

УДК 621.391

И. Г. Сухорукова, ассистент (БГТУ)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Выполнен анализ принципов и технологических особенностей испытаний на герметичность конструкций в машиностроении (методы масс-спектрометрический, аквариума, намыливания, спадом давления, галогенный, индикаторных лент и т. д.). Проведена классификация методов измерения и оценка границ чувствительности методов. Сформирован комплекс требований для выбора метода испытания изделия из множества возможных. Акцентировано внимание на то, что в условиях повышенных требований к точности измерения герметичности следует учитывать влияние физических и химических параметров движения жидкости в капиллярах. Проведен анализ методов на предмет построения приборов автоматического измерения герметичности запорной арматуры в промышленных условиях. Сделан вывод о возможности испытания запорной арматуры с помощью манометрического и объемных методов.

The analysis of principles of carrying out and technological features of tests for tightness of designs in mechanical engineering (methods mass spectrometer, an aquarium, with soap, pressure recession, halogen, display tapes, etc.) is carried out. Under the literary data classification of methods of measurement and border of sensitivity of methods is carried out. The complex of requirements for a choice of a concrete test method from set of the possible is formulated. In conditions of high requirements to tightness, accuracy of methods is influenced by physical and chemical parameters of movement of a liquid in capillaries. Possibility of automation of carrying out of tests in industrial analysis conditions stop valve is analysed. The conclusion is drawn on possibility of carrying out of tests stop valve on manufacture by means of manometrical and volume methods.

Введение. В комплексе разнообразных испытаний изделий (от приемосдаточных до контрольно-выборочных), проводимых для обеспечения качества создаваемой продукции, не последнее место занимают технологические испытания на герметичность. В большинстве отраслей машино- и приборостроения трудоемкость этих испытаний достигает 15–25% общей трудоемкости изготовления изделий [1].

Испытательные работы в основном выполняются вручную, и лишь в последнее время наметилась тенденция к автоматизации этих работ. Повышение требований к точности оценки герметичности диктуется энергетическими, экологическими, социальными и технологическими аспектами современных производств. У ведущих производителей запорной арматуры появились изделия с технологией «*no leak*», т. е. без протечек. Как следствие, происходит постоянное развитие методов и устройств испытания изделий на герметичность, регистрируются патенты [2–7].

Существует около 30 различных методов испытаний на герметичность [1]. При этом многие методы могут быть реализованы разными способами, различающимися схемой проведения, используемыми техническими средствами и технологией проведения испытаний. Для выбора методов испытаний можно сформулировать комплекс требований [8]:

– чувствительность методов должна удовлетворять требованиям конструкторской документации, при этом рекомендуется соблюдать

баланс между максимальной чувствительностью и экономической целесообразностью;

– методы испытаний должны иметь высокую предельную чувствительность. На сегодняшний день требования к герметичности изделий постоянно опережают возможности методов;

– методы и используемые для их осуществления контрольные и индикаторные среды не должны оказывать вредного воздействия на объект и должны быть безопасны для персонала;

– методы испытаний должны быть универсальными для обеспечения возможности испытывать изделия с различными конструкционными характеристиками по единой методике. Универсальность необходима также для сокращения номенклатуры испытательного оборудования и для упрощения подготовки персонала.

Важным свойством методов испытаний на герметичность является устойчивость к помехам, удобство использования и исключение влияния человеческого фактора.

Механизация и автоматизация процессов испытания, автоматическая электронная регистрация полученных данных, маркировка – наиболее эффективный путь сокращения трудовых и материальных затрат.

На основании сформированных требований, нормативных положений из существующих методов оценки герметичности следует обосновать выбор метода для построения прибора автоматической аттестации запорной арматуры в условиях промышленных предприятий.

