2	<p>Баллон огнетушителя УБШ-2-1. $P_p=15,0$ МПа, $P_{II}=22,5$ МПа, срок службы 32 года.</p> 	
3	<p>Баллон УБЦ8-1 огнетушителя ОУ. $P_p=17,0$ МПа, $P_{II}=25,5$ МПа, срок службы 30 лет.</p> 	

Продолжение таблицы 1.

№ пп	Диаграммы нагружений и фото объектов испытаний.
4	<p>Баллон сварной цилиндрический. $P_p=1,6$ МПа, $P_{II}=2,5$ МПа.</p>  
5	<p>Образец прямошовной трубы 762×22,2 мм.</p>  
6	<p>Образец I4 с бандажом, см. выше. Фрагмент диаграммы предшествующий разрушению.</p>  

Продолжение таблицы 1.

№ пп	Диаграммы нагрузений и фото объектов испытаний.
7	<p>Полипропиленовая водопроводная труба.</p>  
8	  <p>Образец прямошовной трубы 762×22,2 мм., (см. п. 5)</p>  
<p>1...7 - нагружения статическим давлением вплоть до разрушения объекта испытаний. 8 - примеры нагружения циклическим давлением. P_p - рабочее давление, P_{Π} - пробное давление. Испытания проводились при температуре воды не выше 25 °С.</p>	

Испытания полипропиленовых водопроводных труб можно проводить при повышенных, но менее 100 °С, температурах, следующим образом. Из трубы изготавливается образец незначительной длины, один конец заглушается, а к другому присоединяется подводящая арматура. Образец заполняется водой и с незначительной частью арматуры помещается в

бак, в котором соответствующими методами поддерживается определенная температура горячей водой. Образец выдерживается в баке некоторое время необходимое для полного прогрева и испытывается. В принципе разрушать образец давлением можно прямо не вынимая его из бака.

Из диаграммы см. табл. 1 п. 5 видно, что после достижения максимума, давление плавно начало снижаться, а разрушение произошло после продолжительного такого снижения. Это объясняется местным выпучиванием трубы и по всей вероятности очень низкой скоростью нагружения. Обычно при испытании длинных труб до разрушения образуется местное выпучивание - бочкообразование. Деформации трубы в месте выпучивания происходят без увеличения давления.

Из диаграммы см. табл. 1 п. 6 видны резкие, скачкообразные падения давления, затем давление опять повышалось. Это происходит вследствие разрушения, (нарушения кольцевой целостности) некоторых волокон.

При испытании автомобильных газовых баллонов тороидальной формы, с целью полного его заполнения водой, штуцер имеет продолжение во внутрь баллона в виде изогнутой трубки, см. рисунок 13а, трубка видна в месте разрыва. Сам же штуцер имеет шайбу, которая своей наружной поверхностью сопрягается с внутренней цилиндрической поверхностью горловины баллона. К ней и приваривается. Аналогичная компоновка штуцера используется и при испытаниях цилиндрических автомобильных баллонов.



Рис. 13. Ввариваемый специальный штуцер при испытании автомобильных баллонов до разрушения:

а - баллон тороидальной формы, (тор - запаска); б - цилиндрический баллон.

