

Созданная современная установка позволит метрологических службам промышленных и научных предприятий проводить самостоятельно поверку (калибровку) мер потока. В заключении, стоит отметить, что несмотря на создание и внедрение эталонных установок в области измерений потока газа в вакууме для полноценного развития эталонной базы единицы потока газа в вакууме необходимо в ближайшие годы создать национальный первичный эталон, а также государственную поверочную схему.

Литература

1. Фомин Д.М. Метрологическое обеспечение течеискателей масс-спектрометрических гелиевых // «Вакуумная техника, материалы и технология». Материалы X Международной научно-технической конференции. Под редакцией доктора технических наук, профессора С.Б. Нестерова. М. 2015. pp. 66-69.
2. // РОССТАНДАРТ федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: [сайт]. URL: <http://www.fundmetrology.ru/> (дата обращения: 12.май.2017).
3. Чернышенко А.А. Теоретико-прикладные положения поверки средств измерений потока газа в вакууме. СПб: «Студия «НП-Принт», 2014. 136 с.

Результаты сличений мембранно-ёмкостного преобразователя с электростатической автокомпенсацией

Е.К. Израйлов
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,
190005, Санкт-Петербург, Московский пр.,19.,
e-mail: E.K.Izrailov@mail.ru

В работе приведены результаты сличений мембранно-ёмкостного преобразователя с электростатической автокомпенсацией (МЕПК), входящего в состав первичного эталона единицы низкого абсолютного давления. Сличения МЕПК (без активной термостабилизации и динамического режима напуска газа в его измерительную камеру) были проведены с высокоточными вакуумметрами Baratron 698 и Baratron 690 в диапазоне давлений ~ 0,1 – 13 Па. Погрешность сличений МЕПК с перечисленными средствами измерений давления в указанном диапазоне не превысила 4%.

The results of comparisons of membrane capacitive transducer with electrostatic compensation. E.K. Izrailov. The paper presents the results of comparisons membrane capacitive transducer with electrostatic compensation (MCTC) that is a part of primary standard unit of low absolute pressure. Comparisons of MCTC (without active thermal stabilization and dynamic mode of gas inlet into measuring chamber) were conducted with high precision vacuum gauges (Baratron 698 and Baratron 690) in the pressure range of 0,1 – 13 Pa. The accuracy of comparisons of MCTC with the aforementioned means of pressure measurement in the specified range did not exceed 4 %.

Воспроизведение единицы давления и передача ее с необходимой точностью эталонным и высокоточным рабочим приборам представляет основную проблему метрологии в области измерений вакуума.

Требования к средствам вакуумных измерений в последнее время непрерывно возрастают в связи с автоматизацией технологических процессов в электронной промышленности, повышением требований к качеству электронных приборов и развитием целого ряда новых исследований, что приводит к необходимости совершенствования.

Поэтому разработка прецизионных методов и средств измерений низкого абсолютного давления в диапазоне 10^{-4} - 10^4 Па является актуальной задачей. Это важно еще и потому, что все существующие мембранно-емкостные вакуумметры отечественной и зарубежной промышленности требуют при измерениях калибровку.

Для воспроизведения единицы низкого абсолютного давления был выбран мембранно-емкостный метод. С этой целью во ФГУП ВНИИМ им. Д.И.Менделеева был разработан мембранно-емкостный преобразователь с электростатической автокомпенсацией (МЕПК), работающий в диапазоне 10^{-3} ÷ 40 Па [1].

Преимущества МЕПК уже неоднократно были освещены в работах [1,2]. Эталон на основе МЕПК для области абсолютных давлений в диапазоне 10^{-3} ÷ 10^3 Па был введен в действие в 1980 г. [3] одновременно с рабочими эталонами, которые возглавили ряд ведомственных поверочных схем в области вакуумметрии.

С начала 2000-х годов во ФГУП ВНИИМ им. Д.И.Менделеева начались разработки модернизированного эталона единицы абсолютного давления на новой технической базе. В результате модернизированный эталон был утвержден в декабре 2016 г.

Модернизация эталона для области абсолютных давлений в диапазоне 10^{-3} ÷ 10^3 Па проводилась как в области экспериментальной техники, так и в области теоретических исследований.

В результате проведения теоретических исследований для точного определения метрологических характеристик мембран МЕПК была развита **обобщенная (строгая) теория** мембранно-емкостного датчика на основании решения задачи о прогибе мембраны с учетом одновременно трех факторов:

- сопротивления изгибу,
- силы натяжения и
- деформации растяжения срединной плоскости вследствие изгиба [2].

