

3. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах: монография / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, М.Д. Бронштейн. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. -232 с.

4. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Уравнения для расчета проводимости различных видов щелевых каналов в молекулярном режиме течения // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т. 14, № 1. - С. 9-13.

5. НВД-200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vacma.ru/products/roots_pump/nvd/382/, свободный

6. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.

7. COMSOL Multiphysics. License file for Kazan National Research Technology University c/n 9601045.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДВУХКАМЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕДУКЦИИ ДАВЛЕНИЯ

USE OF PARALLEL TWO-CHAMBER MEASURING SYSTEMS FOR ESTIMATING THE DEGREE OF TIGHTNESS BY THE PRESSURE REDUCTION METHOD

С.А.Бушин, / vnii4@vniia.ru, 2009-01-07@mail.ru

S.A.Bushin,

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова» (ВНИИА), г. Москва

На основе метода редукции с принятой параллельной двухпоточной измерительной схемой представлены математические модели (уравнения измерения), описывающие при реализации разрушающего метода контроля разнесенные во времени процессы, ответственные за формирование измеряемой газовой среды при молекулярном режиме течения в объеме вскрытия, в зонах измерения и анализа для оценки ее общего и парциального давлений, с последующей оценкой общей степени негерметичности в объемах ЭВП, имеющих течи. Обозначены источники дополнительных погрешностей измерений с указанием методических неточностей, вызывающих в свою очередь появление остаточных погрешностей, учет которых нашел свое отражение в виде поправочных коэффициентов в уравнении(ях) измерения при определении величины давления пробного газа в исследуемом приборе, измеряемого с погрешностью не более $\pm 8\%$. Предложено апробированное методическое решение построения измерительных схем, позволяющее избежать потери чувствительности измерений, что исключает возможность пропуска малых течей при их наличии.

On the basis of the reduction method with the adopted parallel two-flow measuring circuit, mathematical models (measurement equations) are presented which describe, during the implementation of the destructive control method, the time-spaced processes responsible for the formation of the measured gaseous medium in the molecular flow regime in the total and partial pressures, with the subsequent assessment of the general degree of leakage in the volumes of the EEC which have leaks. Sources of additional measurement errors are shown with an indication of methodological inaccuracies, which, in turn, cause the appearance of residual errors, the

account of which is reflected in the form of correction factors in the measurement equation (s) when determining the value of the test gas pressure in the instrument under study, measured with an error of no more than $\pm 8\%$. A proven methodological solution for measuring circuits construction is proposed, allowing to avoid the loss of measurement sensitivity, which excludes the possibility of missing small leaks in their presence.

Ключевые слова: манометрический преобразователь, газоанализатор, метод редукации, разрушающий контроль, массообмен, уравнение измерения, степень негерметичности, поток натекания(утечки), погрешность, поправка.

Keywords: gauge transducer, gas analyzer, reduction method, destructive testing, mass transfer, measurement equation, degree of leakage, leakage flow (leakage), error, correction.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в осведомленности в отношении процессов, протекающих в объемах ЭВП, начиная с момента их изготовления и в дальнейшем на протяжении всего срока хранения, исчисляемого не одним годом, вместе с контролем герметичности данных оболочек являются, одними из приоритетных проблем. Изученность кинетики формирования газовой остаточной среды, ее качественный и количественный анализ является залогом надежности и безотказности работы ЭВП в условиях эксплуатации. Поэтому решение задач по созданию методик и инструментария, позволяющих измерять и анализировать параметры остаточной газовой среды при заданных значениях погрешностей совместно с проводимыми испытаниями на герметичность, ориентированных в первую очередь на специзделия, послужили отправной точкой для разработки и создания аналитических систем для реализации данных задач.

В настоящей работе представлено детальное рассмотрение применяемого метода редукации для оценки контроля герметичности на примере исследований, проведенных на масс-спектрометрической установке измерения давления (УИД-2) [1].

МЕТОД РЕДУКАЦИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

При создании установки УИД-2 был использован опыт разработок абсолютных методов для измерения высокого и сверхвысокого вакуума на основе метода редукации [2-12]. Надо отметить, что на практике данный метод нашел свое отражение в целом ряде стандартов по передаче размера единицы давления соподчиненным измерительным средствам из области сравнительно высокого давления в область высокого и сверхвысокого вакуума [13,14].

