

Жежеря Николай Илларионович

## **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ПОРШНЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБКЕ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ**

Составлено дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройств контроля герметичности изделий, которое содержит инерционную силу движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, силу жидкостного трения, силу от упругости газа в изделии, нелинейную силу от действия поверхностного натяжения жидкости и силу от воздействия разности давлений, приложенной к жидкостному поршню со стороны эталонной емкости и изделия, контролируемого на герметичность. Разработанное дифференциальное уравнение позволяет проводить теоретические исследования влияния различных технологических и конструктивных параметров на точность контроля герметичности изделий устройством с горизонтальной трубкой.

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2012/7/9.html](http://www.gramota.net/materials/1/2012/7/9.html)

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

**Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2012. № 7 (62). С. 35-39. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2012/7/](http://www.gramota.net/materials/1/2012/7/)

**© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

Задача иерархического управления такой динамической системой формулируется следующим образом:

$$\Omega_{\tau rk} \in \Phi_{\tau rk} | \tau = 1, 2, \dots, T;$$

$$\Omega_{\tau rk} | u(\tau, r, k), \xi(\tau, r, k) \Rightarrow \Omega_{(\tau+1)rk} | \tau = 1, 2, \dots, T;$$

$$\mu_{\tau rk} = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K g(\Omega(\tau, r, k), u(\tau, r, k), \xi(\tau, r, k)) \rightarrow \max;$$

$$u(\tau, r, k) \in U(\tau, r, k) | \tau = 1, 2, \dots, T;$$

$$\xi(\tau, r, k) \in \Xi(\tau, r, k) | \tau = 1, 2, \dots, T;$$

$$\Omega_{0rk} \in \Omega_0 | \tau = 1, 2, \dots, T$$

где:  $\Omega_{\tau rk}$  - вектор состояния,  $\Phi_{\tau rk}$  - множество допустимых состояний,  $u(\tau, r, k)$  - вектор управляющих воздействий,  $\xi(\tau, r, k)$  - вектор случайных внешних воздействий,  $\mu_{\tau rk}$  - критерий оптимальности,  $U(\tau, r, k)$ ,  $\Xi(\tau, r, k)$  - множества возможных значений управляющих и случайных внешних воздействий для структуры технологического наполнения  $k$  уровня  $r$  ИУДС в момент времени  $\tau$ ,  $\Omega_0$  - известное начальное состояние ИУДС,  $T$  - период моделирования ИУДС.

#### Список литературы

1. Губко М. В. Математические модели оптимизации иерархических структур. М.: ЛЕНАНД, 2006. 264 с.
2. Денисов В. А. Ієрархічна модель оптимізації екологічних параметрів житлово-комунального господарства // Проблеми загальної енергетики: науковий збірник / Інститут загальної енергетики НАН України. 2011. № 4(27). С. 35-38.
3. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
4. Угольницкий Г. А. Иерархическое управление устойчивым развитием. М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. 336 с.

УДК 681.5:620.165.29.008.6 (075.8)

#### Технические науки

*Составлено дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройств контроля герметичности изделий, которое содержит инерционную силу движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, силу жидкостного трения, силу от упругости газа в изделии, нелинейную силу от действия поверхностного натяжения жидкости и силу от воздействия разности давлений, приложенной к жидкостному поршню со стороны эталонной емкости и изделия, контролируемого на герметичность. Разработанное дифференциальное уравнение позволяет проводить теоретические исследования влияния различных технологических и конструктивных параметров на точность контроля герметичности изделий устройством с горизонтальной трубкой.*

*Ключевые слова и фразы:* герметичность; контроль; изделие; дифференциальное уравнение; жидкостный поршень; горизонтальная трубка.

