

Построенные зависимости доказывают, что увеличение количества слоёв позволяет увеличить диапазон перемещения устройств на его основе, либо уменьшить рабочее напряжение, необходимое для достижения определенного значения перемещения.

При исследовании характеристик актуатора на основе аналогичных образцов ДЭ с титанатом бария- «классическим» наполнителем ДЭ, были получены следующие результаты: для одного слоя -15,39 мкм, для двух слоёв -35,35 мкм, для четырёх слоев -39,11 мкм, для восьми -68,24 мкм.

Сравнение полученных результатов для ДЭ на основе титаната бария и кварца позволяет сделать вывод, что для изготовления ДЭ кварц можно считать более дешёвым аналогом титаната бария. Таким образом, используя кварц в качестве наполнителя, можно добиться результата на 8-ми слоях ДЭ на 15 мкм хуже, но уменьшив затрат на изготовление в разы.

Литература

1. Prahlad H, Pelrine R, Kornbluh R, von Guggenberg P, Chhokar S, Eckerle J Programmable surface deformation: thickness-mode electroactive polymer actuators and their applications. Proc SPIE 5759:102 2005.
2. Brochu P., Pei Q. Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles In L. Rasmussen Electroactivity in Polymeric Materials Springer Sciens+Business Media New York, 2012 -56c. DOI 10.1007/978-1-4614-0878-9_1.
3. Planck M. An experimental investigation of electromechanical response in a dielectric acrylic elastomer// Applied Physics A, 2003-4c.
4. In SeongYoo. Artificial Muscles, Made of Dielectric Elastomer Actuators- A Promising Solution for Inherently Compliant Future Robots//Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 2012 – 12c.
5. Jung MY, Chuc NH, Kim JW, Koo IM, Jung KM, Lee YK, Nam JD, Choi HR, Koo JC Fabrication and characterization of linear motion dielectric elastomer actuators. Proc SPIE 6168:616824 2006.

Метрологическое обеспечение мер потока газа в вакууме

Д.М. Фомин

*Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», пр. Московский, 19
E-mail: vacuum@vniim.ru*

В статье рассматриваются принципы работы мер потока газа в вакууме, метрологическое обеспечение и основные проблемы, возникающие при эксплуатации.

Metrological support of test leaks in vacuum. D.M.Fomin. The article discusses work principles of test leaks in vacuum, metrological support and main problems arising during operation.

Меры потока широко применяются в различных областях промышленности для калибровки аппаратуры, предназначенной для контроля герметичности и газовыделений вакуумных систем и выпускаемых изделий. Например, параметры анализатора течеискателя масс-спектрометрического гелиевого настраивают с помощью установленной внутри прибора (или в испытываемой вакуумной системе) меры потока (течи гелиевой).

В настоящее время утверждены в качестве средств измерений и внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (Госреестр СИ) следующие типы мер потока (течи гелиевые), приведенные в таблице 1.

Таблица 1 - Меры потока (течи гелиевые), внесенные в Госреестр СИ.

п/п	Наименование СИ	Диапазон значения воспроизводимого потока, Па·м ³ /с	Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения потока, %
1.	Гелит 1	$7 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-8}$	±15
2.	Гелит 2	$3 \cdot 10^{-11} - 7 \cdot 10^{-10}$	±20
3.	10xxxx	$1 \cdot 10^{-9} - 9 \cdot 10^{-6}$	±15
4.	Fx4xxx	$1 \cdot 10^{-10} - 3 \cdot 10^{-5}$	±15

Меры потока позволяют настроить течеискатель для получения корректной количественной характеристики герметичности. До внесения течеискателей масс-спектрометрических гелиевых в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений с их помощью определяли качественную характеристику течеискателей (в том числе пределы допускаемой относительной погрешности).

