

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ ИМЕНИ  
Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА»**

---

На правах рукописи

**Кувандыков Рустам Эгамбердыевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО  
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ЭТАЛОННОГО ВАКУУММЕТРА ДЛЯ  
ПРОВЕДЕНИЯ СЛИЧЕНИЙ, ПОВЕРКИ, КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ  
ИЗМЕРЕНИЙ НИЗКОГО АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ**

**Специальность –**

**2.2.4. «Приборы и методы измерения (по видам измерений)»**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание учёной степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:**

**к. т. н. А.А. Чернышенко**

**Санкт-Петербург – 2023**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение.....	8
ГЛАВА 1 Обзор и анализ рабочих эталонов государственных поверочных схем в области измерений низкого абсолютного давления газа.....	19
1.1 Обзор метрологических и технических характеристик рабочих эталонов государственных поверочных схем по методам измерений низкого абсолютного давления газа.....	23
1.2 Анализ характеристик вакуумметров.....	45
1.3 Выводы к главе 1 и постановка задач исследования.....	51
ГЛАВА 2 Разработка эталонного вакуумметра.....	52
2.1. Построение модели первичного измерительного преобразователя эталонного вакуумметра .....	53
2.2 Разработка конструкции первичного измерительного преобразователя эталонного вакуумметра.....	59
2.3 Разработка измерительного блока с функцией автоматического регулирования давления газа.....	73
2.4 Выводы к главе 2.....	90
ГЛАВА 3 Исследование метрологических характеристик экспериментального образца эталонного вакуумметра.....	91
3.1 Исследование неопределённости измерений эталонного вакуумметра.....	91
3.2 Экспериментальное исследование метрологических характеристик эталонного вакуумметра.....	116
3.3 Выводы к главе 3.....	117
Заключение.....	118
Перечень библиографических записей.....	120

Приложение А. Описание изобретения к патенту.....	125
Приложение Б. Акты о внедрении.....	141
Приложение В. Акт приёмочных испытаний.....	146
Приложение Г. Чертёж первичного измерительного преобразователя.....	164

**ПЕРЕЧЕНЬ**  
**принятых сокращений**

БП	– блок питания;
ВПИ	– верхний предел измерений;
ГПСЭ	– государственный первичный специальный эталон;
МК	– микроконтроллер;
МЭМС	– микроэлектромеханические системы;
НПИ	– нижний предел измерений;
НСП	– неисключенная систематическая погрешность;
СИ	– средство измерений;
СКО	– среднее квадратическое отклонение;
СПЕД	– средство передачи единицы давления;
ТМН	– турбомолекулярный насос;
ЭВ	– эталонный вакуумметр;
ГЭТ	– государственный эталон.

**ПЕРЕЧЕНЬ**  
**Обозначения**

**В документе применяются следующие обозначения:**

Обозначение	Единица	Определение
$n$	-	Число циклов сличений; $I = 1.. n$
$k$	-	Коэффициент расширения [1]
$P$	Па	Давление газа
$t$	°C	Температура в градусах Цельсия
$U$	Па	Расширенная неопределённость
$u$	Па	Стандартная неопределённость
$u_c$	Па	Суммарная стандартная неопределённость

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В данной работе применяются следующие термины:

**средняя длина свободного пути молекул газа ( $\lambda$ )** определяется отношением скорости молекул газа к числу столкновений в единицу времени;

**критерий Кнудсена ( $K_n$ )**: отношение средней длины свободного пути молекул газа к линейному размеру объема с газом;

**низкий вакуум** : давление газа, при котором  $K_n \ll 1$  [2]. Низкому вакууму характерен диапазон  $10^5 - 100$  Па;

**средний вакуум** : давление газа, при котором  $K_n \approx 1$ . Среднему вакууму, соответствует диапазон  $100 - 0,1$  Па;

**высокий вакуум** : давление газа, при котором  $K_n \gg 1$ . Высокому вакууму характерен диапазон  $0,1 - 10^{-5}$  Па;

**неопределённость измерений**: [uncertainty (of measurement)] параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределенность измерения, как правило, включает в себя много составляющих. Некоторые из них могут быть оценены из статистического распределения результатов ряда измерений и описаны выборочными стандартными отклонениями. Другие составляющие, которые могут быть описаны стандартными отклонениями, оценивают, исходя из основанных на опыте предположений или иной информации о виде закона распределения. Предполагается, что результат измерения является лучшей оценкой измеряемой величины, а все составляющие неопределенности, включая обусловленные систематическими эффектами

(разного рода поправками, используемым эталоном сравнения), вносят вклад в разброс значений измеряемой величины;

**эталон единицы величины:** техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины;

**сличение эталонов:** установление соотношения между результатами измерений при воспроизведении и передаче единицы.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Актуальность разработки и исследования отечественного эталонного вакуумметра [3] обусловлена тем, что эксплуатационные, функциональные, технические, метрологические характеристики выпускаемых в настоящее время отечественных и иностранных вакуумметров в полной мере не удовлетворяют потребностям метрологического обеспечения в области низкого абсолютного давления (вакуума). Следует отметить тот факт, что в настоящее время в РФ не выпускаются транспортируемые компактные вакуумметры, имеющие необходимые диапазоны и погрешности измерений, которые можно было бы использовать в качестве эталонов сравнения при проведении межлабораторных и международных сличений с целью установления эквивалентности государственных первичных эталонов, возглавляющих различные государственные поверочные схемы в области абсолютных давлений и вакуума, а также аттестации рабочих эталонов в рамках этих поверочных схем. К ним относятся, в том числе: государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений абсолютного давления газа в диапазоне  $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^3$  Па в соответствии с ГОСТ 8.107–81 и Государственная поверочная схема для средств измерения абсолютного давления газа в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$  Па, утвержденная приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06.12.2019 г. № 2900 [4], реализованные в государственных первичных эталонах ГЭТ 49-2016 и ГЭТ 101-2011. До последнего времени задача обеспечения транспортируемыми эталонами сравнения в области измерений низкого абсолютного давления решалась при помощи вакуумметров иностранного производства, различных типов. Однако введённые со стороны некоторых государств санкционные ограничения (решение Евросоюза № 2014/512/CFSP13 и регламент № 833/2014 от 31.07.2014 г.) и ограничения на ввоз со стороны РФ (Постановление Правительства РФ от 21.12.2019 г. № 1746) существенно уменьшили возможность приобретения



необходимых эталонов сравнения для области измерений низкого абсолютного давления газа, а также ограничили возможности развития системы метрологического обеспечения в области измерений низкого абсолютного давления газа.

Необходимо отметить крайнюю важность этой области измерений для ряда отечественных отраслей промышленности и науки. Особенно значимы измерения низкого абсолютного давления газа в металлургии, электронной, авиационной, атомной, космической промышленности и других высокотехнологичных отраслях, относящихся к приоритетным направлениям развития науки, утверждённых Указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011 г. «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ». В настоящее время на фоне увеличения количества средств измерений низкого абсолютного давления газа в промышленности РФ, наблюдается и рост потребности в эталонных вакуумметрах, применяемых для их поверки, калибровки и межлабораторных испытаний.

Необходимость развития отечественного приборостроения, в том числе в области измерений низкого абсолютного давления, подчёркивают такие документы как: национальный проект «Наука» в рамках Указа Президента РФ от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года» и Распоряжение Правительства РФ от 17 января 2020 г. № 20-р «О Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г.».

**Степень разработанности темы исследования.** Важно отметить, что разработке эталонных средств измерений в области низкого абсолютного давления газа посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных учёных. Этим вопросам уделялось большое внимание сотрудниками института метрологии им. Д.И. Менделеева Рыжовым В.А., Казаковым В.А., Израйловым Е.К., Горобеем В.Н., которые в разные годы разрабатывали эталонные вакуумметрические установки, включающие эталонные вакуумметры, основанные на деформационных и других методах измерений низкого абсолютного давления газа. Большой вклад в развитие эталонной базы РФ на основе жидкостного метода измерений давления газа внесли Садковская И.В. и Эйхвальд А.И. Существенное внимание вопросам разработки отечественных вакуумметров посвящены работы профессора Политехнического университета Санкт-Петербурга Розанова Л.Н., а также профессора Ульяновского государственного университета Стучебникова В.М. Интересными работами, направленными на разработку средств измерений низких абсолютных давлений с применением новых способов измерений и технологий изготовления, являются работы таких иностранных авторов, как Steffen Kurth, Karla Hiller, которые предложили использовать первичные измерительные преобразователи изготовленные по технологии микросистемной техники (МЭМС). Все эти работы привели к существенным улучшениям метрологических и эксплуатационных характеристик средств измерений низких абсолютных давлений газа. Однако, в трудах указанных учёных нет исследований, посвященных разработке эталонных вакуумметров, предназначенных для проведения межлабораторных и международных сличений с целью установления эквивалентности государственных первичных эталонов.

В рамках работы были сформулированы цель и задачи исследования.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности метрологического обеспечения в области измерений низкого абсолютного давления газа, в том числе метрологических и технических характеристик эталонных вакуумметров, за счёт совершенствования метода измерения давления газа, развития приборной базы, разработки и автоматизации процедур поверки, калибровки и сличений вакуумметров.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели был сформулирован и решался ряд задач, направленных на разработку и исследование эталонного вакуумметра, с техническими и метрологическими характеристиками, не уступающими уровню аналогичных эталонных вакуумметров, а также разработку программно-аппаратного комплекса для автоматизации процедур поверки и сличений вакуумметров:

- провести анализ существующих эталонных вакуумметров, основанных на различных методах измерения низкого абсолютного давления газа. Определить целевые метрологические и технические характеристики разрабатываемого эталонного вакуумметра, обеспечивающие метрологическую прослеживаемость результатов измерения приборов к государственным первичным эталонам согласно государственным поверочным схемам в области измерений низкого абсолютного давления;

- выбрать и обосновать физико-математическую модель нового способа измерения абсолютного давления газа для совершенствования деформационного метода измерения давления газа, исключая влияние на результат измерения значения остаточного давления в сравнительной камере и температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя деформационного вакуумметра, с обеспечением требований государственных поверочных схем в области измерений низкого абсолютного давления, при уменьшении массогабаритных характеристик вакуумметра, увеличении стойкости к внешним механическим воздействиям;

- разработать научно-методические и технологические принципы изготовления первичных измерительных преобразователей, основанных на новом способе измерения давления, изготовить экспериментальный образец транспортируемого эталонного вакуумметра;

- исследовать метрологические характеристики экспериментального образца разработанного эталонного вакуумметра, включая составляющие неопределённости результата измерений;

- разработать научно-методические и технологические принципы построения, алгоритмы программно-аппаратного комплекса, включающего разработанный эталонный вакуумметр, повышающего эффективность процедур поверки и калибровки вакуумметров путём автоматизации данных процедур.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается в том, что:

- предложен, реализован и исследован деформационно-частотный способ измерения низкого абсолютного давления газа, исключающий влияние на результат измерения значения остаточного давления в сравнительной камере и температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя деформационного вакуумметра, с обеспечением требований государственных поверочных схем в области измерений низкого абсолютного давления, при уменьшении массогабаритных характеристик вакуумметра и увеличении стойкости к внешним механическим воздействиям;

- предложена и обоснована физико-математическая модель первичного измерительного преобразователя для осуществления деформационно-частотного способа измерения низкого абсолютного давления газа, разработанная с учётом анализа изотермических, адиабатических газовых процессов и колебательного процесса, позволяющая определить расчётный коэффициент преобразования;

- разработаны научно-методические принципы и технологические решения для изготовления конструкции первичного измерительного преобразователя вакуумметра, реализующие деформационно-частотный способ измерения низкого абсолютного давления газа, включая алгоритм расчёта параметров конструкции;

- разработаны и обоснованы научно-методические принципы технических решений программно-аппаратного комплекса, включающего эталонный вакуумметр, повышающих эффективность процедур поверки и калибровки вакуумметров, путём автоматизации данных процедур.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что:

- разработаны методика расчёта параметров первичного измерительного преобразователя и оригинальная конструкция транспортируемого эталонного вакуумметра, основанного на новом способе измерения низкого абсолютного давления газа, что позволило улучшить технические характеристики: уменьшены габаритные размеры более чем в 1,5 раза и масса более чем в 8 раз, снижено энергопотребление и стоимость изготовления более, чем в 2 раза, время выхода на режим измерения сокращено почти в 2 раза по сравнению с существующими эталонными вакуумметрами;

- исследован экспериментальный образец разработанного транспортируемого эталонного вакуумметра, основанного на новом способе измерения низкого абсолютного давления газа с улучшенными метрологическими характеристиками: уменьшена неопределенность измерений в 1,5 раза по сравнению с аналогичными эталонными вакуумметрами, исключён ряд поправок, характерных для современных эталонных деформационных вакуумметров, а также получено значение относительной погрешности измерений, которая меньше в 2–3 раза погрешностей рабочих эталонов второго разряда согласно государственных поверочных схем для средств измерений низкого абсолютного давления газа;

- разработан, изготовлен, исследован и внедрён на предприятиях АО «Гирооптика» и ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» программно-аппаратный комплекс, включающий эталонный вакуумметр, позволивший автоматизировать и сократить более чем в 1,5 раза общее время процедуры поверки и калибровки средств измерений низкого абсолютного давления газа, получен сертификат соответствия программного обеспечения «Калибровка вакуумметров 2310-2020».

**Методология и методы диссертационного исследования.** При решении задач исследования были применены: теоретический анализ метрологического обеспечения в области измерений низкого абсолютного давления газа, синтез при разработке нового способа измерений низкого абсолютного давления газа и устройства для его осуществления, аналитический метод при построении физической и математической модели устройства для осуществления нового способа измерения давления газа, экспериментальные методы при исследовании метрологических характеристик экспериментального образца эталонного вакуумметра, включая методы статистической обработки результатов измерений.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Преобразование абсолютного давления газа в значение собственной частоты автоколебаний объёма измерительной камеры первичного измерительного преобразователя вакуумметра позволило исключить влияние на результат измерения остаточного давления в сравнительной камере, а также температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя деформационного вакуумметра, уменьшить допускаемую погрешность измерений в 1,5 и более раз по сравнению с серийно выпускаемыми средствами измерений, обеспечить требования государственных поверочных схем в области измерений низкого абсолютного давления, при уменьшении массогабаритных характеристик вакуумметра и увеличении стойкости к внешним механическим воздействиям.

2. Применение разработанного деформационно-частотного первичного измерительного преобразователя в составе эталонного вакуумметра обеспечило его метрологические характеристики, превышающие соответствующие характеристики существующих аналогов:

- диапазон измерений 10 – 10000 Па;
- допускаемую относительную погрешность измерений  $\pm 2 \%$ ;
- относительную расширенную неопределённость результата измерения абсолютного давления газа  $U_{0,95} = 1,2 \%$ .

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается корректностью применения математических методов моделирования, анализа и современных методов обработки экспериментальных данных, использованием самых современных средств измерений, а также положительными результатами измерений, обсуждением основных полученных результатов исследований на научно-практических конференциях, семинарах и симпозиумах, публикацией их в ведущих рецензируемых изданиях. При исследовании метрологических характеристик, для экспериментальных работ применялось поверенное и калиброванное оборудование, валидированные методики калибровки и поверки вакуумметров.

**Область исследования.** Диссертационная работа посвящена научным и техническим исследованиям и разработкам в области измерений низкого абсолютного давления газа, в частности эталонным вакуумметрам. Область исследования соответствует паспорту специальности 2.2.4. – «Приборы и методы измерения (по видам измерений)», а именно, следующих пунктов: «п.1. Создание новых научных, технических и нормативно-технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции, связанных с измерениями механических величин, времени и частоты, тепловых величин, электрических и магнитных величин, аналитических и структурно-аналитических величин (состава,

свойств и структуры веществ и материалов). п.2. Совершенствование научно-технических, технико-экономических и других видов метрологического обеспечения измерений для повышения эффективности производства современных изделий, качество которых зависит от точности, диапазонности, воспроизводимости измерений величин, перечисленных в п.1, а также их сохраняемости на заданном промежутке времени. п.3. Совершенствование научно-технических, технико-экономических, оперативных (временных) показателей метрологического обеспечения соответствующих систем и производств. п.5. Разработка или совершенствование существующих методов и способов обеспечения единства измерений в области измерений, относящихся к п.1»

**Личный вклад автора.** Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Автором проведён обзор и анализ метрологических характеристик рабочих эталонов государственных поверочных схем в области измерений низкого абсолютного давления газа, а также характеристик существующих эталонных вакуумметров по методам измерения. Обоснованы направления разработки отечественного транспортируемого эталонного вакуумметра, определены целевые характеристики эталонного вакуумметра. Автор исследовал новый способ измерения низкого абсолютного давления газа, заключающийся в измерении собственной частоты автоколебаний пластины-осциллятора, установленной на упругом механическом подвесе, пропорциональной давлению исследуемого газа, заполняющего заданные зазоры между ней и двумя другими плоскопараллельными пластинами и обеспечивающий исключение погрешностей от величины остаточного давления в сравнительной камере и от эффекта температурной транспирации, характерных для современных эталонных деформационных вакуумметров, что позволило улучшить метрологические характеристики, уменьшить неопределенность измерений в 1,5 раза по сравнению с некоторыми существующими эталонными вакуумметрами,



построена модель устройства для осуществления нового способа измерения давления газа, выведено уравнение измерений, получен патент на группу изобретений (способ и устройство) под № RU 2749644 C1 «Способ измерения низкого абсолютного давления газа и устройство для его осуществления». Автор разработал методику расчёта параметров конструкции первичного измерительного преобразователя, реализующего новый способ измерения низкого абсолютного давления газа. Автор выполнил разработку состава эталонного вакуумметра, включающего измерительный блок, с функцией автоматического регулирования давления газа в измерительной установке. Автор выполнил исследования метрологических характеристик экспериментального образца эталонного вакуумметра, для экспериментальных работ применялось поверенное и калиброванное оборудование из состава первичного эталона, валидированные методики калибровки и поверки вакуумметров. Экспериментально и с помощью метода наименьших квадратов определено значение градуировочного коэффициента экспериментального образца разработанного эталонного вакуумметра; раскрыты значимые факторы, влияющие на результаты измерений разработанного эталонного вакуумметра.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и отдельные её результаты докладывались и обсуждались на:

- конференциях с международным участием «Вакуумная техника и технологии», Санкт-Петербург, 2017 – 2022 гг.;
- научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Республика Крым, сентябрь 2019 г.;
- семинарах НИО 231 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

**Публикации, структура и объём работы.** Основные положения диссертационной работы представлены в 10 печатных работах, из них 1 без соавторов, 3 статьи опубликованы в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК, из них 1 без соавторов, получен патент на группу изобретений (способ и устройство) под № RU 2749644 С1 «Способ измерения низкого абсолютного давления газа и устройство для его осуществления».

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка источников и приложения. Общий объем работы составляет 164 страницах машинописного текста, включая 64 рисунка, 10 таблиц и списка источников из 49 наименований. В диссертационной работе изложены и обобщены результаты работы, выполненной в период с 2016 по 2022 гг.

## ГЛАВА 1 Обзор и анализ рабочих эталонов государственных поверочных схем в области измерений низкого абсолютного давления газа

Единство измерений достигается путем точного воспроизведения и хранения единиц физических величин и передачи их размеров применяемым средствам измерений. Размеры единиц воспроизводятся, хранятся и передаются с помощью эталонов.