**Николай Илларионович Жежера**, д.т.н., профессор

Кафедра систем автоматизации производства

Оренбургский государственный университет

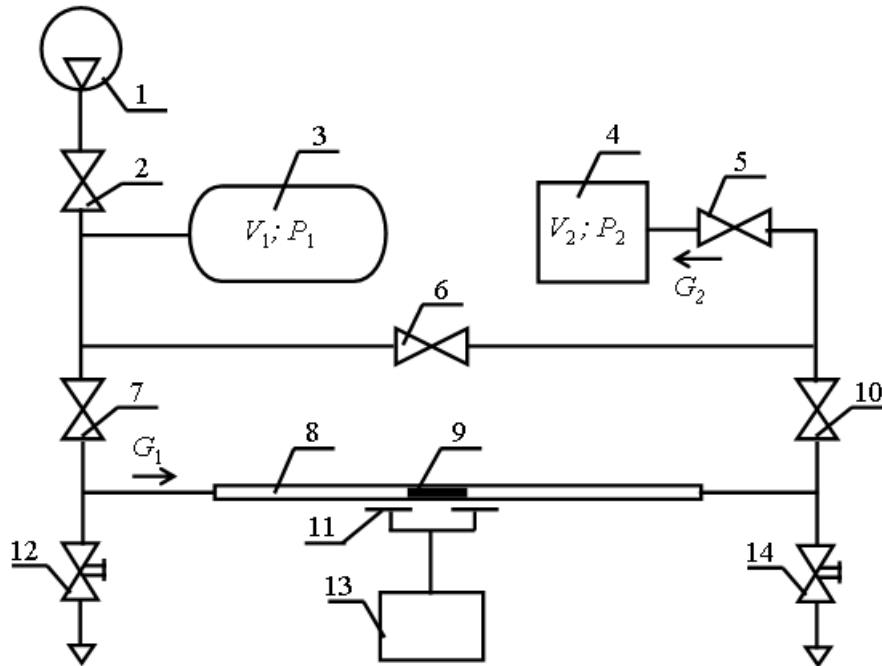
nik-gegera@rambler.ru

#### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ПОРШНЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБКЕ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ<sup>©</sup>

Схема базового устройства контроля герметичности изделий газом с использованием горизонтальной трубки приведена на Рисунке 1. Устройство содержит источник контрольного газа 1, эталонную емкость 3, контролируемое на герметичность изделие 4, горизонтальную трубку 8 с жидкостным поршнем 9, вентили 2, 5, 6, 7 и 10, емкостный измерительный преобразователь 11, вторичный показывающий прибор 13 и дроссели 12 и 14. Перед подключением изделия 4 к устройству контроля все вентили и дроссели находятся в закрытом положении.

Определяют необходимый объем эталонной емкости 3 [7, с. 26], подключают изделие к устройству контроля герметичности изделий, заполняют его газом до заданного давления, для чего открывают вентили 2, 6 и 5. Закрывают вентиль 2 и открывают вентили 7 и 10, через которые подается газ к горизонтальной трубке. С помощью дросселей 12 и 14 устанавливают жидкостный поршень 9 в горизонтальной трубке 8 в начальное положение. Берется первый отсчет по прибору 13, показывающему положение жидкостного поршня 9 в горизонтальной трубке 8. В некоторых системах контроля герметичности изделие 4 вибрируют [6, с. 82], поэтому включают вибраторы. Испытывают изделие 4 в течение установленного времени и берут второй отсчет по прибору 13. По разности показаний показывающего прибора 13 делают заключение

о герметичности изделия 4. Закончив контроль герметичности изделия, вентили 7, 10 и 5 закрывают и изделие 4 отключают от устройства контроля.



**Рис. 1.** Схема устройства контроля герметичности изделий газом с использованием горизонтальной трубки

Вывод дифференциального уравнения движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке рассмотрен применительно к устройству контроля герметичности изделий, схема которого приведена на Рисунке 1.

