

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ОТРАСЛЕВЫХ СТАНДАРТОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

¹Макаров В.А., ¹Тютяев Р.Е.

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники» (МГУПИ), Москва, Россия (119454 Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78), e-mail: dtghmflysq@gmail.com

В докладе приведены сведения о стандартах по неразрушающему контролю изделий серийного и крупносерийного производства разработанных на основе использования информационных технологий при определении герметичности изделий и компьютерного управления контрольными операциями с целью выявления бракованных изделий на промышленных потоках.

Ключевые слова: герметичность, манометрические преобразователи, имитационная система адресования, воспроизведение утечки газа, частотный молекулярный расход.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF INDUSTRY STANDARDS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING

¹Makarov V.A., ¹Tyutyayev R..

¹ Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics»(MIREA), Moscow, Russia (119454 Russia, Moscow, Vernadskogo avenu, 78), e-mail: dtghmflysq@gmail.com

The report provides information about the standards on nondestructive testing of products and large-batch production based on the use of information technology in determining the tightness of products and computer management of control operations to identify defective products in industrial flows.

Key words: tightness, pressure transducers, simulation system of addressing, playback of a gas leak, the frequency of molecular flow.

В связи с ужесточением требований технической документации к стопроцентному контролю изделий серийного и крупносерийного производства возникла необходимость разработки высокопроизводительных методов, средств контроля и автоматизации испытаний на герметичность. До недавнего времени для этих целей использовались нетехнологичные методы контроля (гидростатический, пузырьковый, метод опрессовки и т.п.), препятствующие автоматизации процесса неразрушающего контроля. Для решения этой проблемы был разработан и испытан в промышленности комплекс унифицированных измерительных преобразователей, обладающий чувствительностью в диапазоне $10^{-7} \div 10^1 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$, характерном для области измерения потоков через дефекты конкретных изделий. Принцип действия автоматических измерительных

преобразователей основан на использовании физико-технических свойств газа: плотности, давления и расхода. В разработанный комплекс вошли различные конструкции манометрических преобразователей, основные конструкции приведены в первом стандарте. Для автоматизации финишных операций использованы контроллеры, позволяющие следить за всеми технологическими процессами контроля и сортировки такими как управление узлами зажимов изделий, транспортными устройствами с имитационной системой адресования, механизмами отбраковки изделий, робототехническими комплексами и т.п.

Для сертификации этих установок и приборов контроля был разработан второй отраслевой стандарт, посвященный метрологическому обеспечению средств контроля герметичности, основанному на воспроизведении утечки газа и допустимого падения испытательного давления. До внедрения предложенного метрологического стандарта калибровка приборов и установок приборов контроля герметичности осуществлялась с помощью потоков через дроссельные устройства. Эти устройства не обладают стабильными расходными характеристиками, поскольку те зависят от параметров окружающей среды, состава и давления газа, режима течения газа. Кроме того, эти устройства склонны к засорению механическими частицами, что существенно меняет их проходные сечения.

Величина степени герметичности обычно равна чувствительности контроля и определяется уравнением /1/:

$$B = V * \frac{\Delta p}{\Delta t} * \frac{1}{\left(\frac{p}{p_n}\right)^2 - 1}, \text{ м}^3\text{Па/с}, \quad (1)$$

где V-величина измерительного объёма, Δt - время контроля, p, p_n – испытательное и атмосферное давления, Δ -допустимое падение испытательного давления.

Если величины V, p, p_n , Δt поверяются обычными средствами контроля объемов, давлений и времени, то определение Δp при метрологическом обеспечении представляет большие трудности в связи с их малыми значениями. Так для значений степени герметичности в диапазоне $10^{-3} - 10^{-7} \frac{\text{м}^3\text{Па}}{\text{с}}$, необходимо регистрировать Δp в диапазоне $5 \div 100 \text{ Па}$ при испытательном давлении p от 0,02 МПа до 1,0 МПа. Естественно, обычными средствами измерений такую поверку невозможно осуществить, поэтому предлагается использовать косвенные методы, основанные на использовании частотного сопротивления.

