

ЗАПЕРТЫЙ ОБЪЕМ ВОЗДУХА КАК ФАКТОР ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОБЪЕМНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКОСТИ

К.К. Лайко^{1,2}

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² Челябинский компрессорный завод, г. Челябинск, Россия

Диагностика состояния рабочих жидкостей и масел на местах непосредственной эксплуатации всегда остается актуальной задачей отделов контроля качества предприятий и производств, применяющих их для нужд собственного станочного парка или для заправки выпускаемой продукции. Несоответствующие условия хранения на складах и терминалах, недобросовестные производители и поставщики, поддельные сертификаты качества и другие факторы современной развитой рыночной экономики приводят к ситуации, когда техника заправляется рабочими жидкостями и маслами с неизвестными, искаженными характеристиками. Одной из важных характеристик является стойкость жидкости к вспениванию. Особое значение она имеет для компрессорной техники, силового и станочного гидропривода. Режимы резкого падения давления, разряжения, отрыва потока от профиля канала и другие воздействия способны вызвать разрыв сплошности жидкости с образованием газовых пузырьков и каверн. Режим смазки в таком случае нарушается, возникает перегрев и преждевременный износ техники, развивается кавитация. Несмотря на то, что изучение разрыва жидкости продолжается не одно десятилетие, достоверный и воспроизводимый способ его диагностики не найден. Достаточно известным среди способов служит разрыв жидкости в герметичной камере с постепенно увеличивающимся объемом – сильфоном. В статье на основе проведенных автором исследований анализируется главный фактор достоверности такого способа – наличие случайно запертого в камере воздуха.

Ключевые слова: давление разрыва, объемная прочность жидкости, диагностика масла, начальная стадия кавитации, запертый объем.

Введение

Способность жидкости сопротивляться разрушающему воздействию, стремящемуся увеличить ее объем, называется объемной прочностью [1–8]. В технической литературе ее численной характеристикой служит давление разрыва p_p .

Способам экспериментального измерения давления разрыва посвящено достаточное количество работ отечественных и зарубежных исследователей [1–7, 10–19]. Одним из распространенных способов служит герметичная камера с изменяющимся объемом. К жидкости, запертой в такой камере, прилагается усилие, направленное на увеличение объема камеры. Простейший пример – шприц, наполненный водой и запаянный со стороны присоединения иглы. Прилагаемое к штоку усилие воздействует на воду и при достижении определенного значения вызывает образование пузырьков воздуха и выдвигание штока. Однако камеры с подвижным штоком имеют значительный недостаток – негерметичность переходной посадки между штоком и цилиндром. Проникновение воздуха в камеру через эту посадку ставит под сомнение достоверность получаемых результатов. Идеальным элементом, способным изменять свой объем и обеспечивать абсолютную герметичность, является сильфон [4, 11]. Но и с его применением существует ряд проблем. Практика исследований показывает, что и сильфонная камера не гарантирует получения достоверных результатов ввиду того, что при ее заполнении воздух замещается жидкостью неполностью.

Для борьбы с запертым воздухом в экспериментах ряда авторов [3, 6, 7, 9, 11] камера подвергалась нагреву, и воздух растворялся в исследуемой жидкости. Для диагностики реального состояния жидкости такой способ недопустим, так как свойства исследуемого образца при нагреве изменяются.

Для камер на основе сильфонов разработан и применяется ряд мер по обеспечению качественного заполнения:

- а) объем наполняется жидкостью снизу вверх, обеспечивая вытеснение воздуха жидкостью;
- б) гофра сильфона должна находиться в растянутом состоянии что позволяет внутренним кольцам гофры раскрыться и принять положительный угол $+\varphi$ для исключения запираания в них жидкости, так как в разгруженном состоянии гофра в соответствии с геометрическими паспортными параметрами ряда сильфонов имеет отрицательный угол $-\varphi$, что служит ловушкой для воздуха (см. также рис. 4, б);
- в) отсечной кран, запирающий жидкость внутри камеры, должен находиться под уровнем жидкости.

Кроме того, конструкция камеры не должна быть предрасположена к накоплению и удержанию воздуха или препятствовать его выходу при заполнении:

- а) торцевые поверхности должны иметь минимальное количество плоских поверхностей и представлять собой в основном конусные отверстия, позволяющие воздуху свободно подниматься из камеры снизу вверх;
- б) резьбовые соединения должны быть уплотнены герметиком на всю длину резьбы и исключать возможность прохождения воздуха в резьбовое соединение;
- в) конструкция должна иметь как можно меньше соединений, особенно соединений разнородных материалов, например, стекла и резины, резины и стали, пластика и стали;
- г) применение показывающих приборов не рекомендуется ввиду невозможности полностью удалить воздух из их внутренних чувствительных элементов.

К сожалению, соблюдение этих мер и требований не обеспечивает абсолютную уверенность в отсутствии запертого воздуха в заполненной камере. Увидеть воздух внутри камеры невооруженным глазом невозможно, а специализированное оборудование крайне дорогостояще и все равно не позволяет определить объем воздуха прямым измерением. Альтернативным вариантом оценки объема воздуха служит анализ процесса, протекающего в герметичном объеме, и его теоретический расчет.

