

Модернизированный вторичный эталон единицы низкого абсолютного давления ВЭ-13—13

В. Н. ГОРОБЕЙ¹, А. В. ТАЛАЛАЙ², А. А. ЧЕРНЫШЕНКО¹, Ю. Т. ВИКТОРКО²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, v.n.gorobey@vniim.ru

² Главный научный метрологический центр Минобороны РФ, Мытищи, Россия, e-mail: vut70@yandex.ru

Рассмотрены результаты разработки нового вторичного эталона для области низких абсолютных давлений. Создана система поддержания давления с использованием современных технологий при изготовлении измерительной камеры. По своим метрологическим и техническим характеристикам эталон соответствует мировому уровню.

Ключевые слова: абсолютное давление, вторичный эталон.

The results of developing a new secondary standard for low absolute pressures are considered. The new standard includes the best modern vacuum meters from national and foreign manufacturers. The system for of pressure maintenance was created using the modern technologies for measuring chamber manufacture. The new secondary standard meets all international requirements for metrological and technical characteristics.

Key words: absolute pressure, secondary standard.

В 2014 г. введен в эксплуатацию комплекс модернизированных вторичных эталонов единиц статического давления ВЭ-13—13, ВЭ-34—13, ВЭ-37—13, разработанных во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и являющихся резервом государственных первичных эталонов ГЭТ 49—80, ГЭТ 23—2010 и ГЭТ 101—2011, соответственно. В статье рассмотрены основные результаты модернизации вторичного эталона единицы абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^3$ Па с учетом опыта работ в этой области [1].

При подготовке технического задания к эталону ВЭ-13—13 было учтено следующее:

получение единицы абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^3$ Па от государственного первичного специального эталона ГЭТ 49—80 единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^3$ Па;

хранение, воспроизведение и передача единицы абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^3$ Па эталонам 1-го и 2-го разрядов на месте эксплуатации эталона;

пределы неисключенной систематической погрешности (НСП), выраженные в относительной форме, не более $0,5 \cdot 10^{-2}$;

среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений, выраженное в относительной форме, не более: $2,0 \cdot 10^{-2}$ в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ Па и $0,5 \cdot 10^{-2}$ в диапазоне $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^3$ Па.

Для выбора эталонных вакуумметров, составивших основу ВЭ-13—13, рассчитали доверительные границы суммарной погрешности в соответствии с [2]:

$$\Delta_{\Sigma} = K_{\Sigma} S_{\Sigma}, \quad (1)$$

где K_{Σ} — коэффициент, определяемый доверительной вероятностью P и отношением случайных погрешностей и НСП,

$$K_{\Sigma} = (\Theta_{\Sigma} + t S_{\bar{X}}) / (S_{\Theta} + S_{\bar{X}});$$

Θ_{Σ} , $S_{\Theta} = \sqrt{\Theta_{\Sigma}^2/3}$ — соответственно граница и СКО суммарной НСП; t — коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности P и эффективному числу степе-

ней свободы; $S_{\bar{X}}$ — СКО результата прямых измерений; S_{Σ} — суммарное СКО воспроизводимой единицы величины, обусловленное воздействием случайных погрешностей и НСП,

$$S_{\Sigma} = \sqrt{2S/X + S_{\Theta}^2}.$$

Для измерений в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ Па заданы $\Theta_{\Sigma} = 0,5 \cdot 10^{-2}$, $S_{\bar{X}} = 2 \cdot 10^{-2}$, $t = 3,25$ при доверительной вероятности $P = 0,99$ и числе наблюдений $n = 10$ [3]. Подставив эти значения в приведенные выше выражения, определим

$$S_{\Theta} = 0,289 \cdot 10^{-2}; S_{\Sigma} = 2 \cdot 10^{-2};$$

$$t' = \frac{\Theta_{\Sigma} + t S_{\bar{X}}}{S_{\Theta} + S_{\bar{X}}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-2} + 3,25 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{0,289 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}} = 3,06;$$

$$\Delta_{\Sigma} = t' S_{\bar{X}} = 3,06 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 6,2 \cdot 10^{-2}.$$