Известно [1] выражение для модуля упругости среды  $E$ , МПа, в зависимости от объема изделия  $V_1$  и изменения объема среды в изделии от изменения давления  $dP_1/dV_1$ , МПа/м<sup>3</sup>

$$E = (dP_1/dV_1)V_1$$

Применительно к Рисунку 1 объем изделия 4 и правую половину горизонтальной трубки 8 обозначим  $V_2$ , а давление газа в изделии  $P_2$ . Изменение объема газа в изделии от движения жидкостного поршня  $\Delta V_2$  равно  $\Delta V_{mp}$  - изменению объема газа в горизонтальной трубке от движения жидкостного поршня, м<sup>3</sup>. При этом  $\Delta V_{mp} = F_{mp} \cdot \Delta x(t)$ , где  $\Delta x(t)$  - перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м,  $F_{mp} = \pi d^2/4$  - площадь сечения трубки, м<sup>2</sup>, диаметром  $d$ . В этом случае выражение модуля упругости принимает вид [3; 5, с. 62]

$$E_g = \frac{\Delta P_2(t)}{F_{mp} \Delta x(t)} \cdot V_2 \quad \text{или} \quad \Delta P_2(t) = \frac{E_g F_{mp}}{V_2} \Delta x(t)$$

где  $E_g$  - модуль упругости газа, МПа;  $\Delta P_2(t)$  - изменение давления газа в изделии, МПа.

Умножив правую и левую части этого выражения на площадь сечения трубки  $F_{mp}$ , получим

$$\Delta P_2(t) \cdot F_{mp} = \frac{E_g F_{mp}^2}{V_2} \Delta x(t) \quad \text{или} \quad N_{yn}(t) = \frac{E_g F_{mp}^2}{V_2} x(t) \quad (1)$$

где  $N_{yn}(t) = \Delta P_2(t) \cdot F_{mp}$  - сила, которую преодолевает жидкостный поршень при движении в горизонтальной трубке от упругости газа в изделии, Н.

Силу жидкостного трения от движения поршня в горизонтальной трубке определим по формуле для силы трения в ламинарном пограничном слое в цилиндрической трубе [9]

$$N_{ж.тр}(t) = (P_1 - P_2) \frac{\pi \cdot d_{um}^2}{4} = \pi \cdot d_{um} \cdot l \cdot \tau_{cm} \quad (2)$$

где  $N_{ж.тр}(t)$  - сила, возникающая от касательных напряжений в жидкости возле стенок горизонтальной трубки, Н;  $P_1, P_2$  - давление газа, Па, с обеих сторон жидкостного поршня;  $d_{um}$  - диаметр трубки, м;  $l$  - длина жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м;  $\tau_{cm}$  - касательное напряжение в пограничном слое жидкости возле стенки горизонтальной трубки, Па.

С другой стороны, потери на трение в трубопроводе [Там же]

$$P_1 - P_2 = 4\lambda \rho \frac{V_{cp}^2}{2} \cdot \frac{l}{d_{um}} \quad (3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент сопротивления;  $V_{cp}$  - средняя скорость, м/с, перемещения жидкости в трубопроводе.

Известно, что скорость движения частиц жидкости по перпендикулярному к оси сечению трубопровода зависит от режима течения жидкости (ламинарного или турбулентного) и изменяется, например, по параболической зависимости для ламинарного течения жидкости.

Средняя скорость по трубопроводу вычисляется с учетом такого распределения текущих по сечению скоростей частиц жидкости [8, с. 47]. Однако в горизонтальной трубке устройств контроля герметичности изделий жидкость в виде жидкостного поршня перемещается как единое целое со скоростью, которая в формуле (3) является средней скоростью.

Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке в процессе контроля герметичности изделий происходит с малой скоростью потому, что малы допустимые и фактические значения утечек жидкости из изделия.

Течение жидкости в трубопроводах характеризуется числовым значением критерия Рейнольдса. Значение критерия Рейнольдса  $Re$  определяется по формуле [1]

$$Re = Vd/\nu \quad (4)$$

где  $V$  - скорость потока жидкости в трубопроводе, м/с;  $d$  - внутренний диаметр трубопровода, м;  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Для горизонтальной трубки систем контроля герметичности изделий диаметром  $d_{um} = 0,002$  м при скорости перемещения жидкостного поршня  $V = 0,1$  м/с и кинематической вязкости воды  $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [10] значение критерия Рейнольдса  $Re = 0,1 \cdot 0,002 / (1,007 \cdot 10^{-6}) = 199$ .