Применимость этого метода к разработкам по контролю давления и степени негерметичности с использованием метода накопления можно изложить, основываясь на следующих положениях. Если через диафрагмы протекает не постоянный поток, а изменяемый во времени, а это обеспечивается, если в камере вскрытия (накопления) будет заключена лишь порция газа, например, баллон ЭВП с течью, который при открытом штенгеле/либо с надрезанным диффузионным спаем можно герметично пристыковать к вышеуказанной камере и произвести кратковременную опрессовку контрольным газом, то при наличии последовательно установленных пар диафрагм может сняться часть проблем, возникающих во многих случаях при измерениях:

– во-первых, подбором величин проводимостей, возможно, обеспечить рабочий диапазон измерений при величинах давлений накопленного газа, выходящих за пределы рабочего давления датчика газоанализатора (в меньшей степени это относится к широкодиапазонным преобразователям общего давления);

– во-вторых, при наличии элементов малой проводимости сравнительно просто добиться снижения эффекта селективности откачки (при наличии такового);

– в-третьих, за счет подбора постоянной времени можно добиться эффективного использования образца, т.е. регламентированной длительности откачки исследуемого газа из камеры, где находится контролируемый газ (вскрытия/накопления).

Указанный метод и вместе с тем принцип разделения исследуемого газа в двух изолированных объемах, был предложен на установке УИД-2, где использована двухпоточная схема измерения на базе метода редукции. Существо нововведения заключалось в том, что если запараллелить две измерительные ветки, в каждой из которых разместить манометрический и масс-спектрометрический датчики, используя при этом единую откачную систему, то тем самым можно существенно уменьшить взаимное влияния преобразователей друг на друга и в то же время снизить их влияние на исходный состав в камере вскрытия/накопления [15].

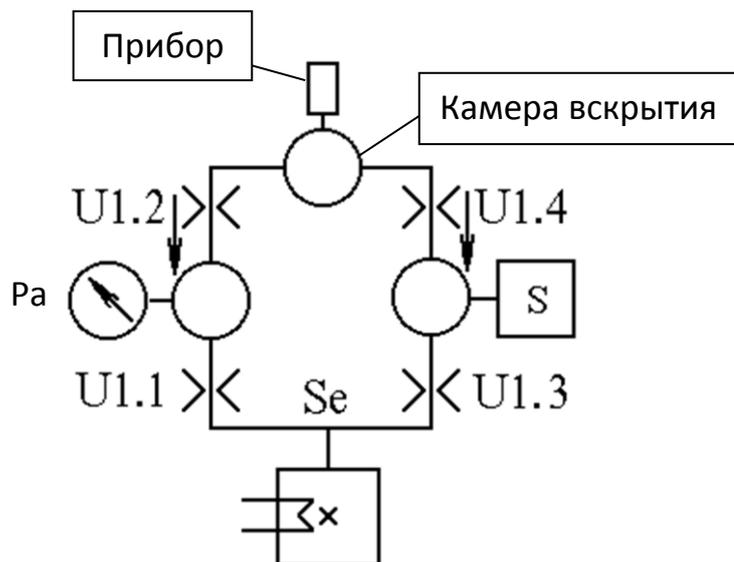


Рис.1. Схема с параллельными редукционными измерительными линиями.

Проработка вопросов, связанных с массообменом с использованием метода Монте-Карло [16], позволила выяснить ряд важных моментов: во-первых, в условиях молекулярного режима, как наиболее вероятного, вероятность обратной миграции молекул, уже побывавших в измерительных камерах, а также факт их присутствия в камерах, где они прежде не были сравнительно мал – не более 5 %; здесь принимаются во внимание случаи взаимопроникновения молекул, как со стороны входных, так и выходных диафрагм; во-вторых, вероятности прямого пролета молекул со стороны отверстий входных диафрагм на сторону выходных и в обратных направлениях при разнице в значениях проводимостей в 2-3 десятичных порядка не превышают 1 %.

Следует отметить, что выбранная схема измерения позволяет одновременно проводить измерения общего и парциальных давлений, а, следовательно, и степени негерметичности без существенного искажения исследуемой среды в реципиенте. При этом в отсутствии каких-либо видимых препятствий на пути распространения газа из камеры вскрытия до входных диафрагм процесс начала регистрации считается обоюдно равновероятным как для манометрического, так и масс-спектрометрического преобразователей.

Для того чтобы процесс измерения не сводился к эмпирическим или полумэмпирическим зависимостям и его можно было уверенно "чувствовать" и в определенной мере научиться "управлять" его ходом, применяя выработанную к использованию принципиальную схему, проведена разработка теоретической модели в условиях динамики разворачиваемых во времени процессов. Кроме того рассмотрены возможные факторы, влияющие на точность измерений, присущих методу редукции.

УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ

В результате проведенной аналитической проработки схемы динамической вакуумной системы, представленной на рис. 1, получены выражения описывающие изменения давления в ее разных объемах $P=f(t)$. Данные модели адекватно отражают процессы, происходящие в камерах вскрытия, измерения и анализа, поскольку описывают динамику изменения давления в обозначенных объемах измерительной системы, учитывая, в частности, такое явление как возникновение побочного газового потока, вызываемого из-за разрушения оболочки штенгеля объекта исследования (разрушающий контроль) [17,18], а также возникновение его откачки в зависимости от сорбционной емкости геттера прибора к моменту вскрытия совместно с фоновой составляющей. Кроме того, учитывается и время, требуемое для установления нового равновесного состояния в объединенных объемах, в результате экспансии высвобождаемого газа, поскольку связано с субъективным фактором – оперативностью и правильностью действий со стороны лица, производящего вскрытие прибора, так как отмеченные особенности зависят в значительной степени от геометрии тракта (19), связывающего полость реципиента с объемом камеры перепуска (вскрытия).

Функция измерения общего давления $P_{pa}(t)$ в камере с размещенным в ней манометрическим преобразователем, имеет следующий вид:

$$P_{pa}(t) = \left\{ \begin{array}{l} P_{opa} + \frac{U_{1.2}}{(U_{1.1} + s_{pa})} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{A1.5}} \cdot \left[\frac{Q_{A1.5}}{(U_{1.2} + U_{1.4})} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_1}{V_{A1.5}}}) \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.1} + s_{pa}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_1}{V_{pa}}}) \right] + \dots \\ \frac{U_{1.2}}{(U_{1.1} + s_{pa})} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{A1.5}} \cdot P_{rez} \cdot e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_2}{V_{A1.5}}} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.1} + s_{pa}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_2}{V_{pa}}}) \end{array} \right. \quad (1, a)$$

• при $0 \leq \Delta t_1 < \Delta t'_1$;
• при $0 \leq \Delta t_2 < \Delta t'_2$;

$$P_{pa}(t) = \left\{ \begin{array}{l} P_{opa} + \frac{U_{1.2}}{(U_{1.1} + s_{pa})} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{kvs}} \cdot \left[\frac{Q_{kvs}}{(U_{1.2} + U_{1.4})} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4} + s_g) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_1}{V_{kvs}}}) \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.1} + s_{pa}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_1}{V_{pa}}}) \right] + \dots \\ \frac{U_{1.2}}{(U_{1.1} + s_{pa})} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{kvs}} \cdot P_{rez} \cdot e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4} + s_g) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_2}{V_{kvs}}} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.1} + s_{pa}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_2}{V_{pa}}}) + \frac{U_{1.2}}{(U_{1.1} + s_{pa})} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{kvs}} \cdot \dots \\ \Delta P \cdot e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_3}{V_{kvs}}} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.1} + s_{pa}) \sqrt{\frac{28}{M}} \Delta t_3}{V_{pa}}}) \end{array} \right. \quad (1, б)$$

• при $\Delta t'_1 \leq \Delta t_1 < \infty$;
• при $\Delta t'_2 \leq \Delta t_2 < \infty$;
• при $0 \leq \Delta t_3 < \infty$.

Аналогичные уравнение измерения строятся и в отношении масс-спектрометрического датчика $P_{mx}(t)$ (соответствующее выражение здесь не представлено).

ПОПРАВКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

Функции $P_{pa}(t)$, $P_{mx}(t)$, описывающие изменения давления в объемах коллекторов с датчиками общего и парциального давления, могут быть преобразованы в выражения:

$$P_{pa} = P_{0pa} + \frac{U_{1.2}}{U_{1.1}} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{kvs}} \cdot \Delta P \cdot \frac{1}{(1 + \delta_{Spa})} \cdot \left(\delta'_{Q_{kvs}} + \delta'_{rez} + \delta'_c \right); \quad (2)$$

$$P_{mx} = P_{0mx} + \frac{U_{1.4}}{U_{1.3}} \cdot \frac{T_{mx}}{T_{kvs}} \cdot \Delta P \cdot \frac{1}{(1 + \delta_{Smx})} \cdot \left(\delta''_{Q_{kvs}} + \delta''_{rez} + \delta''_c \right), \quad (3)$$

где $\delta'_{Q_{kvs}}, \delta''_{Q_{kvs}}$ – поправка на сорбционно-десорбционные процессы и натекание (улетку), $\delta'_{Rez}, \delta''_{Rez}$ – поправка на составляющую от трибологического фактора при вскрытии прибора; δ'_c, δ''_c – поправка на неустановившийся режим течения; $\delta'_{Spa}, \delta''_{Smx}$ – поправка на откачивающее действие манометрического и масс-спектрометрического преобразователей.