Для измерений в диапазоне 10^{-2} — 10^3 Па заданы $\Theta_{\Sigma} = 0,5 \cdot 10^{-2}$, $S_{\bar{X}} = 0,5 \cdot 10^{-2}$, $t = 3,25$ и найдены

$$S_{\Theta} = 0,289 \cdot 10^{-2}; S_{\Sigma} = 0,58 \cdot 10^{-2}; t' = 2,69; \Delta_{\Sigma} = 0,5 \cdot 10^{-2}.$$

На основе полученных значений доверительных границ суммарной погрешности ВЭ-13—13 с учетом диапазона измерений в его состав вошли: вязкостный SRG-2CE и компрессионный BK1A вакуумметры, два мембранно-емкостных вакуумметра Baratron 690A, которые использовали соответственно в диапазонах 10^{-3} — 1 ; $0,133$ — 133 ; 10 — 10^3 Па. Для увеличения метрологической надежности диапазоны измерений подобраны с возможностью их перекрытия примерно на порядок. На рис. 1 приведена структурная схема ВЭ-13—13.

Вязкостный вакуумметр SRG-2CE состоит из измерительной головки с присоединительным фланцем и электронного блока питания и индикации. Принцип действия этого вакуумметра основан на зависимости вязкости (внутреннего трения) разреженного газа от измеряемого давления. Чувствительным элементом служит металлический шарик, свободно вращающийся в вакууме. Вращение шарика замед-

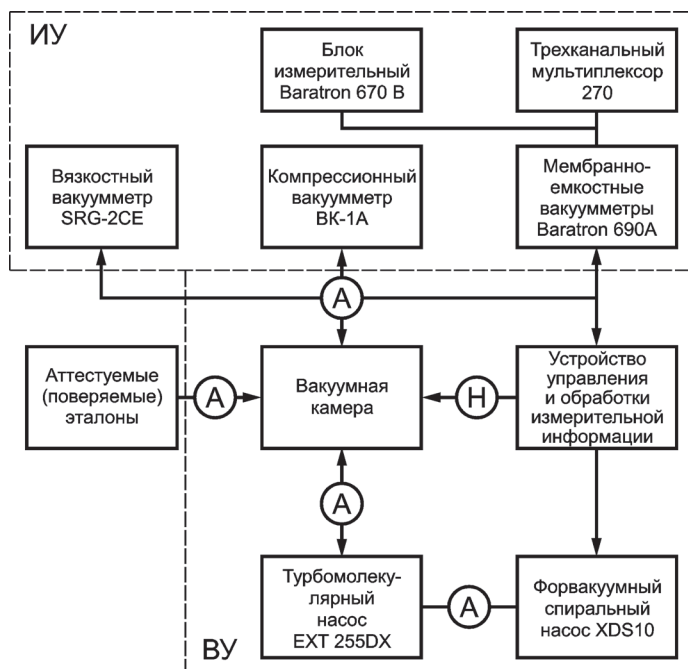


Рис. 1. Структурная схема эталона ВЭ-13—13:

ИУ, ВУ — измерительная и вакуумная установки; А — вакуумная арматура; Н — натекатель

ляется из-за трения о молекулы газа. Шарик помещают во втулку присоединительного фланца измерительной головки, в которой используется магнитная подвеска и осуществляются стабилизация, привод и измерение угловой скорости шарика. Расчет измеряемого абсолютного давления газовой среды и его индикация осуществляются с помощью цифрового электронного блока с возможностью передачи информации по интерфейсу RS-232 на последовательный порт компьютера.

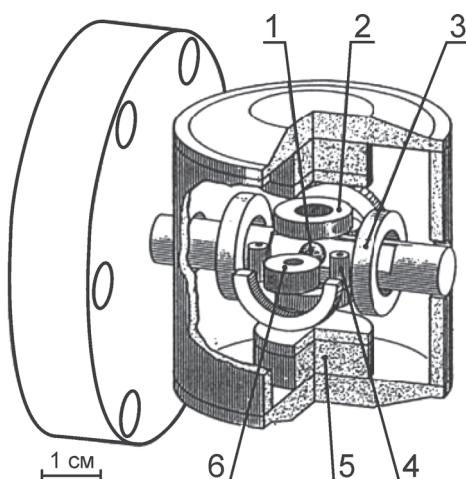


Рис. 2. Измерительная головка вакуумметра SRG-2CE:

1 — металлический шарик; 2 — две встречновключенные катушки; 3 — двухфазный мотор с четырьмя катушками; 4 — четыре катушки, предотвращающие горизонтальное отклонение шарика; 5 — два постоянных магнита; 6 — две последовательно соединенные катушки

На рис. 2 изображена измерительная головка вакуумметра в разрезе. Металлический шарик 1 расположен в измерительном цилиндре (втулке) фланца, два постоянных магнита 5 создают сильное однородное магнитное поле в области измерительного цилиндра. Стабилизация достигается с помощью двух встречновключенных катушек 2, усиливающих верхнее и нижнее поля постоянных магнитов в соответствии с отклонением шарика. Горизонтальные отклонения шарика предотвращают с помощью четырех катушек 4. Шарик приводится в движение двухфазным мотором, состоящим из четырех катушек 3. Сигнал снимается двумя последовательно соединенными катушками 6, установленными напротив друг друга.

В вакуумметре со свободно вращающимся шариком давление определяется методом измерения относительной скорости торможения шарика. Начиная с давления более 1 Па, пропорциональность между давлением и относительным торможением нарушается, поэтому такой вакуумметр целесообразно применять при измерении давления ниже 1 Па.

Компрессионный вакуумметр ВК1А, применяемый для измерения абсолютного давления более 0,1 Па, разработан в ООО «Новоуральский приборный завод». Вакуумметр состоит из измерительного преобразователя и блока измерения; принцип его действия основан на циклическом изменении положения измерительной мембраны вследствие сжатия газа, заключенного в компрессионной камере. Плунжер, жестко связанный с мембраной, при перемещении изменяет распределение магнитных потоков двух измерительных катушек, что приводит к изменению электрических сигналов, поступающих от катушек в блок измерения.

Конструкция преобразователя изображена на рис. 3. Он состоит из измерительного узла и пульсатора (устройства компрессии), встроенных в герметичный корпус. В измерительный узел входят измерительная мембрана 4 с жестко прикрепленным к ее центру плунжером 1 и две измерительные катушки 2, 3, которые вместе с плунжером образуют дифференциальный индуктивный преобразователь перемещения центра мембраны при ее деформации под действием измеряемого давления. Пульсатор состоит из мембраны 6, аналогичной измерительной, и электромагнитного привода, образованного соленоидом 7 с сердечником в виде постоянного магнита 8, жестко закрепленного в центре мембраны. Пространство, заключенное между мембранами, образует компрессионную камеру, сообщаемую с объемом измеряемого давления через канал, перекрываемый клапаном 5.

В измерительном узле задаются необходимые режимы работы вакуумметра и управления преобразователем, а также измеряемое давление преобразуется в аналоговый токовый сигнал и дискретный (цифровой) с отображением на индикаторе.

Мембранно-емкостные вакуумметры Баратрон 690А связаны с электронным блоком питания и индикации Баратрон 670В (см. рис. 1). Чувствительный элемент Баратрона 690А состоит из металлической ячейки, разделенной на две части туго натянутой плоской металлической диафрагмой, по обеим сторонам которой расположены электроды. Электроды с диафрагмой образуют две переменные емкост-

ти, которые включены в плечи измерительного моста. Когда давление по обеим сторонам диафрагмы одинаково, мост уравновешен. Изменение давления в одной из камер деформирует диафрагму, изменяет емкости, равновесие моста нарушается. Возникающий при этом сигнал усиливается и демодулируется в постоянный ток, пропорциональный измеряемому давлению. С опорной стороны мембраны создается разрежение, не превышающее 10^{-5} Па, которое поддерживается в течение длительного времени химическим геттером (газопоглотителем). Для уменьшения влияния изменений температуры на работу этого вакуумметра применена температурная компенсация и термостатирование чувствительного элемента.

Для создания и поддержания вакуума в состав ВЭ-13—13 входит установка, состоящая из вакуумной камеры, форвакуумного спирального насоса XDS10, турбомолекулярного насоса EXT 255 DX, контроллера TIC, релейного блока TIC Relay Box, индикаторного вакуумметра Пирани APG-M, индикаторного ионизационного вакуумметра AIGX, вакуумной арматуры.