При ламинарном течении жидкости и значениях Рейнольдса менее 2000 коэффициент сопротивления  $\lambda$  рекомендуется [Там же] определять по формуле Гагена - Пуазейля

$$\lambda = 64 / Re \quad (5)$$

Из соотношения (2) определяем, что

$$P_1 - P_2 = 4l \cdot \tau_{cm} / d_{um} \quad (6)$$

Приравнявая (3) и (6), получим

$$\tau_{cm} = \lambda \rho V_{cp}^2 / 2 \quad (7)$$

С учетом соотношения (5) и того, что  $\nu \cdot \rho = \mu$ , где  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости жидкости, Н·с/м<sup>2</sup> (для воды  $\mu = 1,05 \cdot 10^{-3}$  Н·с/м<sup>2</sup> [Там же]), формула (7) принимает вид [3; 4, с. 49]

$$\tau_{cm} = \frac{64\nu\rho V_{cp}^2}{2V_{cp}d_{um}} = \frac{32\mu V_{cp}}{d_{um}} \quad (8)$$

Если, например,  $V_{cp} = 0,1$  м/с и  $d_{um} = 2 \cdot 10^{-3}$  м, тогда  $\tau_{cm} = 32 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 / 2 \cdot 10^{-3} = 1,68$  Па.

После подстановки (8) в (2) получим

$$N_{ж.мп}(t) = 32\pi \cdot l \cdot \mu V_{cp}, \quad N_{ж.мп}(t) = 32\pi \cdot \mu \cdot l \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$

$$N_{ж.мп}(t) = k_{z,мп} \cdot \frac{dx(t)}{dt} \quad (9)$$

где  $k_{z,мп} = 32\pi\mu l$  - размерный коэффициент гидравлического трения при перемещении жидкостного поршня в трубке, Н·с/м;  $V_{cp} = dx(t)/dt$  - скорость перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

Силу  $N_{н/л}(t)$ , Н, от действия поверхностного натяжения жидкости на жидкостный поршень в горизонтальной трубке определим на основании формулы Лапласа для капилляров  $\Delta P_a = 2\sigma/R$ , где  $\Delta P_a$  - давление, возникающее в трубке от поверхностного натяжения жидкости, Па;  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $R$  - радиус трубки, м. Умножая обе части формулы Лапласа на площадь трубки и заменяя радиус трубки на ее диаметр, получим

$$\Delta P_a \cdot F_{мп} = \frac{4\sigma}{d_{мп}} \cdot F_{мп} \quad \text{или} \quad N_{н/л}(t) = \Delta P_a \cdot F_{мп} = \pi \cdot \sigma \cdot d_{мп} = |N_{\sigma}| \quad (10)$$

где  $|N_{\sigma}|$  - абсолютное значение силы от действия поверхностного натяжения жидкости поршня в горизонтальной трубке, Н;  $N_{н/л}(t)$  - нелинейная сила при движении жидкостного поршня в горизонтальной трубке от действия поверхностного натяжения жидкости, Н, которую определим по выражениям, аналогичным для силы сухого трения [2]

$$N_{н/л}(t) = \begin{cases} +N_{\sigma}, & \text{при } x(t) > 0 \\ -N_{\sigma}, & \text{при } x(t) < 0 \\ -N_{\sigma} \leq N_{н/л}(t) \leq N_{\sigma}, & \text{при } x(t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

где  $\dot{x}(t)$  - скорость движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м/с.

В соответствии с вторым законом Ньютона инерционная сила движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $N_u(t)$ , Н

$$N_u(t) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (12)$$

где  $m$  - масса жидкостного поршня в горизонтальной трубке, кг;  $d^2x(t)/dt^2$  - ускорение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м/с<sup>2</sup>.