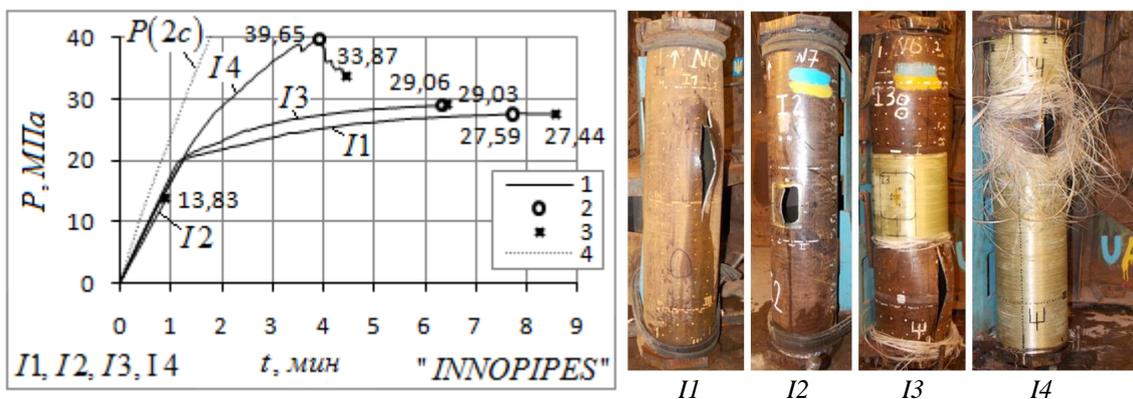


Рис. 14. Состыкованные диаграммы поэтапных нагружений натуральных образцов I1, I2, I3 и I4 внутренним статическим гидравлическим давлением вплоть до разрушения:

1 - диаграммы нагружения образцов; 2 - максимальное давление P_B ; 3 - давление, при котором произошло разрушение образца $\{P_B\}$; 4 - диаграмма нагружения ресивера, состоящего из двух специальных сосудов высокого давления $P(2с)$, без объекта испытаний. На фото образцы после разрушения, закреплены в стенде.

Чем длиннее испытываемые трубы, тем, при одних и тех же режимах нагружения, меньшим будет разброс по давлению разрушения, это же касается и давлений начала и полной текучести. Чем больше скорость нагружения, тем большим будет максимальное давление, реализуемое в объекте испытаний.

5. Систематическая погрешность фиксированной бюретки.

Речь пойдет о погрешности измерения изменения объема баллона с помощью фиксированной бюретки - бюретки, не имеющей возможности перемещения в вертикальном направлении.

При использовании метода водяной рубашки и фиксированной бюретки следует обращать внимание на возможную погрешность при определении изменения объема баллона. Погрешность является систематической. Ее можно заранее определить и учитывать при определении фактического результата объемного расширения. Действительно, жидкость в водяной рубашке должна быть свободной от растворенного в ней воздуха, а в самой системе не должно быть воздушных подушек. Продемонстрировать погрешность при измерении с помощью фиксированной бюретки можно несколькими способами, которые мы и рассмотрим. Для этого воспользуемся лабораторной установкой, в которой бюретка имеет возможность, как вертикального перемещения, так и быть зафиксированной. В качестве жидкости в водяной рубашке используется отстоянная водопроводная вода.