Приводя решение выражений (2) и (3) к каноническому виду относительно постоянной величины ΔP , вывод уравнений измерения давления в камере вскрытия можно считать практически завершенным:

$$\Delta P = \left\{ \begin{array}{l} \left(\delta'_c \right)^{-1} \cdot \frac{(P_{pai} - P_{opa})}{\frac{U_{1.2}}{U_{1.1}} \cdot \frac{1}{(1 + \delta'_{Spa})} \left(\frac{T_{pa}}{T_{kvs}} \right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{\delta'_{Q_{kvs}}}{(P_{pai} - P_{opa})} + \frac{\delta'_{Rez}}{(P_{pai} - P_{opa})} \right) \right] \end{array} \right. \quad (4)$$

для манометра

$$\Delta P = \left\{ \begin{array}{l} \left(\delta''_c \right)^{-1} \cdot \frac{(P_{pai} - P_{opa})}{\frac{U_{1.4}}{U_{1.3}} \cdot \frac{1}{(1 + \delta''_{Smx})} \left(\frac{T_{mx}}{T_{kvs}} \right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{\delta''_{Q_{kvs}}}{(P_{pai} - P_{opa})} + \frac{\delta''_{Rez}}{(P_{pai} - P_{opa})} \right) \right] \end{array} \right. \quad (5)$$

для масс - анализа тора

С тем, чтобы оценить потенциально-возможный вред от указанных побочных эффектов, целесообразно обратиться к методу редукции в его базовом варианте [20], т.е. при установившемся течении потока (предполагается, что количество исходной порции постоянно). Соответствующее общее выражение с учетом упомянутых процессов в виде поправок описывается следующей зависимостью:

$$P_{pa} = \frac{U_{1.2}}{U_{1.1}} \cdot \Delta P \cdot (1 + \sum \delta). \quad (6)$$

При выводе уравнения (6) для вводимых поправок накладывалось условие их достаточной малости.

Анализ вновь полученной модели (модификации) уравнения измерения (1а, 1б) показывает, что именно в силу допущенных ограничений при решении системы дифференциальных уравнений часть поправок из уравнения (6) отсутствует. Однако это не исключает их влияния как таковых на процессы в действительности и, следовательно, поэтому они должны быть учтены совместно с ранее отмеченными поправками, особенно поправка, учитывающая влияние обратного потока из насоса δ_e .

Большинство из указанных процессов не поддается точному расчету или экспериментальному определению из чего следует, что наиболее целесообразно осуществление таких конструктивных и методических мер, посредством которых можно свести значения их влияния к минимуму.

В методике измерения давления предусмотрен ряд мер, направленных на устранение влияния, оказываемого со стороны потоков сорбции и десорбции, а также за счет трибологического фактора. Однако в полной мере устранить отмеченные эффекты не представляется возможным.

Ввиду необходимости разрешения проблемы, связанной с учетом выше отмеченных поправок, следует обратить особое внимание на основные положения методики в той ее части, где речь идет о вакуумметрических характеристиках. Необходимый акцент должен быть сделан в отношении выполняемой по методике операции, связанной с вычитанием из получаемой экспериментально основной характеристики сигнала предварительно записанного фонового сигнала в предположении о воспроизводимости последнего. Однако фоновый сигнал все же претерпевает изменения, которые возникают уже непосредственно в процессе вскрытия изделия. Из сказанного следует, что существует методическая неточность, допускаемая в данной процедуре: во-первых, за счет дополнительно подключаемого к камере вскрытия объема прибора и, во-вторых, из-за откачивающего действия геттера, о чем ранее уже упоминалось, что в итоге влечет к возникновению остаточной погрешности Δq_{kvs} . Остаточная погрешность Δp_{rez} также возникает и при учете дополнительной газовой составляющей при резании штенгеля, которая в полной мере не может быть реально воспроизведена как в и случае с фоном. Поэтому с учетом отмеченного и в предположении о пренебрежимой малости в отношении всех остальных дискриминационных эффектов, значение ΔP из выражения (1) подлежит корректировке, т.е. $\Delta P = \Delta P_D \cdot (1 - \sum \delta_{pa})$, где ΔP_D – действительное (искомое) приращение давления в объеме камеры вскрытия; $\sum \delta_{pa} = \Delta q'_{kvs} + \Delta p'_{rez}$ – суммарная поправка на остаточные погрешности от побочных процессов.