Сила, приложенная к поршню горизонтальной трубки от воздействия разности давлений со стороны эталонной емкости и изделия, является движущей силой для перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $N_{\text{движ}}(t)$ , Н

$$N_{\text{движ}}(t) = [P_1(t) - P_2(t)] \cdot F_{\text{мп}}$$

или  $N_{\text{движ}}(t) = \Delta P_{1-2}(t) \cdot F_{\text{мп}} \quad (13)$

где  $P_1(t)$ ;  $P_2(t)$  - давление газа, приложенное к поршню горизонтальной трубки с двух сторон, со стороны эталонной емкости и изделия, МПа;  $F_{\text{мп}}$  - площадь сечения горизонтальной трубки, м<sup>2</sup>;  $\Delta P_{1-2}(t)$  - разность давлений  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$ .

Дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке применительно к устройству контроля герметичности изделий (Рисунок 1) в соответствии с выражениями (1), (9), (11), (12) и (13) принимает следующий вид

$$N_u(t) + N_{\text{ж.мп}}(t) + N_{\text{уп}}(t) + N_{\text{н/л}}(t) = N_{\text{движ}}(t)$$

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \kappa_{\text{с.мп}} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{\text{с}} F_{\text{мп}}^2}{V_{\text{из}}} x(t) +$$

$$\begin{cases} + N_{\sigma}, \text{ при } x(t) > 0 \\ - N_{\sigma}, \text{ при } x(t) < 0 \\ - N_{\sigma} \leq N_{\text{н/л}}(t) \leq N_{\sigma}, \text{ при } x(t) = 0 \end{cases} = \Delta P_{1-2}(t) \cdot F_{\text{мп}} \quad (14)$$

где  $N_u(t)$  - инерционная сила движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, Н;  $N_{\text{ж.мп}}(t)$  - сила жидкостного трения в ламинарном пограничном слое, зависящая от скорости движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, Н;  $N_{\text{уп}}(t)$  - сила, которую преодолевает жидкостный поршень при движении в горизонтальной трубке от упругости газа в изделии, Н;  $N_{\text{н/л}}(t)$  - нелинейная сила от движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке и действия поверхностного натяжения жидкости, Н;  $N_{\text{движ}}(t)$  - сила, приложенная к поршню горизонтальной трубки, от воздействия разности давлений со стороны эталонной емкости и изделия, Н.

Дифференциальное уравнение (14) записывают в следующем виде

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \kappa_{\text{с.мп}} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{\text{с}} F_{\text{мп}}^2}{V_{\text{из}}} x(t) + N_{\sigma} \text{Sign } x(t) = \Delta P_{1-2}(t) \cdot F_{\text{мп}}$$

где  $\text{Sign } x(t)$  - кусочно-постоянная функция «сигнум», характеризующая влияние сил поверхностного натяжения жидкости при движения в одну или другую сторону жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройств контроля герметичности изделий.

Таким образом, составлено дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройств контроля герметичности изделий, которое содержит инерционную силу движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, силу жидкостного трения, силу от упругости газа в изделии, нелинейную силу от действия поверхностного натяжения жидкости и силу от воздействия разности давлений, приложенной к жидкостному поршню, со стороны эталонной емкости и изделия, контролируемого на герметичность. Разработанное дифференциальное уравнение позволяет проводить теоретические исследования влияния различных технологических и конструктивных параметров на точность контроля герметичности изделий устройством с горизонтальной трубкой.

#### Список литературы

1. Башга Т. М. Машиностроительная гидравлика: справочное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
3. Жежера Н. И. Развитие теории и совершенствование автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Оренбург: ОГУ, 2004. 441 с.