1. Принцип работы стенда и построение поля характеристик жидкости. Схема испытательного стенда на основе сильфонной камеры представлена на рис. 1. Она включает сильфон СФ, на верхней крышке которого установлен кран шаровой КШ4 и расширительный бачок БР. Нижняя крышка через компенсационный рукав РК1 соединена с баком БМ, для испытываемого образца жидкости. РК1 предназначен для минимизации влияния веса трубопроводов и арматуры и исключения отклонения СФ от вертикальной оси. БМ устанавливается выше СФ, чем достигается полное заполнение как СФ, так и БР. КШ4 при этом оказывается под уровнем жидкости что исключает задержание под ним воздуха во время наполнения и закрытия. Слив жидкости из СФ производится перемещением БМ ниже СФ. Для соединения БМ с СФ предусмотрены быстроразъемные соединения БРС2 и БРС3. Для наполнения БМ предусмотрено быстроразъемное соединение БРС1. Сильфон установлен в серповидных держателях, входящих в его гофру. Верхние серповидные держатели ВСД1 и ВСД2 закреплены неподвижно. Нижние серповидные держатели НСД1 и НСД2 для исключения отклонения от вертикальной оси шарнирно соединены тросами с мерной нагружающей емкостью ЕНМ и перемещаются вместе с ней. Нагружение объема производится подачей воды дозирующим центробежным насосом Н в ЕНМ из бака БВ. Регулирование подачи Н осуществляется перепуском части потока в бак через кран КШ7. ЕНМ соединена с трубопроводами и арматурой через компенсационный рукав РК2, выполняющий те же функции, что и РК1. БВ расположен выше оси Н, но ниже ЕНМ, что в первом случае позволяет обеспечить постоянное нахождение Н под уровнем воды, а во втором – слив воды из ЕНМ самотеком. Контроль параметров окружающей среды осуществляется многофункциональным прибором ИПС, совмещающим в себе функции барометра, термометра и гигрометра. Удлинение сильфона под действием веса воды отслеживается микрометром МКМ, установленным непосредственно под дном сильфона.

В ходе испытаний строится поле последовательных характеристик (рис. 2) по следующему алгоритму:

1. Камера заполняется исследуемой жидкостью до отметки «макс» на БР, после чего отсекается КШ3 и КШ4.

Контроль и испытания

2. Насос Н подает воду в ЕНМ, при этом фиксируется объем и соответствующее ему удлинение – строится характеристика «1», в которой известный вес воды, отнесенный к площади нижней крышки камеры, дает единицы давления.

3. Кран КШ4 открывается, воздух, вышедший в камере, поднимается вверх и через БР выходит в атмосферу. Одновременно производится слив воды в БВ самотеком при остановленном насосе Н.

4. Ожидание выхода воздуха принято постоянным и составляет 600 ± 20 с.

5. По МКМ контролируется возвращение к нулевой отметке, после чего КШ4 вновь закрывается и испытание повторяется с п. 2 строится характеристика «2» и т. д.

Из рис. 2 видно, что угол наклона кривых при переходе от предыдущего испытания к следующему постоянно растет. Это означает, что система «камера – жидкость» повышает свою жесткость из-за удаления воздуха. Здесь и проявляется главный фактор достоверности: неясно выделяется ли воздух из испытываемой жидкости или выходит из геометрически несовершенной камеры. В пользу второго малоприятного явления говорит, что большинство авторов [1, 3, 4, 10, 11] описывают потерю жидкостью прочности как разрушение хрупкого материала: удлинения сильфона до определенной нагрузки происходить не должно.

2. Вывод формулы расчета начального объема. Благодаря построению поля характеристик (см. рис. 2) начальный объем воздуха W_n , который может быть заперт внутри камеры, может быть рассчитан через классическое уравнение термодинамического процесса:

$$p_n W_n^k = p_k W_k^k = const, \quad (1)$$

где p_n – начальное абсолютное давление внутри камеры, $кПа$;

p_k – конечное абсолютное давление внутри камеры, $кПа$;

W_n – начальный объем запертого воздуха, $мм^3$;

W_k – конечный объем запертого воздуха, $мм^3$,

k – показатель процесса: для адиабатного $k = 1,4$, для изотермического $k = 1,0$

Начальный объем W_n является искомым. Выражение его из (1) дает:

$$W_n = W_k \left(\frac{p_k}{p_n} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (2)$$

Начальное давление p_n , установившееся в камере после закрытия крана КШ4, равно текущему атмосферному давлению $p_{атм}$, сложившемуся на момент испытаний. Оно измеряется барометром напрямую и всегда известно:

$$p_n = p_{атм}. \quad (3)$$

Конечное давление p_k определяется по весу воды G , приложенному ко дну сильфона, за вычетом силы сопротивления гофры сильфона F_c . Вес G определяется по объему воды $W_в$ в ЕНМ и ее плотности $\rho_в$:

