

заметному приросту давления. С увеличением температуры прогрева наблюдается увеличение потока газовой выделения. Однако, вместе с тем с увеличением температуры прогрева поток газовой выделения спадает быстрее.

Большинство выделяющихся из материала газов входят в состав атмосферы, что объясняется его пористой структурой. Наиболее интенсивно из МРЭ выделяются водяной пар и азот.

Однако, при сравнении суммы парциальных давлений проанализированных газов с общим давлением в камере, становится очевидно, что существуют другие газы, помимо описанных, чье парциальное давление вносит значительный вклад в суммарное газовой выделение МРЭ.

Литература

1. В.П. Михайлов, Г.В. Степанов, А.М. Базиненков, А.С. Кузнецов, И.К. Зобов. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для нанотехнологического оборудования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2010. – С. 138-148.
2. Иванова Д. А., Ефимов И. А., Ротарь А. П. Разработка вакуумной камеры для исследования вакуумных характеристик магнитореологического эластомера. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 8 – 12 апреля, 2019, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2019.– № гос. регистрации 0321900970.– URL: studvesna.ru/go=articles&id=2609 (дата обращения: 01.06.2019)
3. Руководство по эксплуатации анализатора остаточных газов Extorr серии ХТ: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.extorr.ru> (дата обращения 20.07.2019)

Разработка и исследования вакуумметров с чувствительными элементами, изготовленными по технологии МЭМС

*Р.Э. Кувандыков, Р.А. Тетерук
Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», пр. Московский, 19
E-mail: ruskuw@mail.ru*

Статья посвящена разработке чувствительных элементов, преобразователей и вакуумметров, созданных по технологии МЭМС и предназначенных для измерений абсолютного давления в широком диапазоне от 10^{-3} до 10^5 Па.

***Development and researches of MEMS vacuum gauges. R.E. Kuvandykov, R.A. Teteruk.**
The article is devoted to the development and research of sensitive elements, transducers and vacuum gauges created by MEMS technology and intended for absolute pressure measuring in a wide range from 10^{-3} to 10^5 Pa.*

В настоящее время в области измерений низкого абсолютного давления (вакуума) существует ряд проблем, связанных, в первую очередь, с отсутствием на рынке высокоточных отечественных средств измерений низких абсолютных давлений. Можно обозначить следующие основные проблемы.

1. Отсутствие отечественных эталонов сравнения для проведения сличений между государственными первичными эталонами ГЭТ 49-2016 и ГЭТ 101-2011, проведения межлабораторных сравнительных испытаний, а также проведения международных сличений.

2. Отсутствие серийно выпускаемых отечественных высокоточных СИ, соответствующих эталонам 1 и 2 разрядов по ГОСТ 8.107-81. С 2008 года по настоящее время прошли испытания в целях утверждения типа всего два вакуумметра отечественного

производства, причем их метрологические характеристики не удовлетворяют требованиям к эталонам 1 и 2 разрядов [1].

3. Санкционные ограничения, введенные западными странами, не позволяют осуществлять закупку целого ряда высокоточных СИ иностранного производства.

Для решения указанных проблем ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» было предложено разработать отечественные вакуумметры, к которым предъявлены следующие требования:

- компактные размеры чувствительных элементов;
- слабая зависимость от рода газа;
- комплектующие отечественного производства;
- низкая стоимость.

Анализ показал, что этим требованиям более всего удовлетворяет конструкция чувствительных элементов, производимых по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Результаты исследовательских работ, которые велись в инициативном порядке в отделе государственных эталонов в области измерений давления [], в 2017 году позволили начать во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» ОКР «Разработка и исследование высокоточных деформационных средств измерений низких абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^4$ Па, создаваемых по технологии микроэлектромеханических систем», шифр «Элемент».

Было принято решение разработать два типа опытных образцов: вакуумметр, основанный на резонансном методе измерения давления и вакуумметр, основанный на мембранно-емкостном методе с применением компенсации и компрессии. На этапе написания технического задания были сформулированы требования к метрологическим характеристикам разрабатываемых опытных образцов, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики опытных образцов.

Наименование метрологических	Значения метрологических
Опытный образец 1 типа	
Диапазон измерений	от 10 Па до 10^4 Па
Относительная погрешность измерений	не более $\pm(2 \dots 1)$ %
Опытный образец 2 типа	
Диапазон измерений	от 10^{-3} Па до 10 Па
Относительная погрешность измерений	не более $\pm(10 - 2)$ %

Чувствительный элемент вакуумметра (рис. 1), принцип действия которого основан на измерении жесткости газовой пружины (резонансного типа), конструктивно представляет из себя пластину на подвесах, расположенную между стационарными плоскостями.