Требуемое абсолютное давление создается в герметично изолированном объеме вакуумной камеры. Благодаря сферической форме камеры сведена к минимуму ее газопроницаемость и, как следствие, уменьшен поток десорбции с внутренних стенок. Вакуумная камера имеет следующие порты подключения: шесть симметрично радиально расположенных портов для эталонов и поверяемых приборов, два — для системы откачки и один — для индикационного вакуумметра. Такая конструкция позволяет одновременно поверять несколько средств измерений, не нанося ущерб ресурсу ВЭ-13—13. На внешней стороне камеры имеются приспособления для крепления устройства, предназначенного для нагревания ее стенок, которое можно использовать для достижения более глубокого вакуума [4].

Управление работой вакуумных насосов осуществляется посредством контроллера TIC (BOC EDWARDS) вручную или удаленно с помощью персонального компьютера по специальной программе. Релейный блок функционирует как интерфейс управления между контроллером TIC и форвакуумным насосом, прогревающим ободом турбомолекулярного насоса, форвакуумным клапаном в трубопроводе. Для контроля абсолютного давления в форвакуумной линии предназначен индикаторный вакуумметр Пирани. В вакуумной установке давление ниже $1 \cdot 10^{-2}$ Па контролирует ионизационный вакуумметр AIGX. В качестве вакуумной арматуры в системе создания и поддержания абсолютного давления применяют высоковакуумные запорные клапаны HTC (DN 40 CF), мотыльковый клапан серии 202 компании VAT, прецизионный игольчатый натекаль фирмы Adixen, Германия.

Показания эталонных вакуумметров отображаются как на измерительных блоках вакуумметров, так и на устройстве управления и обработки измерительной информации с помощью специального программного обеспечения, предназначенного для автоматизации управления процессом аттестации (поверки).

Также в состав ВЭ-13—13 входит метеометр МЭС-200А для контроля атмосферного давления, температуры и влажности окружающего воздуха.

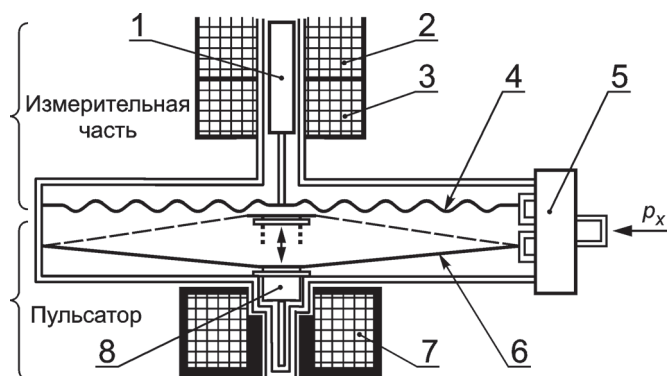


Рис. 3. Конструкция преобразователя компрессионного вакуумметра ВК1А:

1 — плунжер; 2, 3 — измерительные катушки; 4 — измерительная мембрана; 5 — клапан; 6 — мембрана пульсатора; 7 — соленоид; 8 — магнит

В табл. 1 представлены обобщенные данные о метрологических характеристиках эталонных вакуумметров, которые в процессе исследований, проводимых в рамках аттестации по ГЭТ 49—80, обеспечили заданные диапазоны воспроизведения, хранения и передачи единицы низкого абсолютного давления.

Таблица 1

Метрологические характеристики эталонных вакуумметров

Эталонный вакуумметр	Диапазон измерений, Па	Предел допускаемой относительной погрешности, %
Вязкостный с вращающимся шариком SRG-2CE	$5 \cdot 10^{-5}—1,0$ $1,0—10^2$	$\pm (5 \dots 1,3)$ ± 10
Компрессионный ВК1А	$0,133—20,0$ $20,0—133$	$\pm 3^*$ $\pm 1,5$
Мембранно-емкостный Баратрон 690А	$1 \cdot 10^{-1}—10^3$	$\pm (2 \dots 1)$

Примечание: * — предел допускаемой приведенной погрешности.

По результатам первичной аттестации установлено, что диапазон воспроизведения, хранения и передачи единицы абсолютного давления и пределы НСП соответствуют заданным значениям, СКО результата измерений меньше заданных значений в 1,3 раза.