Созданная теория позволяет рассчитывать оптимальные параметры МЕМ с заданными метрологическими характеристиками мембран в процессе конструирования.

Сущность метода измерения МЕПК, как известно [2], состоит в том, что давление, вызывающее прогиб мембраны, компенсируется электрическим воздействием, приводящим ее в исходное положение.

Принципиальная схема преобразователя манометра приведена на рис. 1.

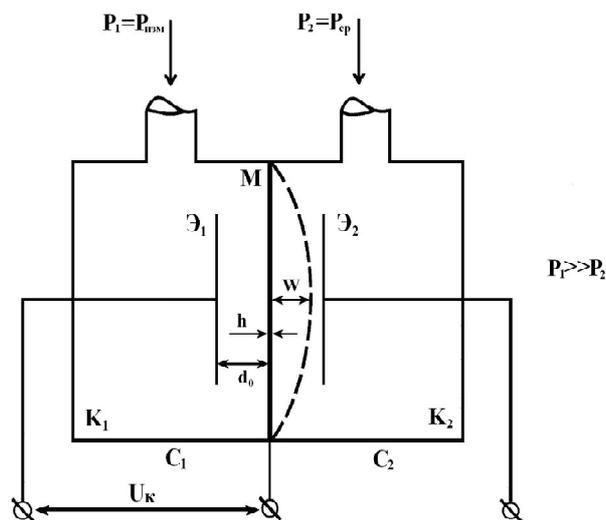


Рис. 1. Принципиальная схема мембранно-емкостного преобразователя с электростатической автокомпенсацией (МЕПК), где: p_1 – измеряемое давление в камере измерения K_1 , $p_2 = p_0$ – остаточное давление в сравнительной камере K_2 , M – круглый мембранный электрод толщиной h , \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – измерительный и вспомогательный электроды, C_1 и C_2 – емкости электродов относительно мембраны M , d_0 – начальный зазор в измерительном конденсаторе, W – прогиб мембраны под действием давления p_1 , U_k – напряжение компенсации.

Уравнение измерения преобразователя компенсационного типа имеет вид:

$$p_1 = KU_k^2 + p_0, \quad (1)$$

где p_0 – давление в сравнительной камере пренебрежимо малое по сравнению с измеряемым; K – расчетная постоянная преобразователя (датчика давлений).

Постоянную K можно рассчитать или непосредственно по геометрическим размерам преобразователя до сборки (многократными измерениями d_0 , $R_{эл}$ и R_m в 4-х сечениях) или по многократному измеренному значению емкости C_1 (между мембраной и электродом) с последующим ее расчетом по формулам:

$$K = \frac{\varepsilon_0}{2d_0^2} \left(\frac{R_{эл}}{R_m} \right)^2 \quad \text{или} \quad K = \frac{1}{2\varepsilon_0\pi^2} \left(\frac{C_1}{R_m \cdot R_{эл}} \right)^2, \quad (2)$$

где ε_0 - электрическая постоянная; $R_{эл}$ и R_m – радиусы электрода и мембраны соответственно.

Подчеркнем, что достоинство такого метода измерения давления состоит в том, что сила, создаваемая электростатическим полем может быть рассчитана по измеренным величинам: напряжения компенсации и геометрическим параметрам преобразователя, входящих в формулы (2). Это дает возможность создать *манометр измерения абсолютного давления*, не требующий градуировки [2].

Из (2) видно, что погрешность определения K в основном зависит от точности измерения емкости измерительного конденсатора, так как другие составляющие постоянны. Исходя из модельных представлений МЕРК можно также представить расчет коэффициента K по формуле

$$K = K_0 \cdot K_1, \quad (3)$$

где $K_0 := \frac{\varepsilon_0}{2 \cdot d_0^2}$, а $K_1 := \frac{4 \cdot \ln(R_{эл}/R_m) - 1}{1 - 2 \cdot R_m^2/R_{эл}^2}$ - учитывает разницу радиусов соответствующих

электродов.

При выбранных параметрах МЕРК: $d_0 = 97$ мкм, $D_{эл} \approx 41,455$ мм, $D_m \approx 46,049$ мм в результате расчетов была получена постоянная $K=4,553 \cdot 10^{-4}$ Па/В² при $K_0 = 4,705169 \cdot 10^{-4}$ Па/В² и $K_1 = 9,676751 \cdot 10^{-1}$.

Герметичность МЕРК является необходимым условием его работоспособности и достижения требуемых параметров. Однако проверка герметичности различных узлов МЕРК с помощью стандартных гелиевых течеискателей для данной конструкции не совсем удобна в связи со сложной конфигурацией его вакуумных соединений. Такой метод позволил обнаружить негерметичность МЕРК в целом, но трудно применим для определения конкретных, локальных мест вакуумных течей.