Средства измерения представляют собой технические средства, предназначенные для измерений и имеющие нормированные метрологические характеристики [5]. СИ (в нашем случае вакуумметры) представляют собой совокупность двух элементов: измерительного преобразователя давления [3] (первичный измерительный преобразователь, воспринимающий непосредственно измеряемое давление и преобразующий его в другую физическую величину - далее преобразователь) и измерительного блока (часть вакуумметра, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и содержащая блок питания и все электрические цепи, необходимые для работы вакуумметра).

Согласно данным Федеральной Государственной Информационной Системы (ФГИС) «Аршин» Росстандарта, диапазон измерений давления эталона ГЭТ 49-2016 находится в пределах от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^3$  Па, для ГЭТ 95-2020 находится в пределах от  $1 \cdot 10^{-1}$  до  $4 \cdot 10^4$  Па, а ГЭТ 101-2011 в пределах от  $1 \cdot 10^{-1}$  до  $7 \cdot 10^5$  Па, соответствующие данным диапазонам области обозначены на рисунке 1.1.

Давление, Па*10 <sup>n</sup> /n	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
ГЭТ 49-2016													
ГЭТ 101-2011													

Рисунок 1.1 – Диапазоны измерений ГЭТ 49-2016 и ГЭТ101-2011

Вертикальными линиями на рисунке обозначен общий диапазон измерений для ГЭТ 49-2016, ГЭТ 101-2011, который находится в пределах от  $1 \cdot 10^{-1}$  до  $1 \cdot 10^3$  Па. Целесообразно чтобы диапазон измерений разрабатываемого вакуумметра находился в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1}$  -  $1 \cdot 10^3$ , что позволит ему работать в составе всех вышеперечисленных эталонов.

Представим в виде графиков (рисунки 1.2-1.5) диапазоны измерения и относительную погрешность СИ используемых в качестве рабочих эталонов в составе государственных поверочных схем для СИ абсолютного давления.

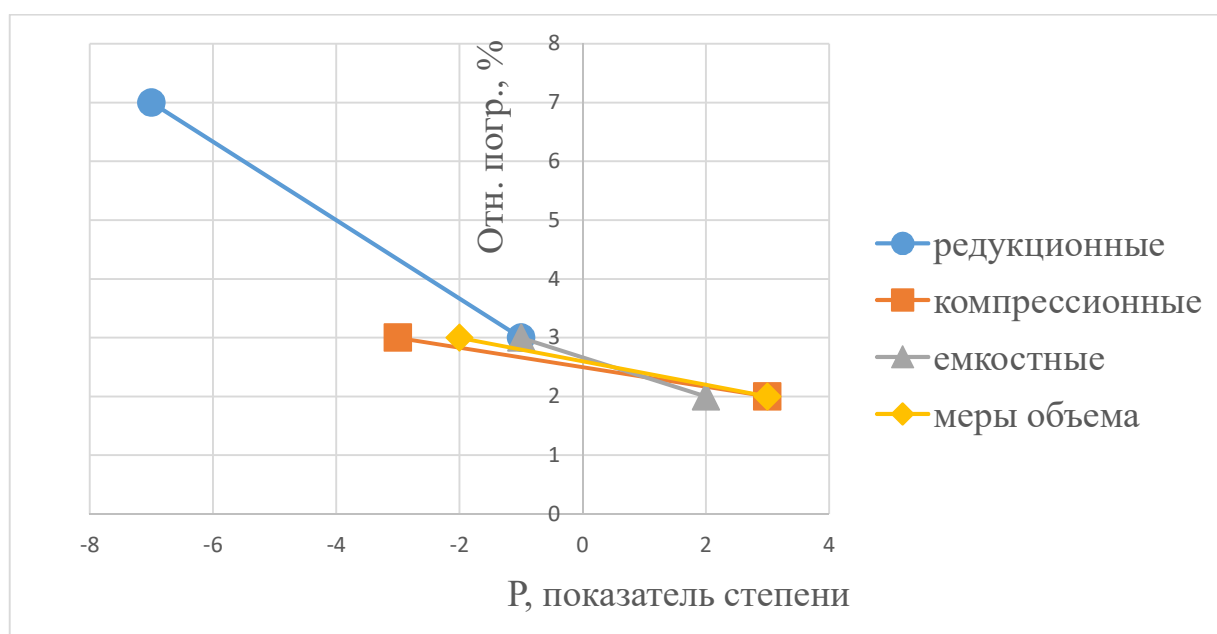


Рисунок 1.2 – Относительная погрешность рабочих эталонов первого разряда государственной поверочной схемы для СИ абсолютного давления газа в диапазоне  $1 \cdot 10^{-8}$  –  $1 \cdot 10^3$  Па

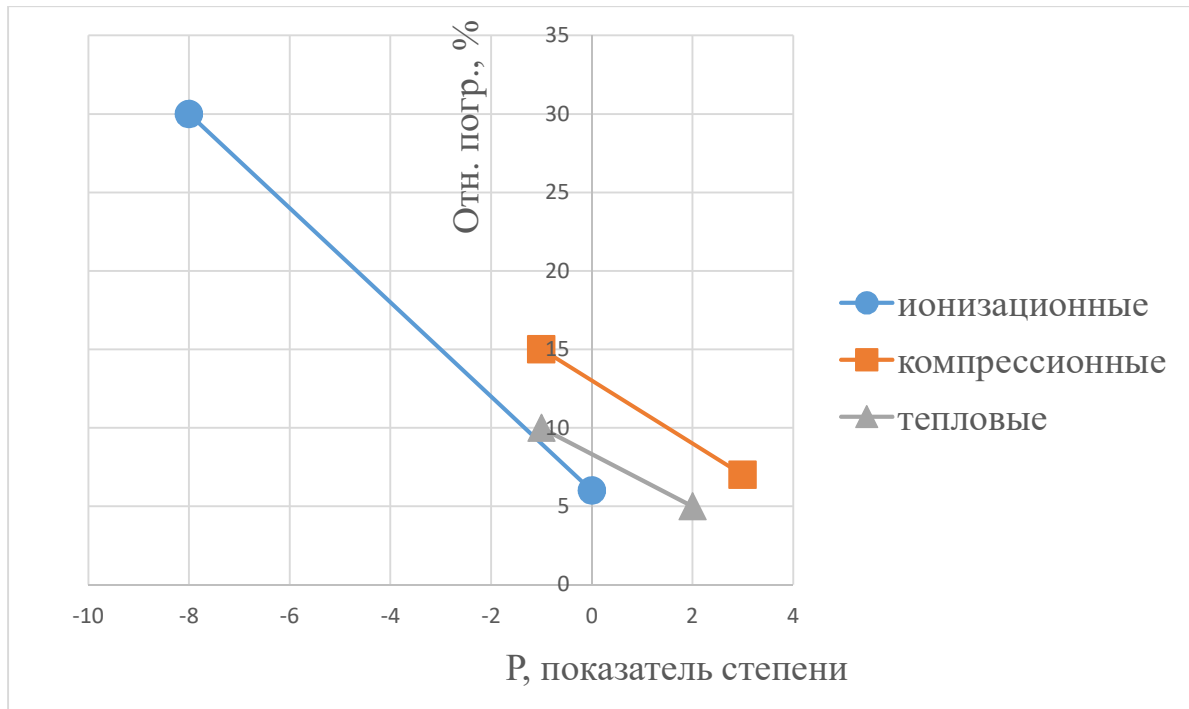


Рисунок 1.3 – Относительная погрешность рабочих эталонов второго разряда государственной поверочной схемы для СИ абсолютного давления газа в диапазоне  $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^3$  Па

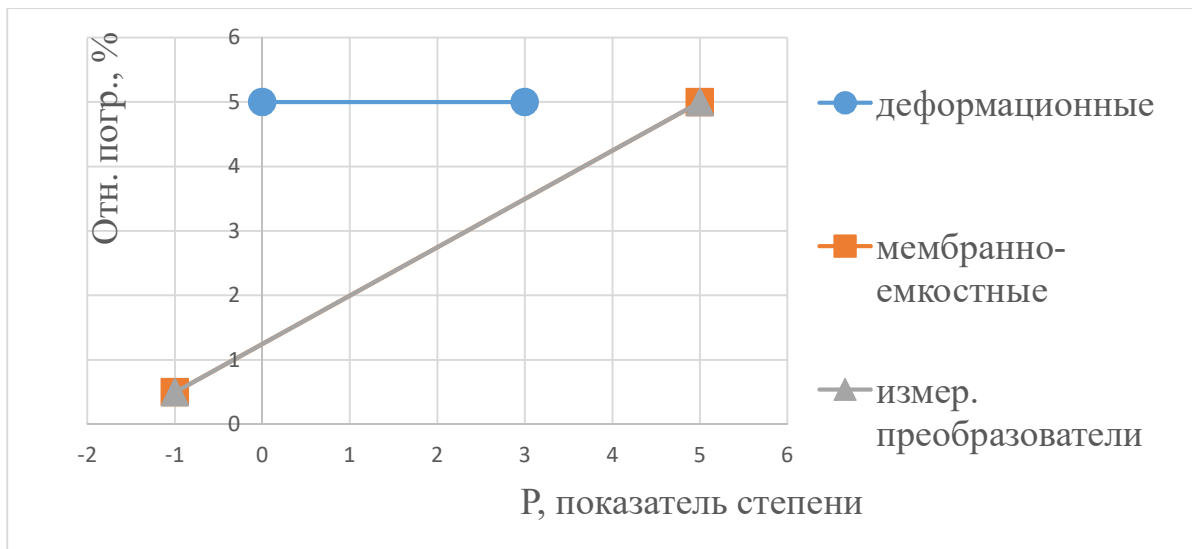


Рисунок 1.4 – Относительная погрешность рабочих эталонов первого разряда государственной поверочной схемы для СИ абсолютного давления газа в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$  Па (часть 1. Вакуумметры)

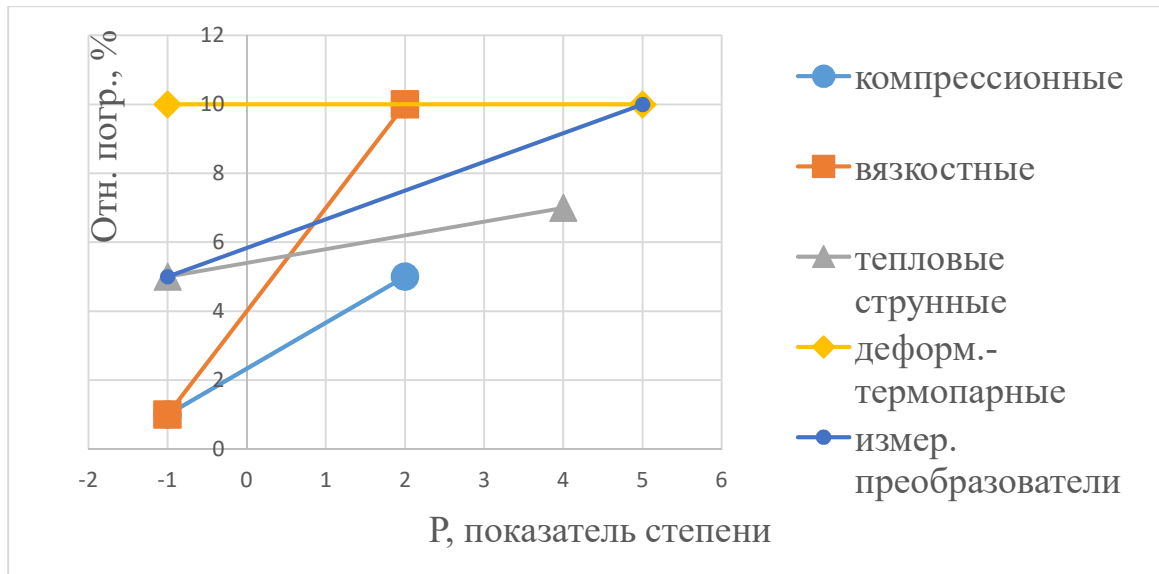


Рисунок 1.5 – Относительная погрешность рабочих эталонов второго разряда государственной поверочной схемы для СИ абсолютного давления газа в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$  Па (часть 1. Вакуумметры)

Таким образом, при разработке параметров конструкции первичного измерительного преобразователя для охвата наибольшего количества типов ЭВ и как область пересечения поверочных схем государственных эталонов будем использовать значение верхнего предела измерений давления  $P_{ВПИ} = 10^3$  Па как область пересечения рассмотренных государственных поверочных схем в области измерения низкого абсолютного давления газа.

Актуальное значение относительной погрешности для разрабатываемого ЭВ судя по представленным на рисунках графиках при  $P_{ВПИ} = 10^3$  Па составляет  $\Delta_0 = 2$  %. Например, для случая деформационных ЭВ первого разряда государственной поверочной схемы для СИ абсолютного давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$  Па (часть 1. Вакуумметры) с  $\Delta_0 = 5$  % это позволит увеличить точность в 2,5 раза.

## 1.1 Обзор метрологических и технических характеристик рабочих эталонов государственных поверочных схем по методам измерений низкого абсолютного давления

Для современной вакуумной техники характерен диапазон  $10^{-12} - 10^5$  Па. Измерение давлений с достаточной точностью в таком диапазоне, невозможно одним средством измерения и одним методом измерения. Для обеспечения достаточных метрологических характеристик в таком широком диапазоне давления газа применяются различные по методу измерения типы вакуумметров. В настоящее время по методу измерения низких абсолютных давлений выделяют следующие типы вакуумметров [6], которые изображены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Классификация вакуумметров по методу измерений низких абсолютных давлений

На рисунке 1.7 показаны диапазоны измерений давлений вакуумметров различных методов измерений абсолютных давлений.

Давление, Па	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
Метод измерения	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Деформационный												
Жидкостный												
Тепловой												
Ионизационный												
Вязкостный												

Рисунок 1.7 – Диапазоны измерений давлений в зависимости от метода измерения вакуумметров

Как видно из рисунка для интересующего нас диапазона измерений эталонов ГЭТ 49-2016 и ГЭТ101–2011 в качестве рабочих эталонов могут использоваться все типы вакуумметров.

Для понимания тенденций в области приборостроения СИ вакуума, ниже приведен обзор СИ по методам измерения, в том числе устаревших и не применяющихся в настоящее время, а также приведены метрологические характеристики вакуумметров, прошедших испытания с целью утверждения типа за последнее десятилетие и сведения о которых внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (ФИФ) [7].



## 1.1.1 Деформационные вакуумметры

Деформационный метод основан на измерении деформации первичного измерительного преобразователя в зависимости от измеряемого давления газа. Деформационный метод позволяет проводить измерения, не зависящие от рода газа. В качестве первичного измерительного преобразователя в большинстве случаев используется мембранный узел, деформация которого измеряется с помощью механизмов, емкостным или индуктивным методами. Мембранные преобразователи применяют в диапазонах давления газа от  $10^{-1}$  –  $10^5$  Па. Однако, вследствие того, что показания линейны только в области малых относительных деформаций, то диапазон измерения таких преобразователей ограничен обычно 2 – 4 порядками [8]. Метрологические характеристики современных мембранно-емкостных вакуумметров используемых в качестве СИ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Метрологические характеристики деформационных мембранно-емкостных вакуумметров

Тип	Метрологические параметры		Отн. погр., %	Фирма изготовитель	№ ФИФ
	Диапазон показаний, Па	Диапазон измерений, Па			
CMR, CCR	$10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^5$	$10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^5$	$\pm(30..2)$	«Pfeiffer Vacuum GmbH», Германия	63021–16
CDG	10 – $1,33 \cdot 10^5$	10 – $1,33 \cdot 10^5$	$\pm 10$	«Inficon AG»	72859–18

Отечественная промышленность выпускает вакуумметр деформационный компрессионный ВК – 1 [9]. При периодическом сжатии объема газа в

компрессионной камере, измеряется деформация измерительной мембраны, пропорциональная измеряемому давлению газа. На рисунке 1.8 изображена схема преобразователя вакуумметра ВК–1.

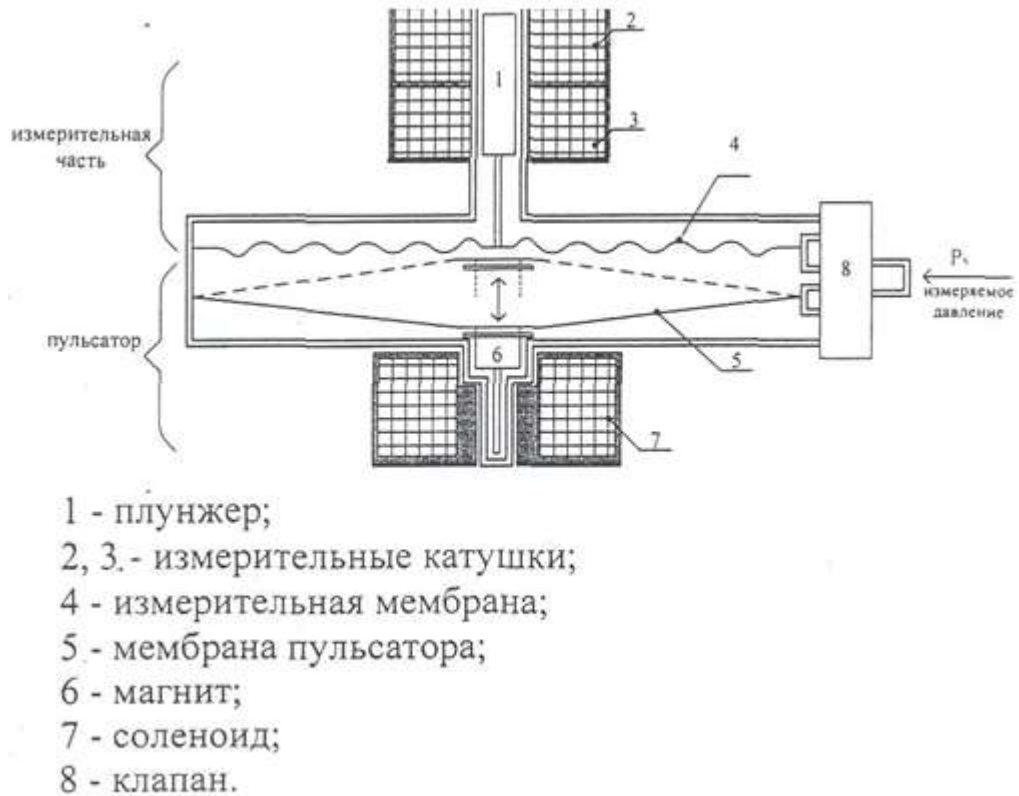


Рисунок 1.8 – Преобразователь вакуумметра ВК–1

Объём между мембранами, образует компрессионную камеру. Таким образом, деформируя объём компрессионной камеры мы, согласно уравнению для случая идеального газа, увеличиваем давление газа и вызываем смещение измерительной мембраны. При этом сила, действующая со стороны газа на измерительную мембрану пропорциональна величине деформации объёма, то есть является упругой силой. Измеряя смещение измерительной мембраны, мы можем измерить данную упругую силу, которая пропорциональна измеряемому давлению газа. Из недостатков данного способа можно выделить зависимость чувствительности вакуумметра от величины деформации объёма газа.