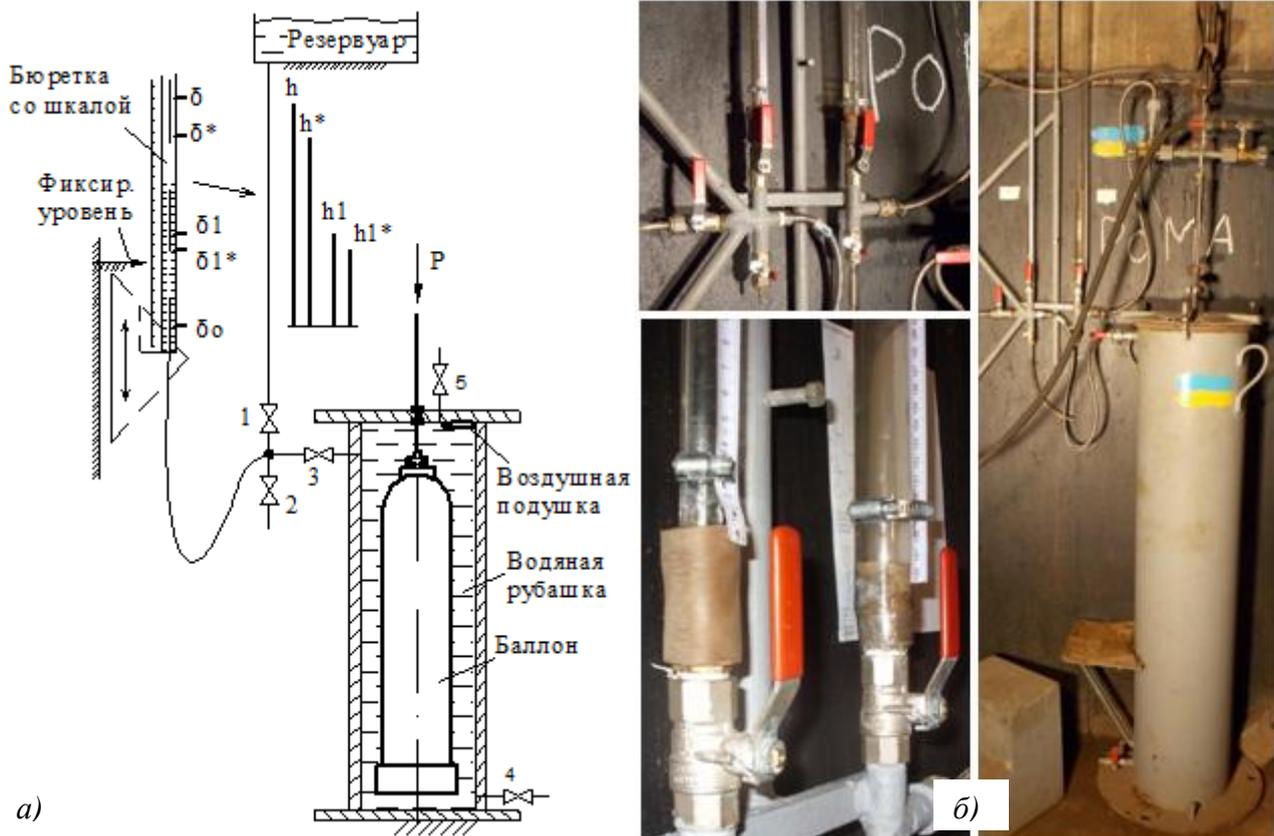


Рис. 15. Принципиальная схема к пояснению погрешности системы с фиксированной бюреткой и фото установки «Водяная рубашка», реализованной в ИЭС им. Е. О. Патона, для испытаний баллонов на объемное расширение:

1...5 - вентили низкого давления.

Принципиальная и фактически реализованная схемы установки (см. рисунок 15) несколько отличаются, но смысл от этого не изменяется. Фиксированный уровень - устанавливаемый неподвижно на определенной высоте репер, относительно которого перемещается бюретка. Значения δ_0 , δ и т.п. определяются по шкале бюретки, где δ_0 - некий первоначальный уровень жидкости (воды), а например, $\delta - \delta_0 = h$ - принимаемый первоначальный столб жидкости. Бюретка А на фото, см. рисунок 5б находится слева.

Проведем следующее испытание (испытание I) в условиях фиксированной бюретки. Баллон помещен в ВР, но давлением не нагружается. При открытом вентиле 3, (см. рисунок 15а) с помощью вентиля 1 и 2 выставим уровень воды в бюретке на отметке δ_0 и свяжем с ним фиксированный уровень. Примем эту высоту за нулевой столб жидкости. Затем перекроем вентиль 3. Далее с использованием вентиля 1 поднимем уровень воды в бюретки до отметки δ . Т.е. изменение столба жидкости составит $\delta - \delta_0 = h$. После открытия вентиля 3 уровень воды в бюретке опустится до значения δ_* , т.е. столб жидкости составит $h_* = \delta_* - \delta_0$. Этот эффект определяет погрешность измерения увеличения объема при использовании фиксированной бюретки. На величину $h - h_*$ влияют многие факторы, которые будут описаны ниже, но самым существенным является количество имеющегося в том или ином виде воздуха в водяной рубашке. Понятно, что чем

больше диаметр бюретки, тем величина $h-h_*$ будет меньше из условия сохранения объема воды между этими высотами. При откреплении же бюретки и перемещении ее вниз уровень воды в бюретке совпадет с фиксированным уровнем как раз при значении δ . Если система не имеет погрешности, то понятно, что уровень воды в бюретке после открытия вентиля 3 опускаться не будет. Столб жидкости в бюретке на некоторую величину сжимает воду в ВР и возможно имеющиеся в ней растворенный воздух и воздушные подушки. Вода намного меньше поджимается чем воздух.

Введем коэффициент, связанный с систематической неточностью измерений - систематической погрешностью:

$$k=h_*/h. \quad (1)$$

Поскольку $h_* \leq h$, то $k \leq 1$. Под h, h_* можно понимать величины связанные с действительным изменением объема и измеренным по водяной рубашке его значением. На самом же деле изменение объема определяется как изменение столба жидкости, умноженное на коэффициент тарировки бюретки. Коэффициент тарировки бюретки - усредненная площадь просвета бюретки. Коэффициент тарировки бюретки можно принять постоянным, поэтому наше суждение правомерно. Понятно, что чем больше k отличается от единицы, (естественно в меньшую сторону), тем больше погрешность. Положим что погрешность бюретки постоянная, т.е. $k=const$. Чем меньше длина бюретки, и/или чем меньше в ВР воздуха в том или ином виде, тем это утверждение более справедливо.

