

СЕКЦИЯ 2. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Источники погрешностей при измерениях степени негерметичности на установке УФКГ

С.А. Бушин, С.С. Галкин

Москва, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л.Духова», ул.Суцьевская, д. 22, e-mail:vniiia4@vniia.ru

В работе представлены результаты экспериментальных работ по выявлению источников погрешностей, связанных, в частности с эффектом памяти по рабочему (пробному) газу на поверхностях элементов вакуумной системы, влияющих на точностные показатели оценки степени негерметичности у миниатюрных разрядников.

Sources of errors in measurements of the leakage degree at the installation of the final tightness check. S.A. Bushin, S.S.Galkin. The paper presents the results of experimental work to identify sources of errors associated with the effect of memory for working (test) gas on the surfaces of the vacuum system elements, affecting the accuracy of the evaluation of the leakage degree in miniature arresters.

Многообразие номенклатуры выпускаемых электровакуумных приборов (ЭВП), в том числе газонаполненных, обуславливает необходимость в решении задач, связанных с контролем сравнительно большого количества параметров, определяющих их работоспособность. Одной из таких задач в процессе изготовления приборов является проведение масс-спектрометрических исследований при контроле герметичности. Это особенно важно для приборов специального назначения, к которым предъявляются достаточно высокие требования по вакуумной плотности и точности оценок показателя негерметичности. Наложение чрезвычайно жестких требований вызвано необходимостью выпуска продукции высокого качества и степени надежности. При финишном контроле герметичности, проводимом на опытном образце масс-спектрометрической установки УФКГ [1] для газонаполненных металлокерамических разрядников, выпускаемых во ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, отличающихся своей миниатюрностью и сравнительно малыми вместимостями, особенно важное значение имеет точность измерений и достоверность получаемых результатов, связанные напрямую с разработанной методикой проведения данных исследований. Методика, в основе которой лежит метод неразрушающего контроля проникающими веществами по ГОСТ 18353, применяемый совместно со способом накопления включает определенную последовательность этапов.

Первым этапом при контроле герметичности является подготовка объекта к испытаниям. При этом прибор заключается в технологическую оправку (ложемент) в виде цанги и помещается в специальный объем-приемник известной величины – камеру накопления. Полость камеры и прибор подвергаются откачке до давления заданного значения с помощью комбинированных высоковакуумных откачных средств. На втором этапе с определенной экспозицией производится накопление порции рабочего газа-неона (при наличии течи) в объеме камеры. По прошествии заданного интервала времени, в случае группового анализа в режиме "экспресс-анализ", синхронно открываются управляемые запорно-регулируемые элементы, ограничивающие вместимости камер, и одновременно происходит перепуск (экспансия) накопленных газовых порций в измерительный объем с размещенными датчиками газоанализатора и широкодиапазонного вакуумметра, где фиксируется приращение аплитуд ионного тока на соответствующих массовых числах с регистрацией общего давления. Количество газа, накапливаемое за 30 мин в объеме $1,28 \text{ см}^3 \pm 0,043 \text{ см}^3$ (свободный объем

камеры накопления с прибором) при значении потока утечки, равного заданной норме герметичности, характеризуется средним значением давления $1,7 \cdot 10^{-4}$ Па, что соответствует $5,77 \cdot 10^{10}$ молекул. Используя масс-спектрометрические средства (QMG 220 PrismaPlus) с источником ионов с электронным ударом, производится измерение содержания неона в накопленной пробе, характеризуемого однозарядным ионом $^{20}\text{Ne}^+$ (основная линия в масс-спектре рабочего газа), в течение 90 с. На данном временном отрезке производится около 163 ± 2 записей отсчета пика на 20 М/е, а также интенсивностей линий его изотопов $^{21}\text{Ne}^+$, $^{22}\text{Ne}^+$ совместно с пиком двухзарядного иона $^{10}\text{Ne}^{++}$. Третий этап включает повторение масс-спектрометрических измерений накопленных порций с одинаковыми экспозициями, но в уже с раздельным перепуском. Не вдаваясь в детальное описание методики измерений, поскольку более подробно основные ее положения изложены в работах [2,3], следует отметить, что каждый цикл измерений осуществлялся по схеме: калибровочная (эталонная) проба, фоновая проба, рабочая проба. Четвертый этап согласно методике включает в себя интерпретацию обработанных результатов измерений. При наличии утечки $>1,0 \cdot 10^{-10}$ Па·м³/с запускается программный проект по оценке так называемых "больших" течей с использованием корреляционно-регрессионного анализа (см. ниже). Пятый этап является подготовительным и включает опрессовку рабочим газом приборов, заложенных в накопительные камеры, с последующим повторением этапов три и четыре. Здесь надо отметить, что данный этап является методическим приёмом, применяемым при наличии течей в газонаполненных приборах, находившихся сравнительно долгое время на вылежке, особенно для приборов имеющих сравнительно большие утечки. Процедура опрессовки вызвана необходимостью восстановления начального уровня давления рабочего газа в объёмах внутренних полостей приборов к моменту их отпайки (завершения диффузионной сварки) и снятия с вакуумного поста, для повышения точности измерений показателя степени негерметичности. В случае с вакуумными разрядниками опрессовка неоном (используемым в качестве пробного газа) является обязательной процедурой, при этом для всех типов приборов устанавливаемое давление в течение заданного временного интервала не превышало значения в 1 атм, чтобы не исказить результаты контроля.