Отсюда

$$\Delta P_D = \frac{\Delta P}{(1 - \sum \delta_{pa})}. \quad (7)$$

Поскольку величина давления ΔP относится к объему, образуемому от объединения объемов камеры вскрытия ($V_{A1.5}$) и исследуемого прибора V_{pr} с объемами $V_{D1.2}$, $V_{D1.4}$, характеризующими величины полостей от клапанов, ограничивающих объем камеры вскрытия (накопления), до входных отверстий малых диафрагм, уравнение измерения общего давления в полости прибора приобретет следующий вид:

$$P_{pr} = \frac{(V_{A1.5} + V_{D1.2} + V_{D1.4} + V_{pr}) \cdot \Delta P_D}{V_{pr}}. \quad (8)$$

Учитывая, что $\Delta P = \frac{\Delta I}{S_{N2}} \cdot q_{см}$,

где ΔI – ток положительных ионов с коллектора манометрического преобразователя; S_{N2} – абсолютный коэффициент чувствительности (N2) вакуумметра, а также с учетом возможного присутствия в приборе газов с общим числом более одного ($q_{см}$ – коэффициент относительной чувствительности вакуумметра к данной смеси газов) выражение (8) в окончательном виде можно записать:

$$P_{pr} = \frac{(V_{A1.5} + V_{D1.2} + V_{D1.4} + V_{pr})}{V_{pr}} \cdot \frac{\Delta I}{S_{N2}} \cdot \frac{q_{см}}{(1 - \sum \delta_{pa})}, \quad (9)$$

и, соответственно, выражение для величины потока (в случае с ограниченным опрессовкой контрольным газом и накоплением) примет следующий вид

$$Q = P_{pr} \cdot V_{pr} / t_n, \quad (10)$$

где V_{pr} – вместимость прибора; t_n – время накопления.

Аналогичное выражение для i -го газового (контрольного) компонента для масс-спектрометрической камеры P_i имеет следующий вид:

$$P_i = \frac{(V_{A1.5} + V_{D1.2} + V_{D1.4} + V_{pr}) \cdot \Delta I_i}{V_{pr} S_i (1 - \sum \delta_{mx})}, \quad (11)$$

где ΔI_i – ток положительных ионов с коллектора масс-спектрометрического преобразователя, S_i – абсолютный коэффициент чувствительности масс-спектрометра по i -му газу, $\sum \delta_{mx} = \Delta q_i + \Delta p_i$ – суммарная поправка на остаточные погрешности от побочных процессов.

Значение потока контрольного газа Q_i в камере анализатора запишется в виде выражения аналогичного (10)

$$Q_i = P_i \cdot V_{pr} / t_n. \quad (12)$$

При детальном рассмотрении "статуса" параметров (отдельных переменных), входящих в уравнения измерения (2), (3) будет не лишним напомнить о значении массового потока газа Q_{kvs} ($Q_{A1.5}$), который характеризует количество, вещества поступающего в(из) объем(а) в единицу времени, вследствие, сорбции газовых компонентов на стенках и их десорбции с поверхностями камеры вскрытия(накопления), а также, что несомненно важно при контроле герметичности, за счет существующего интегрального потока натекания в данном объеме из-за неплотностей, включая объем прибора, значение которого является количественной характеристикой, по которой судят об общей герметичности объекта контроля.

Для случая определения давления с последующей оценкой степени негерметичности откачиваемого баллона ЭВП, имеющего течь, внешняя поверхность которого подвергается опрессовке контрольным газом, а внутренняя полость имеет свободное сообщение с объемом камеры вскрытия/накопления ($V_{\Sigma} = V_{kvs} + V_{pr}$), аналитическое(ие) выражение(я) для определения искомого значения давления из уравнений (1,б) можно преобразовать к виду:

$$P_{pa}(t) = P_{opa} + \frac{U_{1.2}}{(U_{1.1} + s_{pa})} \cdot \frac{T_{pa}}{T_{A1.5}} \cdot \left[\frac{Q_{kvs} + pr}{(U_{1.2} + U_{1.4})} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4}) \cdot \sqrt{\frac{28}{M}} \cdot \Delta t_1}{(V_{kvs} + V_{pr})}}) \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.1} + s_{pa}) \cdot \sqrt{\frac{28}{M}} \cdot \Delta t_1}{V_{pa}}}) \right]. \quad (13)$$

при $0 \leq \Delta t_1 < \infty$

Соответственно для датчика газоанализатора выражение (13) будет иметь аналогичный вид

$$P_{mx}(t) = P_{omx} + \frac{U_{1.4}}{(U_{1.3} + s_{mx})} \cdot \frac{T_{mx}}{T_{A1.5}} \cdot \left[\frac{Q_{kvs} + pr}{(U_{1.2} + U_{1.4})} \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.2} + U_{1.4}) \cdot \sqrt{\frac{28}{M}} \cdot \Delta t_1}{(V_{kvs} + V_{pr})}}) \cdot (1 - e^{-\frac{(U_{1.3} + s_{mx}) \cdot \sqrt{\frac{28}{M}} \cdot \Delta t_1}{V_{mx}}}) \right]. \quad (14)$$

при $0 \leq \Delta t_1 < \infty$

Расчетные уравнения величин потоков натекания Q (10) для манометрического метода измерения, а также – Q_i (12) для масс-спектрометрического метода остаются без изменений.