$$G = \rho_в W_в g. \quad (4)$$

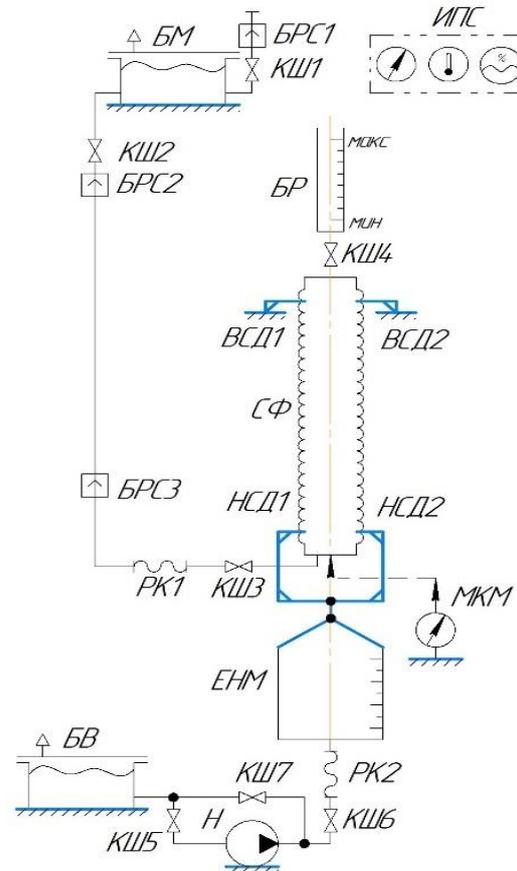


Рис. 1. Принципиальная схема испытательного стенда

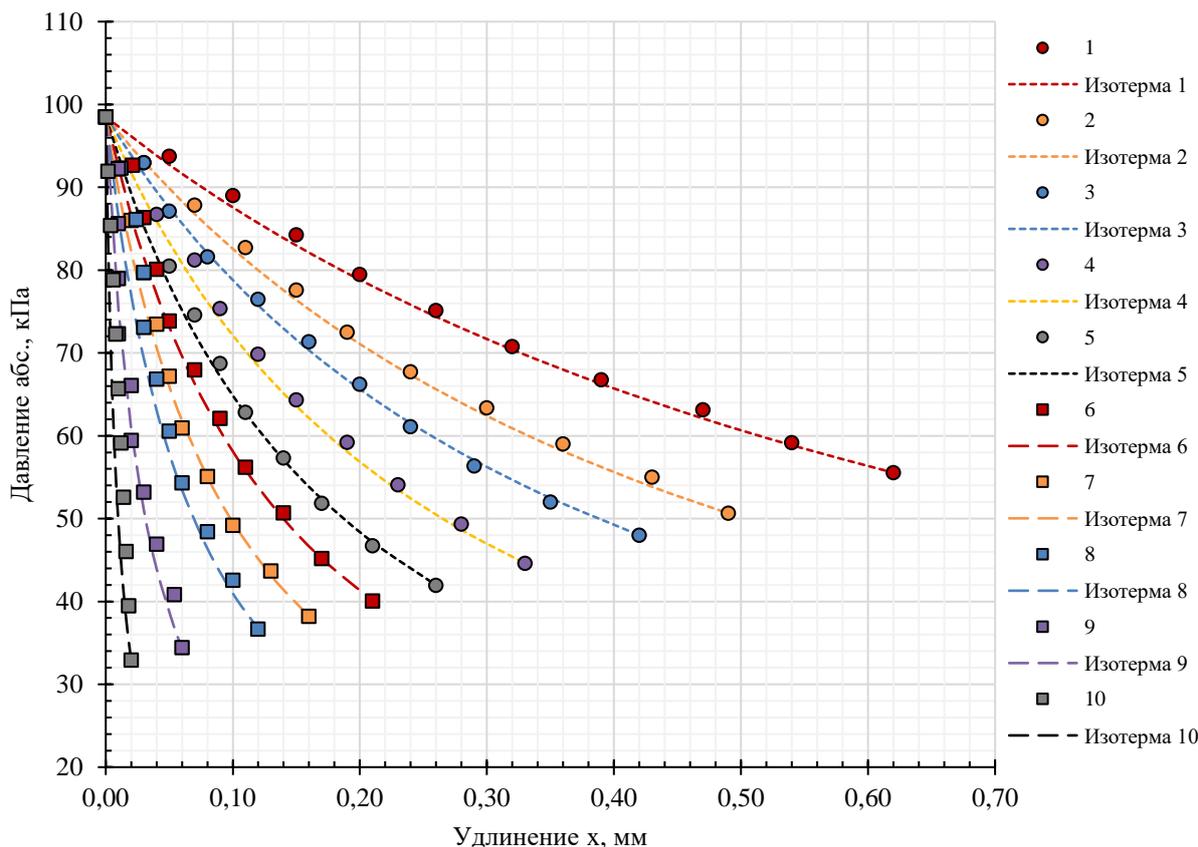


Рис. 2. Поле из 10-ти последовательных характеристик сопротивления

При соблюдении нормальных условий испытаний по [20] $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3 = \text{const}$. Объем воды определяется прямым измерением по ЕНМ. Сила сопротивления сиффона F_c определяется его механической характеристикой при известном удлинении x :

$$F_c = k_c x. \quad (5)$$

Разность $G - F_c$, действующая на дно сиффона площадью S (на условном диаметре d_y), дает текущее значение давления p_k :

$$p_k = \frac{G - F_c}{S} = \frac{4 \cdot (\rho_B W_B g - k_c x)}{\pi d_y^2}. \quad (6)$$

Удлинение сиффона определяется прямым измерением микрометром МКМ (см. рис. 1) с применением индикатора часового типа по ГОСТ 577 с ценой деления $0,01 \text{ мм}$.

Конечный объем воздуха W_k связан с начальным W_H через изменение объема камеры ΔW :

$$W_k = \Delta W + W_H, \quad (7)$$

предполагая, что изменение объема гофрированной части исчезающе мало по сравнению с изменением всей камеры, ΔW рассчитывается через условный диаметр d_y и измеренное с помощью МКМ удлинение x :

$$\Delta W = x \cdot \frac{\pi d_y^2}{4}. \quad (8)$$

Подстановка в (2) формул (3) – (8) дает формулу для расчета начального объема:

$$W_H = \frac{x \cdot \frac{\pi d_y^2}{4} \left(\frac{4 \cdot (\rho_B W_B g - k_c x)}{\pi d_y^2 p_{\text{атм}}} \right)^{\frac{1}{k}}}{1 - \left(\frac{4 \cdot (\rho_B W_B g - k_c x)}{\pi d_y^2 p_{\text{атм}}} \right)^{\frac{1}{k}}}. \quad (9)$$

Уравнение (9) устанавливает следующие необходимые для расчета параметры:

а) вид протекающего термодинамического процесса, характеризуемый показателем k ;

Контроль и испытания

б) объем воды в нагружающей емкости $W_в$, м³;

в) удлинение сиффона x , мм;

г) атмосферное давление $p_{атм}$, Па.