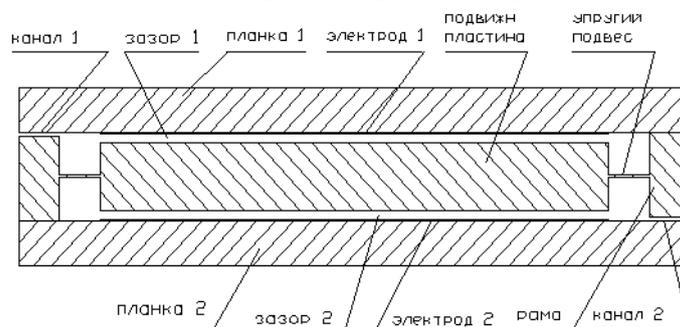


Рис. 1. Эскиз чувствительного элемента резонансного типа.

Газовые пружины образуются плоскостью электродов №1 и №2, а также кремниевой подвижной пластиной, как изображено на рис. 2.

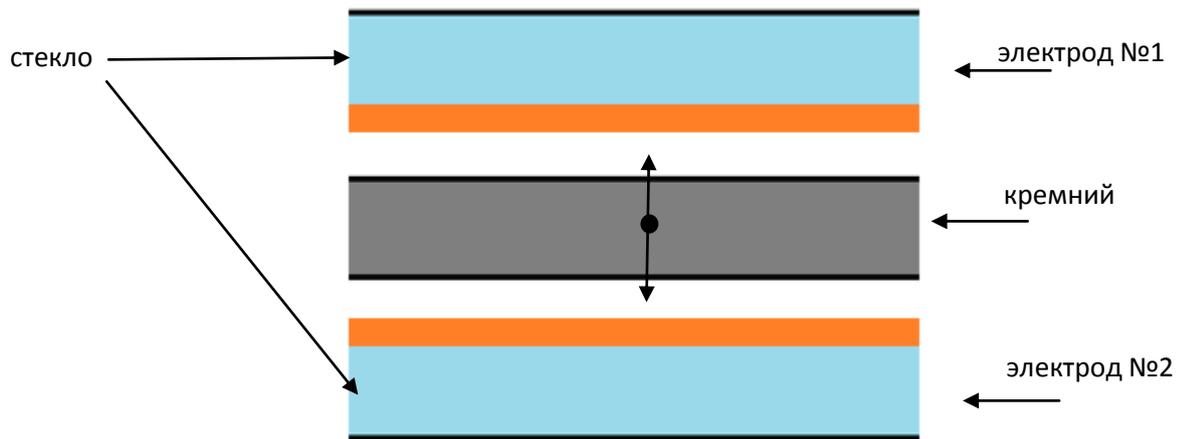


Рис. 2. Конструкция чувствительного элемента резонансного типа.

Метрологически значимые размеры чувствительного элемента резонансного типа изображены на рисунке 3.

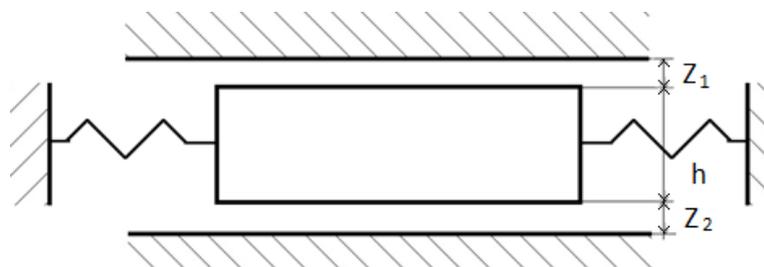


Рис. 3. Метрологически значимые размеры чувствительного элемента.

где: h – толщина подвижной пластины;
 Z_1 – исходное значение величины зазора (газовая пружина) №1;
 Z_2 – исходное значение величины зазора №2.

Резонансная частота колебаний пластины зависит от жесткости газовой пружины.

$$f_p^2 = \frac{G_M + G_{п}}{4 \cdot \pi^2 \cdot m}, \quad (1)$$

где G_M – механическая жесткость подвеса, $G_{п}$ – пневматическая жесткость газовой пружины, m – масса подвижной пластины.

Электрическая схема преобразователя давления резонансного типа представлена на рис.4.