Частотное сопротивление /2/ представляет собой калибровочный объем 1 (Рис.1), ограниченный клапанами 2, 3, управляемыми с помощью генератора 4 инверсными

сигналами t и \bar{t} , соединяющими калибровочный объем с измерительным объемом, с одной стороны и атмосферой с другой стороны.

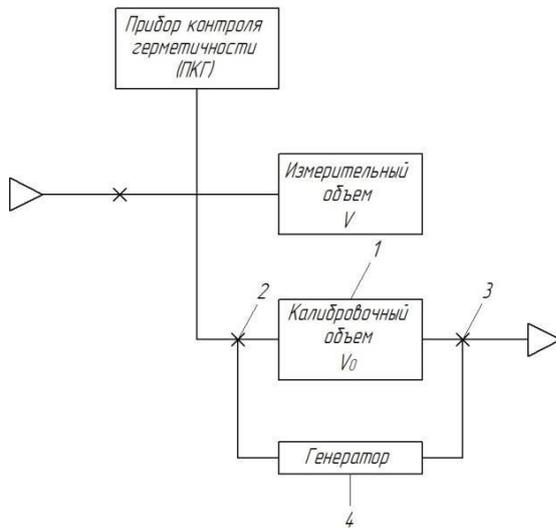


Рис. 1. Схема частотного сопротивления

Число молекул, проходящих через частотное сопротивление в единицу времени, представляющее собой молекулярный расход $\frac{dN}{dt}$, определяется по формуле:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{fV_0}{kT} p^*, \quad (2)$$

где f - частота переключений генератора, 1/с; V_0 - калибровочный объем, m^3 ; k - постоянная Больцмана ($k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T - температура газа, К; $p^* = p - p_H$ - избыточное давление, Па.

Если принять процесс изменения давления в камере изотермическим, то из уравнения состояния $pV = NkT$ получим соотношение:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{V}{kT} * \frac{dp}{dt}, \quad (3)$$

Так как при $p_H = \text{const}$ имеем $dp = dp^*$, то из последнего соотношения и из уравнения (2) следует:

$$\frac{V}{kT} * \frac{dp^*}{dt} = -\frac{fV_0 p^*}{kT}, \quad (4)$$

Разделяя переменные в уравнении (3), получим:

$$\frac{dp^*}{p} = -\frac{fV_0}{V} dt, \quad (5)$$

Проведя интегрирование и представив постоянную интегрирования в форме $C_* = \ln C$, получим:

$$\ln p^* = -\frac{fV_0}{V} t + \ln C,$$

$$\text{откуда } p^* = C e^{-\frac{fV_0}{V} t}$$

Обозначая величину давления p при $t = 0$, как p_a , находим $C = p_a^*$

Окончательно получаем для рассматриваемого процесса

$$p^* = p_a^* e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6)$$

где

$$\tau = \frac{V}{fV_0}. \quad (7)$$

Согласно формуле (6), давление в камере при данном процессе меняется по экспоненциальному закону. Отсюда падение давления в камере малого объема равно:

$$\Delta p = p_a^* - p_b^* = p_a^* \left(1 - e^{-\frac{t_{ab}}{\tau}}\right) = p_a^* \left(1 - e^{-\frac{V_0 f t_{ab}}{V}}\right) \quad (8)$$

где $f t_{ab} = n$ – число тактов генератора, необходимых для падения давления от значения p_a^* до p_b^* .