С целью уменьшения влияния натекания в измерительную камеру МЕРК в отличие от обычно используемого в экспериментальной практике напуска газа в статическом режиме, впервые была использована методика напуска газа в динамическом режиме.

Преимущество последней состоит в том, что она позволяет исключить с допустимой погрешностью влияние процессов гажения отдельных частей измерительной линии камеры МЕРК, а также влияние микронатеканий, искажающих измеряемое давление. Для уменьшения погрешности напуска при изменении температуры окружающей среды натекатель помещался в пассивный термостат из пенопласта.

При динамическом режиме напуска газа для улучшения метрологических характеристик МЕРК была создана дополнительная система высоковакуумной откачки, состоящая из турбомолекулярного насоса (ТМН) с эффективной скоростью откачки ~ 70 л/с,

приведенная в работе [4] и позволяющая поддерживать величину давления в его измерительной камере в диапазоне измерений $13,0 \pm 0,01$ Па.

Систему регулирования измеряемого давления в измерительной камере МЕРК можно создать разными способами напуска газа в динамическом режиме:

- с помощью регулируемой вручную диафрагмы и ТМН или
- с помощью натекателя с пьезострикционным приводом и ТМН.

Первая система содержит [4] специальный регулируемый малогабаритный прецизионный клапан, выполняющий функцию регулируемой диафрагмы.

Вторая система, которая была исследована, состоит из натекателя с пьезострикционным приводом и блоком питания. Работа такого натекателя газа основана на перемещении блока микроперемещений по резьбе, создавая противоусилие через шток. Изменяя величину напряжения на блоке, можно в широких пределах изменять сечение перепускного отверстия, а, следовательно, и величину напуска газа.

Использование пьезострикционной керамики, сжатие (или удлинение) которой прямо пропорционально приложенному электрическому напряжению, позволяет практически безынерционно управлять напуском и с высокой точностью дистанционно устанавливать заданное давление в системе как в ручном режиме, так и в автоматическом (в устройствах, имеющих обратную связь).

В ручном режиме работы напряжение, приложенное к пьезострикционному приводу, стабилизировано электронным стабилизатором, что позволяет осуществлять дозированный напуск газов в объем измерительной системы в диапазоне измеряемых давлений: $2,66 \cdot 10^{-6}$ - **13,3 Па**. Нестабильность напуска газов с атмосферного давления за 10 минут при изменении температуры окружающего воздуха $\pm 1^{\circ}\text{C}$ не более $\pm 1,5\%$.

Упрощенная схема подключения системы напуска с пьезострикционным приводом, предназначенная для стабилизации давления в измерительном объеме МЕРК, и принцип её действия, приведены на рис. 2.

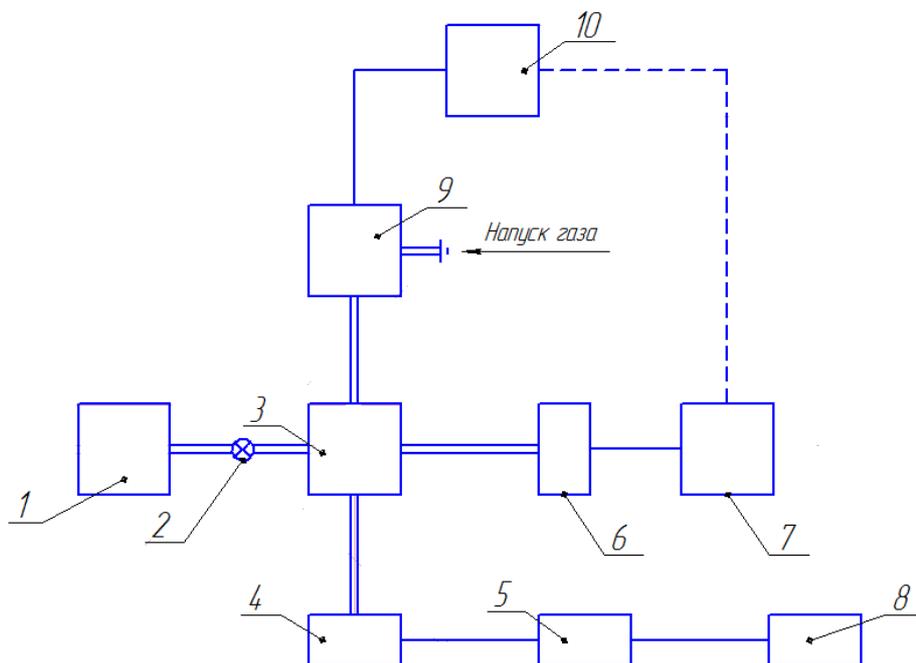


Рис. 2. Схема подключения системы напуска газа, где 1-ТМН; 2-электромагнитный клапан; 3- измерительный объем; 4-баратрон; 5- контроллер; 6- датчик АІGX; 7- контроллер АІGX; 8- персональный компьютер; 9- пьезострикционный натекатель газа; 10- блок питания натекателя.