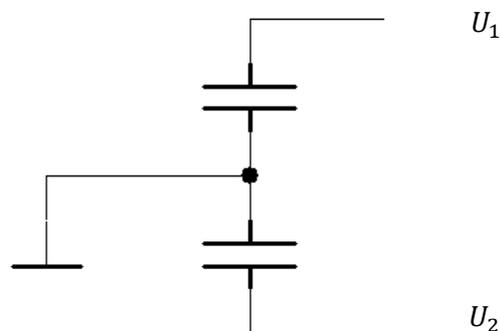


Рис.4. Электрическая схема преобразователя давления резонансного типа.

В общем случае параметры движения пластины описываются следующим выражением:

$$m * \frac{d^2y}{dt^2} + B * \frac{dy}{dt} + G * y - \frac{\epsilon * \epsilon_0}{2 * (Z+y)^2} * (U_1^2 - U_2^2) * S = 0, \quad (2)$$

где $y = a \cdot \sin(\omega \cdot t)$ - функция движения пластины, a - амплитуда колебаний, ω - циклическая частота колебаний, B - коэффициент силы вязкого трения газовой среды, G - жесткость, ϵ - диэлектрическая проницаемость газовой среды, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, U_1 и U_2 - электрические напряжения на электродах.

Также зависимость резонансной частоты колебаний пластины от давления газа можно получить методом малых перемещений, приравняв количество энергии, запасаемой в газовых пружинах изменению энергии колебательной системы. В этом случае зависимость измеряемого давления газа от частоты колебаний пластины выглядит следующим образом

$$P = 2 * \pi^2 * \rho * h * Z * f^2, \quad (3)$$

где ρ - плотность материала пластины.

Зависимость давления от квадрата частоты колебаний линейна:

$$P = K * f^2, \quad (4)$$

где $K = 2 * \pi^2 * \rho * h * Z$ - коэффициент преобразования, может быть вычислен из плотности материала и значений геометрических размеров подвижной пластины.

На рис. 5 изображена экспериментальная зависимость давления от квадрата частоты, полученная в ходе испытаний опытного образца.

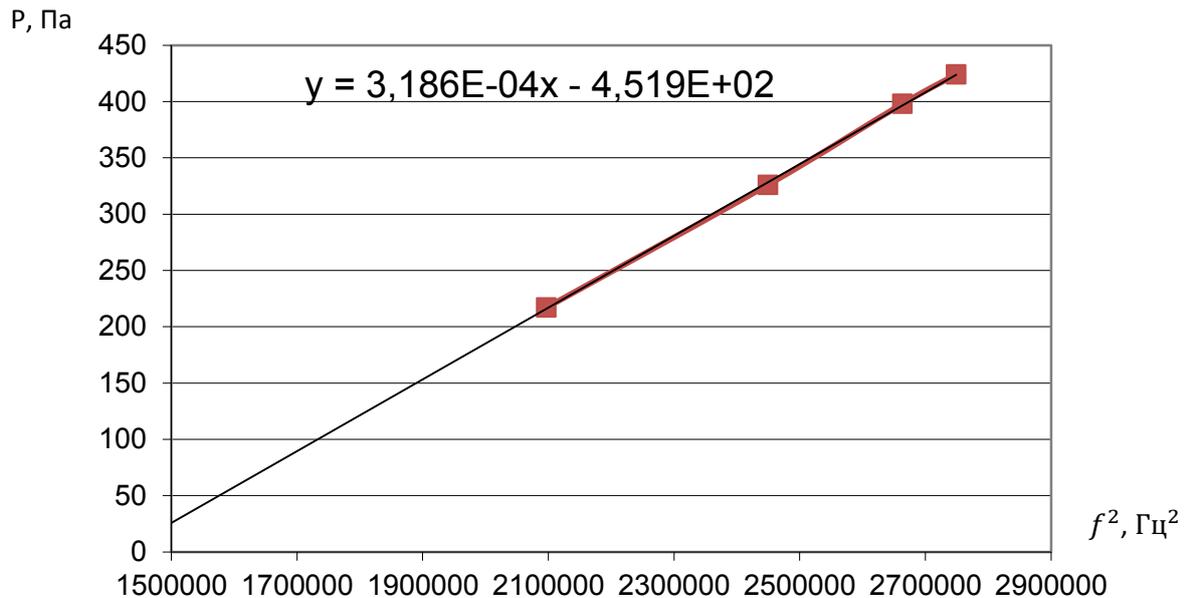


Рис. 5. Экспериментальная зависимость давления от квадрата частоты колебаний.

На графике также отображена функция аппроксимации, из которой видно, что тангенс угла наклона прямой равен $3,18 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}$. Это значение совпадает с вычисленным ранее значением коэффициента преобразования K .