Устранить недостатки данного способа можно изменив способ измерения упругой силы со стороны газа, а именно вместо измерения смещения измерительной мембраны, измерять собственную частоту автоколебаний объема газа, пропорциональную коэффициенту упругости (отношению упругой силы к величине деформации объема газа). Блок измерения обеспечивает управление механическими элементами конструкции преобразователя (клапанами), преобразует сигнал, поступающий от преобразователя, в величину измеряемого давления с отображением его на отсчетном устройстве.

Основные метрологические характеристики:

диапазон измерений, Па 0,133 – 133,3;

приведенная погрешность в диапазоне измерения 0,13 – 20,0 Па, %  $\pm 3$ ;

относительная погрешность в диапазоне 20 – 133,3 Па, %  $\pm 1,5$ .

По совокупности точностных и эксплуатационных (вес, время подготовки к измерению и тп.) характеристик можно сделать вывод, что СИ, основанные на деформационном методе, могут быть применены в качестве эталонов первого и второго разряда для хранения и передачи единицы давления газа.

Из деформационных вакуумметров в качестве эталона первого разряда используются мембранно-емкостные вакуумметры. В качестве чувствительного элемента первичного измерительного преобразователя используется плоская, металлическая или керамическая диафрагма (мембрана), разделяющая преобразователь на объём, в котором поддерживается остаточное давление, не превышающего  $10^{-6}$  Па, например, при помощи химического газопоглотителя, и объём с измеряемым давлением, деформирующим мембрану, что приводит к изменению величины электрической ёмкости между мембраной и измерительными электродами.

Одним из лидеров в области производства мембранно-емкостных вакуумметров является компания «MKS Instruments» (США), выпускающая вакуумметры Баратрон [10], которые зарекомендовали себя как высокоточные и стабильные СИ эталонного уровня. В международных сличениях национальных эталонов в области низких абсолютных давлений в основном используются именно эти вакуумметры в качестве эталонов сравнения. Внешний вид вакуумметра приведен на рисунке 1.9.

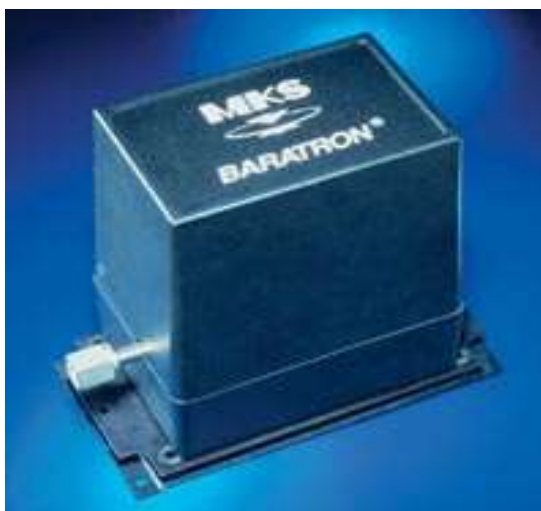


Рисунок 1.9 – Вакуумметр Баратрон

В России в 2006 году проведены испытания этих вакуумметров с целью утверждения типа СИ. Первичный измерительный преобразователь вакуумметра Баратрон состоит из объёма, разделенного на две части натянутой диафрагмой, плоскопараллельно которой расположены измерительные электроды, образующие плечи ёмкостного измерительного моста. Ёмкостной мост «сбалансирован» (выходное напряжение равно «нулю») в момент, когда давление газа по обеим сторонам мембраны одинаково. Электрический сигнал (напряжение) дисбаланса пропорционален измеряемому давлению газа.

Для уменьшения влияния температуры на показания вакуумметра Баратрон компания «MKS Instruments» используется температурная компенсация и термостатирование первичного измерительного преобразователя. В моделях 690 и 698 удалось получить значение температурного коэффициента дрейфа нуля

менее, чем  $0,0004\%$  ВПИ/ $^{\circ}\text{C}$ . Однако термостатирование приводит к неравномерности температур в измерительной вакуумной системе и требует учета эффекта температурной транспирации при измерении давления газа.

Вакуумметры Баратрон являются надежными и долговечными приборами при условии правильного обращения с ними. Мембранно-емкостные манометры Баратрон 690 и 698 отличаются использованием новой технологии в изготовлении первичных измерительных преобразователей, что обеспечивает им лучшую компенсацию по температуре и лучшую стойкость к превышению давления. Согласно описанию типа вакуумметров Баратрон модификации 690А, 698А их погрешность (основная относительная погрешность) составляет от  $2\%$  до  $0,05\%$  от показания при широком диапазоне измерения давлений:

НПИ  $3 \cdot 10^{-3}$  ..  $30$  Па и ВПИ  $10..34 \cdot 10^5$  Па. Однако, вследствие пропорциональности деформации измерительных мембран измеряемому низкому абсолютному давлению и ограниченной снизу чувствительности измерительного блока, толщина измерительной мембраны должна быть пропорциональна измеряемому низкому абсолютному давлению. В связи с чем диапазон измерения перекрывается несколькими первичными измерительными преобразователями с измерительными мембранами разной толщины, отдельно приобретаются преобразователи с ВПИ до  $13$  Па, до  $1300$  Па, до  $13000$  Па и тд. Перечень модификаций состоит из моделей со следующими ВПИ:  $0.1$ ,  $1$ ,  $10$ ,  $100$ ,  $1000$ ,  $5000$ ,  $10000$ ,  $15000$ ,  $20000$ ,  $25000$  Торр ( $1$  Торр  $\approx 133$ Па), таким образом, в диапазоне измерений абсолютного давления до  $\approx 3 \cdot 10^6$  Па для обеспечения максимально возможной точности требуется десять первичных измерительных преобразователей типа 690А, то есть каждый из преобразователей может обеспечить измерение низкого абсолютного давления только в пределах **2-3 декад** (порядков). Также, известно, что линейность показаний преобразователей давления основанных на деформационном методе сохраняется в пределах  $2..3$  порядков [2].

Из недостатков деформационных мембранно-емкостных манометров Баратрон можно выделить:

- иностранное производство и санкционные ограничения к поставке на территорию РФ;

- вес и размер, несколько первичных измерительных преобразователей с ВПИ до 13 Па, до 1300 Па, до 13000 Па и тд., перекрывающих диапазон измерений, электронный измерительный блок, кабели, упаковка, могут достигать 10 кг и более, что, учитывая правила перевозки ручной клади авиакомпаний (Аэрофлот, UTair и др.: до 10 кг, 55×40×20 см), затрудняет транспортировку эталонного СИ к месту проведения калибровки, поверки.

### 1.1.2 Жидкостные вакуумметры

В жидкостном методе вес столба жидкости уравнивается разностью давлений. Жидкостные вакуумметры применяют в диапазонах давления газа от  $10^{-1} - 10^5$  Па. Диапазон преобразователя зависит от плотности рабочей жидкости (вода, масло, ртуть) и ограничен обычно 3-4 порядками.

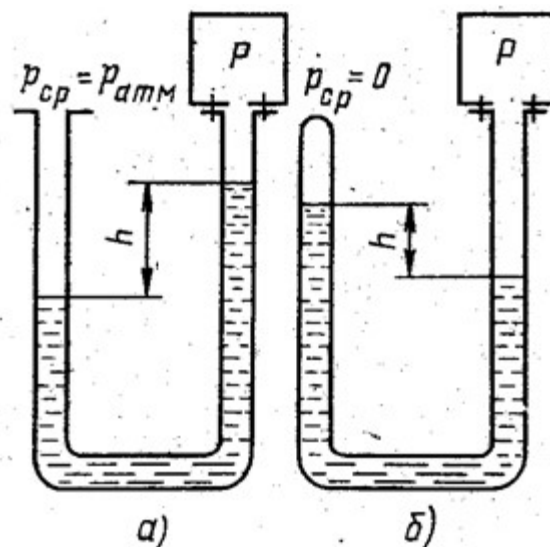
Наиболее распространёнными жидкостными (гидростатическими) преобразователями являются жидкостные манометры с открытым (Рисунок 1.10 а) и закрытым коленом (рисунок 1.10 б) [11] [12]. Измеряемое этими манометрами дифференциальное давление ( $P$  и  $P_{cp}$ ) пропорционально весу столба с перепадом уровней жидкости  $h$ :

$$P - P_{cp} = \rho gh$$

$g$  – ускорение земного притяжения;

$\rho$  – плотность жидкости.

Для измерения абсолютного давления газа, в закрытом колене преобразователя обеспечивают величину давления  $P_{cp} \approx 0$  (на несколько декад меньше измеряемого), таким образом показания манометра не зависят от величины атмосферного давления.



а) закрытое колено, б) открытое колено

Рисунок 1.10 – Жидкостный манометр [13]

В качестве рабочей жидкости в зависимости от требуемого диапазона измерения давления используют ртуть, масло или воду. Перед работой требуется тщательная дегазация рабочей жидкости. Пределы измерения ртутных манометров  $10^3$ – $10^5$  Па, а масляных  $1$ – $10^4$  Па [2]. Абсолютная погрешность при визуальном отсчете уровня  $h$  может быть доведена до 0,1 мм. В эталонах воспроизведения единицы давления для более точного измерения уровня  $h$  применяют лазерно-интерференционный метод [14], а также учитывают непостоянство величины поверхностного натяжения, изменений плотности, температурных градиентов рабочей жидкости и т. д [15].

Также известны гидростатические манометры с предварительным сжатием газа (компрессионные) (рисунок 1.11) [16].



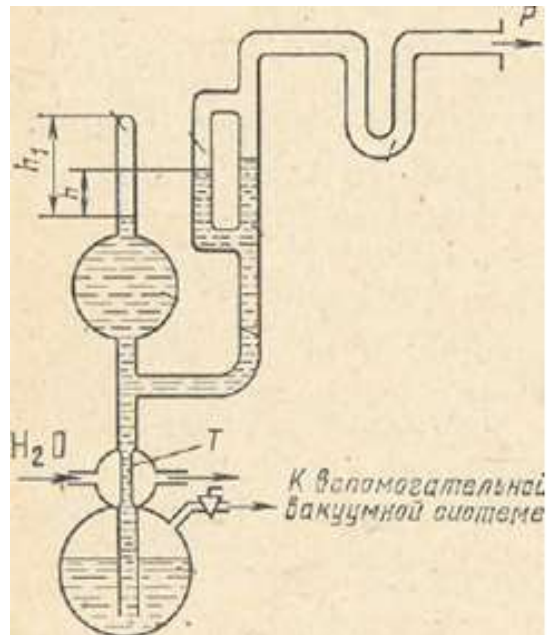


Рисунок 1.11 – Компрессионный манометр [13]

Диапазон измерения компрессионных манометров  $10^{-3}$  –  $10^1$  Па. Гидростатические компрессионные манометры широко использовались в 60-80х годах. В настоящее время в метрологической практике они практически не применяются.

По точностным характеристикам СИ основанные на жидкостном методе применяются в качестве эталона воспроизведения единицы давления во многих странах, включая Россию. Но эксплуатационные характеристики, такие как: вес (важно при транспортировании), время подготовки к измерению и др. ограничивают возможность применения данного метода в транспортируемых рабочих эталонах первого и второго разрядов.

## 1.1.3 Тепловые преобразователи

Метод основан на пропорциональности переноса тепла от абсолютного давления газа [17]. Тепловые вакуумметры применяют в диапазоне  $10^{-1} - 10^5$  Па.

Например, измеряется перенос тепла металлической проволоки к молекулам газа. Через металлическую проволоку пропускается электрический ток  $I$ . Уравнение теплового баланса такого средства измерения можно представить в следующем виде [2]:

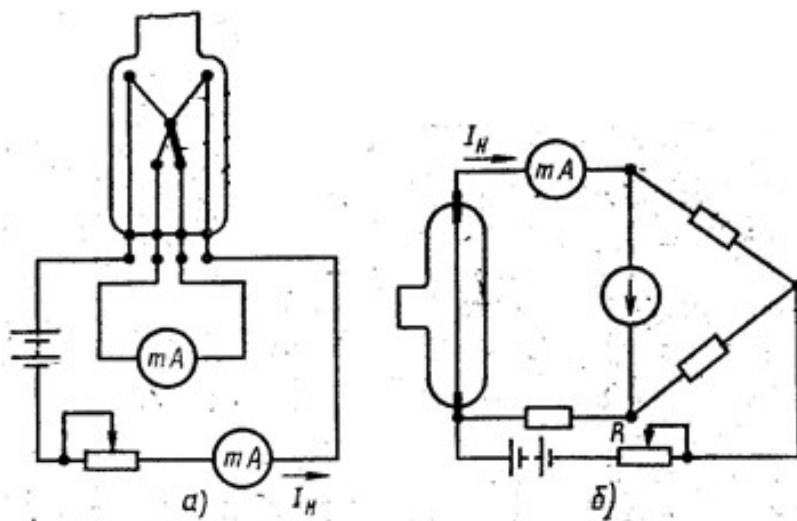
$$I^2 R = E_K + E_T + E_H + E_M$$

$I$  – сила электрического тока, проходящего через проволоку;

$R$  – электрическое сопротивление материала проволоки;

$E_K + E_T + E_H + E_M$  – конвективные потери тепла, потери в следствии теплопроводности газа, излучения и теплопроводности проволоки.

Температура проволоки зависит от измеряемого давления газа. В зависимости от способа измерения температуры вакуумметры делятся на термопарные и преобразователи сопротивления (рисунок 1.12) [11].



а) – термопарного, б) – преобразователя сопротивления

Рисунок 1.12 – Схемы тепловых преобразователей [6]

Из недостатков тепловых вакуумметров можно выделить:

- инерционность показаний, до нескольких секунд при низких давлениях;
- зависимость показания тепловых вакуумметров от рода газа, значительная при давлениях газа выше 100 Па;
- зависимость показаний от температуры окружающей среды.

На рисунках 1.13 – 1.15 приведены различные типы манометрических преобразователей для тепловых вакуумметров.



Рисунок 1.13 – Преобразователь манометрический ПМТ-2



Рисунок 1.14 – Преобразователь термисторный ПМТ-М



Рисунок 1.15 – Преобразователь термисторный ПМТ-6-3

В России применяются следующие типы отечественных тепловых вакуумметров: термопарные ВТ-2А, ВТ-3, ВТ-6; тепловые блокировочные ВТБ – 1, 13ВТ3 – 003 (ВТБ-2).

Метрологические характеристики тепловых вакуумметров приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Метрологические характеристики тепловых вакуумметров

Типы	Диапазон показаний, Па	Диапазон измерений, Па	Отн. погр., %	Фирма изготовитель	№ ФИФ
VD	-	$5 \cdot 10^{-2} - 10^4$	$\pm(100..15)$	«Thyracont Vacuum Instruments GmbH», Германия	43629-10
VSP	$10^{-2} - 10^5$	$10^{-2} - 10^4$	$\pm(100..15)$	«Thyracont Vacuum Instruments GmbH», Германия	44060-10
APG	$10^{-2} - 10^5$	$10^{-2} - 10^3$	$\pm 20$	«Edwards Limited», Великобритания	44391-10
CVG101, CVM201	$10^{-2} - 1,33 \cdot 10^5$	$10^{-2} - 10^3$	$\pm(35..15)$	«InstruTech, Inc.», США	51328-12

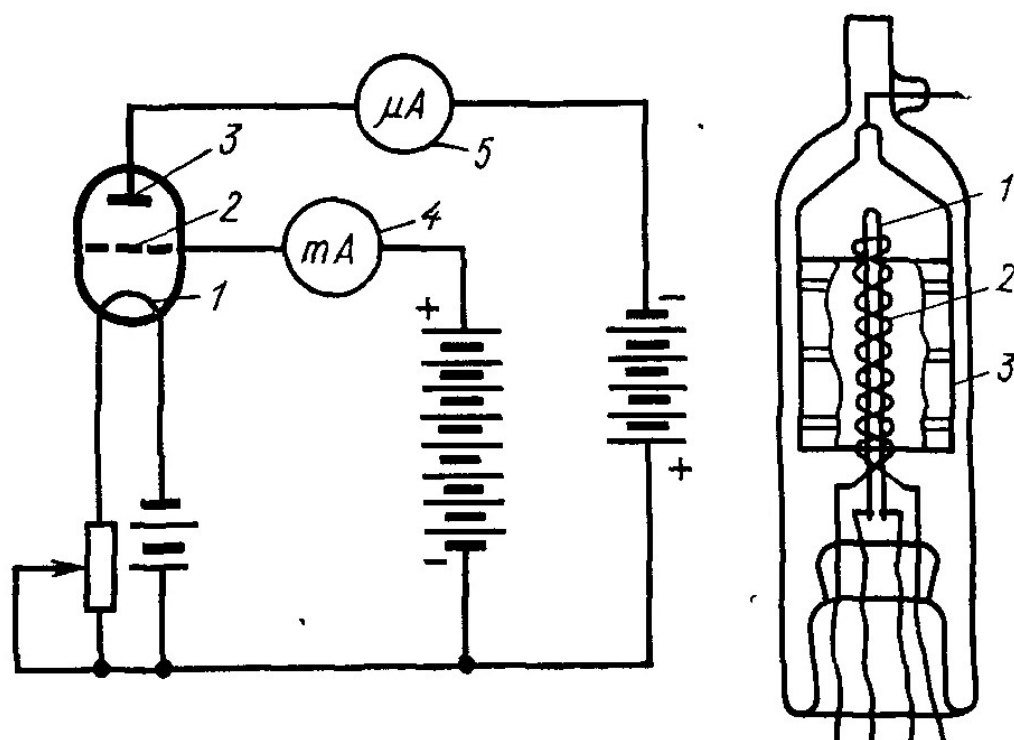
Продолжение таблицы 1.2

CVC-3000, VSP-3000, DC P-3000	–	$10^{-1} - 10^5$	$\pm(30..15)$	«VACUUBR AND+CO KG», Германия	51918–12
Televac 2A, 4A	$1,3 \cdot 10^{-1} - 1,3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-1} - 10^3$	$\pm 30$	«The Fredericks Company», США	56243–14
TPR, TPG 201, PPT 200	$10^{-2} - 10^5$	$10^{-2} - 10^3$	$\pm(50..30)$	«Pfeiffer Vacuum GmbH», Германия	63031–16
ERSTE- VAK	–	$5 \cdot 10^{-8} - 10^5$	$\pm(40..10)$	«Thyracont Vacuum Instruments GmbH», Германия	64910–16

Погрешность тепловых вакуумметров колеблется в пределах  $\pm 20\%$ , очевидно, что данные показатели не позволяют рассматривать возможность использования вакуумметров на базе тепловых преобразователей в качестве эталонных вакуумметров.

## 1.1.4 Ионизационные преобразователи

Ионизационный метод основан на зависимости между давлением газа и электрическим током между электродами, помещенными в газовую среду. На рисунке 1.16 показан эскиз ионизационного манометра ЛМ – 2 и электрическая схема его включения.



1 — катод, 2 — сетка анод; 3 — коллектор, 4, 5 — приборы контроля тока электронов и ионов

Рисунок 1.16 – Ионизационный манометр ЛМ-2 и схема его включения [6]

Ионизационные преобразователи в настоящее время используются в составе вакуумметров с широким диапазоном, в комбинации с тепловым преобразователем.