Каждому из обозначенных этапов соответствуют свои "индивидуальные" погрешности, для обнаружения которых рассматриваются разнообразные возможные источники возникновения (существования) отклонений с введением некоторых изменений в условия и процедуры испытаний. В результатах измерений могут содержаться погрешности, обусловленные, например, как самой измеряемой величиной, так и методикой выполнения экспериментов. В этой связи наиболее подробно следует остановиться на результатах измерений по определению содержания неона после проведения вышеотмеченного пятого этапа. Интерес вызывает не то количество газа, которое он занимает в объёме свободной полости, а то количественное содержание, которое характеризует его присутствие на поверхностях оболочек приборов и стенок вакуумных объёмов за счет адсорбционных и других побочных явлений. Такие данные необходимы для сведения методических погрешностей к минимальным значениям, что ведет к обеспечению точности и правильности измерений, отражающих, как известно, близость результатов к истинному их значению и к нулю систематических ошибок измеряемой величины, соответственно.

Для исследований были подобраны разрядники из числа технологического отхода, в конструктивном исполнении со штенгелем и без него (вакуумные разрядники), изготовленные с неодинаковыми условиями ведения техмаршрута и в разное время. Из них было сформировано несколько выборок, приблизительно одинаковых по количеству, но с разными видами дефектов: в группы входили приборы с однотипными видами брака¹. Оболочки разрядников двух групп (со штенгелем и без) были подвергнуты технологической процедуре ультразвуковой очистки. Стоит отметить, что основным преимуществом такого вида обработки является возможность качественной очистки контролируемой поверхности от разнообразных

¹ Бр.С – вид дефекта, относится к параметру несоответствия по емкости, Бр.Р_{ог} – брак по остаточному давлению, Бр.Q_н – дефект по давлению от натекания.

загрязнений. Причём в результате воздействия ультразвуковых колебаний на поверхность вакуумноплотной керамики возникает звукокапиллярный эффект (капиллярной полости), при котором увеличивается глубина проникновения рабочих водных растворов в тупиковые капиллярные каналы. С одной стороны, достигается уменьшение наличия различного рода загрязнений, с другой стороны, значительно изменяется физическая поверхность стохастической структуры наружной оболочки за счёт "открытия" пор. При этом повышается концентрация молекул (атомов) на границе раздела сред при взаимодействии с внешней атмосферой: на поверхности взаимодействия частиц не уравновешены, поэтому поверхность твердого тела притягивает молекулы из соседней газовой фазы.

Одним из критериев достоверности результатов может служить статистическая обработка экспериментальных данных с оценкой возможных величин погрешностей [4]. Предположительно, можно считать, что содержание неона на поверхностях приборов и вакуумных стенок объёмов камер накопления описывается нормальным распределением со средними выборочными значениями и стандартным отклонением σ . В процессе измерений непосредственно определялась концентрация молекул по отношению к отдельному прибору при различных экспозициях выдержки пребывания прибора (группы) в опрессованном состоянии. Для сравнения оценивались как дисперсия эталонной порции (камера в конструктивном исполнении с имитатором прибора из нержавеющей стали при наличии разрезной цанги совместно с вытеснителем объёма), так и фоновая проба (прибор без опрессовки неоном находится в объёме камеры, зажатый в цанговом патроне), а также рабочая проба (навеска) – прибор в цанге с вытеснителем объёма после проведения опрессовки в среде неона. Для статистического анализа использовались односторонний и двухсторонний критерии Фишера с вероятностью ошибочного отклонения 0,05 (5 % уровень значимости), а также критерий Кохрана [5]. Как показали результаты, дисперсии обработанных и необработанных ультразвуком поверхностей отличаются значительно и каждое исследование приборов, различаемых только по технологии обработки поверхностей, характеризуется своей величиной содержания неона. Случайные вариации степени откачки вакуумной системы и её сорбционной памяти на результаты измерений накладывают существенный "отпечаток", т.е. дисперсии определяются не погрешностями измерительной аппаратуры, а степенью откачки вакуумной системы и её памятью по рабочему газу. При этом, начиная с экспозиции более 15-17 ч пребывания в среде неона при опрессовке, дальнейшее увеличение её продолжительности практически не сказывается на показателях присутствия рабочего (пробного) газа на поверхности оболочек разрядников.