Таким образом:

$$\Delta p = p_a^* \left(1 - e^{-\frac{V_0 n}{V}}\right) \quad (9)$$

Из (9) следует, что падение давления на каждом такте работы генератора представляет собой ряд:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= p_a^* \left(1 - e^{-\frac{V_0}{V}}\right) \\ \Delta p_2 &= p_a^* * e^{-\frac{V_0}{V}} \left(1 - e^{-\frac{V_0}{V}}\right) \\ \Delta p_3 &= p_a^* * e^{-\frac{2V_0}{V}} \left(1 - e^{-\frac{V_0}{V}}\right) \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta p_n &= p_a^* * e^{-\frac{(n-1)V_0}{V}} \left(1 - e^{-\frac{V_0}{V}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

Сумма членов этого ряда за n тактов работы генератора равна падению давления Δp .

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_i. \quad (11)$$

Принимая за Δp цену деления прибора значение $\Delta p_{ц}$, мы разбиваем ее на n частей (Рис.

2). Изменяя количество тактов генератора, мы можем фиксировать малые значения падения давления в камере, заданные в технической документации.

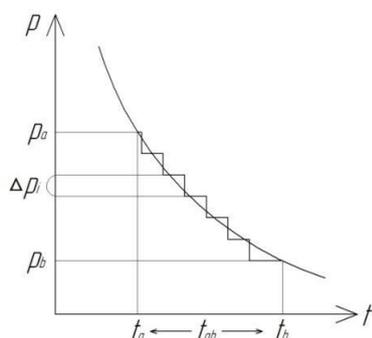


Рис. 2. Зависимость давления в измерительной камере от времени.

Для проведения математического моделирования процесса падения давления в камере малого объема определим реально возможные параметры системы. Для этого построим зависимости $V_0(n)$ для следующего набора исходных данных: $p_a^* = 0,02; 0,04; 0,08 \text{ МПа}$; $\Delta p^* = 500 \text{ Па}$, $V = 50 \text{ см}^3$ (Рис. 3).

Время t_{ab} , в течение которого давление в камере падает от значения p_a^* до значения p_b^* , равно:

$$t_{ab} = -\tau \ln \frac{p_a^*}{p_b^*} = -\frac{V}{fV_0} * \ln \frac{p_a^*}{p_b^*}. \quad (12)$$

Отсюда

$$n = ft_{ab} = -\frac{V}{V_0} * \ln \frac{p_a^*}{p_b^*} \quad (13)$$

$$V_0 = -\frac{V}{n} * \ln \frac{p_a^*}{p_b^*} \quad (14)$$

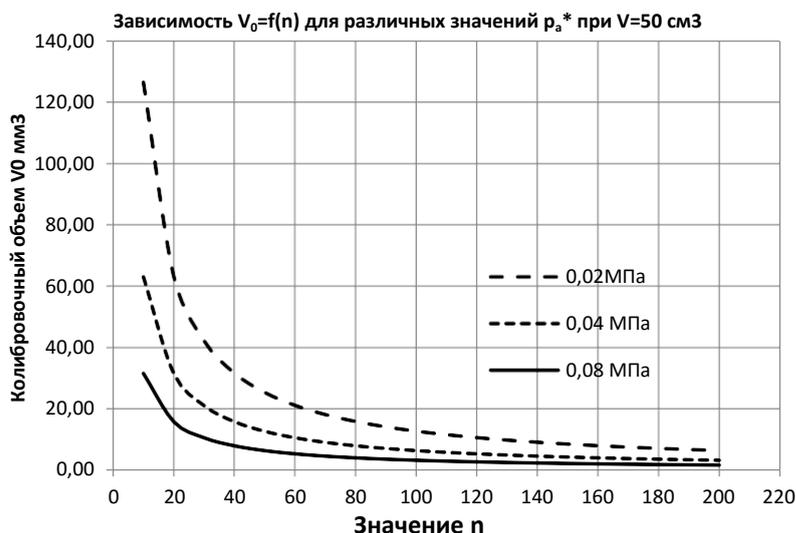


Рис. 3. График зависимости $V_0(n)$.