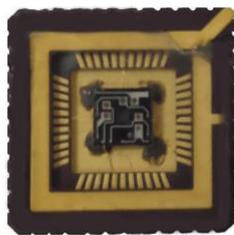


Рис. 6. Чувствительный элемент резонансного типа.



Рис. 7. Датчик давления по технологии МЭМС.

Второй тип чувствительного элемента, изготовленного по технологии МЭМС, основан на измерении давления газа компенсацией электростатическим давлением и конструктивно представляет из себя мембрану с плоскопараллельно расположенными электродами (рис. 8).

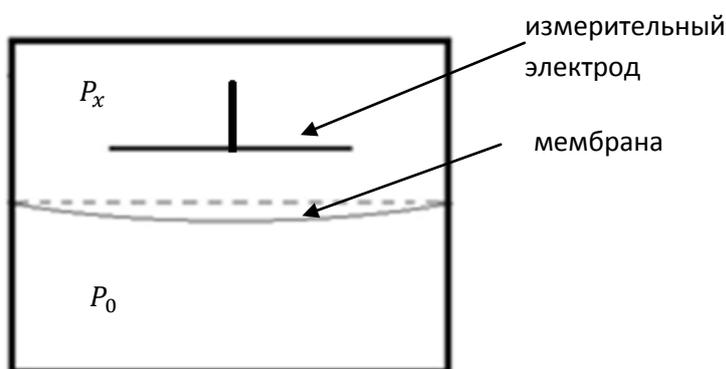


Рис. 8. Конструкция компенсационного преобразователя.

Деформация мембраны, возникающая при подаче измеряемого давления газа, компенсируется электростатическим отрицательным давлением (при подаче постоянного напряжения на измерительный электрод). Формула преобразования выглядит следующим образом:

$$P = \frac{\epsilon_0}{2 \cdot Z^2} * U^2, \quad (5)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, h – величина зазора между мембраной и плоскостью измерительного электрода, U – значение постоянного напряжения, при котором наступила компенсация деформации мембраны.

Третий тип чувствительного элемента, изготовленного по технологии МЭМС, конструктивно схож с чувствительным элементом резонансного типа, с той разницей, что измеряется не жесткость газовой пружины, а величина энергопотерь (работа против сил трения со стороны газа) при колебательных движениях пластины. Принцип действия чувствительного элемента данного типа поясняется на рис.9.

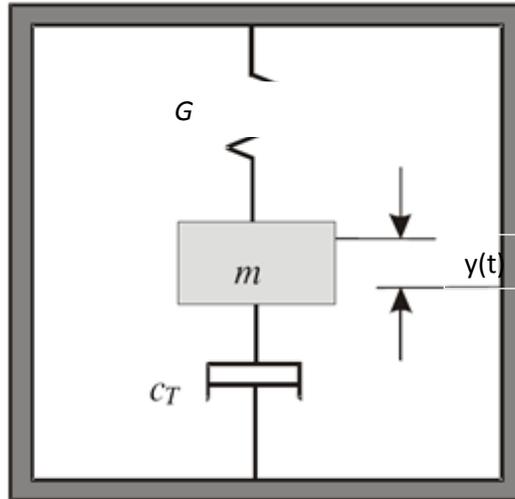


Рис. 9. Принцип измерения величины энергопотерь при колебательных движениях пластины чувствительного элемента.

Составная пластина массой m на механическом подвесе жесткостью k совершает вынужденные колебания $z(t)$, приближенные по форме к гармоническим. При движении на плоскость пластины действует сила со стороны газа, пропорциональная абсолютному давлению газа. Для поддержания определенной амплитуды вынужденных колебаний требуется восполнять энергию, затраченную на работу против сил со стороны газа. Энергия восполняется электростатическим приводом $y(t)$. Количество восполняемой энергии пропорционально абсолютному давлению газа.

Результаты градуировки вакуумметра, использующего чувствительный элемент, реализующий принцип измерения энергопотерь, представлены на рис.10.