На рис. 3 приведен график зависимости давления напуска газа в измерительный объем МЕРК от напряжения на пьезострикционном датчике при работе в динамическом режиме напуска.

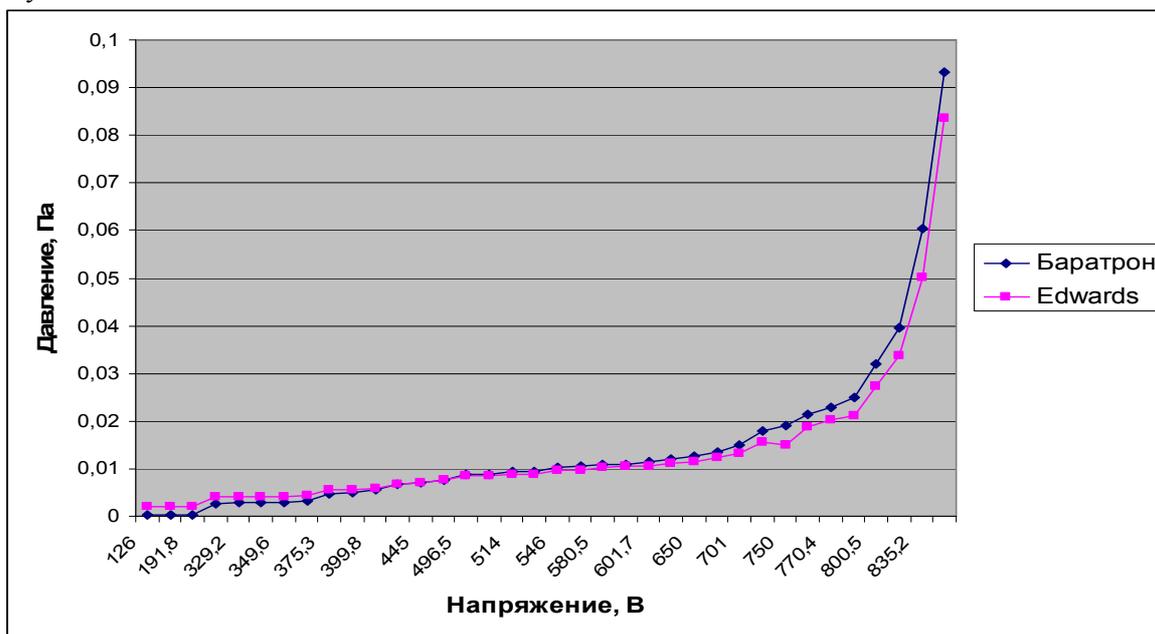


Рис. 3. График зависимости давления в измерительном объеме от напряжения на пьезострикционном датчике системы напуска газа

В таблице 1 приведены результаты сличений МЕРК с высокоточными вакуумметрами типа Баратрон 690 А и Баратрон 698 в диапазоне давлений до 13 Па при расчетной постоянной МЕРК, равной $4,553 \cdot 10^{-4}$ Па/В².

Таблица 1 - Результаты сличений МЕРК (ГЭТ 49-80) с Баратронами 690А и 698, декабрь 2016г.

№	P, Па			w, %	
	МЕРК	690	698	690	698
1	0.105	0.104	0.105	0.9	0.2
2	0.297	0.304	0.304	2.2	2.1
3	0.684	0.705	0.702	3.2	2.7
4	0.971	1.003	0.997	3.3	2.7
5	2.902	2.992	2.972	3.1	2.4
6	6.793	6.955	6.908	2.4	1.7
7	9.900	10.102	10.034	2.0	1.4
8	12.750	12.984	12.897	1.8	1.1
1	0.106	0.106	0.106	0.2	0.7
2	0.295	0.303	0.303	2.7	2.5
3	0.689	0.713	0.709	3.5	3.0
4	0.976	1.011	1.005	3.6	3.1
5	2.942	3.037	3.017	3.2	2.6
6	6.834	7.001	6.955	2.4	1.8
7	9.932	10.140	10.026	2.1	0.9
8	13.287	13.532	13.440	1.8	1.2
1	0.108	0.111	0.110	2.9	2.1
2	0.291	0.303	0.302	4.1	3.8
3	0.685	0.715	0.711	4.2	3.8
4	0.953	0.993	0.988	4.2	3.7
5	2.885	2.986	2.967	3.5	2.8
6	6.879	7.057	7.011	2.6	1.9
7	9.877	10.093	10.026	2.2	1.5
8	12.805	13.053	12.966	1.9	1.3