Количественная оценка содержания неона построена на основе геометрических размеров и процедуры измерения концентрации неона, "высвобождаемого" с контролируемой оболочки. При этом методика определения количества выделяемого газа-неона, может вносить некоторую погрешность в результаты анализов. При оценке газосодержания неона нужно учитывать, что его выделение с поверхности(ей) начинается с того момента, когда давление в объёме с размещённым в камере накопления прибором начинает нелинейно падать в результате проведения откачки. Это обстоятельство необходимо брать в расчёт при определении исходного(искомого) значения общей составляющей парциального давления неона.

Согласно методике определения концентрации неона в свободном объёме, по достижению заданного давления перекрывают объём замкнутой оболочки с прибором и в течение заданного времени создают порцию контролируемой среды, содержащей компонент рабочего (пробного) газа, с её последующим перепусканием в объединённый объём. Последний состоит из замкнутой оболочки с прибором и вакуумного коллектора с масс-спектрометром. Данные объёмы имеют селективную откачку: откачиваются все газы, кроме идентифицируемого. Производят соответствующие измерения концентрации неона на основе полученных масс-спектрограмм. Далее последовательно проводят серию повторяемых измерений концентрации с заданной временной экспозицией, производя между измерениями откачку объёма с масс-спектрометром (датчиком масс-спектрометра), с последующей математической обработкой результатов и установлением зависимости показателя степени негерметичности во времени ($Q = F(t) = A \cdot \exp^{-Bt}$), с последующей экстраполяцией полученной зависимости на определённый экспозиционный промежуток, начало которого отнесено на нулевой момент ($t=0$) – момент после опрессовки рабочим (пробным) газа, по полученному

значению которого судят о количественном содержании неона [6]. Для получения достоверных результатов при измерениях $^{20}\text{Ne}^+$ необходимо, чтобы разница между точечным значением измеряемого количества Q_i выделенного неона от его генерального среднего \bar{Q} не превышала $2 \cdot \bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}$ – генеральное среднее квадратическое отклонение) при назначенной доверительной вероятности 0,95 (95 %).

Количества выделяемого $^{20}\text{Ne}^+$ у приборов (герметичных) могут отличаться на несколько порядков, что обусловлено неравномерным распределением неона по поверхностям. Здесь следует отметить, что равномерность распределения неона в отобранной пробе зависит от величины пористости анализируемой оболочки и её физической поверхности. Очищенная ультразвуком в процессе производства внешняя поверхность прибора имеет гораздо более разветвленную физическую поверхность, в отличие от её геометрической площади, при этом велика вероятность наличия на ней микрополостей и раковин, которые могут являться источниками достаточно интенсивного поступления в вакуумный объём рабочего газа после проведения опрессовки. К тому же наличие у прибора со штенгелем на хвостовике капли компаунда, имеющей воздушные микропузырьки с их локальным распространением по объёму пластификата, частично высвобождаемые при вакуумировании и заполняемые при опрессовке неона, также может серьёзным образом исказить получаемые результаты.

Точечные оценки значений выделяемых потоков через 10...15 мин после проведенной опрессовки показали, что уровень интегрального потока с поверхности достигает значений приблизительно до $(1...3) \cdot 10^{-9}$ Па·м³/с. Спустя 5...8 часов после высоковакуумной откачки, уровень потока "спадает" до значений приблизительно $(0,5...2) \cdot 10^{-10}$ Па·м³/с. Возврат к начальным фоновым показателям (до опрессовки), установленным на значении не более $1,2 \cdot 10^{-12}$ Па·м³/с (по неону), достигается в течение приблизительно от 1,5 до 3-х суток с общим временем откачки за одну рабочую смену 3...5 ч.

Следует отметить, что после проведения опрессовки и эвакуации остатков рабочего (пробного) газа, поток поверхностного натекания в камерах увеличивался в результате сорбционно-десорбционных процессов, протекающих как на внешней поверхности оболочки изделия, так и на поверхностях конструктивных элементов камер накопления.