При этом применяются следующие постоянные (паспортные) значения:

а) коэффициент механической характеристики сиффона $k_c = 30,339$;

б) условный диаметр сиффона $d_y = 32$ мм;

в) плотность воды $\rho_в = 1000$ кг/м³;

г) ускорение свободного падения $g = 9,81$ Н/кг;

д) число $\pi = 3,14$.

Ввиду малой скорости процесса нагружения – подача насоса N порядка 1 л/мин, одна характеристика из 10 точек строится в течение 5 мин – теплообмен жидкости с внешней средой следует считать установившемся, следовательно, расширение воздуха (если он есть) происходит по изотермическому закону, т. е. $k = 1$.

3. Анализ уравнений регрессии. Подстановка в (9) указанных величин с учетом перевода их в систему СИ дает для каждой характеристики (см. рис. 2) начальный объем воздуха W_n , который теоретически должен находиться в камере, чтобы изменение объема сиффона произошло на величину, рассчитанную по удлинению x .

На рис. 3 приведены результаты для 2-х разнородных жидкостей: компрессорного масла и питьевой воды. При их рассмотрении можно заключить следующее.

1. Регрессии с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,9935, R^2 = 0,9943$) аппроксимируются натуральным логарифмом.

2. Пересечение уравнения аппроксимации с осью абсцисс дает номер характеристики (округленный до ближайшего целого в большую сторону), которая будет соответствовать процессу определения прочности жидкости, а не процессу удаления запертого воздуха из камеры. Для компрессорного масла это 10-я характеристика, а для воды – только 25-я.

3. Сравнение характеристик выявляет одну важную особенность: несмотря на то, что для масла 1-й начальный объем оказался на 26% больше, чем для воды (644 мм³ против 510 мм³), пересечение с осью абсцисс аппроксимации для масла было достигнуто значительно быстрее, чем для воды. Это явление может объясняться тем, что вода, имея значительно меньшую вязкость по сравнению с маслом, первоначально лучше заполнила камеру, однако была перенасыщена растворенными газами, которые выделялись в процессе испытания. Таким образом, для «газированных» жидкостей четко разделить процессы удаления запертого воздуха и их собственного упрочнения (вакуумирования) невозможно. Вопрос об отнесении жидкости к перенасыщенной газом выходит за рамки данной статьи, тем не менее следует отметить, что способ пересечения аппроксимации с осью абсцисс работает и для таких жидкостей, если дополнить основной параметр прочности – давление разрыва p_p – номером характеристики, а в перспективе – временем или скоростью достижения требуемой характеристики (скоростью набора прочности).

Рассчитанные начальные объемы W_n позволяют построить теоретические изотермы. Их наложение на экспериментальные данные по каждой характеристике сопротивления для компрессорного масла приведено на рис. 2. Очевидно, что экспериментальные точки достаточно близко лежат к соответствующим изотермам, что подтверждает правомерность допущения об изотермическом процессе и положительно характеризует качество выполнения испытаний.

4. Сравнение рассчитанного запертого объема с характерными объемами сиффона. Порядок величины запертого объема, рассчитанного для 1-й характеристики, для различных образцов исследованных жидкостей, лежит вблизи значений, указанных на рис. 3, и не превышает 1000 мм³ (1 мл). Анализ геометрии сиффонной камеры позволяет установить характерные объемы для запираемого воздуха.

Эскиз элемента гофры сиффона в соответствии с паспортными данными (табл. 1) приведен на рис. 4, а. В исходном состоянии она немного сжата, угол гофры φ отрицателен (рис. 4, б). Если производить наполнение камеры в таком состоянии, воздух задержится в верхних точках каждого витка.