Основное уравнение, используемое в течеискателях масс-спектрометрических гелиевых для расчета величины потока натекания Q , имеет вид [1]

$$Q = Q_{ЭТ} \cdot \frac{\alpha_{изм.} - \alpha_{\phi}}{\alpha_{изм.эт.} - \alpha_{\phi}} \quad (1)$$

где $Q_{ЭТ}$ – величина потока течи гелиевой, установленной в течеискатель или в вакуумную систему, указанная в свидетельстве о поверке (калибровке) течи;

$\alpha_{изм.}$ – значение потока пробного газа от вакуумной системы или выпускаемого изделия, измеряемое течеискателем в реальном времени;

$\alpha_{изм.эт.}$ – значение потока пробного газа от течи, установленной в течеискатель (или в вакуумную систему), измеряемое течеискателем;

α_{ϕ} – фоновый сигнал.

Как видно из формулы, мера потока вносит значительный вклад в точность и достоверность полученных в ходе испытаний результатов, поэтому метрологическое обеспечение данного оборудования является необходимым для повышения точности результатов испытаний.

Самыми распространёнными мерами потока являются диффузионные и капиллярные. Принцип действия диффузионных течейлучше всего рассмотреть на примере мер потока (течей гелиевых) Гелит 1 и Гелит 2. Отличием в конструкции модификаций является различный материал проницаемого элемента – кварцевое стекло (Гелит 1) и молибденовое стекло (Гелит 2).

Диффузионная мера потока (рис. 1) представляет собой герметичный металлический баллон (1), с одной стороны которого имеется трубка (3) для присоединения к испытуемой вакуумной системе или вакуумной системе течеискателя. Внутри баллона трубка присоединена к проницаемому элементу, представляющему собой шарообразную колбу (2) из молибденового или кварцевого стекла. Стенки баллона, трубки и проницаемый элемент образуют замкнутый объем, заполненный гелием до давления от 6 до 100 кПа. В процессе работы происходит диффузия гелия через стенки колбы проницаемого элемента. Толщина стенки, площадь поверхности проницаемого элемента, а также давление гелия в баллоне определяют диапазон воспроизводимого потока.

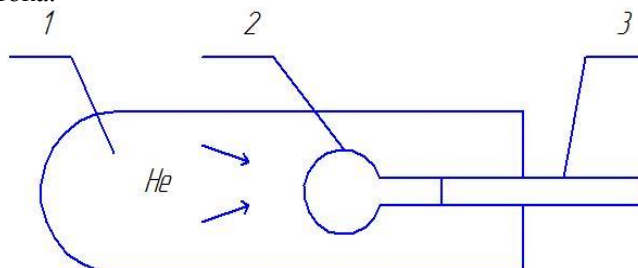


Рис. 1. Диффузионная мера потока.

Капиллярная мера потока имеет похожую конструкцию, но вместо проницаемого элемента устанавливают капилляр, изготовленный из различных материалов (стекло, фторопласт, металл и др.). Пробный газ заполняется при давлении от 0,1 до 1 Мпа, в некоторых случаях давление достигает 10 Мпа. Основным преимуществом капиллярных течей является возможность заполнения любыми видами газов, которые не засоряют капилляр и не вступают в химическую реакцию с его поверхностью.

В настоящее время в РФ эталоном наивысшей точности для проведения поверки (калибровки) мер потока является Государственный вторичный (рабочий) эталон единицы потока газа в вакууме в диапазоне $1,0 \cdot 10^{-12} \dots 1,00 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (ГВЭТ 49-2-2006). Суммарная погрешность эталона характеризуется средним квадратическим отклонением результата измерений ($S_{\Sigma 0}$): в диапазоне от $1 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ не более 0,1-0,015; в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ не более 0,015. В эталоне реализованы три измерительных блока с различными принципами действия – жидкостно-механический измерительный блок с диапазоном измерений от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; кумуляционный измерительный блок с диапазоном измерений от $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; редуктометрический измерительный блок с диапазоном измерений от $1 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Эталон содержат и применяют в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Основной проблемой при эксплуатации мер потока является разница температуры измеряемого потока и температуры самой меры потока. Необходимость введения температурной поправки в значение потоков, воспроизводимыми мерами потока, обусловлено тем, что, как правило, температура, при которой эксплуатируется течь не совпадает с температурой её калибровки. [2]