Основная часть. Согласно нормативным положениям, нормы герметичности выражаются через поток (расход) Q , Вт ($\text{м}^3 \cdot \text{ Па/с}$), контрольной среды через течь, создающий в объеме V , м^3 , изделия падение или повышение давления P , Па, за время τ , с [7]:

$$Q = \frac{PV}{\tau}, \quad (1)$$

или непосредственно через допустимый размер утечки ($\text{м}^3/\text{с}$) [8].

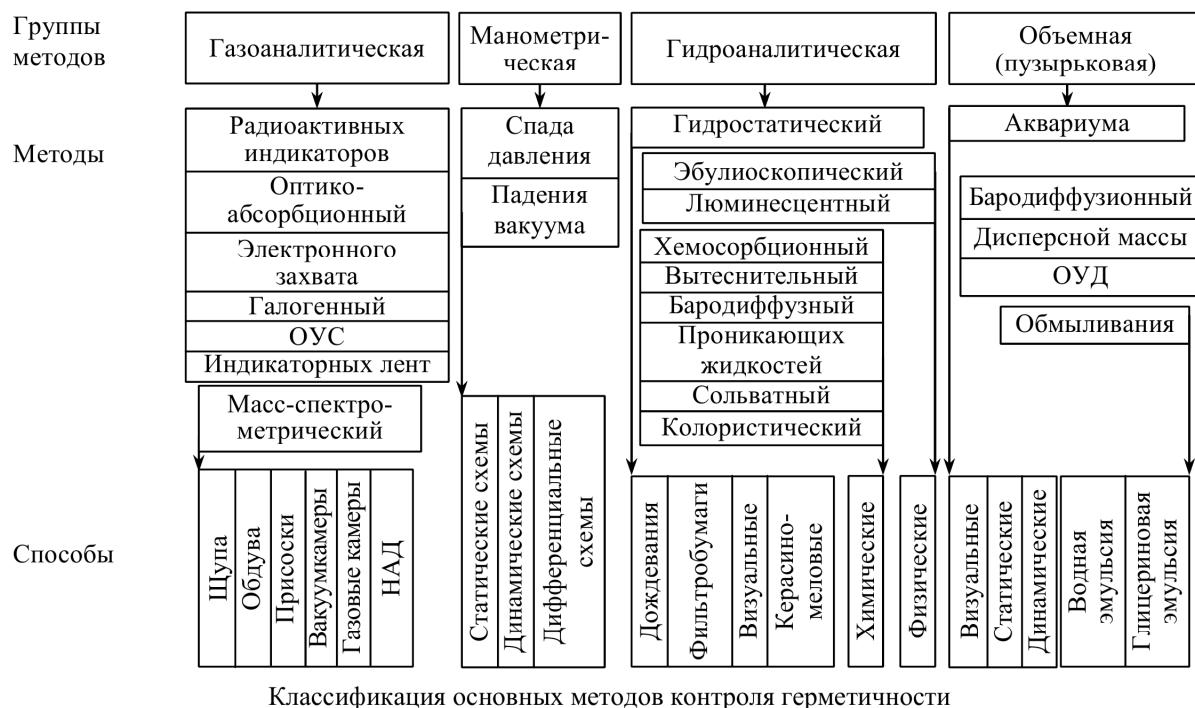
Требования по герметичности (по допустимым утечкам) различных изделий, встречающихся в машиностроении, существенно различаются: от 1,3 до $1,3 \cdot 10^{-16}$ Вт [9–12].

Масс-спектрометры и методика накопления утечек дают максимальную чувствительность и, кроме того, используются для поиска технологических макродефектов конструкции. Вместе с тем существуют многочислен-

ные методы контроля герметичности, которые основаны на различных принципах работы и обладают иными характеристиками. По нормам герметичности емкостные конструкции ответственного назначения могут быть разбиты на группы [1].

В литературе можно встретить несколько попыток классификации измерений [1, 7], однако здесь имеется ряд трудностей. Сложность обусловлена многообразием и постоянным развитием методов, улучшением техники поиска и анализа течи, повышением производительности и снижением себестоимости, ростом требований к безопасности.

