

испытаний на герметичность, с учетом критериев их выбора, даёт возможность формулирования основных методологических подходов и требований к герметичности, ведущих к повышению качества и эффективности контроля.

Литература

1. ГОСТ Р 51780-2001. Неразрушающий контроль. Методы и средства испытаний на герметичность. Порядок и критерии выбора. ГОССТАНДАРТ России. Москва.
2. П.К. Петров. Математико-статистическая обработка и графическое представление результатов педагогических исследований с использованием информационных технологий: учебное пособие. - Ижевск: Изд-во "Удмурский университет", 2013, - с.179.
3. О.В. Стукач. Программный комплекс STATISTICA в решении задач управления качеством: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011, - с.163.
4. Е.В. Сидоренко. Математические методы обработки в психологии. - Санкт-Петербург: ООО "Речь", 2002, - с.350.
5. Математическая статистика для психологов: Учебник /О.Ю. Ермолаев, - 2-ое изд. испр. - М.:Московский психолого-социальный институт: Флинта, 2003. - с. 336.
6. Дюран Б. и Оделл П. Кластерный анализ. Пер. с англ. Е.З. Демиденко. Под ред. Б.Я. Боярского. М.: Статистика, 1977. - с.128.
7. В. Боровиков. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов, - 2-ое изд., - СПб.:Питер, 2003. – с.688.
8. А.П. Кулаичев. Методы и средства анализа данных в среде Windows STADIA. – 4-ое изд., - М.: Информатика и компьютеры, 2002. – с.341.

Вакуумметрическая редуцирующая установка для государственного первичного специального эталона единицы абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^3$ Па

Д.М. Фомин, А.А. Чернышенко

Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Московский пр., д.19

E-mail: [vacuum@vniim.ru](mailto:vacuuum@vniim.ru)

Представлены результаты работ по созданию и исследованию вакуумметрической редуцирующей эталонной установки (ВРЭУ), которая вошла в состав модернизированного эталона ГЭТ 49-20XX, тем самым существенно расширив диапазон передачи единицы давления от эталона

Vacuummetric reduction installation for state primary special unit of absolute pressure in the range of $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^3$ Pa. D.M.Fomin, A.A. Chernyshenko. The results of works on creation and investigations of vacuum reduction standard installation (VREU) are presented. This installation has become a part of the upgraded standard GET 49-20XX, thereby the range of the pressure transmission unit is significantly extended.

В настоящее время в РФ происходит существенное увеличение объема научных исследований и высокотехнологичных производств. В большинстве случаев, в подобных проектах, необходимо получение, а также достоверное измерение высокого и сверхвысокого вакуума. В таблице 1 представлены основные сферы деятельности производственных и научных предприятий в которых необходимо получение и измерение высокого и сверхвысокого вакуума [1].

Таблица 1. Востребованность высокого и сверхвысокого вакуума производственными и научными предприятиями

Сфера деятельности предприятия	Диапазон необходимого давления, Па
Электротехника	$10^{-7} - 10^{-1}$
Полупроводниковые технологии	$10^{-5} - 10^2$
Медицина и медицинские технологии	$10^{-7} - 10^4$
Биотехнологии	$10^{-8} - 10^5$
Симуляция космического пространства	$10^{-5} - 10^{-3}$
Авиакосмические технологии	$10^{-6} - 10^{-3}$
Физика элементарных частиц	$10^{-9} - 10^{-6}$
Процессы термоядерной реакции	$10^{-6} - 10^{-1}$
Масс-спектрометрия	$10^{-8} - 10^{-3}$
Метрология	$10^{-8} - 10^{-1}$
Исследование низких температур	$10^{-6} - 10^{-1}$
Технологии выращивания тонких пленок	$10^{-6} - 1$
Технологии выращивания кристаллов	$10^{-4} - 10^{-1}$
Технологии молекулярно-пучковой и молекулярно-лучевой эпитаксии	$10^{-10} - 10^{-8}$

В РФ существовал государственный первичный специальный эталон ГЭТ 49-80 в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^3$ Па. Для передачи размера единицы давления, в соответствии с поверочной схемой по ГОСТ 8.107 -81 в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^3$ Па эталонам и рабочим средствам измерений применялись вторичные эталоны – вакуумметрические установки 1-го разряда, которые имеют достаточно низкие точностные характеристики. Но в связи с тем, что в последнее десятилетие на рынке появилось большое количество эталонных вакуумметров с погрешностью до 10% возникли сложности с метрологическим обеспечением существующими эталонными средствами. Для расширения диапазона передачи и измерений Государственного первичного специального эталона, а также повышения точности возникла необходимость создания установки, которая будет входить в состав эталона.

По данным ВIRM на 2016 год 10 стран мира имеют национальные первичные эталоны для измерения высокого и сверхвысокого вакуума. В таблице 2 приведены измерительные возможности национальных первичных эталонов высокого и сверхвысокого вакуума различных стран [2].