Метрологические характеристики широкодиапазонных вакуумметров приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Метрологические характеристики широкодиапазонных вакуумметров

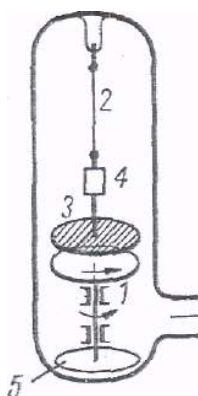
Типы	Диапазон показаний, Па	Диапазон измерений, Па	Отн. погр., %	Фирма и страна изготовитель	№ ФИФ
IGM402	$1,3 \cdot 10^{-7} - 1,33 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^{-7} - 10^3$	$\pm(25..15)$	«InstruTech, Inc.», США	51329–12
PKR, PBR, IMR, HPT, MPT	$5 \cdot 10^{-8} - 10^5$	$10^{-7} - 10^3$	$\pm(100..30)$	«Pfeiffer Vacuum GmbH», Германия	62158–15

Погрешность ионизационных вакуумметров колеблется в пределах  $\pm 25\%$ , можно сделать вывод, что данные показатели погрешности не позволяют рассматривать возможность использования вакуумметров на базе тепловых преобразователей в качестве эталонных вакуумметров.

### 1.1.5 Вязкостные преобразователи

Вязкостные манометры измеряют перенос количества движения и работают в диапазоне  $5 \cdot 10^{-5} - 10^5$  Па.

На рисунке 1.17 представлено устройство кинетомолекулярного (перенос движения непосредственно молекулами газа, приводящими в движение чувствительный элемент) манометра [18].



1 – вращающийся диск; 2 – нить; 3 – диск, подвешенный на нити;  
4 – зеркальце; 5 – диск магнитного привода

Рисунок 1.17 – Кинетомолекулярный манометр Ленгмюра – Дэшмана [13]

Количество движения, перенесенного от вращающегося диска к диску, подвешенному на нити зависит от концентрации молекул газа, а, следовательно, от измеряемого давления.

Используются также вязкостные (перенос движения от молекулы к молекуле, тормозящими чувствительный элемент) вакуумные манометры, в которых изменение скорости чувствительного элемента (вращающийся ротор или колеблющаяся нить), является функцией трения, обусловленного вязкостью газа, и пропорциональна его давлению. Для измерения изменения скорости может измеряться, например, время затухания амплитуды колебаний. Диапазон измерения давлений таких вязкостных вакуумметров заключается между  $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^2$  Па. Погрешность измерений таких вакуумметров может достигать 1 %.



Совокупность точностных и эксплуатационных характеристик вязкостных вакуумметров показывает возможность использования таких вакуумметров в качестве ЭВ первого или второго разряда.

Из вязкостных вакуумметров в качестве эталонных используется высокоточный вакуумметр SRG–2CE [19] компании «MKS Instruments». Принцип действия преобразователя описан ниже. В измерительном штифте присоединительного фланца располагается металлический шарик, свободно вращающийся в вакууме, также называемый ротором, движение которого замедляется из-за трения газа. В молекулярном диапазоне давлений относительное торможение шарика пропорционально давлению. Шарик имеет магнитную ось, совмещенную с осью вращения. Благодаря вращательным движениям, шарик вызывает переменное напряжение в укрепленных соответствующим образом съемных катушках измерительной головки, при этом частота данного напряжения пропорциональна угловой скорости шарика. Угловая скорость шарика непрерывно измеряется, на основании чего, определяется актуальное уменьшение числа оборотов. По данному уменьшению на основании отношения пропорциональности рассчитывается давление. Магнитная подвеска, стабилизация, привод и измерение числа оборотов шарика осуществляются при помощи, укрепленной на фланце измерительной головки, которая, в свою очередь, управляется электроникой. Оцифровкой сигнала измерения и расчётом относительного торможения управляет микропроцессор. Цифровая фильтрация позволяет без проблем работать с крайне низкими показателями относительного торможения на нижней границе диапазона давления. Измеренное давление отображается на цифровом индикаторе и при необходимости может регистрироваться с помощью встроенного принтера. Для оценки результатов измерения в распоряжение пользователя предоставлена статистическая программа.

Выше давления 1 Па, пропорциональность между давлением и изменением скорости значительно снижается. Это объясняется вязким трением и резко снижает надежность результатов измерения. Однако функция коррекции позволяет результативно использовать систему до  $10^2$  Па.

Негативное влияние остаточного торможения при низком давлении, обусловленного вихревыми потоками, также корректируется. На рисунке 1.18 изображена магнитная подвеска такого преобразователя.

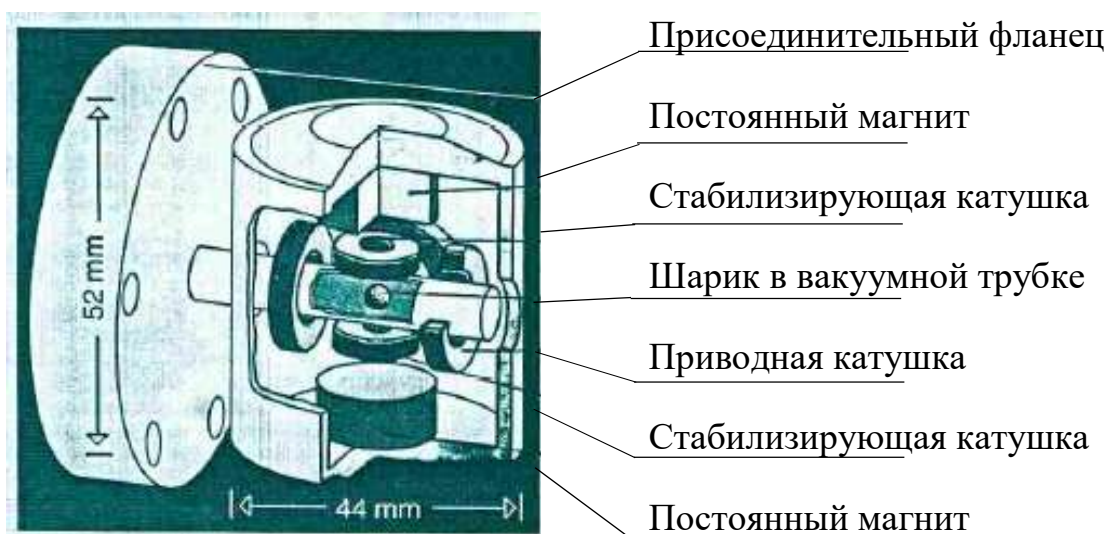


Рисунок 1.18 – Магнитная подвеска вязкостного манометра SRG–2CE

Шарик (специальная сталь, диаметр  $\approx 4,5$  мм) подвешивается вертикально между двумя постоянными магнитами в форме дисков. Положение равновесия шарика между двумя магнитами вдоль вертикальной оси, которая одновременно является осью вращения, нестабильно. Необходимая стабилизация происходит благодаря паре стабилизирующих катушек, симметрично расположенных над металлическим шариком и под ним. Такое положение катушек позволяет регистрировать каждое отклонение шарика от положения равновесия и создавать соответствующее встречно вращающееся поле.

Из-за различной шероховатости поверхности различные шариковые роторы неизбежно обладают различными показателями торможения. Разброс

составляет, как правило,  $\pm 1...5\%$  относительно шарика с идеальной поверхностью. Фирма MKS Instruments поставляет для SRG-2CE только откалиброванные шарики, калибровка подтверждается специальным сертификатом.

Метрологические характеристики вакуумметра:

- диапазон измерений, Па  $5 \cdot 10^{-5} - 100$ ;
- относительная погрешность
- в диапазоне  $5 \cdot 10^{-5} - 1$  Па, %  $\pm(5 - 1,3)$ ;
- в диапазоне  $1 - 100$  Па, %  $\pm 10$ .

Из недостатков вакуумметра SRG-2CE можно выделить:

- иностранное производство;
- большой вес (включая электронный измерительный блок, кабели, упаковка) достигает 6,5 кг;
- большой размер одного только электронного измерительного блока  $480 \times 380 \times 9$  см;
- большое значение погрешности в диапазоне  $1 - 100$  Па.

Также, в качестве ЭВ используется вакуумметр БОП отечественного производства предприятия «Аэроприбор – Восход», показанный на рисунке 1.19.



Рисунок 1.19 – Вакуумметр БОП

Принцип действия вакуумметра БОП основан на упругой деформации первичного измерительного преобразователя – резонирующего тонкостенного

цилиндра. Значение резонансной частоты колебаний первичного измерительного преобразователя имеет зависимость от давления газа.

Метрологические характеристики вакуумметра:

- диапазон измерений, Па  $5 \cdot 10^2 - 10^5$ ;
- абсолютная погрешность, Па  $\pm 10$ .

Из недостатков (для задачи поставленной в данной работе) вакуумметра БОП можно выделить:

- $P_{нпн} = 5 \cdot 10^2$  Па – не позволяющий перекрыть актуальный для данной работы диапазон измерения  $1 \cdot 10^1 - 1 \cdot 10^3$  Па;
- размер  $30 \times 30 \times 9$  см;
- большой вес 5 кг.

#### 1.1.6 Вывод к параграфу 1.1

Для интересующего нас  $P_{впн} = 10^3$  Па в качестве рабочих эталонов могут использоваться деформационные, жидкостные и тепловые типы вакуумметров.

## 1.2 Анализ характеристик вакуумметров

Для интересующего нас  $P_{ВПИ} = 10^3$  Па в качестве рабочих эталонов могут использоваться деформационные, жидкостные и тепловые типы вакуумметров.

Однако, тепловые вакуумметры не удовлетворяют требуемым точностным характеристикам определенных в данной работе. Жидкостные методы используются в составе эталонного вакуумметра, но эксплуатационные характеристики (вес, габариты, время подготовки к измерениям) не позволяют использовать данный метод при разработке транспортируемого рабочего эталона.

В результате проведенного обзора по методам измерений, можно сделать вывод о том, что по критерию точностей и эксплуатационных характеристик при разработке рабочего эталона 1 и 2 разряда для хранения и передачи единицы давления может быть использован деформационный метод.

Так как, линейность показаний преобразователей давления основанных на деформационном методе сохраняется в пределах 2..3 порядков, мы можем установить ширину диапазона измерения низкого абсолютного давления газа в разрабатываемом в данной работе вакуумметре равной 2–3 порядка, то есть значение нижнего предела измерения давлений составит  $P_{НПИ} = \frac{P_{ВПИ}}{10^2} = 10^1$  Па.

Отметим некоторые из недостатков деформационных вакуумметров (мембранно-ёмкостных, компрессионных), например, в случае компрессионного вакуумметра ВК–1, в котором изменение (деформация) величины объёма компрессионной камеры согласно уравнению состояния идеального газа приводит к изменению давления газа (адиабатический или изотермический процесс), то есть возникает упругая сила, которая действует на измерительную мембрану, конструкция первичного измерительного

преобразователя компрессионного (как и для случая мембранно-ёмкостного) вакуумметра сложна и содержит две герметичные камеры, а также несколько клапанов, что усложняет технологические требования к изготовлению.

Также для деформационных вакуумметров характерен недостаток в виде относительно большого веса и размера применяемых в настоящее время ЭВ можно устранить, используя первичные измерительные преобразователи, создаваемые по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). И в последние годы появляется информация о разработке таких преобразователей давления. Имеются патенты на такие разработки, опубликованные в Бюллетенях изобретений (№2.485.465 Бюл. 17, 2013 г.; №2.505.885 Бюл. №3, 2014 г., №2.512.142 Бюл. №10, 2014 г., №2.609.223 Бюл.4, 2017 г. и др.).

Работы по разработке таких приборов начали проводиться и во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» с 2014 г. Ниже приводится краткое описание таких преобразователей.

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» совместно с ООО «Тепловые микросистемы» проводит работы по разработке и совершенствованию тепловых вакуумметров типа ТМ-ВТИ (изготовленных по технологии МЭМС в ООО «Тепловые микросистемы»). Предварительные испытания вакуумметра в диапазоне  $0,1 - 10^4$  Па показали перспективность его применения в качестве СИ, но не в качестве эталонного вакуумметра.

В одной из разработок [20] применен деформационный компенсационный метод измерения [21]. В предлагаемой конструкции перепад давления, созданный компрессией, измеряется компенсационным методом: уравниванием сил, вызванных перепадом давления газа, и электростатической силой, действующей на мембрану. Это позволяет дополнительно повысить точность измерения, исключив влияние нестабильности механических характеристик мембраны, получить строго линейную или квадратичную функцию преобразования.

Первичный измерительный преобразователь измерителя изготавливается по технологии МЭМС. Данная технология позволяет методом размерного травления монокристаллического кремния изготавливать мембраны толщиной 1-3 мкм со стабильными механическими характеристиками. Такая мембрана в сочетании с методом электростатической компенсации дает возможность измерять перепады давления от  $10^{-2}$  до 100 Па с погрешностью 10 %.

Первичный измерительный преобразователь изготовленный по технологии МЭМС, основанный на измерении дифференциального давления газа сравнением с электростатическим давлением, представляет собой измерительную и сравнительную камеры, разделённые металлической мембраной (рисунок 1.20).

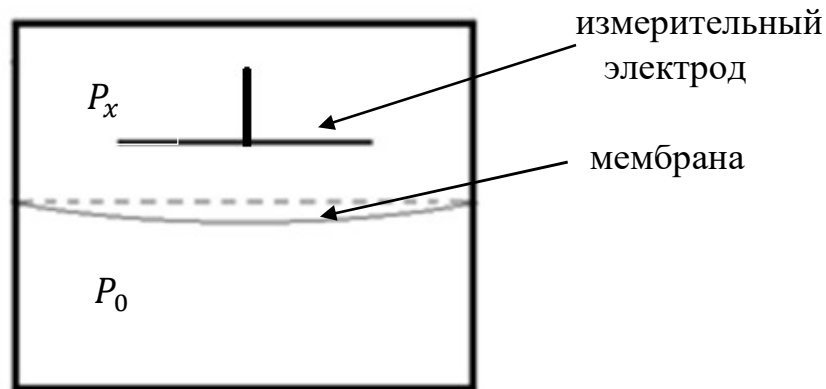


Рисунок 1.20 – Конструкция компенсационного преобразователя

Деформация измерительной мембраны, возникающая при подаче измеряемого давления газа  $P_x$ , компенсируется электростатическим давлением, возникающим при подаче постоянного напряжения на измерительный плоскопараллельный электрод, расположенный плоскопараллельно мембране на расстоянии  $Z$ .

Во втором типе первичного измерительного преобразователя, изготовленного по технологии МЭМС, измеряется величина вязкости газа при поступательных колебаниях движения пластины. Конструкция первичного измерительного преобразователя данного типа поясняется на рисунке 1.21.

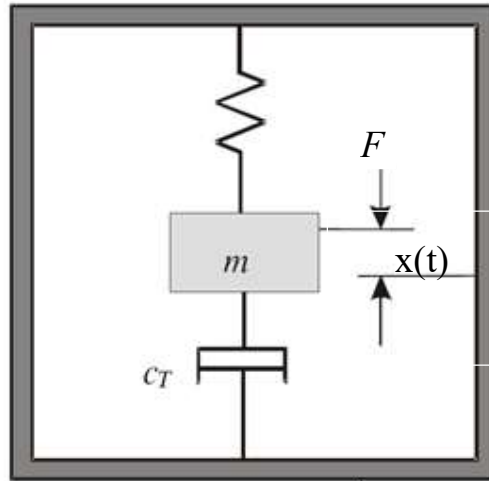


Рисунок 1.21 – Конструкция первичного измерительного преобразователя

Пластина массой  $m$  на механическом подвесе жесткостью  $k$  совершает вынужденные гармонические колебания  $x(t)$  под действием внешней силы  $F$ . Количество энергии, затрачиваемой на работу против сил трения со стороны газа пропорционально абсолютному давлению газа. Результаты градуировки вязкостного преобразователя представлены в виде графика на рисунке 1.22.

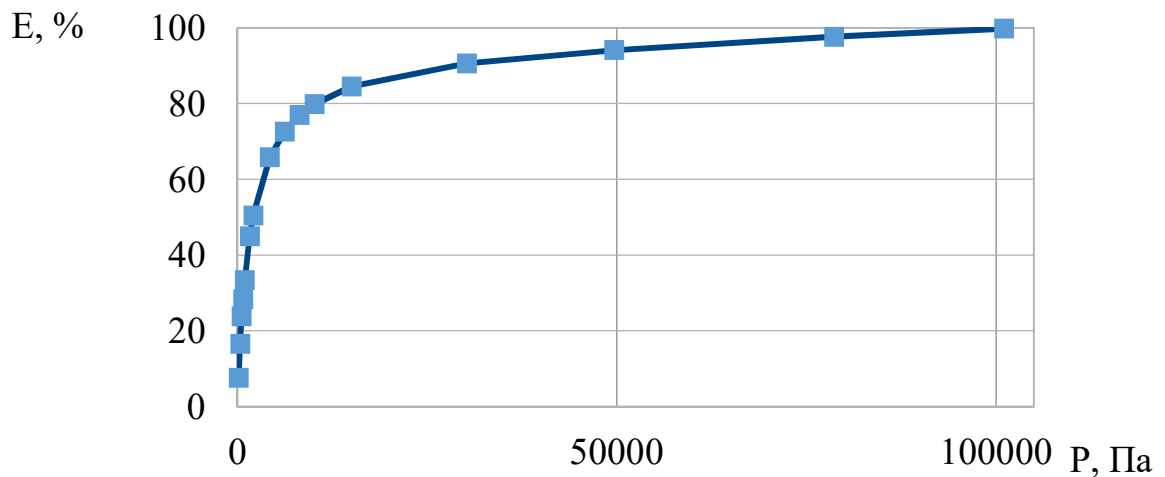


Рисунок 1.22 – Зависимость величины энергопотерь от давления

По оси  $x$  отмечено давление газа в паскалях, по оси  $y$  – величина потерь энергии движения в условных единицах (%).



Чувствительность метода (первая производная функции зависимости энергопотерь от давления) в зависимости от абсолютного давления газа показана на рисунке 1.23.