Анализ представленных зависимостей показал, что для выбранных параметров измерительной системы в диапазоне n от 5 до 100 размер калибровочного объема V_0 существенно меньше размера объема V . Отсюда следует, что значения Δp_i равны между собой с точностью до десятых долей Па, что подтверждается следующими расчетами. Рассмотрим камеру объемом $V=50 \text{ см}^3$ с давлением в камере $p^*=0,02 \text{ МПа}$ и требуемой степенью герметичности $B=3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$, в качестве регистрирующего прибора - манометр МО-250-1 с ценой деления 250 Па. Задаем относительную погрешность 2% или абсолютную погрешность измерений 5 Па. Необходимое количество тактов генератора для достижения падения давления на одну цену деления 250 Па равно 50. По формуле (14) определяем величину калибровочного объема V_0 . В данном случае $V_0 = 12,6 \text{ мм}^3$. По формулам (10) определяем значения 1-го, 10-го и 50-го члена ряда: $\Delta p_1 = 5,04 \text{ Па}$, $\Delta p_{10} =$

5,03Па, $\Delta p_{50}=4,98$ Па. Как видно из расчетов значения Δp_i отличаются не более, чем на 1,2%.

Определив по формуле (1) значение падение давления в камере, принимая за достоверную величину абсолютную погрешность 5Па, получаем, необходимое количество тактов генератора для достижения падения давления в камере $\Delta p=50$ Па равно 10. Отсчитав десять тактов работы генератора, мы фиксируем малое падение давления равное 50Па.

Для проверки корректности предложенной методики калибровки были проведены сличительные испытания с методикой /4/, основанной на использовании усиления перепада давления Δp на нормированный коэффициент K_y , на установке, состоящей из двух контуров, реализующих эти две методики.

Калибровочная установка (Рис. 4) по частотному методу состоит из генератора 1, управляющего с помощью инверсных сигналов t и \bar{t} , частотным сопротивлением 2, соединяющим калибровочный объем V_0 попеременно с измерительной камерой V 3 и атмосферой.

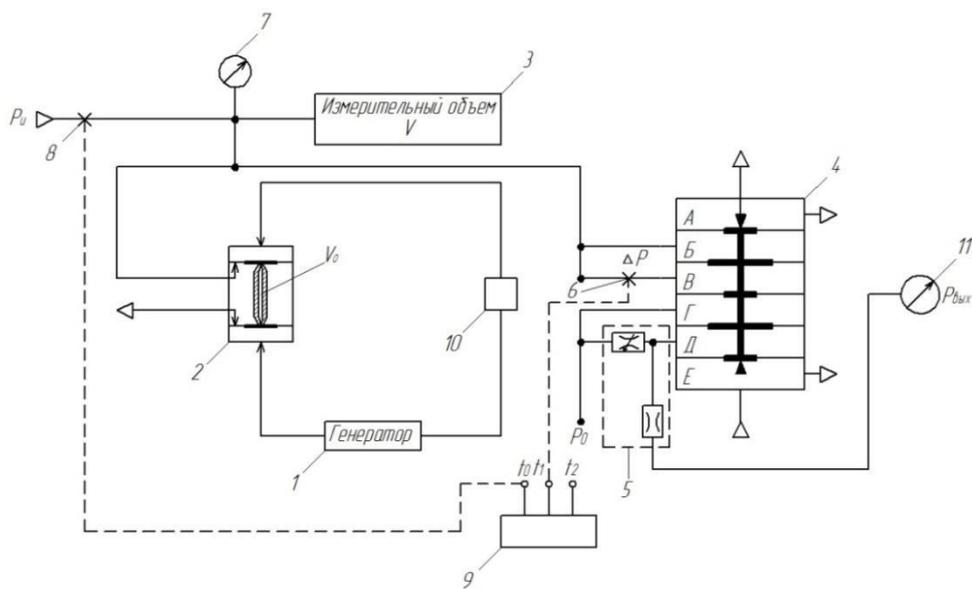


Рис. 4. Схема установки сличительных испытаний.