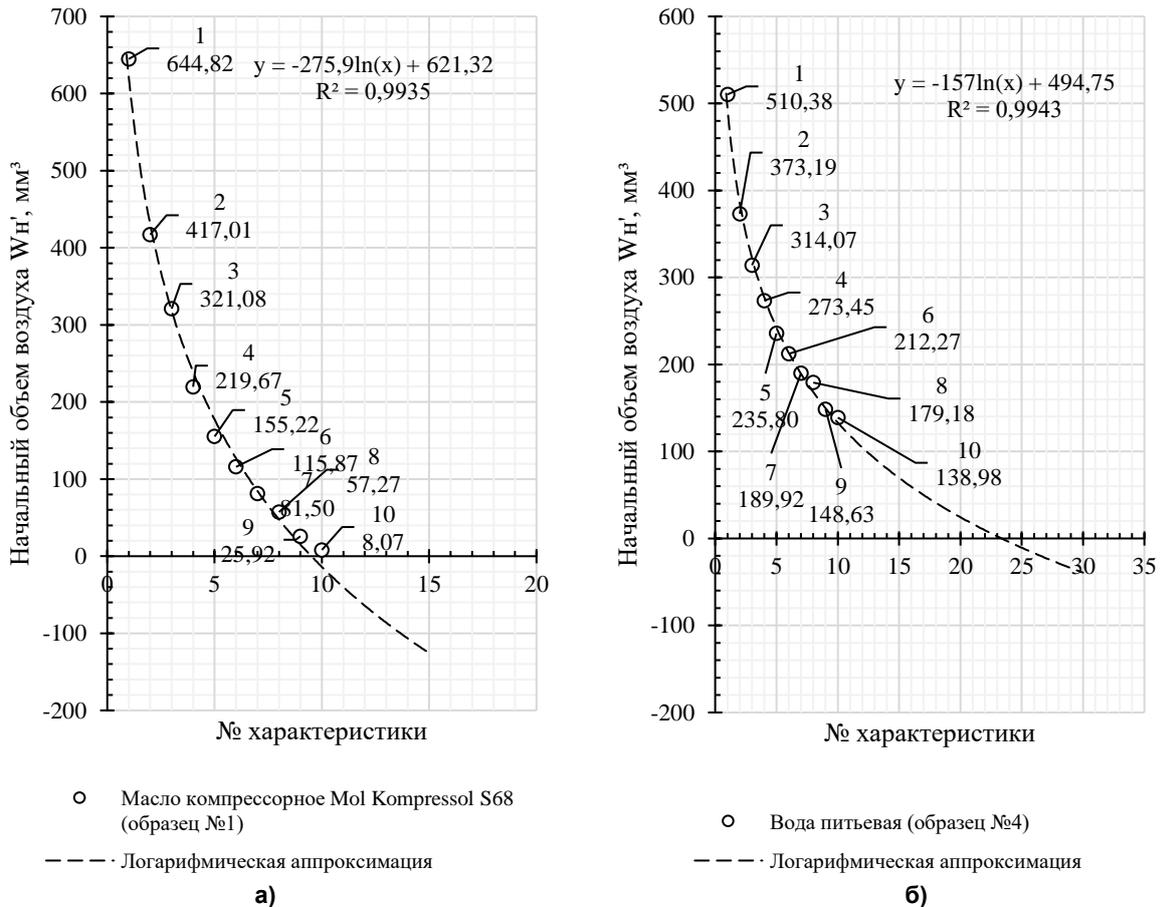


Рис. 3. Начальные объемы запертого воздуха для 10-ти характеристик сопротивления: а – масло компрессорное, б – вода питьевая

Нельзя также исключать, что достаточно вязкое масло может и вовсе не заполнять гофру. Поэтому наибольшее значение имеют 2 характерных объема:

- а) объем витка гофры W_z (см. рис. 4, а);
- б) заземленный объем при сжатой гофре W_ϕ , образуемый внутренней поверхностью гофры и уровнем жидкости, попавшей в гофрированную часть (см. рис. 4, б).

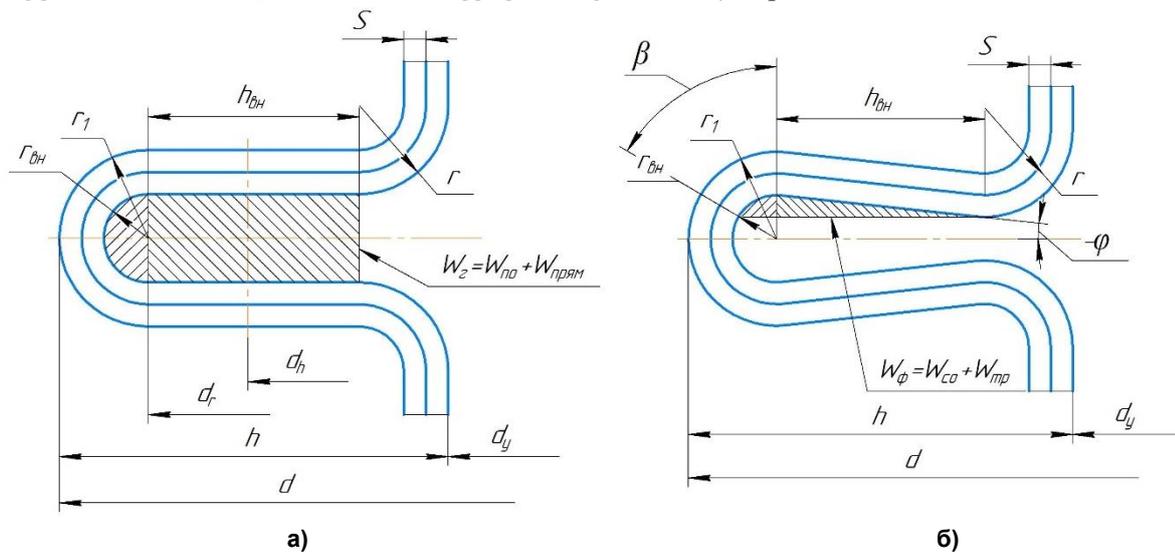


Рис. 4. Гофра сильфона: а – геометрические параметры; б – состояние сжатой гофры и заземленного объема воздуха

Контроль и испытания

Объем витка гофры W_2 вычисляется как сумма объемов двух торов: с сечением в виде полуокружности на диаметре d_r и в виде прямоугольника на диаметре d_h :

$$W_{\Gamma} = W_{\text{по}} + W_{\text{п}}. \quad (10)$$

Объем $W_{\text{по}}$ определяется как половина объема тора круглого сечения:

$$W_{\text{по}} = \frac{\pi d_r \cdot \pi r_{\text{вн}}^2}{2}. \quad (11)$$

Объем $W_{\text{п}}$ определяется как объем тора прямоугольного сечения:

$$W_{\text{п}} = \pi d_h \cdot 2r_{\text{вн}} h_{\text{вн}}. \quad (12)$$

Таблица 1

Геометрические параметры сильфона

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Значение
Объем камеры	$W_{\text{ск}}$	мл	215,0
Диаметр условный	d_y	мм	32,0
Диаметр внешний	d	мм	40,4
Толщина слоя	S	мм	0,2
Радиус гофры внешний	r_1	мм	1,2
Радиус гофры внутренний	r	мм	0,9
Длина выступа	h	мм	4,2
Шаг гофры	t	—	3,0
Исходный угол гофры	φ_0	°	2
Кол-во витков	Z_6	—	72