4. Жежера Н. И., Абубакиров Д. Р. Влияние касательных и капиллярных напряжений на движение и диаметр жидкостного поршня горизонтальной трубки устройств испытаний изделий на герметичность // Законодательная и прикладная метрология. М., 2006. № 4. С. 49-52.
5. Жежера Н. И., Абубакиров Д. Р. Испытание изделий на герметичность жидкостью с использованием пузырьковой камеры при неравных давлениях контрольного газа и жидкости // Законодательная и прикладная метрология. М., 2006. № 1. С. 62-64.
6. Жежера Н. И., Абубакиров Д. Р. Испытания с вибрацией изделий на герметичность жидкостью устройством с горизонтальной трубкой // Законодательная и прикладная метрология. М., 2007. № 3. С. 82-84.
7. Жежера Н. И., Куленко Е. С. Влияние объема эталонной емкости на погрешность измерений утечек газа из изделия, испытываемого на герметичность с использованием пузырьковой камеры // Законодательная и прикладная метрология. М., 2003. № 1. С. 26-28.
8. Жежера Н. И., Самойлов Н. Г. Теоретические положения к устройству измерения динамической составляющей расхода газа // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 4 (39). С. 47-50.
9. Краснов Н. Ф. Аэродинамика: учебник для вузов / М-во высш. и средн. образования СССР. М.: Высшая школа, 1971. 632 с.
10. Метрология: специальные общетехнические вопросы / гл. ред. Ю. И. Шендлер. М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1962. Кн. первая. 735 с.

УДК 681.5:620.165.29.008.6

#### Технические науки

*Установлены аналитические выражения, позволяющие определять необходимую частоту и амплитуду продольной вибрации барботажной трубки устройств контроля герметичности изделий в зависимости от диаметра барботажной трубки и типа жидкости в пузырьковой камере.*

*Ключевые слова и фразы:* изделие; контроль герметичности; пузырьковая камера; барботажная трубка; амплитуда; частота; вибрация.

**Николай Илларионович Жежера**, д.т.н., профессор

Кафедра систем автоматизации производства

Оренбургский государственный университет

nik-gegera@rambler.ru

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ПРОДОЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ БАРБОТАЖНОЙ ТРУБКИ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ<sup>©</sup>

При контроле герметичности изделий пузырьковым методом с использованием устройства с пузырьковой камерой наблюдается большой порог срабатывания потому, что на формирование пузырьков газа в жидкости пузырьковой камеры затрачивается перепад давлений  $\Delta P_{нк}$ , Н [4]

$$\Delta P_{нк} = 3 \frac{\sigma}{d_{мпр}} + \frac{3}{16} \rho_{жс} g d_{мпр} \quad (1)$$

где  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости в барботажной трубке, Н/м;  $d_{мпр}$  - диаметр барботажной трубки на ее нижнем срезе, м;  $\rho_{жс}$  - плотность жидкости в барботажной трубке и пузырьковой камере, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение земного тяготения, м/с<sup>2</sup>.

На Рисунке 1 представлена схема устройства контроля герметичности изделий с использованием пузырьковой камеры при сообщении барботажной трубке вибрации [6, с. 62; 7, с. 82; 10; 11].

Устройство содержит пузырьковую камеру 6, воздушная полость которой соединена с изделием 3, контролируемое на герметичность. Барботажная трубка 10 соединена с эталонной емкостью 1 через гибкий трубопровод 5. Источник контрольного газа 8 соединен через вентиль 4 с полостью эталонной емкости 1 и барботажной трубкой 10. Барботажной трубке 10 сообщается вибрация через шток 9 от источника вибрации.

Контроль герметичности изделий с использованием пузырьковой камеры при сообщении барботажной трубке вибрации реализуется следующим образом. Исходя из объема изделия 3, допустимой утечки и заданной погрешности определяют объем эталонной емкости 1 [8, с. 26]. Заполняют газом под контрольным давлением изделие 3, эталонную емкость 1 и пузырьковую камеру 6. Для этого открывают вентили 4 и 2, соединяя источник газа 8 с изделием 3 и эталонной емкостью 1.

Сообщают барботажной трубке 10 вибрацию заданных значений амплитуды и частоты от возбудителя вибрации. Закрывают вентили 4 и 2 и отключают изделие 3 и эталонную емкость 1 от источника газа 8. Снижают уровень жидкости в барботажной трубке 10 до нижнего среза путем дросселирования газа из изделия 3 в атмосферу через вентиль 7 до появления газовых пузырьков в жидкости пузырьковой камеры 6.