Необходимо отметить, что при контроле герметичности с использованием метода редукции применительно к ЭВП штенгельной конструкции, разрабатываемых и производимых во ФГУП ВНИИА, в число возможных мест течей, конструктивно исключенных из области рассмотрения, попадает диффузионный спай штенгеля, поскольку в первом случае при реализации разрушающего метода хвостовик штенгеля со спаем подвергается резанию, а во втором – участок смятия (в области хвостовика) и вовсе отсутствует. Однако это, пожалуй, единственный основной недостаток. Все остальные неразъемные сочленения узла прибора надежно контролируются, благодаря разработанному устройству, обеспечивающему герметичное подсоединение изделия к измерительному объему [21].

Здесь также может возникнуть вопрос о возможности применения локального поиска течи(течей) вместо процедуры по выявлению общей негерметичности. Можно с уверенностью отметить, что реализация испытаний на герметичность с заменой способа накопления на способ, например, обдува уместна. При этом, однако, имеется ряд ограничений накладываемых 1) за счет влияния неустановившегося режима течения, и 2) использования малых диафрагм, проводимости которых незначительны, что вызывает снижение порога чувствительности в диапазоне малых натеканий (утечек).

Все что касается неустановившегося режима течения, то здесь следует отметить, что в газодинамических системах процессы стационарного и нестационарного течений газов находятся в постоянной конкуренции друг с другом. Картина такого соперничества налицо: как только с целью получения заданного давления в объемы системы начинает поступать пробный газ, в них сразу же возникают переходные процессы [22]. При относительно малом количестве газа установление равновесного состояния в принципе невозможно. При неограниченном количестве подаваемого газа продолжительность этих процессов для каждой отдельно взятой камеры определяется своим временным интервалом.

Поправку на неустановившийся режим течения газа можно свести к минимуму, определив первую производную по времени $\partial \delta'_c / \partial t_3 = 0$, и соответственно необходимый для установления в камере измерения(анализа) равновесного состояния промежуток времени $\Delta t_3 = t_3 - t_{03}$:

$$t_3 = \frac{V_{pa}}{U_{1.1} \cdot (1 + \delta_s) \cdot \sqrt{\frac{28}{M}}} \cdot \text{Ln} \left(1 + \frac{U_{1.1} \cdot (1 + \delta_s) V_{kvs}}{(U_{1.2} + U_{1.4}) \cdot V_{\delta}} \right) \quad (15)$$

Аналогичный вид имеет выражение для времени установления равновесия в камере масс-спектрометра.

Из этого следует, что с момента поступления пробного газа в объединенный объем камеры вскрытия с контролируемым прибором с истечением промежутка времени, длительность которого определяется из уравнения (15), между потоками подаваемого и удаляемого газа в объеме измерения (анализа) наступает состояние равновесия. Это в свою очередь означает, что можно приступать непосредственно к проведению измерений.

Выбор величины t_3 , как следует из уравнения (15), зависит от соотношения проводимостей входных-выходных диафрагм, эффективной скорости откачки манометрического преобразователя (датчика масс-спектрометра), а также значений объемов камер вскрытия и измерения (анализа). При этом анализ предыдущего уравнения показывает, что равновесное состояние в камерах преобразователей устанавливается тем быстрее, чем больше отношение $\frac{U_{1.1} + s_{pa}}{V_{pa}} \left(\frac{U_{1.3} + s_{mx}}{V_{mx}} \right)$. Вместе с этим и убыль газа в камере

вскрытия тем меньше, чем больше отношение $U_{1.2} + U_{1.4} / V_{kvs}$.

На практике редко удается создать вакуумную камеру с объемом $V_i < 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$. В качестве разумных пределов постоянной времени откачки камер измерения (анализа), по-видимому, следует считать значения в интервале между (3–5)...(10–20) с в зависимости от рода газа. Если считать, что по условию $U_{1.1}(U_{1.3}) \ll Se$ (Se – эффективная скорость откачки в сечении за выходной диафрагмой) максимально возможное значение выходной диафрагмы $U_{1.1}$ ограничено значением $< 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ то, задавшись приемлемо малым значением поправки на откачивающее действие преобразователя $[\delta_s] = 0,01-0,001$ можно получить оценочные величины входных диафрагм $U_{1.2}, U_{1.4}$:

$$U_{1.2}, U_{1.4} \leq 1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Если пренебречь всеми поправками в уравнениях измерения (2), (3), кроме δ'_c , δ''_c , и, допустив $T_{kvs}=T_{pa}$, $P_{opa}\approx 0$, то:

$$P_{i_{pa}} = \frac{U_{1.2}}{U_{1.1}} \cdot P_o \cdot \delta'_c; \quad (2,a)$$

$$P_{i_{mx}} = \frac{U_{1.4}}{U_{1.3}} \cdot P_o \cdot \delta''_c; \quad (2,б)$$

На графике (рис.2) приведены иллюстрации изменения динамики в камере измерения (анализа) от значения объема камеры вскрытия V_{kvs} с порцией контролируемого газа.