Подстановка (11) и (12) в (10) дает выражение для вычисления объема витка:

$$W_{\Gamma} = \frac{\pi d_r \cdot \pi r_{\text{вн}}^2}{2} + \pi d_h \cdot 2r_{\text{вн}} h_{\text{вн}}. \quad (13)$$

Защемленный объем при сжатой гофре W_{φ} удобно определить, уменьшив объем W_2 пропорционально площадям:

$$W_{\varphi} = W_{\Gamma} \frac{S_{\Gamma}}{S_{\varphi}}. \quad (14)$$

Площадь S_2 уже применялась для вычисления объема W_2 :

$$S_{\Gamma} = \frac{\pi r_{\text{вн}}^2}{2} + 2r_{\text{вн}} h_{\text{вн}}. \quad (15)$$

Площадь S_{φ} как сумма двух площадей: части окружности $S_{\text{со}}$ и объема с треугольным сечением $S_{\text{тр}}$.

$$W_{\varphi} = W_{\text{со}} + W_{\text{тр}}. \quad (16)$$

Площадь $S_{\text{со}}$ представляет собой разность площадей сектора окружности с углом β радиусом $r_{\text{вн}}$ и прямоугольного треугольника с тем же углом β , в котором $r_{\text{вн}}$ является гипотенузой. Угол β легко найти по известному из табл. 1 углу φ .

$$\beta = \arccos \frac{r_{\text{вн}} - h_{\text{вн}} \cdot \text{tg} \varphi}{r_{\text{вн}}}. \quad (17)$$

Тогда разность площадей сектора и треугольника вычисляется по формуле:

$$S_{\text{со}} = \pi r_{\text{вн}}^2 \frac{\arccos \frac{r_{\text{вн}} - h_{\text{вн}} \cdot \text{tg} \varphi}{r_{\text{вн}}}}{360} - \frac{r_{\text{вн}}^2 \sin \beta \cos \beta}{2}. \quad (18)$$

Площадь $S_{\text{тр}}$ определяется по известному углу φ и длине $h_{\text{вн}}$:

$$S_{\text{тр}} = \frac{h_{\text{вн}}^2 \cdot \text{tg} \varphi}{2}. \quad (19)$$

Подстановка формул (15) и (18) в (14) дает выражение для вычисления объема при сжатой гофре W_{φ} через пропорциональное уменьшение площади:

$$W_{\varphi} = W_{\Gamma} \cdot \frac{\pi r_{\text{вн}}^2 \frac{\arccos \frac{r_{\text{вн}} - h_{\text{вн}} \cdot \text{tg} \varphi}{r_{\text{вн}}}}{360} - \frac{r_{\text{вн}}^2 \sin \beta \cos \beta}{2} + \frac{h_{\text{вн}}^2 \cdot \text{tg} \varphi}{2}}{\frac{\pi r_{\text{вн}}^2}{2} + 2r_{\text{вн}} h_{\text{вн}}}. \quad (20)$$

Значения величин d_r , $r_{\text{вн}}$ и $h_{\text{вн}}$ не известны, но могут быть найдены через данные табл. 1:

$$d_r = d - 2r_1 = 38 \text{ (мм)},$$

$$d_h = d - r_1 - h + r = 35,9 \text{ (мм)},$$

$$r_{\text{вн}} = r_1 - 2S = 0,8 \text{ (мм)},$$

$$h_{\text{вн}} = h - r_1 - r = 2,1 \text{ (мм)}.$$

Результаты вычислений объемов сиффона сведены в табл. 2. Здесь же для сопоставления приведены полученные значения начальных объемов W_n первой характеристики сопротивления компрессорного масла и воды. В процентах вычислено их соотношение.

Таблица 2

Соотношение начального объема запертого воздуха W_n и характерных объемов сиффона

Параметр		Обозн.	Ед. изм.	Значение	Компр. масло		Вода питьевая	
					W_n , мм ³	%	W_n , мм ³	%
Объем сиффона	1 виток	W_φ	мм ³	499	689	510	138,2	102,3
	72 витка	$W_{\varphi 72}$		35928			1,9	1,4
	1 сжатой гофры	W_φ		94			727,8	538,6
	72 сжатой гофры	$W_{\varphi 72}$		6768			10,1	7,5
	Цилиндрический	W_{dy}		173717			0,4	0,3
	Полный	W_c		209645			0,3	0,2

Анализируя результаты вычислений, можно заключить:

1) максимально близко к начальным объемам W_n лежит объем 499 мм³, приходящийся на 1 виток. Однако следует подвергнуть сомнению, что по какой-либо причине не заполнился только 1 из 72 одинаковых витков;

2) утверждать, что все 72 витка недозаполнены из-за сжатой на угол φ гофры также невозможно, так как их объем 6823 мм³ почти в 10 раз превышает начальные;

3) значения начальных объемов находятся между объемами 1-го (94 мм³) и 72-го (6768 мм³) витков сжатой гофры, поэтому следует полагать, что накопление воздуха в сиффоне все же происходит, но при меньшем угле, чем принятый для расчетов φ .