На основании вышеизложенного можно заключить, что результаты проверки приборов на герметичность могут содержать погрешности, искажающие результаты измерений в целом. Поэтому, как это и предусмотрено методикой финишного контроля герметичности, данная процедура должна производиться сразу же после наполнения прибора неона без проведения каких-либо сопроводительных операций, включая заливку хвостовика штенгеля прибора компаундом, т.е. сразу же после снятия его с вакуумного поста. В отношении вакуумных разрядников, подвергаемых опрессовке пробным газом, необходимо отметить, что результаты контроля могут считаться достоверными только после достижения соответствующих фоновых показателей у контрольного (герметичного) прибора, используемого, согласно разработанной методике, в качестве меры фонового содержания пробного газа, проходящего совместно с контролируруемыми приборами весь исследовательский цикл.

Литература

1. С.А. Бушин, С.С. Галкин. Результаты опытной эксплуатации вакуумной автоматизированной установки контроля герметичности разрядников //Вакуумная техника и технология, т. 23 (вып.1), Санкт-Петербург, 2014. - с.39-41.
2. С.А. Бушин. Методика высокочувствительного контроля герметичности газонаполненных разрядников по истечению неона //Вакуумная техника и технология, Санкт-Петербург, 2012. - т.22, № 2. - с.98, 99.
3. С.А. Бушин. Неразрушающий контроль герметичности малогабаритных газонаполненных приборов //Сборник трудов XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Москва, 2017. - с.275-288.
4. Н.Н. Аруев, Б.С. Болтенков. Погрешности измерения изотопов гелия//ЖТФ, №12, т.82, вып.8, - с.134-139.

5. Е.И. Пустыльник. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. с.288.
6. Патент на изобретение РФ, МКИ G 01 M 3/02, 3/26. Способ контроля герметичности изделий /С.А. Бушин, В.В. Багрова. ФГУП ВНИИА.- №2589941; Заявл. 05.03.15; Оpubл. 10.07.16. Бюл.19.

Исследование платформы для активной виброизоляции вакуумного оборудования

В.П. Михайлов, Д.К. Товмаченко, Тун Лин Аунг, А.А. Копылов
Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская, д. 5
e-mail: mikhailov@bmstu.ru

В работе приведены результаты экспериментальных исследований платформы для активной виброизоляции вакуумного оборудования, в которой используются активные демпферы на основе магнитоэологических (МР) эластомеров. Платформа может быть также использована как привод точного позиционирования. Свойства МР эластомера используются для регулирования параметров точности и динамики активных демпферов. Для решения этих задач была экспериментально исследована работа активных демпферов при резонансе в пассивном и полупассивном режимах.

Research of platform for active vibration isolation of vacuum equipment. V.P.Mikhailov, D.K.Tovmachenko, Tun Lin Aung, A.A.Kopylov. The paper presents the results of experimental research of platform for active vibration control of vacuum equipment, which uses active dampers based on magnetorheological (MR) elastomers. The platform can be used also as actuator for precise positioning. The properties of the MR elastomer are used to control precision and dynamics parameters of the active damper. The active damper at resonance in passive and semi-active modes was experimentally investigated.

Для современного нанотехнологического и исследовательского оборудования, в том числе вакуумного (установок микро- и нанолитографии, оборудования нанолокальной ионной и электронной обработки, сканирующих электронных микроскопов, сканирующих зондовых микроскопов и др.), требуется защита от неблагоприятных вибрационных воздействий [1-4]. Колебания высокой частоты успешно изолируются при помощи систем пассивной виброзащиты. Гораздо более опасными являются вызванные резонансными явлениями низкочастотные колебания, для устранения которых используются системы активной виброзащиты.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований активных демпферов на основе магнитоэологических эластомеров, которые используются в платформе для активной виброизоляции [5-7]. Платформа содержит нижнюю и верхнюю плиты, четыре активных демпфера и четыре узла упругой подвески с массовым корректором, расположенных равномерно по периметру платформы (рис. 1). Узел упругой подвески представляет собой горизонтальный маятник с регулируемой несущей пружиной и массовым корректором. Масса маятника представляет собой эквивалент одной четверти массы виброизолируемого объекта. Узлы упругой подвески позволяют настраивать платформу для активной виброизоляции на требуемую массу объекта при помощи регулируемой несущей пружины и резонансную частоту при помощи массового корректора. Активный демпфер содержит мембрану из МР эластомера с подвижным жестким центром, корпус, электромагнитную катушку, сердечник, основание. Сердечник образует с жестким центром воздушный зазор. Демпфер работает следующим образом: при подаче управляющего тока в электромагнитную катушку в электромагнитной системе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране формируется радиальное магнитное