Обозначим через a систематическую погрешность бюретки в процентах, определяемую по формуле:

$$a \% = \frac{h_* - h}{h} \cdot 100 \% = \left(\frac{h_*}{h} - 1 \right) \cdot 100 \% = (k - 1) \cdot 100 \% . \quad (2)$$

Т.е. зная погрешность, действительная высота определяется через измеренную, по выражению: $h=h_*/\left(\frac{a}{100}+1\right)$. Понятно что $a \leq 0$. Из (2) получаем:

$$k = \frac{a}{100} + 1. \quad (3)$$

Далее проведем другое испытание (испытание II), также в условиях фиксированной бюретки и помещенным в ВР, но не нагружаемым давлением баллоном.

При открытом вентиле 3, с помощью вентиля 1 и 2 выставим уровень воды в бюретке на отметке δ_* . Затем перекроем вентиль 3, и с помощью вентиля 2 спустим воду из бюретки до отметки δ_o . При открытии вентиля 3, вода в бюретке, если система имеет погрешность,

поднимется до отметки δ_{1*} . Далее $\frac{h_{1*}}{h_1} = k$, $\delta_{1*} - \delta_o = h_{1*}$.

Введем параметр:

$$b = \frac{h_{1*}}{h_*} \cdot 100 \% . \quad (4)$$

Понятно что $b \geq 0$, и этот параметр также будет систематическим. $\frac{b}{100} = \frac{h_1^*}{h_*} = \frac{h_1 k}{hk} = \frac{h_1}{h}$.

$h = h_* + h_1 = h_* + h \frac{b}{100}$, следовательно $h_* = h \left(1 - \frac{b}{100} \right)$, и в итоге:

$$h = \frac{h_*}{1 - \frac{b}{100}}. \quad (5)$$

$h_* = h - h_1 = h \left(1 - \frac{b}{100} \right)$, следовательно

$$k = 1 - \frac{b}{100}. \quad (6)$$

По старому расчету приблизительно

$$h = h_* \left(1 + \frac{b}{100} \right). \quad (7)$$

$$1 + \frac{b}{100} \approx \frac{1}{1 - \frac{b}{100}}.$$

Из (3) и (6) следует, что:

$$b = -a \quad (8)$$

На рисунке 16 приведены результаты испытаний зависимости между коэффициентом систематической неточности бюретки и изменением высоты измеряемого столба жидкости. Испытания II проводились в нижней, средней, верхней частях бюретки и по всей высоте бюретки, что соответствует n ; c ; v ; и Γ на рисунке 16. Высота перепада в уровне воды для n , c , и v составляла порядка 70 см, а для Γ порядка 140 см.