Основные метрологические характеристики ВЭ-13—13 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метрологические характеристики ВЭ-13—13

Характеристика	Значения	
	заданное	действительное (полученное по результатам аттестации)
Диапазон воспроизведения, хранения и передачи единицы абсолютного давления, Па	$1 \cdot 10^{-3}—1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-3}—1 \cdot 10^3$
НСП, отн. ед., не более	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
СКО, отн. ед., не более: в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}—1 \cdot 10^{-2}$ Па в диапазоне $1 \cdot 10^{-2}—1 \cdot 10^3$ Па	$2,0 \cdot 10^{-2}$ $0,5 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$ $3,7 \cdot 10^{-3}$

В ходе первичной аттестации были определены следующие составляющие бюджета неопределенности ВЭ-13—13:

НСП первичного эталона ГЭТ 49—80 по типу В	$0,3 \cdot 10^{-2}$
погрешность из-за неравномерности распределения давления в измерительной камере по типу В	$0,15 \cdot 10^{-2}$
погрешность, связанная с нестационарностью режима течения, по типу В	$0,1 \cdot 10^{-2}$
СКО по типу А	$(1,4 \cdot 10^{-3}—3,7) \cdot 10^{-3}$
Стандартная неопределенность [5, 6]:	
по типу А	$(1,4—3,7) \cdot 10^{-3}$
по типу В	$2 \cdot 10^{-3}$
Суммарная стандартная неопределенность	$(2,4—4,2) \cdot 10^{-3}$
Расширенная неопределенность	
($k = 2$, $P = 0,95$)	$(4,8—8,4) \cdot 10^{-3}$

Результаты аттестации ВЭ-13—13 подтвердили его высокие метрологические характеристики, что создало условия для дальнейших исследований по совершенствованию и достижению предельных возможностей описываемого эталона давления, в частности, расширения диапазона хранения, воспроизведения и передачи единицы низкого абсолютного давления до $1 \cdot 10^{-5}$ Па и уменьшения его погрешности.

Таким образом, новый вторичный эталон в области низкого абсолютного давления, созданный на основе новейших отечественных и зарубежных разработок, по техническим и

метрологическим характеристикам занимает достойное место в государственной системе обеспечения единства измерений.

Литература

1. Горобей В. Н., Николаев Н. Г., Фомин Д. М., Чернышенко А. А. Установки вакуумметрические эталонные // Главный метролог. 2011. № 3. С. 42—44.
2. ГОСТ 8.381—2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.
3. ГОСТ Р 8.736—2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
4. Маринко С. В., Талалай А. В., Бойко И. Г., Викторко Ю. Т., Неворотин И. В. Новые вторичные эталоны единицы давления // Вестник метролога. 2013. № 1. С. 25—28.
5. РМГ 43—2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
6. Р. 50.2.038—2004. ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результатов измерений.

Дата принятия 21.10.2013 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

53.083.91

Выбор шкалы измерений при оценке соответствия вертикальной скорости приземления самолета установленным требованиям

Л. Н. АЛЕКСАНДРОВСКАЯ¹, А. В. КИРИЛЛИН¹, О. М. РОЗЕНТАЛЬ², П. А. ИОСИФОВ¹

¹ Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва, Россия, e-mail: kirillinav@mati.ru

² Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

Предложена схема корректного анализа результатов измерений в концепции приемлемого риска. На примере измерений точностных характеристик автоматической посадки самолета дано сравнение трех основных методов оценивания вероятности нахождения измеряемой характеристики (непараметрического и параметрического доверительного интервалов и отдельного подтверждения требований к математическому ожиданию и дисперсии) в допуске при использовании различных шкал. Приведены рекомендации по применению предложенных методов и необходимому объему измерений.

Ключевые слова: показатель безопасности, приемлемый риск, доверительный интервал, шкала измерений.

The scheme of correct analysis of measurement results in the concept of acceptable risk is proposed. By the example of measurement of accuracy characteristics of airplane automatic landing the comparison of the three basic methods of estimating the probability of measurement characteristic in tolerance during use of different measurement scales. These methods are the non-parametric and parametric tolerance interval and separate confirmation of requirements to mathematical expectation and variance. The recommendations for proposed methods application and for the needed volume of measurements are presented.

Key words: safety index, acceptable risk, tolerance interval, scale of measurement.

Теория и практика метрологического обеспечения соответствия контролируемых показателей установленным требованиям часто опирается на концепцию абсолютной безо-

пасности. Между тем, из-за погрешностей измерений, а также их недостаточно репрезентативной выборки необходимо перейти к концепции приемлемого риска, обусловлен-