В таблице 1 представлены три серии сличений в 8 диапазонах измеряемых давлений (0,1÷13 Па). Начальные рабочие параметры аппаратуры при сличениях были: давление в камерах МЕРК $\sim 5,0 \cdot 10^{-4}$ Па, напряжение баланса моста по синфазной составляющей сигнала соответствовало току индикаторного прибора, равного нулю, а по квадратурной составляющей - 20В, которое вычиталось из напряжения компенсации. Сличения были предварительными, так как проводились на новом вакуумном стенде, на котором не было достигнуто в камерах МЕРК необходимого предельного давления $\leq 3,0 \cdot 10^{-5}$ Па. Полное время измерений - 15 минут (снятие 30 показаний и вычисление их среднего значения в каждой точке диапазона) в трех сериях при непрерывном режиме напуска газа.

Были также проведены дополнительные исследования МЕРК в области давлений до 30 Па. На рис. 4 построен график расхождения результатов измерений, отраженных в таблице 1, из которого можно отметить уменьшение расхождений сличений с ростом давления, связанных со снижением влияния натеканий в измерительный объем МЕРК по мере возрастания измеряемого давления.

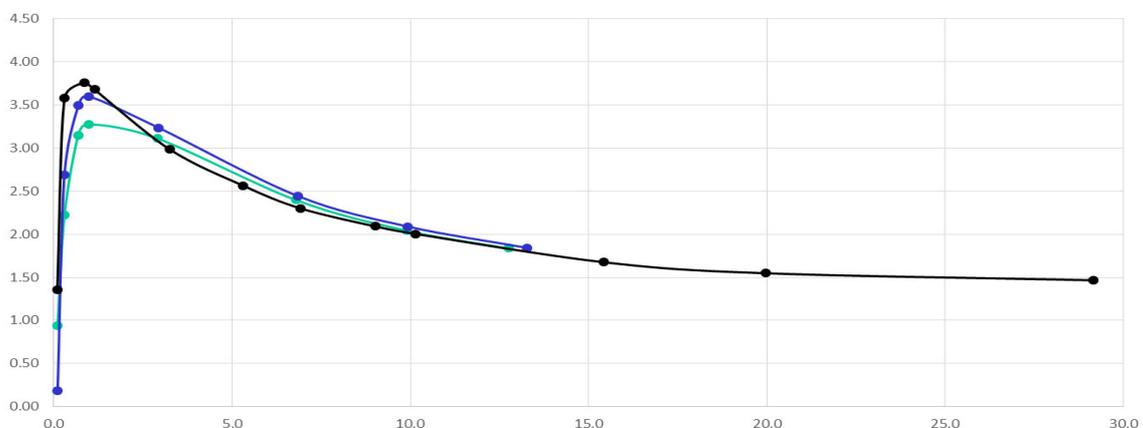


Рис. 4. Расхождение показаний МЕРК с Баратроном в диапазоне давлений до 30 Па

Следует отметить, что предварительные сличения проводились без активного термостатирования МЕРК и использования режима напуска газа в измерительную камеру в динамическом режиме. Результаты предварительных сличений показали совпадение измерений МЕРК с Баратронами в пределах $\leq 4\%$. Однако, при активном термостатировании МЕРК, использовании динамического режима напуска газа с помощью натекателя с пьезострикционным приводом и достижении необходимого предельного давления $\leq 3,0 \cdot 10^{-5}$ Па расхождение сличений будут значительно снижены.

Литература

1. Горобей В.Н., Израилов Е.К. Эталонный мембранно-емкостный манометр низких абсолютных давлений. // Измерительная техника. – 2011. – №4. – С.70-73.
2. Горобей В.Н., Израилов Е.К. Мембранно-емкостный метод воспроизведения единиц абсолютного давления. // Доклад на XX научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», –2013.– С.34 - 39.
3. Государственный эталон единицы давления для области абсолютных давлений $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^3$ Па. Доклад Государственному комитету СССР по стандартам. – Л., 1980.- С.38.
4. Горобей В.Н., Израилов Е.К. Абсолютный мембранно-емкостный вакуумметр с динамическим режимом напуска газа. // Доклад на XXIII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», –2016.– С.42 - 47.