Заключение. При определении объемной прочности жидкости запертый в камере воздух оказывает решающее влияние на достоверность эксперимента. Из расчетов видно (см. табл. 2), что для искажения результатов достаточно всего 0,2 – 0,3 % от полного объема камеры.

Теоретически рассчитанный объем воздуха W_n , запертый после заполнения камеры жидкостью, имеет тот же порядок, что и характерный (геометрически возможный, предрасположенный к заземлению) объем гофры сиффона. Этот факт свидетельствует о невозможности с первого раза заполнить гофру полностью и делает необходимым построение и исследование поля получаемых характеристик, математический анализ которого, отражающий динамику удаления воздуха из камеры, позволяет определить номер характеристики сопротивления, начиная с которой следует считать, что запертый воздух удален полностью. Ее вид отличается от предыдущих характеристик тем, что в начале нагружения удлинения сиффона не происходит: жидкость оказывает сопротивление. Именно по этой характеристике, но не ранее, следует определять главный параметр объемной прочности жидкости – давление разрыва p_p .

Литература

1. Корнфельд, М. Методы и результаты исследования объемной упругости вещества [Электронный ресурс] / М. Корнфельд // Успехи физических наук. – Режим доступа: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1954/10/ufn54_10_04.pdf. (дата обращения 20.11.2021 г.)

2. Корнфельд, М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд. – М., Л.: Гостехтеоретиздат, 1957. – 110 с.

3. Хейуорд, А. Отрицательные давления в жидкостях. Как их заставить служить человеку [Электронный ресурс] / А. Хейуорд // Успехи физических наук. – Режим доступа: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf (дата обращения 20.11.2021 г.)

4. Хохлов, В.А. Электрогидравлический следящий привод / В.А. Хохлов. – М.: Наука, 1964. – 230 с.

Контроль и испытания

5. Trevena, D.H. *Theoretical values for the tensile strength of certain liquids* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1975. – V. 8. – P. L144–L147.
6. Vincent, R.S. *Examination of the Berthelot method of measuring tension in liquids* // *Proc. Phys. Soc. (London)*. – 1941. – V. 55. – No. 6. – P. 376–382.
7. Vincent, R.S. *The viscosity tonometer - a new method of measuring tension in liquids* // *Proc. Phys. Soc. (London)*. – 1941. – V. 55. – No. 1. – P. 4–48.
8. Биркгоф, Г. *Струи следы и каверны* / Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло; пер. с англ. В.П. Вахомчика, М.М. Литвинова; под ред. Г.Ю. Степанова. – М.: Мир, 1964.
9. Пирсол, И. *Кавитация* / И. Пирсол; пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. – М.: Мир, 1975. – 98 с.
10. Пильгунов, В.Н. *Исследование разрывной прочности минерального масла* / В.Н. Пильгунов // *Наука и образование: электронный научно-технический журнал*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 17 с.
11. Vincent, R.S. *The measurement of tension in liquids by means of a metal bellows* // *Proc. Phys. Soc. (London)*. – 1941. – V. 53. – P. 126–140.
12. Еремьянц, В.Э. *К методике экспериментальных исследований влияния давления жидкости на ее объемный модуль упругости* / В.Э. Еремьянц, Б.С. Султаналиев // *Машиноведение*. – 2019. – № 1 (9). – С. 82–90.
13. Юр, Г.С. *Численное исследование процесса кавитации в капле жидкости* / Г.С. Юр, С.В. Пинясов // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – № 1-3 (43). – С. 53–56.
14. Delale, C.F. *Homogeneous bubble nucleation in liquids: the classical theory revisited* / C.F. Delale, J. Hruby, F. Marsik // *J. Chem. Phys.* – 2003. – V.118. – No. 2. – P. 792–806.
15. Morch, K.A. *Cavitation nuclei: experiments and theory* / K.A. Morch // *J. of Hydrodynamics*. – 2009. – V. 21. – No. 2. – P. 176–189.
16. *Study of the Berthelot method for determining the tensile strength of a liquid* / D.F. Scott, D.P. Shoemark, K.N. Tanner, J.G. Wendel // *J. Chem. Phys.* – 1948. – V. 16. – P. 495–502.
17. Brennen, C.E. *Cavitation and bubble dynamics* / C.E. Brennen – Oxford University Press, USA, 1995. – 282 p.
18. Cosden, I.A. *Effect of cut-off radius on the surface tension of nanoscale bubbles* / I.A. Cosden, J.R. Lukes // *J. Heat Transfer*. – 2011. – V. 133. – No. 10. – P. 101–501.
19. Hansen, J.P., *Theory of Simple Liquids* / J.P. Hansen, I.R. McDonald – Academic Press, London, 2006. – 428 p.
20. ГОСТ 15150–69. *Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды*. – М.: Стандартинформ, 2010.

Лайко Константин Константинович – руководитель центра испытаний и исследований ООО «Челябинский компрессорный завод», старший преподаватель-совместитель кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, laiko@chgz.ru

Поступила в редакцию 22 ноября 2021 г.