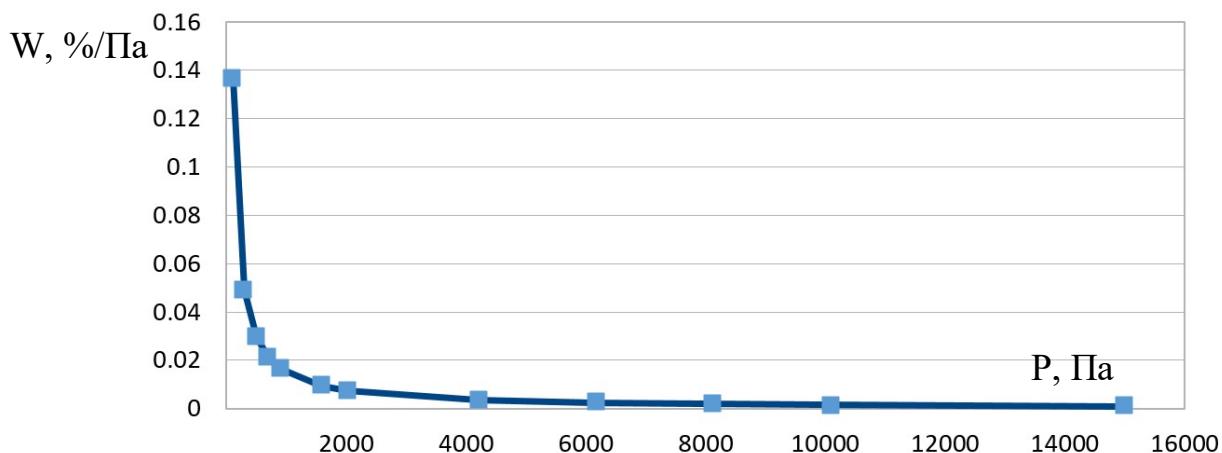


Рисунок 1.23 – Чувствительность метода в зависимости от абсолютного давления газа

Из графика видно, что чувствительность снижается на два порядка при давлениях больше 10000 Па. Точностные характеристики, полученные в ходе исследований данных первичных измерительных преобразователей, не позволяют использовать данные вакуумметры в качестве эталонных вакуумметров.

В ходе исследования МЭМС вакуумметров во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» был предложен новый способ измерения давлений газа [22] [23] [24] [25], основанный на законе Бойля-Мариотта и основанный на измерении упругих свойств объема газа пропорциональных давлению, а именно на измерении собственной частоты автоколебаний измерительного объема газа первичного измерительного преобразователя. Данный способ, отнесенный к деформационным методам (так как измеряется параметр деформации первичного измерительного преобразователя), показал работоспособность и достаточные для эталонного вакуумметра метрологические характеристики (относительная погрешность не более 2 %) в интересующем нас диапазоне 10 – 1000 Па и в данной работе применен

в первичном измерительном преобразователе, входящем в состав деформационно-частотного МЭМС вакуумметра.

### 1.2.2 Выводы к параграфу 1.2

В результате проведённых в параграфе исследований были получены следующие результаты и выводы:

Так как ширина диапазона измерения низкого абсолютного давления газа вакуумметрами на основе деформационного метода составляет 2-3 порядка, то значение нижнего предела измерения давлений составит  $P_{\text{нпи}} = \frac{P_{\text{впи}}}{10^2} = 10^1 \text{ Па}$ .

Применение МЭМС технологий при разработке и создании отечественного эталонного вакуумметра позволяет улучшить эксплуатационные характеристики путем понижения общего веса и размеров прибора. В диапазоне давлений 10 – 1000 Па актуальна разработка деформационно-частотного МЭМС вакуумметра с относительной погрешностью измерений не более 2 %.

### 1.3 Выводы к главе 1 и постановка задач исследования

Анализ метрологических характеристик современных вакуумметров показал актуальность создания отечественного вакуумметра. В результате проведенных исследований, был определен диапазон измерения разрабатываемого отечественного вакуумметра 10 – 1000 Па. Анализ современного состояния метрологического обеспечения в области измерения низкого абсолютного давления показал перспективность разработки МЭМС технологий при разработке эталонного вакуумметра.

В результате обзор-анализа, выполненного в главе 1 определены следующие целевые метрологические характеристики разрабатываемого вакуумметра:  $P_{\text{нпн}}$  (нижний предел измерений) = 10 Па,  $P_{\text{впн}}$  (верхний предел измерений) = 1000 Па, относительная погрешность измерений не более 2 %.

Для достижения поставленной цели был сформулирован ряд задач, направленных на разработку и исследование эталонного вакуумметра, с техническими и метрологическими характеристиками, не уступающими уровню аналогичных эталонных вакуумметров, выпускаемых ведущими в этих отраслях зарубежными странами:

- провести анализ существующих эталонных вакуумметров;
- провести поиск и выявить возможность разработки нового способа измерения низких абсолютных давлений газа, построить и исследовать его модель;
- разработать транспортируемый эталонный вакуумметр;
- разработать программно-аппаратный комплекс, включающий транспортируемый эталонный вакуумметр, для автоматизации процедур поверки, калибровки и измерений;
- исследовать экспериментальный образец разработанного эталонного вакуумметра.

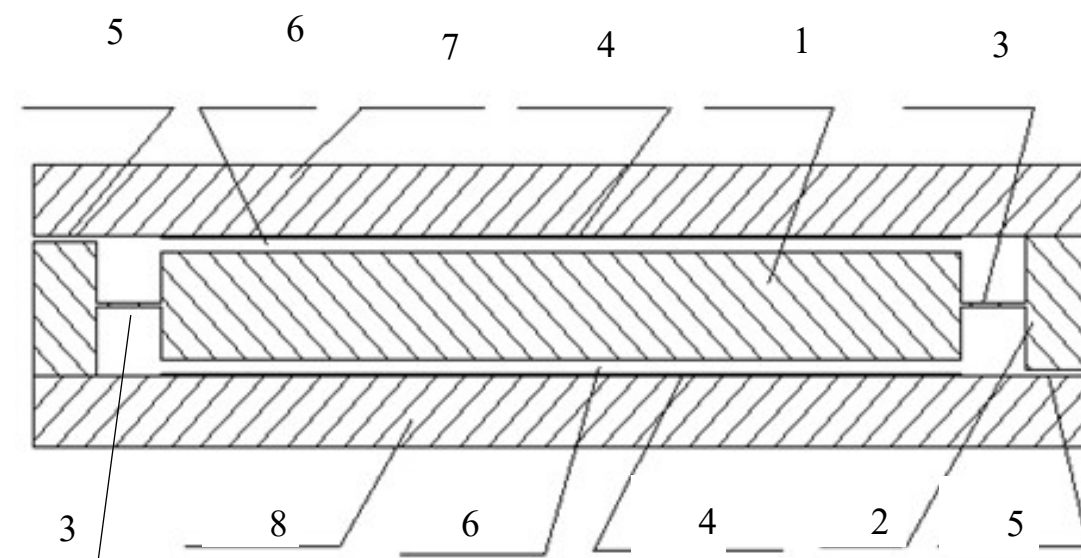
## ГЛАВА 2 Разработка эталонного вакуумметра

На основании результатов, полученных в первой главе, проведено теоретическое исследование нового способа измерения давления газа, основанного на деформационном методе, выведено уравнение измерений нового способа, проведён анализ факторов, влияющих на чувствительность первичного измерительного преобразователя, проведён анализ возможных источников погрешности преобразователя, определены параметры конструкции преобразователя.

Для устранения недостатков присущих вакуумметрам, основанных на деформационном методе измерений низкого абсолютного давления газа был предложен новый способ измерений давления газа, состоящий в измерении упругих свойств газа, а именно, вместо измерения смещения измерительной мембраны, было предложено измерять собственную частоту автоколебаний объёма газа, пропорциональную коэффициенту упругости (отношению упругой силы к величине деформации объёма газа) на основе которого был разработан и исследован отечественный эталонный вакуумметр.

## 2.1 Построение модели первичного измерительного преобразователя эталонного вакуумметра.

Первичный измерительный преобразователь вакуумметра предлагаемого способа измерения абсолютного давления газа является механической колебательной системой и представляет собой две жестко закрепленные и одну подвижную пластину (ПП) между ними, расположенные с зазором [23]. С помощью балок подвеса ПП крепится к неподвижной раме. ПП обладает одной степенью свободы. Поперечный разрез конструкции первичного измерительного преобразователя представлен на рисунке 2.1.



ПП – 1; несущая рама – 2; балки подвеса с суммарным коэффициентом упругости равным  $G_M$  – 3; электроды – 4; канал напуска газа – 5; измерительные газовые зазоры – 6; диэлектрическая пластина № 1 – 7; диэлектрическая пластина № 2 – 8.

Рисунок 2.1 – Первичный измерительный преобразователь

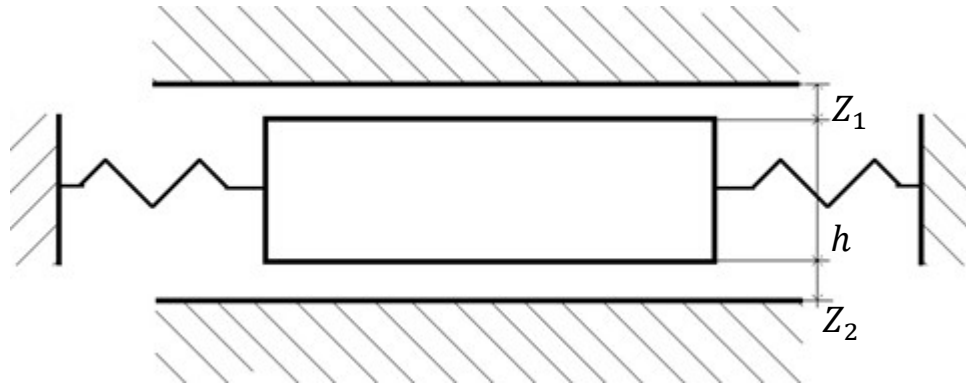
При автоколебаниях ПП и смещении от среднего положения  $x(t) = a \cdot \sin(\omega t)$ , при «отсутствии» газа в измерительных газовых зазорах ( $P \approx 0$  – давление газа  $P$  на 2 – 3 порядка меньше нижнего предела измерения вакуумметра), движение ПП при малой амплитуде автоколебаний  $a$  будет описываться уравнением гармонического осциллятора с одной степенью свободы [26]:

$$x'' + \omega x = 0,$$

$\omega_M = \sqrt{\frac{G_M}{m}}$  – собственная циклическая частота автоколебаний ПП массой  $m$  равная квадрату отношения коэффициента упругости механического подвеса к массе ПП  $m$ .

При давлении газа больше «нуля» в измерительных газовых зазорах происходит изменение объемов измерительных газовых зазоров (при движении ПП в сторону пластины № 2 согласно рисунку 2.1 объем первого измерительного зазора увеличивается, объем второго измерительного зазора уменьшается и, наоборот, при движении от пластины №2), и по закону Бойля-Мариотта, соответственно, изменяются значения абсолютного давления газа в них (при движении ПП в сторону пластины № 2 в первом зазоре уменьшается, во втором увеличивается или наоборот при движении ПП от пластины № 2), то есть появляется дифференциальное давление действующее на ПП. Для определения уравнения измерений в настоящей работе вводится понятие эквивалентной упругости газовых зазоров, выраженной в коэффициенте упругости измерительных газовых зазоров (отношение силы, действующей со стороны газа на ПП к изменению величины зазора).

Размеры первичного измерительного преобразователя показаны на рисунке 2.2.



$h$  – толщина пластины;  $Z_1$  – исходное значение величины зазора № 1;  
 $Z_2$  – исходное значение величины зазора № 2

Рисунок 2.2 – Размеры первичного измерительного преобразователя

При смещении ПП от среднего положения на величину  $x$ , объем газа в первом газовом зазоре  $V_1 = SZ_1$ , где  $S$  – площадь ПП, изменится на величину  $Sx$ , при этом давление в первом газовом зазоре изменится на величину  $\Delta P_1$ . Принимая во внимание малую скорость перемещения ПП, малый объем газа, малое изменение объема газа (единицы процентов), малое абсолютное давление газа (меньше 1000 Па), можно констатировать, что увеличение температуры при сжатии газа будет не значительным, а значит процесс можно считать изотермическим. Согласно закону Бойля-Мариотта для случая изотермического процесса, можно записать:

$$\frac{P + \Delta P_1}{P} = \frac{V_1}{V_1 - Sx} = \frac{SZ_1}{SZ_1 - Sx}$$

Сократив числитель и знаменатель на  $S$  и на  $Z_1$ , умножим числитель и знаменатель на  $(1 + \frac{x}{Z_1})$ , получим:

$$1 + \frac{\Delta P_1}{P} = \frac{1}{1 - \frac{x}{Z_1}} = \frac{1}{1 - \frac{x}{Z_1}} \cdot \frac{1 + \frac{x}{Z_1}}{1 + \frac{x}{Z_1}} = \frac{1 + \frac{x}{Z_1}}{1 - (\frac{x}{Z_1})^2}$$

Сократим слагаемое  $(\frac{x}{Z_1})^2$  в знаменателе, учитывая его малость ( $x \ll Z_1$ ), и выразим величину  $\Delta P_1$ :

$$\Delta P_1 = P \frac{x}{Z_1}$$

Тогда приращение силы, действующей со стороны газа в первом газовом зазоре на ПП будет равно:

$$F_1 = \Delta P_1 S = PS \frac{x}{Z_1}$$

А коэффициент упругости первого газового зазора будет равен:

$$G_1 = \frac{F_1}{x} = \frac{PS}{Z_1}$$

Аналогично коэффициент упругости второго газового зазора будет равен:

$$G_2 = \frac{PS}{Z_2}$$

Суммарный коэффициент упругости газовых зазоров будет равен:

$$G_r = G_1 + G_2 = \frac{PS}{Z_1} + \frac{PS}{Z_2}$$

Обозначив  $Z_3 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ , получим:

$$G_r = \frac{PS}{Z_3} \quad (2.1)$$

Таким образом, первичный измерительный преобразователь представляет собой колебательную систему, параметры которой определяются коэффициентами упругости газовых зазоров, коэффициентом упругости механического подвеса  $G_m$  и массой ПП. Происходит преобразование величины измеряемого абсолютного давления газа в значение собственной частоты автоколебаний ПП.

Ниже приведён вывод формулы уравнения измерения.

ПП является линейным гармоническим осциллятором с одной степенью свободы и совместно с упругим подвесом образует механическую колебательную систему с собственной частотой. Собственная частота колебательной системы в



отсутствии газа в зазоре (то есть «нулевом» давлении – меньше  $P_{\text{НПП}}$  на 2-3 порядка) связана с параметрами системы известной формулой (при условии малой амплитуды автоколебаний) [27] :

$$\omega_M = \sqrt{\frac{G_M}{m}}$$

$$(2\pi f_M)^2 = \frac{G_M}{m}$$

где:  $\omega$  – циклическая частота автоколебаний равная  $2\pi f_M$ ,  $f_M$  – собственная частота автоколебаний ПП обусловленная коэффициентом упругости механического подвеса.

Таким образом, при давлениях близких к нулю можно определить величину  $G_M$  по измеренному значению  $f_M$  и известному значению массы ПП:

$$G_M = 4\pi^2 f_M^2 m$$

При наличии газа в зазоре при движении ПП возникает сила  $F_\Gamma$ , действующая на ПП со стороны газа и направленная против вектора смещения  $x$  ПП от среднего положения, то есть появляется коэффициент упругости газовых зазоров  $G_\Gamma$ . Тогда, собственная частота колебательной системы  $f$  может быть вычислена по формуле:

$$f^2 = \frac{G_M + G_\Gamma}{4\pi^2 m}$$

Подставив выражение 2.1 получим:

$$f^2 = \frac{G_M + G_\Gamma}{4\pi^2 m} = \frac{4\pi^2 m f_M^2 + \frac{PS}{Z_3}}{4\pi^2 m} = f_M^2 + \frac{P \cdot S}{4\pi^2 m Z_3}$$

Выразим давление:

$$\frac{P \cdot S}{4\pi^2 m Z_3} = f^2 - f_M^2$$

Величину массы ПП можно выразить как:  $m = \rho h S$ , где:  $\rho$  – плотность материала ПП, тогда:

$$P = \frac{4\pi^2 m Z_3}{S} (f^2 - f_M^2) = \frac{4\pi^2 \rho h S Z_3}{S} (f^2 - f_M^2) = 4\pi^2 \rho h Z_3 (f^2 - f_M^2)$$

Обозначив коэффициент преобразования  $K = 4\pi^2 \rho h Z_3$ , получим уравнение измерений :

$$P = K(f^2 - f_M^2) \quad (2.2)$$

Вид теоретической зависимости давления от разности квадратов частот изображен в виде графика на рисунке 2.3.

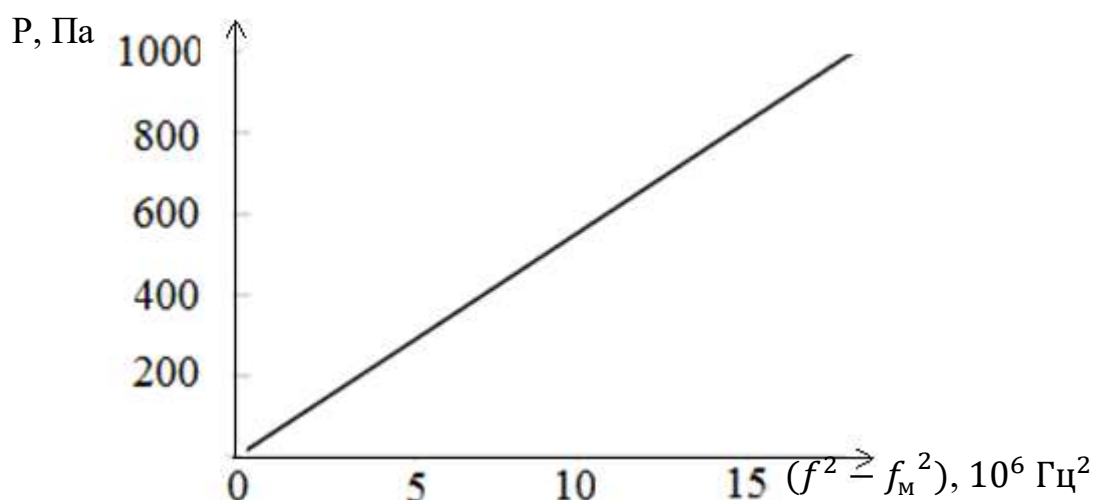


Рисунок 2.3 – Зависимость давления от разности квадратов частот

Из формулы 2.2 и рисунка можно отметить линейный вид зависимости давления от квадрата собственной частоты автоколебаний ПП.

В результате исследований, выполненных в данном параграфе, удалось построить математическую модель первичного измерительного преобразователя вакуумметра, вывести уравнение измерения, что позволит в дальнейшем определить факторы, влияющие на коэффициент преобразования, определить требования к параметрам конструкции первичного измерительного преобразователя, выявить источники погрешности измерений.

## 2.2 Разработка конструкции первичного измерительного преобразователя эталонного вакуумметра

### 2.2.1 Определение параметров конструкции первичного измерительного преобразователя

На основании результатов исследований, выполненных в главе 1 и параграфе 2.1, выполним определение параметров конструкции преобразователя, некоторые подробности также изложены в [28].

Проведём анализ факторов, влияющих на коэффициент преобразования первичного измерительного преобразователя.

Перетекание газа через боковые грани измерительных газовых зазорах при колебаниях ПП нарушает возможность применения закона Бойля-Мариотта при расчёте коэффициента преобразования  $K$  по формуле (2.2) (рисунок 2.4).