Из графика следует, что давление контролируемого газа $P_{i_{pa}}$ достигает равновесного значения быстрее при повышении его, чем при понижении [23]. Поэтому целесообразно начинать эксперименты с предельно низких давлений [8].

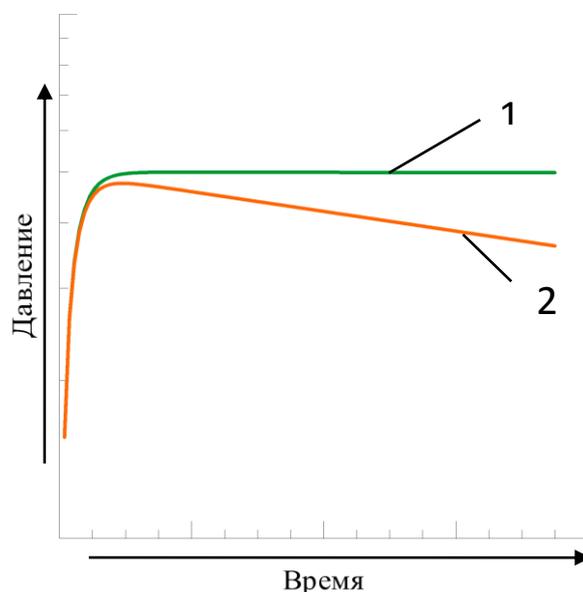


Рис.2. Зависимости $P=f(t)$ 1 – в случае с соотношением величин ($V_{kvs}=Varia$) у показателя первой экспоненты в уравнении (1, а) соответствующем величине 100:1 и 2 – в случае – 1:1 для порции.

Отсюда следует вывод, что при проведении контроля герметичности (также как и при градуировке) необходимо дождаться окончания переходных процессов в камерах измерения и анализа и только по достижению стационарного течения газа начинать измерения. Также необходимо учитывать, что при обдуве гелием мест наличия возможных течей, нужно стремиться, чтобы время перемещение обдувателя из одной позиции в другую было бы равно или больше утроенного значения постоянной времени откачки прибора ($\geq 3 \cdot V_{pr}/U_{1.3}$; $3 \cdot V_{pr}/U_{1.4}$).

Внесение поправок при определении давления опорного(пробного) газа обеспечивает при оценке степени негерметичности достижение значения погрешности не превышающей $\pm 8\%$.

Что касается снижения порога чувствительности из-за значений проводимости малых входных диафрагм, то данные ограничения могут быть устранены методически и, в частности, если изменить тракт, по которому течет газ, исключив из маршрута его

прохождения входные диафрагмы, используя вместо них элементы вакуумной коммутации [запорно-регулирующие клапаны $U_{1,2}, U_{1,4} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (по N_2)], предусмотренные в конструкции измерительной системы с параллельными двухкамерными измерительными системами (УИД-2), т.е. за счет замены одного схемного решения на другое. Это позволит избежать потери чувствительности измерений и соответственно исключит возможность пропусков малых течей при их наличии.

ВЫВОДЫ

Таким образом, использование двухпоточной схемы измерения дает возможность для проведения измерения как общего и парциального давлений, так и определения степени негерметичности приборов по контрольному газу со сравнительно высокой точностью.