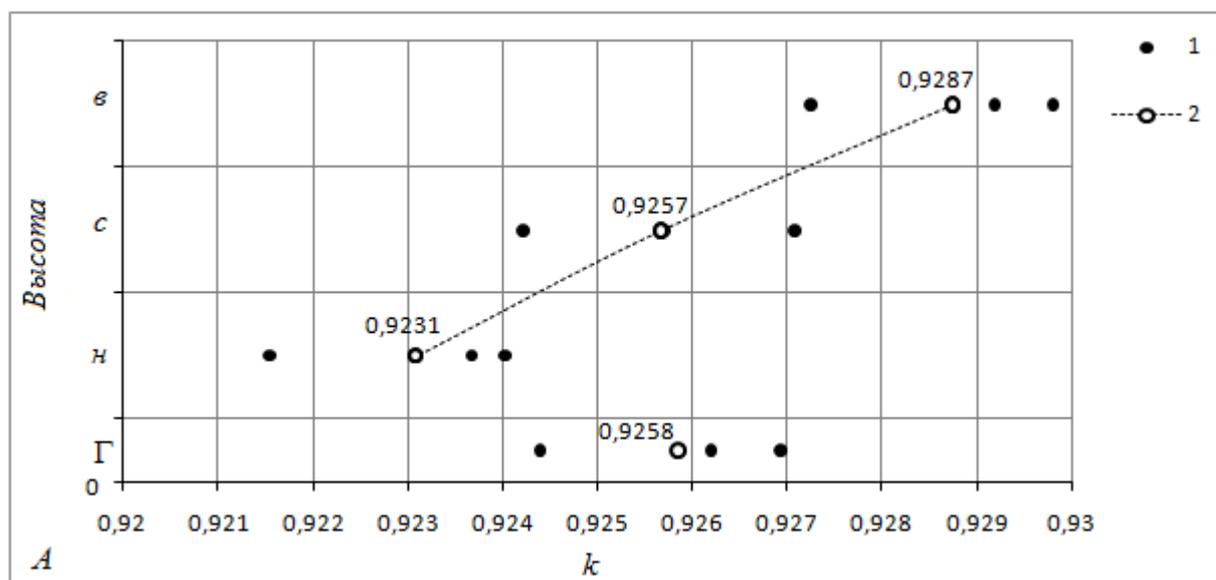


Рис. 16. Зависимость между коэффициентом систематической неточности бюретки и изменением высоты столба жидкости:

1 - экспериментальные данные; 2 - средние значения; в - в верхней; с - в средней; н - в нижней частях бюретки; Г - на всей бюретке.

Среднее значение k равно 0,9258, что соответствует $a=-b=-7,42\%$. При переключении на бюретку Б, погрешность уменьшается до $a=-b=-1,78\%$ что соответствует $k=0,9822$.

На рисунке 17 приведены результаты испытаний по определению влияния количества воздуха в водяной рубашке на коэффициент систематической неточности бюретки. При перекрытом вентиле 3, (см. рисунок 15а) открывалось устройство сброса воздуха 5, и с помощью вентиля 4 из водяной рубашки выпускалось определенное количество воды. Затем устройство 5 закрывалось. И с заранее известным количеством воздуха в ВР, равным количеству выпущенной воды, проводились испытания II. При этом следилось чтобы при открытии вентиля 3 вода из бюретки не уходила полностью в ВР.

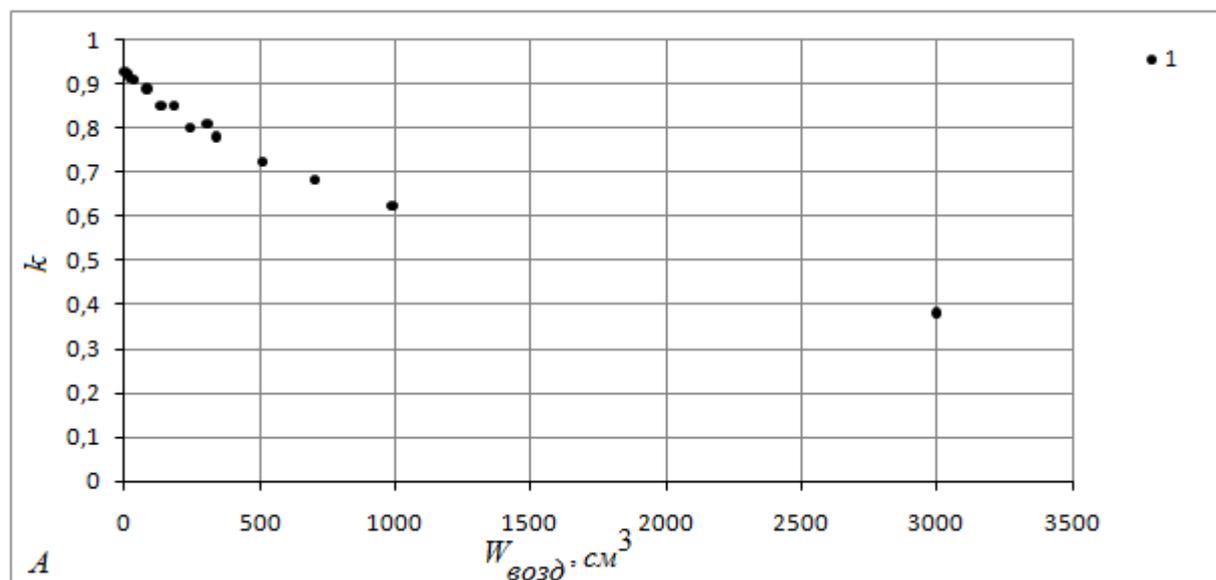


Рис. 17. Влияние воздуха в водяной рубашке на коэффициент систематической неточности бюретки.