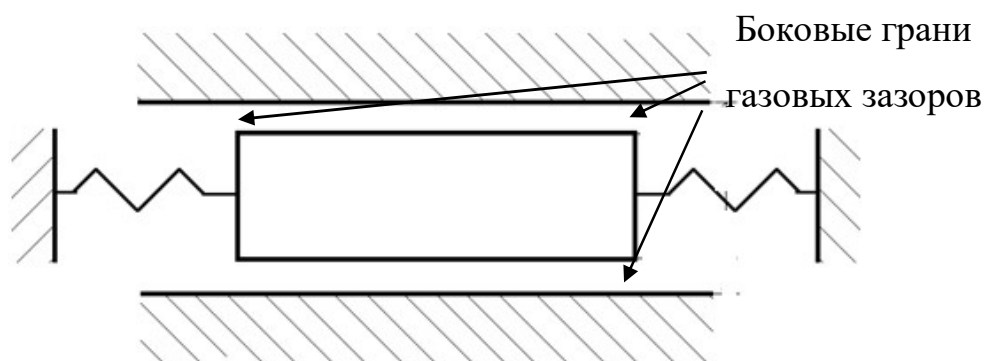


Рисунок 2.4 – Расположение боковых граней газового зазора

На рисунке 2.5 показан эскиз газового зазора размерами ПП  $a$  и толщиной  $Z$  (расстояние от электрода до ПП в ее среднем положении).

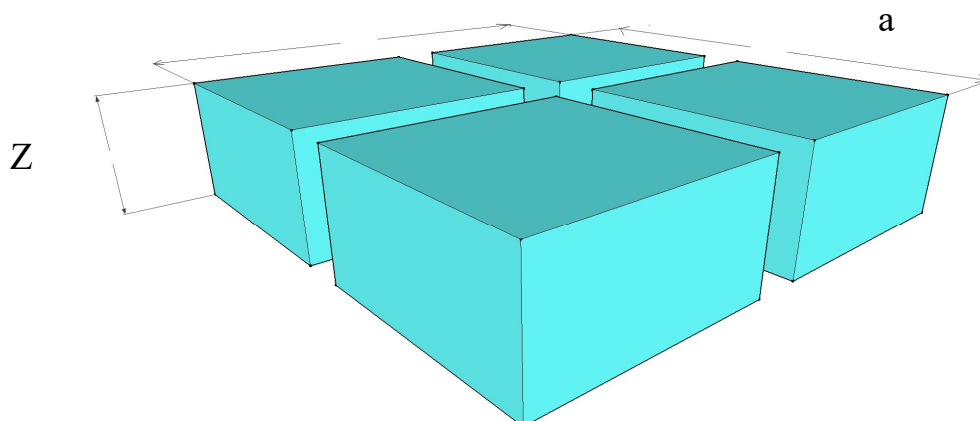


Рисунок 2.5 – Эскиз газового зазора

Площадь боковых граней параллелепипеда, описывающего газовый зазор можно рассчитать по формуле:

$$S_6 = 4aZ$$

Общая площадь поверхности параллелепипеда, описывающего газовый зазор:

$$S_{\Pi} = 2a^2 + S_6$$

Следовательно :

$$\frac{S_6}{S_{\Pi}} = \frac{S_6}{2a^2 + S_6}$$

Для уменьшения перетекания молекул газа обозначим условие  $S_6 \ll S_{\Pi}$  или  $S_6 < 0.01S_{\Pi}$ , таким образом:

$$S_6 < 0.01(2a^2 + S_6)$$

$$0.99S_6 < 0.02a^2$$

$$0.99 \cdot 4aZ < 0.02a^2$$

$$a > 200Z \tag{2.3}$$

Проведем анализ влияния неравности толщин газовых зазоров на коэффициент преобразования первичного измерительного преобразователя.

Коэффициент преобразования выражен следующим образом:

$$K = 4\pi^2 \rho h Z_3, \text{ где } Z_3 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Обозначив сумму  $Z_1 + Z_2 = Z = const$ , получим:

$Z_1 = aZ$  и  $Z_2 = (1 - a)Z$ , где  $a$  – параметр определяющий среднее положение ПП, при  $a = 0.5$  ПП находится посередине (равенство величин газовых зазоров  $Z_1 = Z_2 = \frac{Z}{2}$ ). Тогда формула для выражения коэффициента преобразования будет выглядеть следующим образом:

$$K = 4\pi^2 \rho h Z a(1 - a) \quad (2.4)$$

На рисунке 2.6 показана зависимость коэффициента преобразования  $K$  от значения  $a$ .

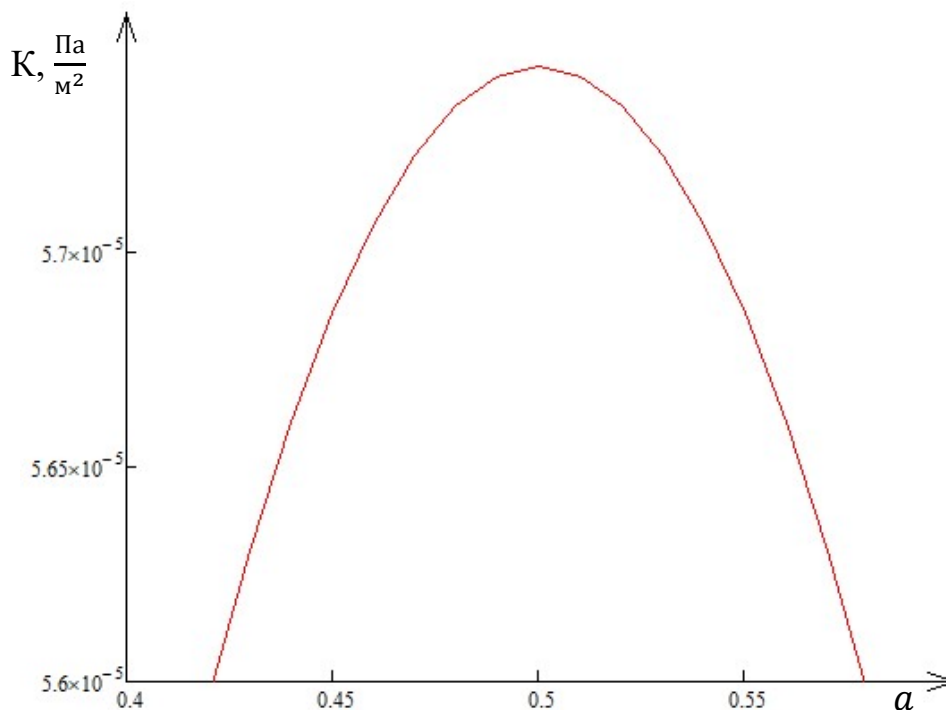


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента преобразования от положения ПП

Из рисунка видно, что коэффициент преобразования максимален для данного давления газа в среднем положении пластины. То есть, согласно формуле 2.4 (первая производная по  $a$  равна 0 при  $a = 0,5$ ) среднему положению ПП соответствует минимальное значение собственной частоты автоколебаний ПП. Если при отсутствии изменения давления газа путем изменения среднего положения ПП (электростатическим воздействием) определить минимальное значение собственной частоты автоколебаний это будет соответствовать условию равенства газовых зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$ .

Относительное изменение  $\gamma_K$  коэффициента преобразования  $K$  в зависимости от относительного изменения  $\gamma_a$  параметра  $a$  согласно формуле 2.33 будут выражаться следующим образом:

$$\gamma_K = 100 \left( 1 - \frac{\left( a + a \frac{\gamma_a}{100} \right) \left( 1 - \left( a + a \frac{\gamma_a}{100} \right) \right)}{a(1-a)} \right)$$

При начальном значении  $a = 0.5 \Rightarrow \gamma_K = \frac{\gamma_a^2}{100}$ . Вид зависимости  $\gamma_K$  от  $\gamma_a$  представлен на рисунке 2.7.

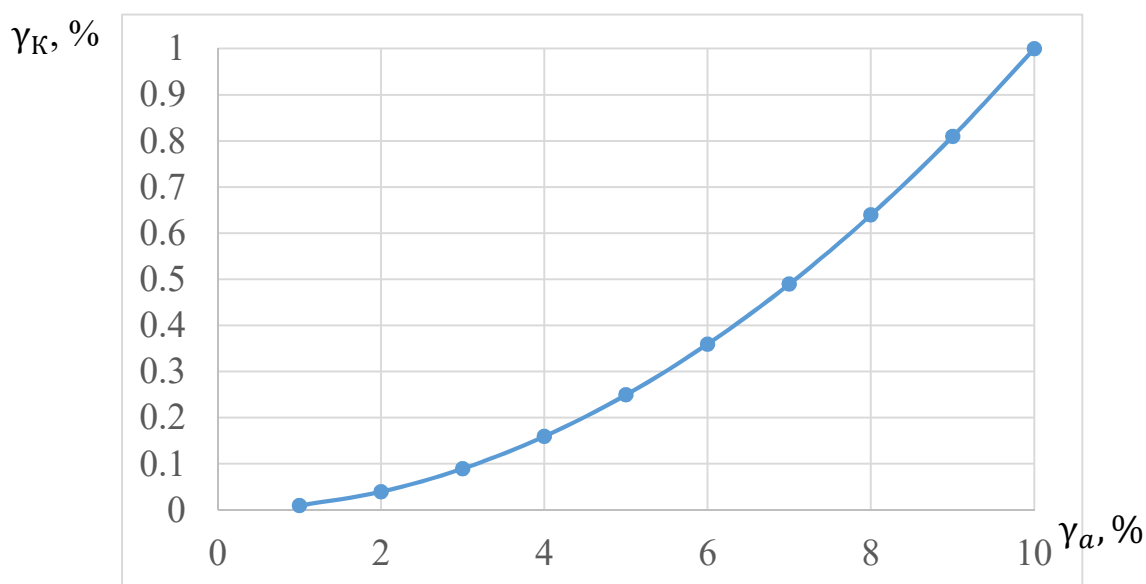


Рисунок 2.7 – Относительное изменение коэффициента преобразования  $K$  в зависимости от относительного изменения параметра " $a$ "

Расчёты значений  $\gamma_K$ , в зависимости от  $\gamma_a$  приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Относительное изменение коэффициента преобразования К в зависимости от относительного изменения параметра а

$\gamma_a, \%$	$\gamma_K, \%$
1	0.01
2	0.04
3	0.09
4	0.16
5	0.25
6	0.36
7	0.49
8	0.64
9	0.81
10	1.00

Таким образом, относительное изменение параметра  $a$  не должно превышать 5 %, чтобы влияние на значение коэффициента К было менее 0,25 %.

Относительная разница между величинами газовых зазоров определяется как отношение абсолютной разницы к среднему значению  $\frac{Z_1+Z_2}{2}$ :

$$\gamma_Z = 100 \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_2}{\frac{Z_1 + Z_2}{2}} \right) = 100 \cdot 2 \frac{aZ - (1-a)Z}{aZ + (1-a)Z} = 200 \cdot (2a - 1)$$

Относительному изменению параметра  $a$  в 5 %, соответствует абсолютное изменение  $\Delta a = 0,05 \cdot 0,5 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ , тогда:

$$\gamma_Z = 200(2a - 1) = 200(2(0,5 + 2,5 \cdot 10^{-2}) - 1) = 10 \%$$

То есть относительная разница между величинами газовых зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$  не должна превышать  $\gamma_Z < \pm 10 \%$ .

При смещении ПП на величину  $x$ , со стороны газа на ПП действует сила  $F_r$ , равная произведению коэффициента упругости газовых зазоров на  $x$ :

$$F_r = G_r \cdot x$$

Примем, что  $Z_1 = Z_2 = Z$ , а также амплитуда автоколебаний ПП относительно величины зазора мала и составляет  $x = 0,01 \cdot Z$ , тогда из формулы 2.1 получим:

$$F_r = \frac{PS}{\left(\frac{Z}{2}\right)} \cdot 0,01Z = 0,02 \cdot PS \quad (3.1)$$

Как следует из формулы сила пропорциональна давлению. При некоторой величине давления, сила  $F_r$  может увеличиться настолько, что силы электростатического привода может быть недостаточно. Сила со стороны подвеса пластины, меньше пневматической при высоких давлениях (что будет показано далее), поэтому в расчётах это учитывать не будем. Ёмкость конденсатора, образованного ПП и плоским электродом определяется формулой [29]:

$$C(Z) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{Z},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная равная 8,85 пФ/м,  $S$  – площадь ПП.

Энергия электростатического поля такого конденсатора может быть вычислена по формуле:

$$E = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 SU^2}{2Z},$$

где  $U$  – электрическое напряжение между ПП и электродом. Электростатическая сила определяется как дифференциал энергии формулой [6]:

$$F_e = \frac{dE}{dZ}$$



Модуль электростатической силы:

$$F_e = \frac{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 S}{2Z^2} \quad (3.2)$$

Если электростатическая сила больше силы действующей на ПП со стороны газа, то можно записать:

$$F_e > F_r,$$

то есть с учетом формул (3.1) и (3.2):

$$\frac{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 S}{2Z^2} > 0,02 \cdot PS$$

Упростив и приняв значение давления газа равным  $P = P_{\text{ВПИ}} = 1000$  Па, ограничив постоянное электрическое напряжение между ПП и электродом  $U = 10$  В, получим что толщина газового зазора  $Z < 5$  мкм. По согласованию с предприятием-изготовителем было выбрано значение толщин газовых зазоров:

$$Z_1 = Z_2 = Z = 3 \text{ мкм}$$

Согласно формуле (2.3) линейный размер ПП  $a$  для минимизации влияния перетекания газа через боковые грани газового зазора на чувствительность вакуумметра должен удовлетворять условию  $a > 200Z$ , таким образом:

$a > 200 \cdot 3 = 600$  мкм, то есть линейный размер ПП должен быть больше 0,6 мм.

Согласно формуле (2.1) коэффициент упругости измерительных газовых зазоров составляет:

$$G_r = \frac{2PS}{Z}$$

Значение собственной циклической частоты автоколебаний ПП  $\omega^2 = \frac{G_M + G_r}{m}$ , так как  $G_M < G_r$ , в первом приближении будем считать, что:

$$\omega^2 = \frac{G_r}{m} = \frac{2PS}{Zm} = \frac{2PS}{Z\rho hS} = \frac{2P}{Z\rho h}$$

Учитывая что  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ , где  $T$  – период колебания ПП, можно записать:

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{2P}{Z\rho}, \quad \text{следовательно} \quad T^2 = 4\pi^2 \frac{Z\rho}{2P} = \frac{2\pi^2 Z\rho h}{P}. \quad \text{Для уменьшения}$$

перетекания газа при колебаниях ПП, период автоколебаний ПП должен быть меньше 1 миллисекунды:  $T < 10^{-3}$ , тогда  $T^2 < 10^{-6}$ . Можно записать:

$$\frac{2\pi^2 Z\rho h}{P} < 10^{-6}$$

$$h < 10^{-6} \frac{P}{2\pi^2 Z\rho},$$

учитывая, что нижний диапазон измерения разрабатываемого вакуумметра составляет  $P_{\text{НПИ}} = 10$  Па, вычислим что  $h < 90$  мкм.

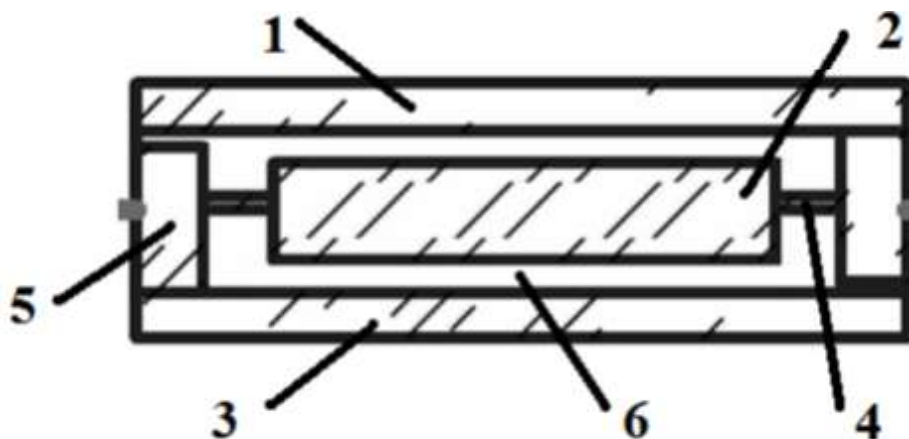
На основании исследований, проведенных выше и по согласованию с предприятием-изготовителем, были утверждены следующие параметры для изготовления первичного измерительного преобразователя (таблица 2.2):

Таблица 2.2 – Параметры конструкции преобразователя

Параметр	Значение
Размер ПП а, м	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Толщина газового зазора Z, мкм	3,0
Толщина ПП h, м	$75 \cdot 10^{-6}$

## 2.2.2 Разработка конструктивного исполнения первичного измерительного преобразователя

На рисунке 2.8 изображена схема поперечного сечения преобразователя вакуумметра.



1 – верхнее стекло; 2 – ПП из кремния; 3 – нижнее стекло; 4 – торсионы; 5 – кремниевая рама; 6 – зазор

Рисунок 2.8 – Схема поперечного сечения преобразователя вакуумметра

Конструкция преобразователя [30] представляет собой составную пластину, в которой верхний и нижний слои представляют собой стекла толщиной 400 мкм, между которыми расположен слой кремния толщиной 75 мкм. В слое кремния сформирована микромеханическая структура в виде плоской кремниевой пластины с размерами  $0,9 \times 0,9$  мм, которая подвешена на подвесах, которые позволяют ей колебаться в направлении, вдоль оси z. Между подвижной кремниевой пластиной и стеклянными слоями расположен зазор шириной 3 мкм, который формируется путем плазмохимического травления кремния. Также на верхнем и нижнем стекле сформированы слои металлизации. Электроды позволяют инициировать колебания ПП, путем подачи на них электрического потенциала. Также они позволяют детектировать частоту и амплитуду перемещения пластины в процессе работы. Из-за особенностей способа производства преобразователя с применением технологий микросистемной техники конструирование изделия и подготовку электронной информации о топологии необходимо делать исходя из послового представления

изделия. В состав преобразователя входят технологические слои, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2. 3 – Технологические слои преобразователя

Название слоя	Описание
Si_active	Слой кремния – собственная конструкция ПП, а также рама и контактные площадки. Толщина 75 мкм.
Si_bonding_top	Слои, обеспечивающие зазор в 3 мкм между ПП и плоскостями электродов. По этим слоям осуществляется сварка кремния со стеклянными пластинами. Толщина 3 мкм.
Si_bonding_bottom	
Al_met_top	Слой металлизации, с электродами «привод» и «сенсор». Толщина 0,15 мкм.
Al_met_bottom	
Outer_met	Слой металлизации, предназначенной для формирования электрических выводов
Holes	Слой с расположением переходных отверстий в стеклянной пластине

Схематичное изображение расположения слоев показано на рисунке 2.9.