Согласно нормативам [11, 12], выделяют пять методов: гидростатический, манометрический, пузырьковый, масс-спектрометрический и галогенный. Основываясь на [1], предлагается следующая классификация методов (рисунок) и сравнительная характеристика (таблица).



Сравнительная характеристика методов анализа герметичности

Метод	Q , Вт	Метод	Q , Вт
Спада давления	До 10^{-5}	Бародиффузионный	$1,3 \cdot 10^{-9}$ – $1,3 \cdot 10^{-7}$
Повышения давления в вакуумной камере	10^{-5} – 10^{-11}	Остаточных устойчивых деформаций	10^{-3} – 10^{-7}
Аквариума	10^{-2} – 10^{-9}	Сольватный	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Обмыливания	10^{-4} – 10^{-12}	Колористический	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Проникающих жидкостей	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Радиоизотопный (РАИ)	10^{-2} – 10^{-14}
Дисперсной массы	10^{-4} – 10^{-6}	Люминесцентный	10^{-5} – 10^{-9}
Масс-спектрометрический	10^{-2} – 10^{-14}	Оптико-абсорбционный	10^{-6} – 10^{-3}
Хемосорбционный	$1,3 \cdot 10^{-8}$ – $1,3 \cdot 10^{-6}$	Галогенный	10^{-9} – 10^{-4}
Остаточных устойчивых следов	$7 \cdot 10^{-6}$ – 10^{-4}	Электронного захвата (плазменный)	10^{-3} – 10^{-10}
Вытеснительный	$1,3 \cdot 10^{-9}$	Эбулиоскопический	$1,3 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-8}$

Метод спада давления. Изделие нагружают внутренним избыточным давлением и после устранения негерметичности в элементах арматуры стенда выдерживают под испытательным давлением заданное время. Падение давления регистрируется манометрами, обладающими погрешностью 0,5–1,6%, которую можно улучшить за счет динамических схем воздействия.

Метод повышения давления в вакуумной камере. Изделие помещают в вакуумной камере с давлением при одновременном внутреннем давлении внутри изделия.

Метод аквариума. Изделие предварительно нагружают избыточным давлением газа, опускают в аквариум с жидкостью, после удаления окклюдированного воздуха с поверхности изделия выдерживают заданное время. Обычно герметичным считается изделие, при испытании которого отсутствует образование пузырьков газа.

Метод обмыливания. Изделие нагружают избыточным давлением газа (азот, воздух), а затем на возможные места негерметичности наносят различные мыльные эмульсии.

Развитием метода обмыливания является *метод остаточных устойчивых деформаций (ОУД)*, который реализуется при замене мыльной эмульсии на латексную пленку, разрывающуюся при утечке.

Масс-спектрометрический метод основан на свойстве ионов газов, ускоренных электрическим полем, отклоняться и двигаться в однородном магнитном поле по различным траекториям, зависящим от массового числа ионов.

Метод остаточных устойчивых следов (ОУС). Изделие нагружают внутренним избыточным давлением контрольного газа, а на контролируемую поверхность наносят слой жидкой индикаторной массы, которая, застывая, хорошо сцепляется с поверхностью изделия.

При *хемосорбционном методе* изделие, заполненное контрольной жидкостью под давлением, устанавливают в камеру, из которой откачивают воздух. Воздух пропускается через индикатор, по изменению цвета которого судят о суммарной негерметичности изделия. *Вытеснительный метод* схож с хемосорбционным, но изделие, установленное в камере, заключают в эластичный чехол. *Бародиффузионный метод* также подобен хемосорбционному, но при его реализации используются только легколетучие жидкости.

Метод проникающих жидкостей ориентирован на изменение цвета реагента при контакте с контрольной жидкостью.

Сольватный метод схож с методом индикаторных лент, но в качестве контрольной среды используют органические жидкости.

При *колористическом методе* в качестве контрольной среды используют водный раствор аммиака, а в качестве индикаторного средства – лакокрасочное покрытие с введенным в него индикатором химической реакции.