Систематическая погрешность системы тем больше, чем ниже измеряемый столб жидкости в бюретке и чем меньше диаметр этой бюретки, а также чем больше объем воды в самой водяной рубашке. Изменение объема самой водяной рубашки вследствие деформаций от давления, создаваемого столбом жидкости также вносит свой вклад, но он незначителен. Влияние поджатия воды также незначительно. Возможные воздушные подушки в водяной рубашке значительно увеличивают эту погрешность. При использовании перемещаемой в вертикальном направлении бюретки такой погрешности не возникает. Поскольку систематическая погрешность зависит от многих факторов, то определять ее стоит перед каждым испытанием, тем более при смене объекта испытаний.

6. Поджатие воды.

Величина поджатия воды зависит от количества самой воды, которая поджимается, давления и температуры. Формулу для расчета сжимаемости воды, а также пример расчета коэффициента остаточного расширения баллонов по методу прямого расширения (без водяной рубашки) можно найти в ISO 6406:2005(E) [1] а в [2] приведено детальное пояснение.

В ISO 6406:2005(E) [1], сжимаемость воды определяется исходя из массы воды в зависимости от давления в барах, также учитывается влияние температуры. Перепишем формулу для объема, а не для массы, введя плотность, и давления в МПа.

$$\Delta V = \frac{V_o \rho}{1000} 10P \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot 10P}{10^5} \right) = \frac{V_o \rho P}{100} \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right), \quad (9)$$

где:

ΔV - уменьшение объема воды в см³, (поджатие);

V_o - объем воды в нагруженном давлением баллоне в см³, т.е. первоначальный объем плюс затраченный насосом для создания давления P . Естественно что V в условиях атмосферного давления;

P - внутреннее давление в МПа;

k - табличный коэффициент, учитывающий поджатие воды при различных температурах, [1, 2, 3];

ρ - плотность воды размерность в кгс/дм или тоже самое в г/см³. В формуле значение ρ равно единице или немного ниже ее, в зависимости от температуры.

На рисунке 18 приведено изменение объема (поджатие) 100 л воды от приложенного давления, для 5, 20, 35 °С. Расчеты проведены по формуле (9). Понятно, что для других объемов все пропорционально. Можно подразумевать и как изменение в процентах для ста процентов объема. Также следует отметить, что зависимости на рисунке 18 не являются линейными, производная с ростом давления уменьшается. Линейными их можно считать только в первом приближении.