Калибровочная установка по методу усиления перепада давления Δp состоит из элемента сравнения 4 и делителя

сопротивлений 5, с помощью которого усиливается перепад давлений Δp до величины /3/:

$$\Delta p_{\text{ВЫХ}} = \left(1 + \frac{\alpha}{\beta}\right) (p_B - p_B) + p_0 = K_y * \Delta p + p_0, \quad (15)$$

где α и β - проводимости переменного и постоянного сопротивлений делителя 5; p_B и p_B - испытательные давления в камерах Б и В; p_0 - начальное давление.

Камера В подключена к измерительному объему V через клапан 6, в котором контролируется испытательное давление с помощью манометра 7. Измерительная камера

отделена от источника питания p клапаном 8. Установка управляется таймером 9. Количество тактов генератора n регистрируется счетчиком 10.

Сличительные испытания проходят по следующему циклу. По команде t_0 клапаны 8 и 6 перекрываются, отделяя измерительную камеру 3 от источника питания p и камеру В от камеры Б элемента сравнения 4. По команде t_1 начинает работать генератор импульсов 1 и счетчик 10, понижая испытательное давление на величину Δp , которое так же понижается в камере Б элемента сравнения 4. Давление $p_{\text{вых}}$ регистрируется манометром 11, по показаниям которого можно определить величину Δp при нормированном коэффициенте усиления K_y .

Сличительные испытания показали, что различие в результатах измерений падения давления в измерительной камере в диапазоне от 10 Па до 250 Па не превышает 2%.

Известно, что за абсолютную погрешность калибровки манометрических приборов принимается количество молекул ΔN , перенесенные за один такт работы генератора.

$$\Delta N = \frac{V_0}{kT} (p_i - p_n)$$

Отсюда следует, что значение абсолютной погрешности зависит от калибровочного объема V_0 . Уменьшение калибровочного объема приводит к увеличению числа n , необходимого для понижения давления в измерительном объеме на одно деление шкалы манометрического прибора, и как следствие к уменьшению абсолютной погрешности.

При постоянстве параметров окружающей среды и давления P_i в камере, относительная погрешность δ калибровки определяется как отношение количества молекул ΔN , перетекающих в калибровочный объем V_0 из измерительного объема V_i за один такт, к количеству молекул N , перетекающих в калибровочный объем за n тактов.

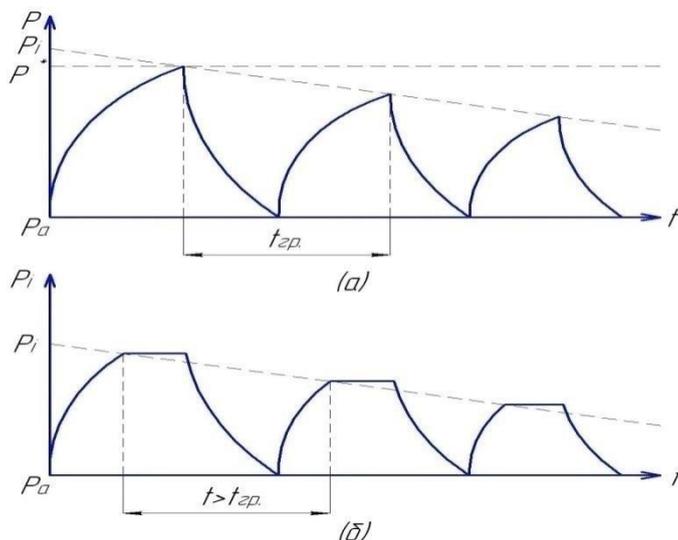
$$\delta = \frac{\Delta N}{\sum_1^{n_k} \Delta N_i} = \frac{\frac{V_0}{kT}(p_i - p_n)}{\frac{V_0 n_k}{kT}(p_i - p_n)} = \frac{1}{n_k}, \quad (16)$$

где n_k - количество тактов генератора, необходимое для снижения давления Δp на величину цены деления измерительного прибора.