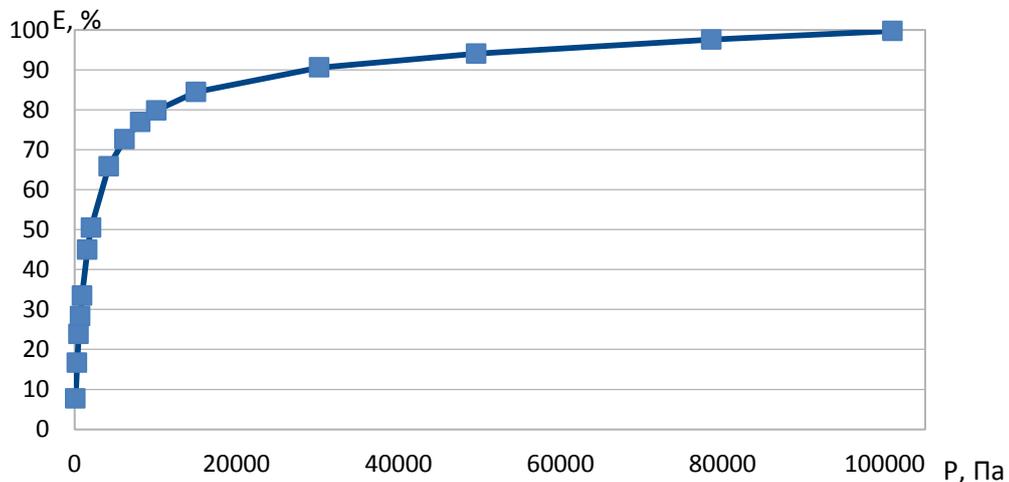


Рис. 10. Зависимость энергопотерь от давления.

По оси x отображается давление в паскалях, по оси y - энергопотери в условных единицах (%). Можно отметить, что с возрастанием давления энергопотери возрастают нелинейно.

На рис. 11 представлен график, позволяющий оценить чувствительность метода (первая производная кривой градуировки) в зависимости от абсолютного давления газа.

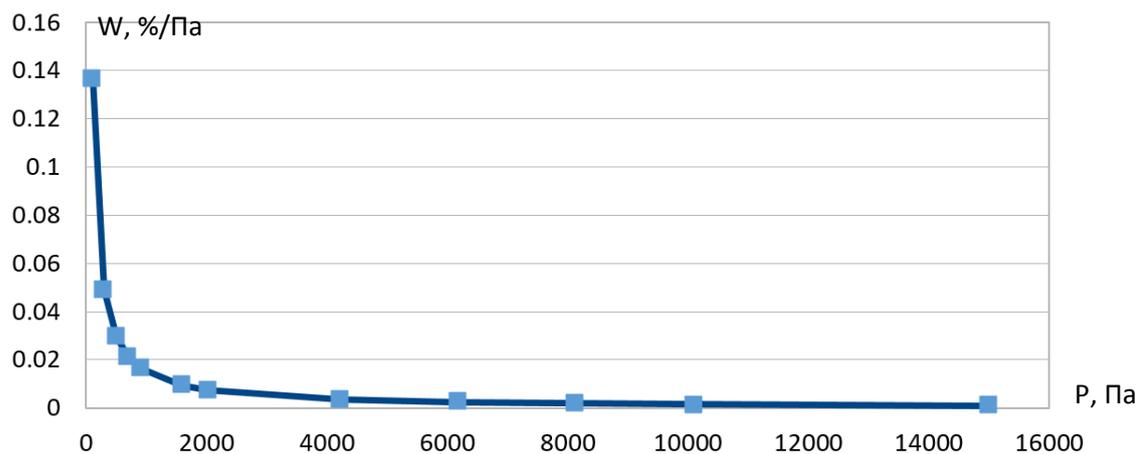


Рис. 11 . Чувствительность метода в зависимости от абсолютного давления газа.

Из графика видно, что чувствительность снижается на два порядка при давлениях больше 10000 Па. Результаты калибровки вакуумметра, реализующего метод измерения энергопотерь, были проведены с использованием эталонного вакуумметра MKS Baratron и представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты калибровки вакуумметра.

Значения МЭМС-вакуумметра, Па	Значения эталона, Па	Относительная погрешность, %	СКО, %
60.68	60.64	0.1	0.6
91.7	91.81	-0.1	0.4
111.6	111	0.6	0.3
301.5	301.7	-0.1	0.1
600.3	599.5	0.3	0.4
897.4	893	0.4	0.3

Внешний вид вакуумметра, использующего преобразователи, изготовленные по технологии МЭМС, изображен на рис. 12.



Рис. 12. Вакуумметр резонансного типа.

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что разработанные образцы удовлетворяют требованиям технического задания, что позволяет продолжить работы над созданием серийно производимого широкодиапазонного прецизионного вакуумметра, использующего сразу несколько чувствительных элементов, изготовленных по технологии МЭМС и реализующих различные принципы измерения абсолютного давления.

Литература

1. В.Н.Горобей, А.Я.Гаршин, Р.Э.Кувандыков. «Резонансный вакуумметрический преобразователь, созданный по технологии МЭМС» Вакуумная техника и технологии -2017. Труды 24-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 06.06.2017 г.