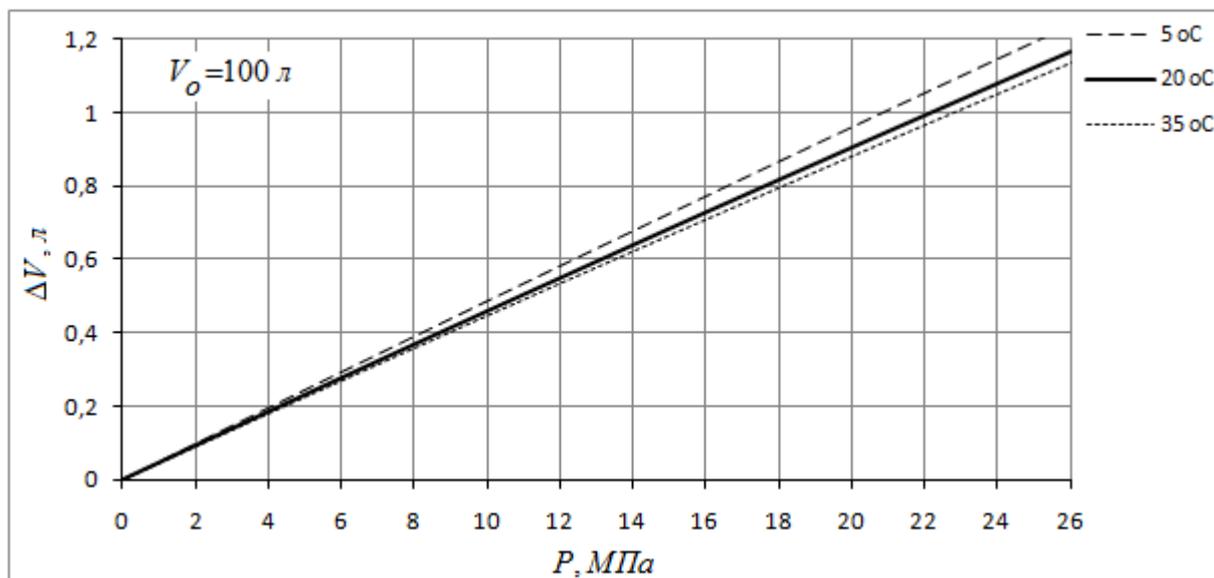


Рис. 18. Изменение объема 100 л воды от приложенного давления, для 5, 20, 35 °С.

При нагружении баллона внутренним давлением, вода, которую подает насос, идет на увеличение объема баллона и на поджатие воды, которая находится в баллоне. Причем на поджатие, приходится, как правило, больше воды, чем на увеличение объема. При испытании баллонов внутренним давлением, объем воды закачиваемый насосом в баллон (ΔW_H , см³) можно связать выражением:

$$\Delta W_H = \Delta W + (W_o + \Delta W_H) \cdot \frac{\rho P}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right),$$

где:

W_o - первоначальный внутренний объем баллона - объем воды в нагруженном давлением баллоне в см³;

ΔW - изменение объема баллона при нагружении его внутренним давлением в см².

Здесь речь идет только о баллоне, поэтому внутренний объем арматуры и поджатие воды в ней мы не учитываем. Тем более арматура можем в себя включать и ресиверы - этот вопрос должен рассматриваться отдельно.

$$\text{Далее } \Delta W_H \left(1 - \frac{\rho P}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right) \right) = \Delta W + W_o \frac{\rho P}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right), \text{ отсюда}$$

$$\Delta W_H = \frac{\Delta W + W_o \frac{\rho P}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right)}{1 - \frac{\rho P}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right)}. \quad (10)$$

Также получаем, что

$$\Delta W = \Delta W_H - (W_o + \Delta W_H) \cdot \frac{\rho P}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right). \quad (11)$$

Аналогичная формула, (речь идет о последней формуле) но при плотности равной единице, приведена и в [3], но там еще учитывается и арматура. Температурный диапазон для определения коэффициента k расширен по сравнению с ISO 6406:2005(E) [1] и составляет 5...37 °С. В интервале же 6...26 °С они полностью совпадают.

Для упрощения можно было бы положить $\beta_t = \frac{1}{100} \cdot \left(k - \frac{0,68 \cdot P}{10^4} \right)$.

В качестве примера рассмотрим испытания образца I4. Образец I4 представляет из себя тоже, что и образец II (см. выше), но на всю цилиндрическую стенку которого, после испытаний в упругой области, в последствии устанавливался бандаж методом намотки ровинга из стекловолокна, пропитываемого в эпоксидном связующем.

После нагружения образца внутренним давлением, лабораторная установка позволяла перекрывать образец от подходящей к нему гидравлической арматуры. Затем, используя дополнительный вентиль, из образца выпускался излишек воды, накаченный в него насосом. Испытания образца проводились в водяной рубашке, что позволяло также определять изменение его объема.