Таким образом, увеличивая количество тактов, мы уменьшаем величину и относительной погрешности.

Динамическая погрешность калибровки определяется исходя из времени заполнения и опустошения калибровочного объема. В предельном случае период следования импульсов должен составлять $t_{\text{гр}}$ (рис. 5а), а в общем случае $t > t_{\text{гр}}$ (рис. 5б).

Рис.5



Характеристики заполнения и опустошения калибровочного объема.

Учитывая, что режим истечения газа в двух взаимосвязанных камерах является турбулентным, воспользуемся формулами определения времени

процессов заполнения и опустошения камер, приведенными в /4/:

$$t_3 = \frac{V_0}{\varepsilon f \sqrt{T}} \int_{r_0}^r \frac{dr}{\xi(r)}, \quad (17)$$

где

t_3 - время заполнения калибровочного объема в одном такте,

V_0 - калибровочный объем,

ε - коэффициент расхода,

f - площадь проходного сечения дросселя,

T - абсолютная температура,

$r = \frac{P_i}{P_k}$ - отношение абсолютных давлений при заполнении,

r_0 - значение r при $t=0$,

$$\xi(r) = \sqrt{2gR \frac{k}{k-1}} \sqrt{r^{\frac{2}{k}} - r^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (18)$$

где k - отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к его теплоемкости при постоянном объеме,

R - газовая постоянная ,

g - ускорение свободного падения,

$$t_0 = \frac{V_0}{\varepsilon f \sqrt{T}} \int_{r'_0}^r \frac{dr'}{r' \xi(r')}, \quad (19)$$

t_0 - время опустошения калибровочного объема в одном такте.

$r'_0 = \frac{P_k}{P_i}$ - отношение абсолютных давлений при опустошении калибровочного объема.

Так как $t_{rp} = t_3 + t_0$, имеем

$$t_{rp} = \frac{V_0}{\varepsilon f \sqrt{T}} \left[\int_{r_0}^r \frac{dr}{\xi(r)} + \int_{r'_0}^r \frac{dr'}{r' \xi(r')} \right]. \quad (20)$$

Следовательно, граничная частота работы генератора будет равна

$$f_{гр} = 1/t_{гр} = 1 / \left[\frac{V_0}{\varepsilon f \sqrt{T}} \left[\int_{r_0}^r \frac{dr}{\xi(r)} + \int_{r'_0}^{r'} \frac{dr'}{r' \xi(r')} \right] \right]. \quad (21)$$

Оценим величину граничной частоты для реально возможного случая. Пусть измерительный объем V_i равен 200 см^3 , избыточное давление P^* равно $0,01 \text{ МПа}$, падение давления за один такт работы генератора -50 Па , тогда калибровочный объем $V_0 = 10^{-6} \text{ м}^3$. При этих данных $t_{гр} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, и $f_{гр} = 2 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 2 \text{ кГц}$.

Таким образом, при реальной частоте работы генератора 100 Гц динамическая погрешность будет исключена.

Список литературы

1. В.В. Ключева Неразрушающий контроль // Справочник: В 7т. Под общ. ред. Т.2: В 2 кн. - М.: Изд-во «Машиностроение», 2003. - 688 с.
2. Макаров В.А., Тютяева Л.Н., Тютяев Р.Е. Способ калибровки газоаналитического течеискателя. Патент №2504748. МКИ G01 М 3/00. Приоритет изобретения по заявке №2012103208/28 (004696) от 31.01.2012г. Оpubл. 20.01.2014г.
3. Мордасов М.М., Трофимов А.В. Анализ и синтез пневматических устройств: Учеб. пособие. М.: Изд-во "Машиностроение", 2005.- 136 с
4. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во АН СССР, 1961-247 с.