Таблица 2. Измерительные возможности национальных эталонов высокого и сверхвысокого вакуума различных стран

Страна (метрологический институт)	Диапазон, Па	Расширенная неопределенность ($k=2$), %
Германия (PTB)	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-2}$	3 – 0,66
США (NIST)	$1 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$	1,7 – 1,22
	$3 \cdot 10^{-6} - 9 \cdot 10^{-5}$	1,15 – 0,5
	$9 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$	0,5 – 0,42
	$1 \cdot 10^{-4} - 1$	0,3
Франция (LNE)	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$	5 – 1,5
Япония (NMIJ)	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	0,91
	$1 \cdot 10^{-3} - 10$	0,38 – 0,32
Корея (KRISS)	$5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-3}$	1 – 0,6
Турция (UME)	$1 \cdot 10^{-4} - 1$	8,3 – 2,4
Италия (INRIM)	$1 \cdot 10^{-6} - 9 \cdot 10^{-4}$	5
	$9 \cdot 10^{-4} - 9 \cdot 10^{-2}$	3 – 1,5
Индия (NPLI)	$3 \cdot 10^{-6} - 0,1$	2
Чехия (CMI)	$1 \cdot 10^{-4} - 1$	1,5
Мексика (CENAM)	$1 \cdot 10^{-4} - 1$	0,9

В 80-х годах XX века во ВНИИМ была разработана и создана вакуумметрическая установка ВОУ-1, реализующая метод редукции давления. Однако данная установка морально и технически устарела, а также имела ряд существенных недостатков, не позволяющих получить необходимые точности измерений.

В результате анализа первичных эталонов других стран, а также не основе предшествующего опыта было принято решение о создании вакуумметрической редукционной эталонной установки (ВРЭУ) с диапазоном измерений $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-2}$ Па и включение её в состав модернизируемого эталона ГЭТ 49-2016.

В основе установки лежит метод редукции, основанный на понижении (редукции) давления, посредством которого осуществляется передача размера единицы давления из области низкого и среднего вакуума в область высокого и сверхвысокого вакуума [3]. На рис. 1 представлена общая схема такой установки.

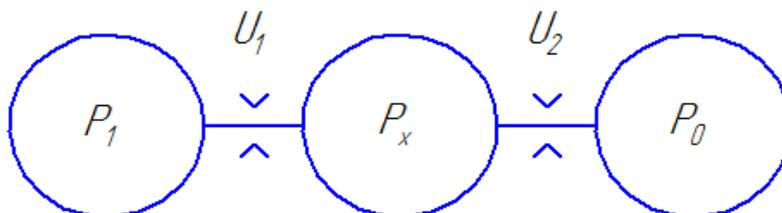


Рис. 1. Общая схема редукционной установки.

Уравнение измерений в общем виде:

$$P_x = \frac{U_1}{U_2} \cdot P_1 = k \cdot P_1, \quad (1)$$

где P_x - воспроизводимое давление в камере измерительной; U_1 и U_2 – проводимости малой и большой диафрагмы соответственно; P_1 – давление измеренное в камере помощью мембранно-емкостных преобразователей компенсационного типа (МЕРК) входящих в состав эталона ГЭТ 49-2016; k – коэффициент редукции.



Рис. 2. Общий вид Вакуумметрической редукционной эталонной установки (ВРЭУ).

Установка представляет собой три последовательно соединенные камеры (камера исходного давления, камера измерительная, камера сверхвысоковакуумная) через которые протекает процесс непрерывного течения разряженного газа. Камеры изготовлены из нержавеющей стали с применением электролитической полировки, оснащены современными откачными средствами. Также для установки разработана система прогрева и терморегуляции для уменьшения эффектов сорбции и десорбции. Между камерами установлены диафрагмы большой и малой проводимости, диафрагмы малой проводимости помещены в специальный узел крепления, позволяющий менять диафрагмы без разбора вакуумной системы, тем самым

варьировать проводимостями и коэффициентами редукции. На рис. 2 представлен общий вид установки.

При учете процессов газовой выделению, а также давления в сверхвысоковакуумной камере, уравнение измерений принимает вид:

$$P_x = P_0 + k\Delta P + \frac{q_{\text{пл}}}{2}, \quad (2)$$

где P_0 – давление в камере сверхвысоковакуумной; $\frac{q_{\text{пл}}}{2}$ – газовыделение с внутренней поверхности вакуумной системы.