Эбулиоскопический метод позволяет выявлять места негерметичности по появлению в технологической жидкости, окружающей изделие, пара, тумана, пузырей.

При *люминесцентном методе* используют свойство некоторых жидкостей светиться под действием ультрафиолетовых лучей или коротковолновой части видимого спектра. *Оптико-абсорбционный метод* основан на обнаружении контрольного газа по избирательному поглощению излучения. При *галогенном методе* используют эффекта Раиса.

Метод электронного захвата, или плазменный метод, основан на том, что параметры низкотемпературной плазмы, возбужденной высокочастотным электрическим полем между двумя электродами в камере ионизации, существенно зависят от концентрации газов, которые обладают сродством к электрону.

Радиоизотопный метод, или метод радиоактивных индикаторов (РАИ), основан на замере счетчиками Гейгера интенсивности потока излучения.

Несмотря на то, что газо- и гидроаналитические методы имеют высокую чувствительность (таблица), их применение обосновано только при высокой стоимости изделия. Для этих методов требуются специфические реактивы, камеры, гидростабилизирующие бассейны и т. д. Следует отметить плохую автоматизируемость данных методов и то, что только некоторые из них совмещают одновременно проверку на герметичность и прочность.

При использовании химических реагентов возможно проявление физико-химических эффектов. Так, можно отметить эффект Марангони – Гиббса, который связан с появлением дополнительного течения жидкости за счет градиента концентрации растворенных веществ вдоль оси капилляра. Возникающий массоперенос определяется уравнением [7]

$$q = \frac{Ph}{2\eta} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial c} \right) \frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

где h – высота поднятия жидкости плотностью d в канале; η – вязкость жидкости; c – равновесная концентрация; x – координата. $d\sigma / dc$ находят из уравнения Гиббса и изотермы Ленгмюра.

Чем сложнее строение химических веществ, которые используются при тестировании арматуры, тем в большей степени возможны эффекты,

связанные с коэффициентами диффузии, углом смачивания и т. д.

Методы, в основе которых лежит фиксация концентрации газообразных веществ, могут быть автоматизированы при наличии средств электронной фиксации изменения концентрации. Построение приборов автоматического распознавания цветовых эффектов с достаточной степенью разрешения можно рассматривать только в перспективе.

В целом, использование газо- и гидроаналитических методов характерно для анализа элементов пищевых продуктов, космических и летательных аппаратов. Применение их для анализа запорной арматуры будет обосновано лишь в случае высоких требований по герметичности, проверки оборудования технологии «no leak», которые выходят за рамки ГОСТ [8].

Вышеназванные причины и обусловливают интерес к развитию и автоматизации манометрического и объемного (пузырькового) методов путем применения различных подходов, которые позволяют увеличить чувствительность этих методов за счет использования дифференциальных схем, активного воздействия на измерительную систему в процессе измерения [2–3, 5–6, 8–12].

Выбор этих методов для оценки герметичности запорной арматуры в первую очередь обусловлен разнообразием типоразмеров элементов арматуры, требованиями к чувствительности, а также культурой производства. Объемный метод обладает более высокой чувствительностью, но требует больше механических операций при его использовании. В случае анализа герметичности арматуры непосредственно на технологическом оборудовании он является безальтернативным.

Заключение. Выбор метода контроля для конкретного изделия осуществляется каждый раз индивидуально, с учетом следующих факторов:

1) заданная степень герметичности изделия. В большинстве задач машиностроения применяют методы контроля, обладающие предельной индикацией потока 10^{-7} – 10^{-9} Вт (иногда до 10^{-12} Вт). Рациональное комбинирование методов позволяет избежать необоснованного использования методов с высокой чувствительностью;

2) условия эксплуатации изделия. Выбранный метод контроля должен имитировать действующую схему нагружения, реальные среды и уровни действующих факторов.