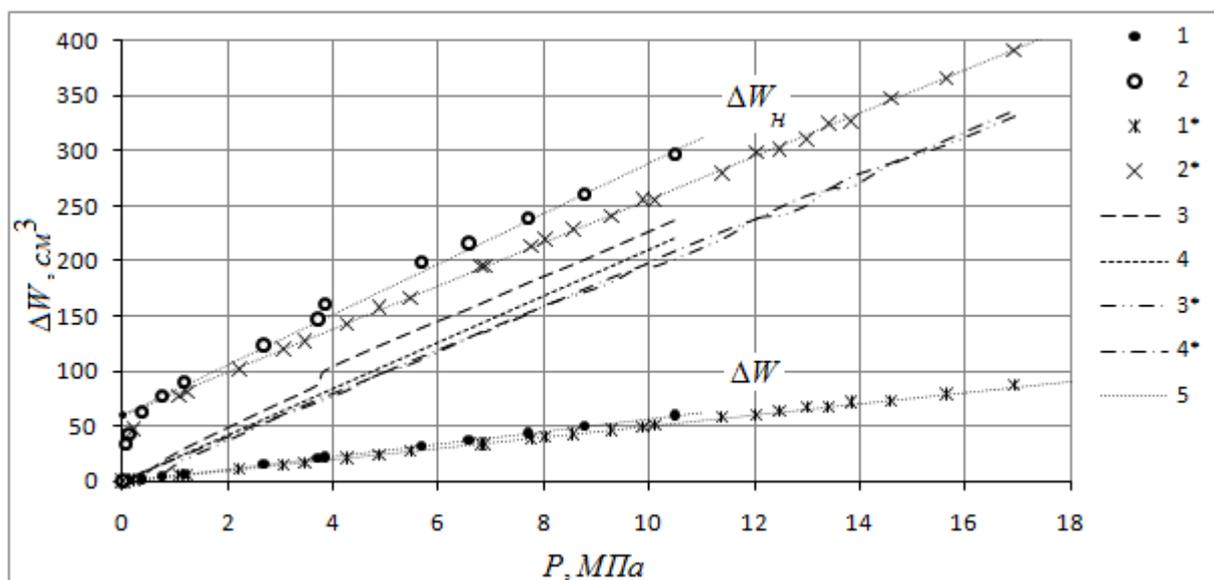


Рис. 19. Изменение объема образца I4 и количество воды дополнительно вмещаемого в него в зависимости от внутреннего давления:

1 - изменение наружного объема баллона; 2 - количество воды, в последствии выпущенное из баллона; 3 - значения 2 опущенные на величину 60 см^3 ; 4 - значения, рассчитанные по формуле (10); 5 - прямые линии. Звездочкой «*» указаны зависимости после установки бандажа на цилиндрическую часть образца.

Из рисунка 19 видно, что после намотки бандажа объемная податливость образца немного уменьшилась. Также следует отметить следующую особенность. Поскольку в качестве днищ использовались плоские приварные пластины, и штуцер для выпуска воздуха находился не у самого края днища, то полностью выпустить воздух из образца не удалось. Поэтому вследствие сжатия воздуха, зависимости ΔW_n , см. рисунок 19, имеют характерную особенность при низких давлениях. В идеале, если бы воздух был полностью выпущен, зависимости были бы близки к линейным, идущим от нуля, что наблюдается у баллонов с полусферической горловиной.

Использованные источники:

1. ISO 6406:2005(E) - Gas cylinders. Seamless steel gas cylinders. Periodic inspection and testing. (Газовые баллоны. Бесшовные стальные газовые баллоны. Периодическая инспекция и испытание).
2. Дмитриенко Р. И. Использование метода остаточного расширения баллонов, (ОРБ) // Рабочая записка: RZ DRI - 120214. URL: <http://www.dri1.cc.ua/RZ/RZ-DRI-120214.pdf> (дата обращения: 28.01.2017).
3. GB 9251-88, GB/T 9251-1997 и GB/T 9251-2011 - 气瓶水压试验方法 (气瓶水压试验方法) - Баллоны. Методы гидростатических испытания газовых баллонов (Китай). (Относятся к бесшовным стальным и из алюминиевых сплавов газовым баллонам).

*** $|u \uparrow a|$ ***

Текст: <http://www.dri1.cc.ua/RZ/RZ-DRI-050417.doc>

Дмитриенко Р. И. Из опыта проведения гидравлических испытаний сосудов внутренним давлением // Рабочая записка: RZ DRI - 050417. URL: <http://www.dri1.cc.ua/RZ/RZ-DRI-050417.pdf> (дата обращения: 06.09.2018).

© Роман Игоревич Дмитриенко. (Roman Dmytriienko). Моб.: +380688579600.

SPIN- код: 5715-5773. www.orcid.org/0000-0001-8842-5051.

YouTube: <https://www.youtube.com/channel/UCBEzDeXFjUeCKCN6nUYqsQA>.

Сайт: <http://www.dri1.cc.ua>. E-mail: dri1@ukr.net. Skype: dri1dri1. Украина.