Применение метода редукиции с так называемой ограниченной аналитической навеской и неограниченной навеской имеют свои положительные стороны, а также некоторые недостатки, часть из которых можно методически исключить, применив возможность перехода на другие конструктивные схемотехнические решения без отхода от использования редуцирования давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерюхин А.А., Кузьмин В.В. Образцовая установка для воспроизведения единицы давления в диапазоне 10^{-3} - 10^{-6} Н/м² / А. А. Ерюхин, В. В. Кузьмин // Измерит. техн.. 1969. № 4. – С.22–26
2. Florescu, N. A. Reproducible low pressures and their application to gauge calibration / N. A. Florescu // Transactions of 8-th., Nat. Vac. Symp., New York., Macmillan. 1961. – Vol. 1. – P. 504–510.
3. Кузьмин, В. В. Абсолютный метод динамического воспроизведения малых давлений / В. В. Кузьмин // Измерительная техника. 1967. – № 1. – С. 29–33.
4. Кузьмин, В. В. Абсолютный метод измерения давлений в области ниже 10^{-5} тор // Физика и техника сверхвысокого вакуума: сб. науч. тр. / Под общ. ред. Г. Л. Саксаганского. Ленинград: Изд-во Машиностроение, 1968. – С. 177–183.
5. Ерюхин, А. А. Образцовая установка для воспроизведения единицы давления в диапазоне 10^{-3} - 10^{-6} Н/м² / А. А. Ерюхин, В. В. Кузьмин // Измерительная техника. 1969. – № 4. – С. 22–26.
6. Davis, W. D. Gauge calibration in the ultra-high vacuum range / W. D. Davis // Transactions of 10-th., Nat. Vac. Symp., New York, 1963. – P. 253–256.
7. Fletcher, B. Erfahrungen an einem system für das genaue und absolute kalibrieren von vakuum-messgeräten / B. Fletcher, J. F. Watts // Vakuum-Technick, 1968. – № 6. – С. 145–148.
8. Кузьмин, В. В. Абсолютный метод и образцовая аппаратура для воспроизведения единицы давления в области 10^{-3} - 10^{-6} Н/м² / Кузьмин Валерий Васильевич; дис. ... канд. техн. наук : 05.04.06 : ДК70-5/745. – Ленинград, 1970.
9. Кузьмин, В. В. Образцовая манометрическая установка с областью измерения 10^{-4} - 10^{-7} мм рт.ст. / В. В. Кузьмин, В. А. Рыжков // Уникальные приборы. 1973. – № 13. – С. 59–64.
10. Кузьмин, В. В. Аппаратура для определения метрологических характеристик и поверки вакуумметров / В. В. Кузьмин, В. Х. Набиулин // Химическое и нефтяное машиностроение. 1979. – № 2. – С. 34–35.
11. Poulter, K. F. An apparatus for calibrating vacuum gauges in the UHV region / K. F. Poulter // J.Phys.E.: Sci.Instr.1974. – Vol.7, № 1. – P. 39–44.
12. Кузьмин, В. В. Градуировка абсолютным методом панорамного анализатора парциальных давлений / В. В. Кузьмин, Е. К. Фролов // Вопросы атомной науки и техники. 1973. Сер. Физ. и техн. высок. вакуум, Вып.1. – С.40.

13. Ерюхин, А.В. Точность воспроизведения единицы давления в области высокого и сверхвысокого вакуума абсолютным методом редукции давления / А. В. Ерюхин, В. В. Кузьмин // Измерит. техника, 1970. – № 5. – С.41–44.
14. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений абсолютного давления за пределами от 10^{-8} до 10^3 Па: ГОСТ 8.107-74. Официальное издание. – Москва: Изд-во стандартов, 1974. – 7 с.
15. Бушин С.А., Нестеров С.Б. Теоретические и экспериментальные исследования молекулярного (атомного) обмена на установке измерения и анализа остаточной газовой среды УИД-2// XXVII научно-технической конференции "Вакуумная техника и технологии - 2020", г. Санкт-Петербург, 2020. - с. 68.
16. Пипко, А. И. Конструирование и расчет вакуумных систем / А. И. Пипко, В. Я. Пенчко, Е. А. Плясковский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1979. – 509 с.
17. Jamison, W.E. Introduction to tribology / W. E. Jamison // J. Vac. Sci. and Technol., 1976. – Vol.13, №1. – P.76–81.
18. Gorodetsky, I.G. Mass-spectrometric observation of gas evolution in some devices for transmission of rotational motion into a vacuum / I. G. Gorodetsky, V. E. Skurat // Vacuum, 1975. – Vol.25, № 9-10. – P.427–430.
19. Бушин, С. А. К расчету о пропускной способности щелевого канала штенгеля ЭВП / С. А. Бушин // XX Юбилейная научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» : сб. док-ов. – Москва : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – С.66–78
20. Кузьмин, В. В. Образцовая манометрическая установка с областью измерений $10^{-4} \div 10^{-7}$ мм рт. ст. / В. В. Кузьмин, В. А. Рыжов // Уникальные приборы, 1973. – № 13. – С. 59–63.
21. Патент № 2164018 на изобретение РФ, МПК G 01 N 1/22. Устройство вскрытия электровакуумных приборов / С.А. Бушин, В.М. Папко. Заявка 97110409/12; Заявл.19.06.1997; Оpubл. 10.03.2001, Бюл. №7.
22. Будников, С. Ф. Динамика вакуумной откачки как совокупность переходных процессов / С. Ф. Будников : сб. науч. труд. Саратов, политехнический ин-т, 1975. – Вып. 76. – С.12–17.
23. Кузьмин, В. В. Градуировка манометров в области высокого и сверхвысокого вакуума: сб. «Науч. приборы», Москва.1977. – № 13. – С.15–18.