При невозможности полной имитации используют моделирование условий с учетом

вязкости сред, масштабных эффектов и др. В случае высоких требований по герметичности из-за возможности различных физико-химических эффектов моделирование условий нежелательно;

3) вид оценки герметичности. Выбирая метод контроля, необходимо оценить его возможности при выявлении суммарных, локальных или тех и других утечек одновременно;

4) безопасность испытаний. Этот фактор связан с уровнем действующих нагрузок, возможностью дистанционного управления процессом, а также нетоксичностью, пожаро- и взрывобезопасностью применяемых технологических и контрольных сред, экологической чистотой среды испытаний;

5) прогрессивность метода контроля. Это понятие связано с возможностью механизации и автоматизации процесса проведения испытаний и обработки их результатов, т. е. позволяет оптимизировать себестоимость, трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость при обеспечении качества.

Для количественного анализа герметичности запорной арматуры наилучшей автоматизации поддается манометрический метод.

В случае недостатка чувствительности, а также для анализа арматуры на технологическом оборудовании предпочтение следует отдавать объемному методу.

Литература

1. Калинчев, В. А. Методы испытаний конструкций на герметичность: учеб. пособие / В. А. Калинчев. – М.: Изд-во МГТУ, 1992. – 34 с.
2. Способ испытания изделий на герметичность: пат. 2206879 РФ, МКИ7 G01M3/00 / Н. И. Жежера, А. И. Сердюк, Е. С. Куленко; заявитель Автоном. неком. орг-ция Науч.-технол. парк Оренбург. гос. ун-та. – № 2002110032/28; заявл. 16.04.2002; опубл. 20.06.2003 // Бюллетень изобретений. – 2005. – № 18 – С. 102.
3. Автоматический стенд для испытания на герметичность: пат. 2194259 РФ, МКИ7 G 01 M 3/02 / В. Г. Барабанов, Г. П. Барабанов; заявитель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 2001100578/28; заявл. 09.01.2001; опубл. 10.12.2002 // Бюллетень изобретений. – 2002. – № 34 – С. 23.
4. System and method for utility metering and leak detection: pat. 7412876 USA, IPC (20060101) G01M 3/02 (20060101) / L. Kates; Assignee Corona Del Mar. – № 11/761760; appl. 16.12.2007; filed 19.08.2008 // http://patft.uspto.gov.
5. Leak rate measuring device: pat. 7331216 USA, G01M 3/20 (20060101) / L. Gerdau, R. Rolff, R. Kilian; Assignee Inficon GmbH. –

№ 10/558,164; appl. 12.10.2004; filed 19.01.2008 // <http://patft.uspto.gov>.

6. Жежера, Н. И. Развитие теории и совершенствование автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Н. И. Жежера; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург, 2004. – 36 с.

7. Бударин, Л. И. Химические методы испытания изделий на герметичность / Л. И. Бударин, К. С. Касаев, В. Н. Наумов; отв. ред. В. М. Чертов. – Киев: Наукова думка, 1991. – 208 с.

8. Арматура трубопроводная запорная. Классы и нормы герметичности затворов: ГОСТ 9544–2005. – Введ. 04.01.08. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2008. – 14 с.

9. Industrial valves. Testing of valves. Pressure tests, test procedures and acceptance criteria. Mandatory requirements: BS EN 12266-1:2003. – Publ. Date 02.04.2003 // <http://www.standardsdirect.org>.

10. Industrial valves. Testing of valves. Tests, test procedures and acceptance criteria. Supplementary requirements: BS EN 12266-2:2003. – Publ. Date 06.12.2002 // <http://www.standardsdirect.org>.

11. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования: ГОСТ 24054–80. – Введ. 01.01.87. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам. – 8 с.

12. Соединения трубопроводов. Методы испытаний на герметичность: ГОСТ 25136–82. – Введ. 04.01.08. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам. – 23 с.

Поступила в редакцию 31.03.2010