В работе [2] предложена температурная поправка в следующем виде:

$$Q_T = Q_K \frac{T}{T_K} e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_K} \right)} \quad (2)$$

где Q_T – поток, воспроизводимый мерой потока при температуре $T, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$;

Q_K – поток, воспроизводимый мерой потока при температуре её поверки (калибровки) $T_K, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$;

T, T_K – абсолютные температуры, К;

E – энергия активации для проницаемого материала элемента меры потока, кал/моль;

R – универсальная газовая постоянная.

Для определения поправок с помощью данной формулы необходимо определение значений активации для проницаемых элементов мер потока (например, кварцевого или молибденового стекла и фторопласта).

В настоящее время производители чаще всего указывают среднее рассчитанное значение температурной поправки для конкретной модели меры потока. Как правило, значение температурной поправки составляет 3%/К. Также производители обязательно указывают значение потока в единицах измерений и температуру поверки (калибровки). Для пересчета потока необходимо использовать следующую формулу:

$$Q_T = Q_K \left(1 + \frac{K_T}{100} \right)^{(T - T_K)} \quad (3)$$

где Q_T – поток, воспроизводимый мерой потока при температуре $T, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$;

Q_K – поток, воспроизводимый мерой потока при температуре её поверки (калибровки) $T_K, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$;

K_T – температурная поправка, указанная производителем;

T – температура эксплуатации меры потока, К;

T_K – температура поверки (калибровки) меры потока, К.

Однако, температуру можно не учитывать, если значение потока задано как молекулярный расход, т.е. проникновение количества вещества (моль) за единицу времени [3]. В нашей стране пока еще не распространено выражение потока в единицах измерений моль/с, однако мировым вакуумным обществом было принято решение о постепенном переходе на измерение потока (особенно для эталонного оборудования) именно в единицах измерений моль/с, что позволит нивелировать температурную зависимость при измерениях.

Для точных измерений с помощью мер потока необходимо использовать устройства для стабилизации температуры (термостаты воздушные или водяные, тепловые экраны и т.д.). В статье [2] экспериментально установлено, что для диффузионных мер потока типа Гелит 1 и Гелит 2 выдержка в течение 15 минут при вновь установленной температуре достаточна для температурной стабилизации измеряемого (воспроизводимого) потока.

Следующей проблемой при эксплуатации мер потока является влияние фоновых потоков. Фоновые потоки оказывают существенное влияние на точность и достоверность результатов измерений. Данные потоки обусловлены двумя основными причинами – фоновыми потоками измерительной системы (течеискателя, непосредственно самой вакуумной системы и т.д.) и фоновыми потоками, поступающими непосредственно со стенок патрубков мер потока. С первым видом потоков можно успешно бороться с помощью, например, прогрева системы, чистки, продолжительной откачки, а также «обнулением» фонового сигнала с помощью современных средств течеискания.

Второй вид фонового сигнала возникает по причине неправильного хранения мер потока – долгого хранения на воздухе с открытым патрубком, а еще большее влияние оказывается в случае хранения длительное время меры потока с закрытым патрубком с помощью вакуумного клапана. В этом случае происходит накопление пробного газа в проницаемом элементе и значение потока на какое-то неопределенное время может значительно вырасти на величину от 30% до 100% по сравнению с номиналом. К сожалению, современные течеискатели, как правило, создают достаточно низкий вакуум на входе, что не позволяет быстро откачать накопленный пробный газ в проницаемом элементе, что создает дополнительную погрешность при измерениях с помощью данной меры потока.