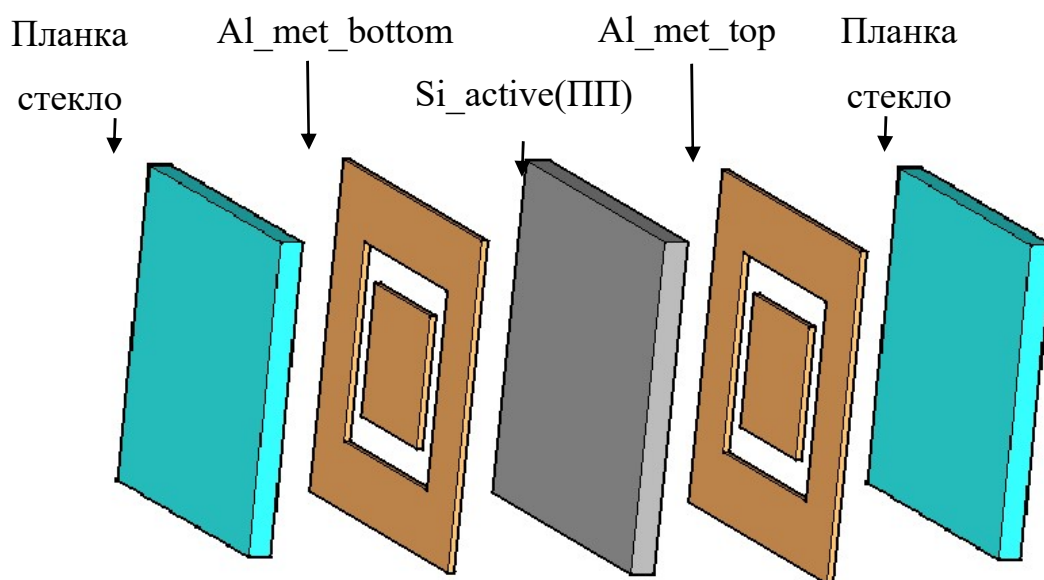


Рисунок 2.9 – Схематичное изображение расположения слоев

Над данным рисунке слой Si\_active показан частично, без подвесов и рамы. Слои Al\_met\_top и Al\_met\_bottom выполняются на стеклянных планках. Между слоем Al\_met\_top и Si\_active расположен слой Si\_bonding\_top, обеспечивающий зазор между плоскостями ПП и электродами. Между слоем Al\_met\_bottom и Si\_active расположен слой Si\_bonding\_bottom, обеспечивающий зазор между плоскостями ПП и электродами.

На рисунках 2.10 – 2.12 показаны двумерные изображения основных слоев преобразователя.

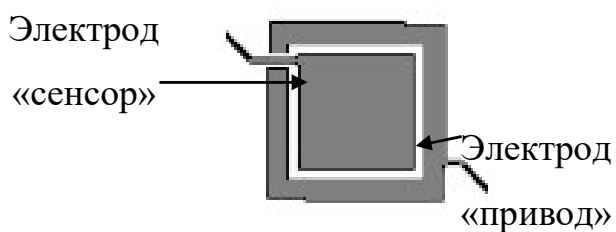


Рисунок 2.10 – Слои Al\_met\_bottom и Al\_met\_top

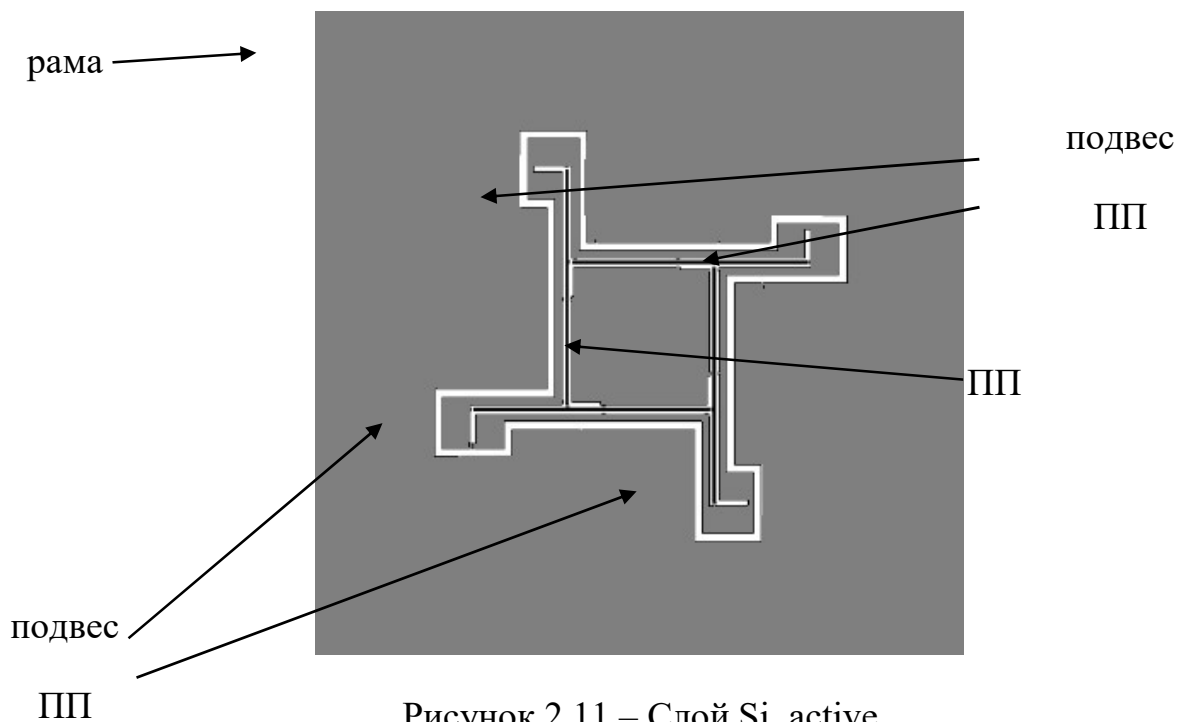


Рисунок 2.11 – Слой Si\_active

Слой из кремния Si\_active состоит из ПП прикрепленной к раме с помощью четырех S-образных подвесов.

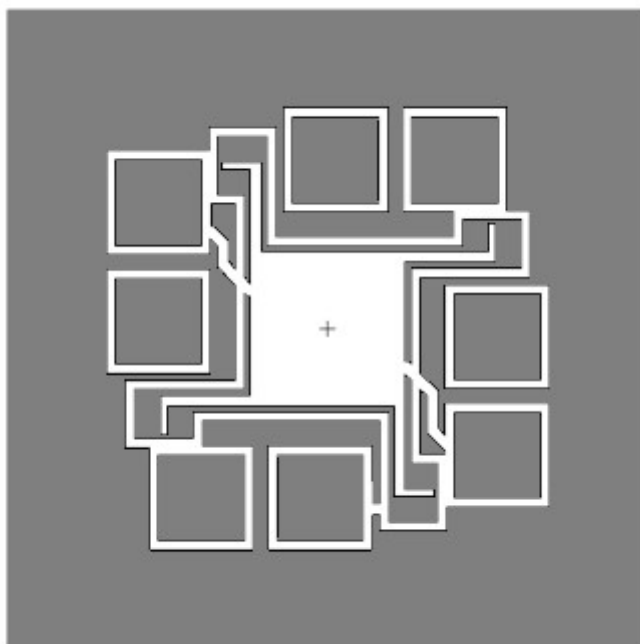


Рисунок 2.12 – Слои Si\_bonding\_top и Si\_bonding\_bottom

Металлические слои Al\_met\_bottom и Al\_met\_top выполняются для создания двух электродов с каждой стороны ПП: электрода «сенсор» (необходимого для измерения положения ПП через измерение электрической емкости пары «электрод сенсор - ПП») и электрода «привод» (необходимого для поддержания амплитуды автоколебаний ПП путем электростатического воздействия). Электроды «привод» и «сенсор» в слоях Al\_met\_bottom и Al\_met\_top требуют 4 электрических вывода. Еще 1 электрический вывод предназначен для создания контакта к ПП (слой Si\_active, через подвесы и раму). Преобразователь в сборе имеет габаритные размеры 4,3х4,3 мм. Вид преобразователя сверху показан на рисунке 2.13.

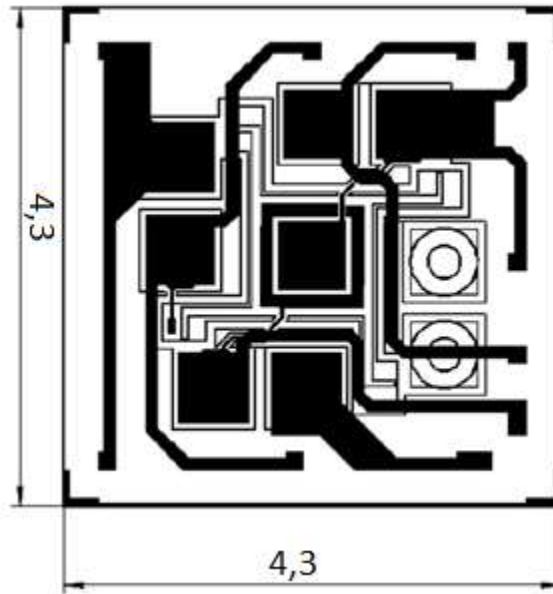


Рисунок 2.13 – Вид на преобразователь сверху

Эскиз поперечного разреза преобразователя показан на рисунке 2.14.

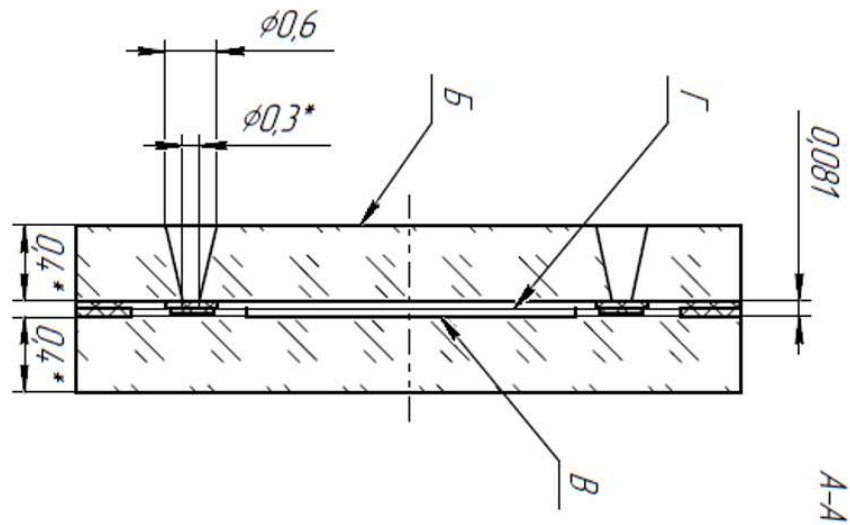


Рисунок 2.14 – Эскиз поперечного сечения преобразователя

### 2.2.3 Выводы к параграфу

В результате исследований, проведённых в параграфе 3.1 были определены следующие параметры конструкции преобразователя:

- размер ПП  $a = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м;
- толщина газовых зазоров  $Z_1 = Z_2 = 3,0$  мкм;
- толщина ПП  $h = 75$  мкм.

На основе найденных значений параметров конструкции преобразователя были изготовлены чертежи, входящие в пакет конструкторской документации.



## 2.3 Разработка измерительного блока с функцией автоматического регулирования давления газа

### 2.3.1 Разработка электрической схемы вакуумметра

Для поддержания автоколебаний ПП изготовленного первичного измерительного преобразователя, измерения частоты колебаний ПП, обработки и отображения результатов измерений были разработаны электрические схемы измерительных блоков вакуумметра. Структурная схема вакуумметра изображена на рисунке 2.15.

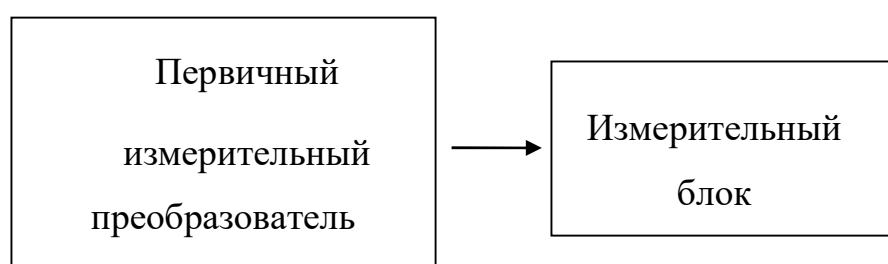


Рисунок 2.15 – Структурная схема вакуумметра

Вакуумметр состоит из первичного измерительного преобразователя и измерительного блока. Первичный измерительный преобразователь преобразует измеряемое абсолютное давление газа в частоту автоколебаний ПП. Измерительный блок измеряет параметры автоколебаний ПП (амплитуду и фазу автоколебаний, среднее положение ПП, частоту), поддерживает амплитуду автоколебаний ПП на заданном уровне.

Более подробно структурная схема вакуумметра показана на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 – Структурная схема деформационно-частотного вакуумметра

Из рисунка следует, что вакуумметр состоит из первичного измерительного преобразователя и измерительного блока. Измерительный блок состоит из блока измерения положения ПП, блока поддержания автоколебаний ПП, частотомера. Блок измерения положения ПП измеряет параметры автоколебаний ПП (амплитуду и фазу автоколебаний, среднее положение, частоту). Блок поддержания автоколебаний поддерживает амплитуду автоколебаний ПП на

заданном уровне. Первичный измерительный преобразователь подключен к блоку измерения положения ПП, электрическое напряжение пропорциональное положению ПП передается в блок поддержания автоколебаний ПП и частотомер. Измеренное частотомером значение частоты автоколебаний ПП передается в блок обработки данных и, с учетом градуировочной характеристики в виде показаний на отсчетное устройство [31] для отображения значений измеренного давления.

Для измерения фазы автоколебаний пластины необходимо иметь возможность определять ее текущее положение в каждый момент времени, емкостным методом. Электроды «сенсор» сформированные в слоях Al\_met\_bottom и Al\_met\_top совместно с ПП образуют обкладки дифференциального конденсатора, эквивалентная электрическая схема которого показана на рисунке 2.17. ПП следует изготавливать из легированного кремния, достаточной электропроводности (например, КЭФ–03) [32].

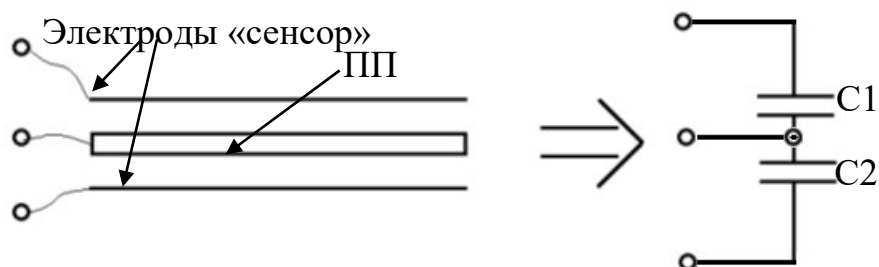


Рисунок 2.17 – Эквивалентная электрическая схема преобразователя

Первичный измерительный преобразователь представляет собой два электрических конденсатора соединенных последовательно. Измеряя значения  $C_1$  и  $C_2$ , либо значение соотношения значений  $C_1/C_2$ , можно определить значение смещение ПП от среднего положения. При проектировании электрической схемы теоретические значения емкостей конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  вычисляются по следующей формуле (приближение для бесконечных плоскопараллельных обкладок) [29]:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{Z},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная,  $S$  – площадь обкладок конденсатора,  $Z$  – расстояние между обкладками.

Для измерения смещения ПП разработан следующий блок измерения положения ПП, структурная схема которого изображена на рисунке 2.18.

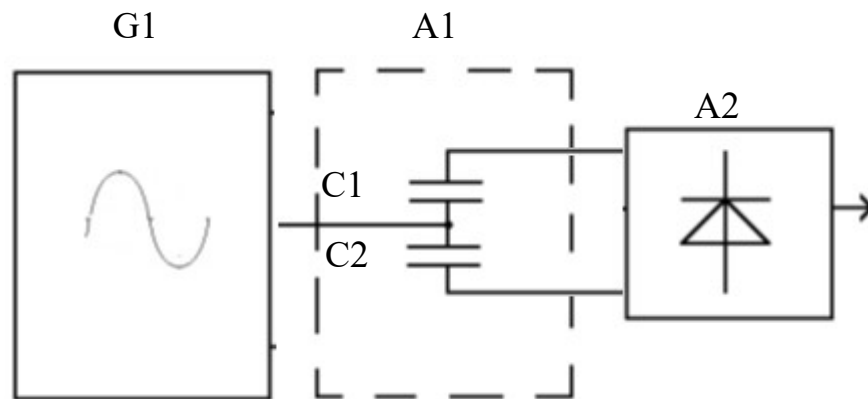
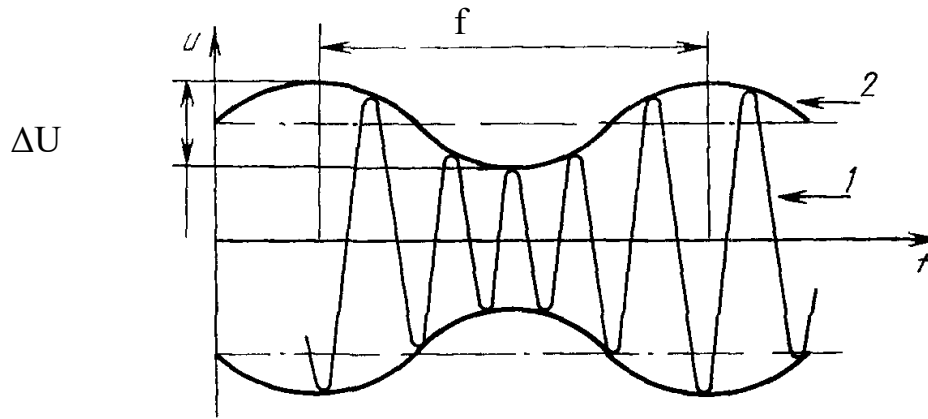


Рисунок 2.18 – Структурная схема блока измерения положения ПП

Генератор G1 подает синусоидальное напряжение стабильной амплитуды постоянной частоты со значением  $F$  на 2–3 порядка больше частоты автоколебаний ПП (дифференциальный конденсатор A1, образованный емкостями C1 и C2) на электрический контакт с ПП преобразователя. Сигнал с дифференциального конденсатора A1 поступает на детектор A2, который выделяет огибающую  $U_x(t)$  (огибающая сигнала показана рисунке 2.19) в виде переменного напряжения с частотой и фазой механических автоколебаний ПП [33].



1 – сигнал частоты  $F$ ; 2 – огибающая сигнала частотой  $f$

Рисунок 2.19 – Сигнал на входе блока измерения положения ПП

При колебаниях ПП изменяется расстояние между ПП и сенсорными электродами, соответственно меняется значение емкостей  $C1$  и  $C2$ , их электрическое сопротивление переменному току (импеданс) [34]. Падения напряжений на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  будут модулированы колебаниями ПП, соответственно сигнал 1 на входе измерительного моста  $A2$  с частотой  $F$  генератора  $G1$  смодулирован по амплитуде колебаниями ПП (сигнал 2 - огибающая). Амплитуда  $\Delta U$  огибающего сигнала 2 пропорциональна амплитуде автоколебаний ПП, фаза и частота  $f$  равны фазе и частоте автоколебаний ПП.

Более подробно структурная схема измерительного моста показана на рисунке 2.20.