LOCKED AIR VOLUME AS A CONFIDENCE FACTOR IN DETERMINING THE VOLUMETRIC STRENGTH OF A LIQUID

K.K. Layko^{1,2}, laiko@chkz.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Chelyabinsk Compressor Plant, Chelyabinsk, Russian Federation

Diagnostics of the condition of working fluids and oils in the field of direct operation always remains an urgent task of the quality control departments of enterprises and industries that use them for the needs of their own machine park or for filling the manufactured products. Inappropriate storage conditions in warehouses and terminals, unscrupulous manufacturers and suppliers, fake quality certificates and other factors of the modern developed market economy lead to a situation where equipment is filled with working liquids and oils with unknown, distorted characteristics. One important characteristic is the foaming resistance of the liquid. It is of particular importance for compress equipment, power and machine-tool hydraulic drive. The modes of a abrupt pressure drop, rarefaction, flow separation from the channel profile and other influences can cause a rupture in the continuity of the liquid with the formation of gas bubbles and opens. In this case, there lubrication interval is violated, overheating and premature wear of equipment occur, cavitation develops. Despite the fact that the study of fluid rupture has been going on for more than a decade, a reliable and reproducible method of diagnosing it has not been found. Quite well known among the methods is the rupture of liquid in a sealed chamber with a gradually increasing volume – a bellows. The article on the basis of there search conducted by the author analyzes them in reliability factor of this method – the presence of air accidentally locked in the chamber.

Keywords: fracturing pressure, liquid volume strength, oil diagnostics, initial cavitation stage, locked volume.

References

1. Kornfeld M. *Metody i rezul'taty issledovaniya ob"yemnoy uprugosti veshchestva* [Methods and results of the study of volume elasticity of matter] [Electronic resource]. Advances in physical sciences. – Access mode: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1954/10/ufn54_10_04.pdf (accessed 20.11.2021).
2. Kornfeld M. *Uprugost' i prochnost' zhidkostey* [Elasticity and strength of liquids]. Leningrad: Gostekhizdat, 1957. 110 p.
3. Hayward A. *Otritsatel'nyye davleniya v zhidkostyakh. Kak ikh zastavit' sluzhit' cheloveku* [Negative pressures in liquids. How to make them serve a person] [Electronic resource]. Advances in physical sciences. – Access mode: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf (accessed 20.11.2021).
4. Khokhlov V.A. *Elektrohidravlicheskiy sledyashchiy privod* [Electro-hydraulic servo drive]. Moscow. Nauka, 1964. 230 p.
5. Trevena D.H. Theoretical Values for the Tensile Strength of Certain Liquids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1975, vol. 8, pp. L144–L147.
6. Vincent R.S. Examination of the Berthelot method of measuring tension in liquids. *Proc. Phys. Soc. (London)*, 1941, vol. 55, no. 6, pp. 376–382.
7. Vincent R.S. The viscosity tonometer – a new method of measuring tension in liquids. *Proc. Phys. Soc. (London)*, 1941, vol. 55, no. 1, pp. 41–48.
8. Birkhoff G., Sarantonello E. *Strui sledy i kaverny* [Jets traces and caverns]; translation from English. V.P. Vakhomchik, M.M. Litvinova; G.Yu. Stepanov (ed.). Moscow, Mir, 1964.
9. Pirsol I. *Kavitatsiya* [Cavitation]; translation from English. Yu.F. Zhuravleva. Moscow, Mir, 1975. 98 p.
10. Pilgunov V.N. *Issledovaniye razryvnoy prochnosti mineral'nogo masla* [Investigation of the breaking strength of mineral oil]. Science and education: electronic scientific and technical journal. Moscow, Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2012. 17 p.

11. Vincent R.S. The Measurement of Tension in Liquids by Means of a Metal Bellows. *Proc. Phys. Soc. (London)*, 1941, vol. 53, pp. 126–140.
12. Erem'yants V.E., Sultanaliev B.S. [On the Method of Experimental Studies of the Effect of Fluid Pressure on its Bulk Modulus of Elasticity]. *Machine Science*, 2019, no. 1(9). pp. 82–90 (in Russ).
13. Yur G.S., Pinyasov S.V. [Numerical Study of the Cavitation Process in a Liquid Drop]. *Marine Intelligent Technologies*, 2019, no. 1–3(43), pp. 53–56.
14. Delale C.F., Hruby J., Marsik F. Homogeneous Bubble Nucleation in Liquids: the Classical Theory Revisited. *J. Chem. Phys*, 2003, vol. 118, no. 2, pp. 792–806.
15. Morch K.A. Cavitation Nuclei: Experiments and Theory. *J. of Hydrodynamics*, 2009, vol. 21, no. 2, pp. 176–189.
16. Scott D.F., Shoemark D.P., Tanner K.N., Wendel J.G. Study of the Bertholet Method for Determining the Tensile Strength of a Liquid. *J. Chem. Phys*, 1948, vol. 16, pp. 495–502.
17. Brennen C.E. Cavitation and Bubble Dynamics. *Oxford University Press. USA*, 1995. 282 p.
18. Cosden I.A., Lukes J.R. Effect of cut-off Radius on the Surface Tension of Nanoscale Bubbles. *J. Heat Transfer*, 2011, vol. 133, no. 10, pp. 101501.
19. Hansen J.P., McDonald I.R. Theory of Simple Liquids, *Academic Press, London*, 2006. 428 p.
20. GOST 15150–69. *Mashiny, pribory i drugiye tekhnicheskiye izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshney sredy* [State Standard 15150–69 Machines, devices and other technical products. Versions for different climatic regions. Categories, operating conditions, storage and transportation in terms of the impact of climatic factors of the external environment]. Moscow. Standardinform, 2010.

Received 22 November 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лайко, К.К. Запертый объем воздуха как фактор достоверности при определении объемной прочности жидкости / К.К. Лайко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 26–36. DOI: 10.14529/engin210403

FOR CITATION

Layko K.K. Locked Air Volume as a Confidence Factor in Determining the Volumetric Strength of a Liquid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 26–36. (in Russ.). DOI: 10.14529/engin210403