Экспериментально доказано, чем длительнее откачка патрубков мер потока, тем выше достоверность измеренных потоков и ниже погрешность измерений.

Исходя из вышеперечисленного очень важно соблюдать правильные условия хранения мер потока, а в особенности перед проведением поверки (калибровки), т.к. неправильное хранение может существенно зависить значение потока на неопределенное время, в результате пользователь может получить некорректное номинальное значение потока.

Также серьезной проблемой является разработка и серийный выпуск мер потока, отечественного производства с возможностью наполнения различными газами (водород, азот, аргон, фреон и т.д.). Данные меры потока необходимы для калибровки щуповых течеискателей. Также необходимо проведение государственных испытаний с целью утверждения типа для определения метрологических характеристик данных мер потока. На данный момент в Госреестре РФ нет утвержденных в качестве СИ мер потока с возможностью наполнения другим газом, кроме He4.

В 2019 году компанией ООО «Вактрон» по заказу ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» были разработаны и изготовлены новые капиллярные меры потока – течь гелиевая (азотная) ВАКТРОН ВКТ с возможностью заполнения как гелием, так и азотом.

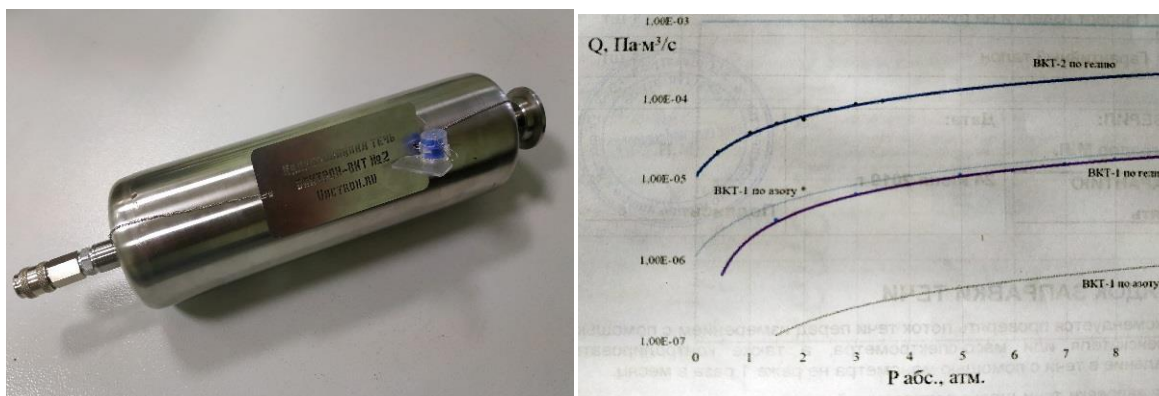


Рис. 2. Внешний вид течи ВКТ и график зависимости потока от давления внутри баллона течи.

Основным преимуществом новых мер потока является возможность регулировки потока за счет повышения или понижения давления пробного газа внутри баллона. Истечение меры потока возможно как на вакуум, так и на атмосферу. Также стоит отметить простоту самостоятельно заполнения баллона пробным газом. Предварительные испытания подтвердили заявленные производителем характеристики.

Своевременное метрологическое обслуживание, а также соблюдение правил эксплуатации и хранения мер потока в вакууме, позволит существенно повысить точность проводимых измерений с помощью данного оборудования, тем самым повысить качество производимой продукции, сократить вероятность принятия ошибочного решения в отношении испытываемых объектов.

Литература

1. Кузьмин В.В., Аляев В.А. Техника измерения вакуума: монография – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009.
2. Афанасьева Л.А., А.И. Евлампиев, И.В. Творогов Метрологическая аттестация диффузионных гелиевых калиброванных течей // Вакуумная техника и технология. Том II, № 1, 1993.
3. Handbook of Vacuum Technology. Second edition. Edited by Karl Jousten, 2016.