Величина коэффициента редукции определялась экспериментально на основании выражения:

$$k = \frac{P_x - P_0 - \frac{q_{\text{пл}}}{2}}{\Delta P}, \quad (3)$$

причем величина давления P_x , устанавливаемая в камере измерительной и измеряемая высокоточным вязкостным вакуумметром с вращающимся шариком, выбиралась таким образом, чтобы $\frac{q_{\text{пл}}}{2} \ll P_x$ и $P_0 \leq 0,1P_x$. На основании этого выражение (3) принимает упрощенный вид:

$$k = \frac{P_x}{\Delta P}, \quad (4)$$

В результате проведенных исследований были определены метрологические характеристики установки, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. Метрологические характеристики ВРЭУ

Наименование характеристики	Значение
Диапазон значений воспроизводимого давления, Па	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$
Число независимых измерений	10
Среднее квадратическое отклонение результата измерений, S_o , не более	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Неисключенная систематическая погрешность, θ_o , не более	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Относительная стандартная неопределенность по типу А	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Относительная стандартная неопределенность по типу В	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Относительная суммарная неопределенность	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Относительная расширенная неопределенность U_{po} ($k=2$)	$4,8 \cdot 10^{-2}$

Стоит отметить, что основной вклад в неопределенность измерений вносят эталонные средства измерений давления, используемые при определении коэффициента редукции.

В результате работ была создана вакуумметрическая редукционная эталонная установка (ВРЭУ), которая вошла в состав Государственного первичного специального эталона единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^3$ Па ГЭТ 49-2016, тем самым расширив его диапазон измерений до уровня мировых первичных эталонов. Разработан проект поверочной схемы для передачи размера единицы давления эталонам и рабочим средствам измерений, в настоящее время поверочная схема проходит процесс утверждения в Росстандарте.

В заключении следует отметить, что в дальнейшем для совершенствования эталонной базы в области низкого абсолютного давления предполагается провести следующие мероприятия.

1. Реализация экспансионного метода измерений давлений, путем присоединений к камерам реципиентов известных объемов.
2. Реализация метода потоков на основе механического потокомера.
3. Внедрение квадрупольного масс-спектрометра для изучения состава остаточных газов и передачи размера единицы новейшим средствам измерений давлений, таким как масс-спектрометры различных типов.

Данные мероприятия позволят в будущем повысить точность эталона, а также исключить возможные ошибки за счет реализации нескольких методов измерений одновременно.

Литература

1. Jousten K. Handbook of Vacuum Technology, Second Edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2016. 1026 pp.
2. The VIPM key comparison data base [Электронный ресурс] // bipm.org: [сайт]. [2002]. URL: <http://kcdb.bipm.org/> (дата обращения: 11.Декабрь.2016).
3. Кузьмин В.В., Аляев В.А. Техника измерения вакуума. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. 300 с.

Применение акустически стимулированной термодесорбции в производстве электровакуумных СВЧ приборов

*И.Ф.Ханбеков, И.П.Ли, В.С.Петров, *В.П.Михайлов*
Москва, ОАО Плутон, ул. Нижняя сыромятническая 11,
E-mail: i.khanbekov@pluton.msk.ru
*МГТУ им. Н.Э.Баумана, ул. 2-я Бауманская 5.

В статье описываются недостатки действующей технологии обезгаживания электровакуумных приборов и перспективы использования альтернативных видов десорбции в производстве. Описывается метод ускоренного перевода газовых компонентов, адсорбированных на внутренних поверхностях электровакуумного СВЧ прибора и растворенных в толще металлических и неметаллических деталей изделия в свободный газ за счет одновременного термического и акустического воздействия на корпус прибора. Приведены сравнения скорости газоотделения при различных технологиях откачки электровакуумных приборов. Дано физическое объяснение механизма термоакустической десорбции газовых компонентов в вакууме.

Implication of acoustically stimulated thermal desorption in production of electro-vacuum microwave devices. I.Khanbbekov, I.Li, V.Petrov, V.Mikhaylov. Shortcomings of the operating technology of electro-vacuum devices degassing and the prospect of alternative types of desorption use for production are described. The degassing of these elements occurs due to thermal and acoustic factors. Comparisons of gas desorption speed at various technologies of pumping of electro-vacuum devices are given. The physical explanation of the thermo-acoustic desorption of gas components in vacuum is offered.

Откачка электровакуумных приборов СВЧ диапазона (далее ЭВП СВЧ) наиболее длительный, энергозатратный и ответственный технологический процесс, в ходе которого формируется работоспособность всего изделия. В настоящее время откачке ЭВП СВЧ уделяется недостаточное внимание, зачастую, технология не менялась с момента создания, несмотря на то, что за последние 30-40 лет произошел ощутимый прогресс в области вакуумной техники.

Откачка ЭВП СВЧ происходит по классической схеме, с использованием ступенчатого нагрева корпуса изделия и изотермической выдержки при температуре около 550°C. Длительность такого процесса может достигать нескольких десятков часов. Очевидно, что ускорить откачку электровакуумных приборов, придерживаясь классической технологии невозможно ввиду того, что возможности термодесорбции в данном случае исчерпаны, и дальнейшее повышение температуры приведет к повреждению или разрушению элементов ЭВП СВЧ. Использование более мощных насосов увеличит габариты действующих установок,