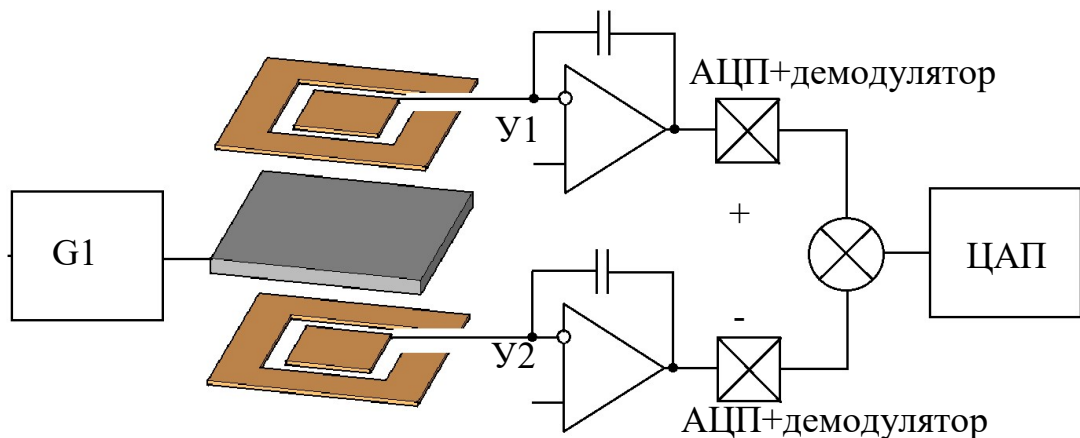


Рисунок 2.20 – Структурная схема измерительного моста

Генератор G1 подает синусоидальное напряжение стабильной амплитуды постоянной частоты со значением  $F$  на 2–3 порядка больше частоты автоколебаний ПП на электрический контакт ПП преобразователя. Сигналы с сенсорных электродов поступают на схемы дифференцирования У1 и У2 [35], далее на АЦП, после которых происходит демодуляция (выделение огибающей с помощью ЦАП) [36].

Рассмотрим метод поддержания автоколебаний пластины. Вызвать колебания ПП можно электростатическим воздействием на нее.

При подаче постоянного напряжения  $U_0$  на электрод преобразователя возникает электростатическая сила притяжения, действующая на ПП, согласно формуле 3.2:

$$F_e = \frac{U_0^2 \varepsilon \varepsilon_0 S}{2(Z - X)^2}$$

$Z = Z_1$  – первоначальное расстояние между электродом и ПП,

$X$  – текущая величина отклонения ПП от среднего положения.

Сила  $F_e$  уравнивается силой определяемой жесткостью механического подвеса ПП  $F_m = G_m \cdot X$ . То есть из условия  $F_e = F_m$  можно определить конечное отклонение  $X = A_0$  ПП от среднего положения. Величина  $X$  пропорциональна квадрату отклоняющего напряжения.

При снятии с обкладок электрического напряжения ПП начинает колебаться с частотой  $f = \frac{1}{T}$  (где  $T$  – период колебаний), определяемой текущими значениями коэффициентов упругости механического подвеса ПП и газовых зазоров. Однако при наличии потерь кинетической энергии (рассеяние энергии при деформации механического подвеса ПП и на сопротивление газа движению ПП) колебания будут затухающими [26] (рисунок 2.21), причем величина потерь прямо пропорциональна величине давления газа и скорости движения ПП

(скорость движения обратно пропорциональна периоду и прямо пропорциональна амплитуде колебаний).

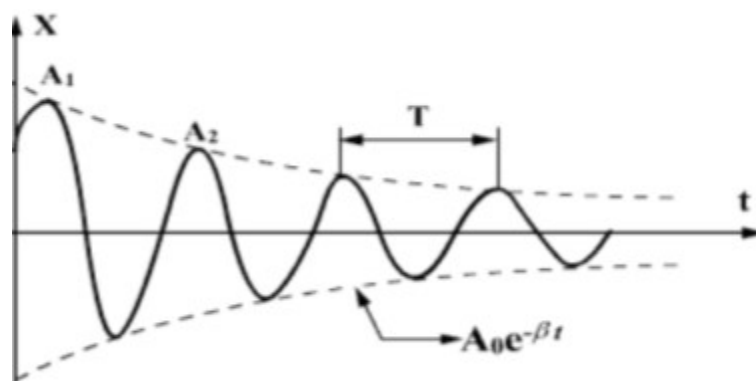


Рисунок 2.21 – Затухающие колебания ПП

По оси ординат отложена величина отклонения ПП ( $X$ ) от среднего положения, по оси абсцисс – время  $t$ . С течением времени амплитуда колебаний уменьшается ( $A_0 > A_1 > A_2$ ). Зависимость величины амплитуды колебаний от времени можно вычислить по формуле [37]:

$$X = A_0 e^{-\beta t}, \text{ где } \beta \text{ – коэффициент затухания.}$$

Для возбуждения затухающих колебаний ПП на электрод-«привод» подается импульс напряжения, форма сигнала показана на рисунке 2.22.

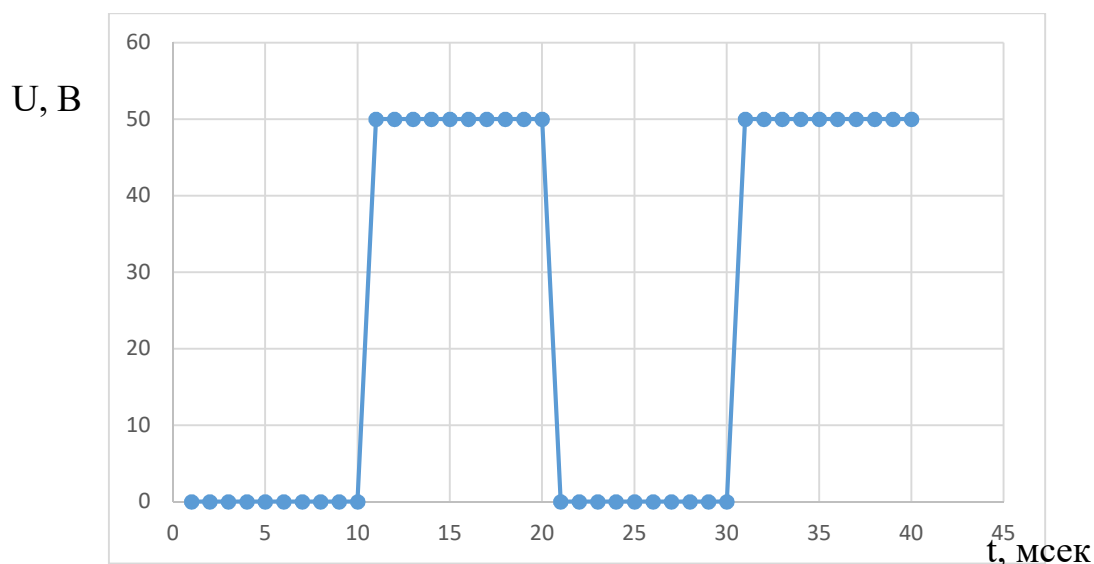


Рисунок 2.22 – Форма сигнала на электрoде– «привод»

При периодической подаче импульсов напряжения  $U_{\text{п}}$  на электрод-«привод» возникают затухающие колебания  $X(t)$  ПП как показано на рисунке 2.23.

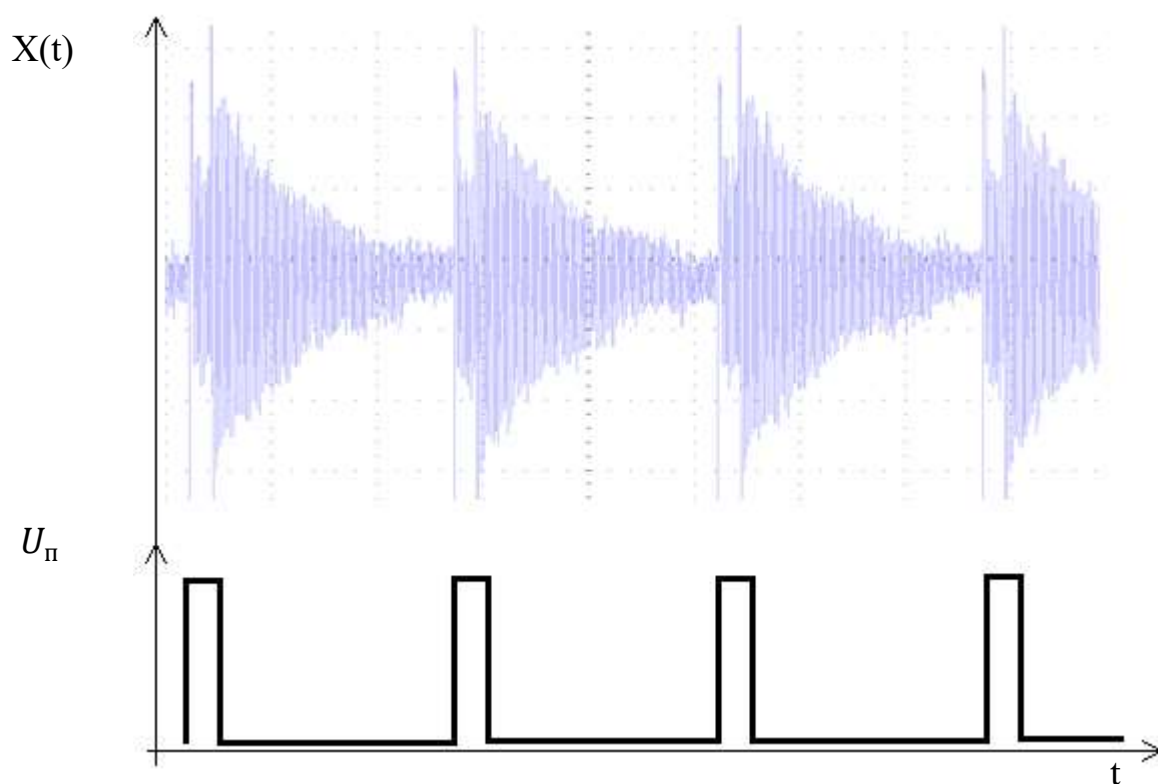


Рисунок 2.23 – Форма затухающих колебаний ПП

Однако из-за такой формы колебаний  $X(t)$  (уменьшение амплитуды колебаний) практически измерить частоту колебаний частотомером затруднительно.

Затухающие колебания, в общем случае описываются следующей формулой:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (2.4)$$

$x$  – отклонение ПП от среднего положения в текущий момент времени,

$\beta$  – коэффициента затухания,

$\omega_0$  – собственная циклическая частота свободных колебаний при отсутствии сил трения.

Циклическая частота колебаний в режиме затухающих колебаний выражена следующей формулой:



$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (2.5)$$

Как видно из формулы, частота колебаний ПП в режиме затухающих колебаний зависит от коэффициента затухания  $\beta$ . То есть для измерения частоты собственной частоты колебаний в режиме затухающих колебаний нужно вводить поправку зависящую от коэффициента затухания  $\beta$ . В свою очередь коэффициент затухания  $\beta$ , зависит не только от давления, но и от рода газа.

Постоянную амплитуду колебаний можно обеспечить, возмещая потери энергии в режиме автоколебаний [38]. Структурная схема автоколебательной системы в общем виде представлена на рисунке 2.24.

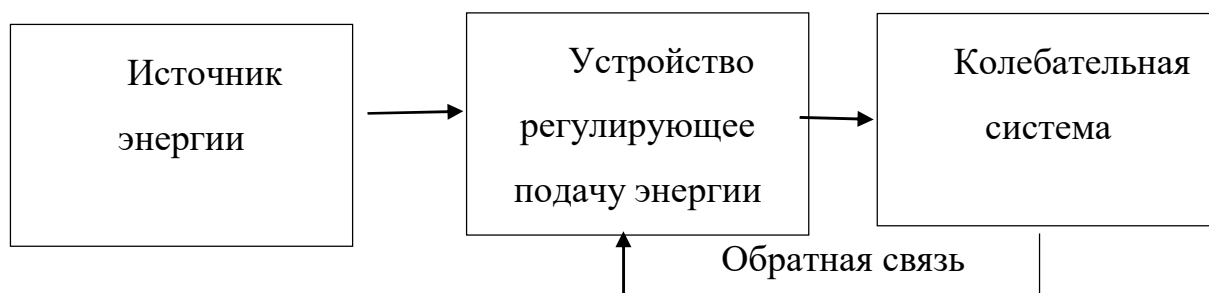


Рисунок 2.24 – Структурная схема автоколебательной системы

Автоколебания принципиально отличаются от затухающих колебаний, происходящих без последующих внешних воздействий, а также от вынужденных колебаний, происходящих под действием периодической внешней силы. Автоколебательная система сама управляет внешним воздействием, обеспечивая согласованность поступления энергии определенными порциями в нужный момент (в такт колебаниям), таким образом коэффициент затухания  $\beta$  перестает иметь влияние на частоту колебаний ПП.

Возмещать энергопотери при движении ПП можно введением электростатической силы  $F_e(t)$ , смещенной на  $90^\circ$  по фазе относительно колебаний мембраны, как показано на рисунке 2.25.

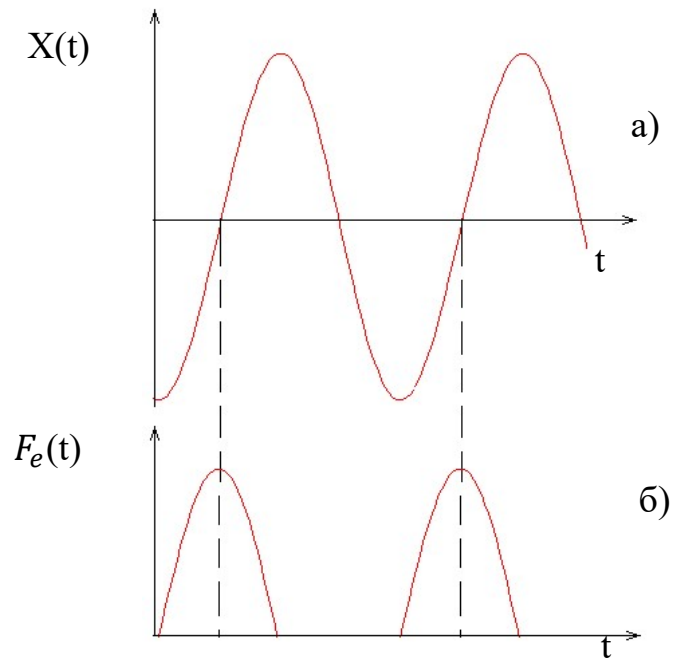


Рисунок 2.25 – Форма колебаний (а) и форма сил (б), возмещающих энергопотери автоколебательной системы

Для поддержания автоколебаний была разработана структурная схема, изображенная на рисунке 2.26.

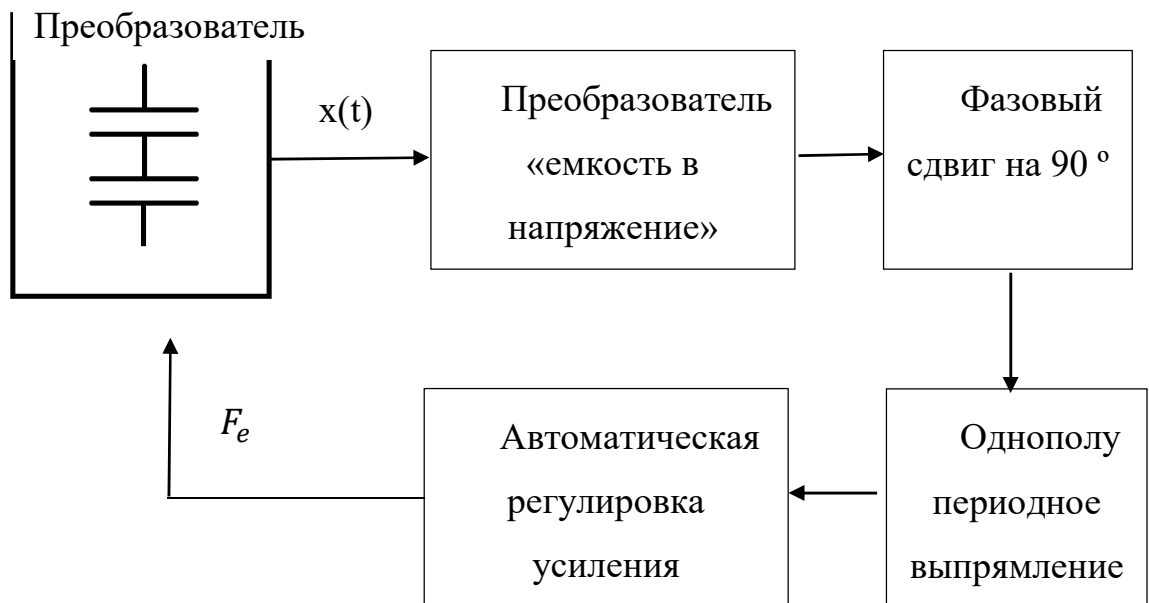


Рисунок 2.26 – Структурная схема автоколебательной системы

При регулировании амплитуды  $F_e(t)$  наиважнейшим условием является удержание колебательной системы в гармоническом режиме (рисунок 2.27).

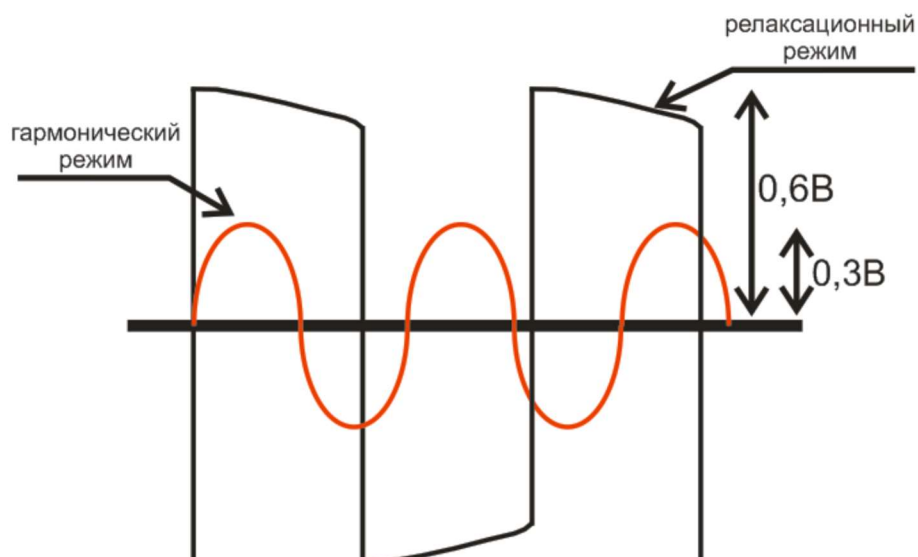


Рисунок 2.27 – Гармонический и релаксационный режим колебаний ПП

Подача больших амплитуд  $F_e(t)$  приводит к переходу колебательной системы в релаксационный режим и изменению значения частоты колебаний ПП (вследствие неработоспособности формулы (2.2)).

В результате использования предложенной структурной схемы автоколебательной системы удалось получить стабильную амплитуду колебаний ПП для измерения их частоты частотомером.

Опираясь на значения параметров преобразователя, полученных в параграфе 3.1 можно вычислить требуемый диапазон измерения частотомера. Согласно формуле (2.2) значение частоты будет равно:

$$f^2 = \frac{P}{K} + f_M^2 = \frac{P}{4\pi^2 \rho h Z_3} + f_M^2$$

При давлении равном верхнему диапазону измерения  $P=1000$  Па значение частоты колебаний будет максимальной и многим больше  $f_M$ , поэтому можно записать:

$$f^2 = \frac{P}{4\pi^2 \rho h Z_3} = \frac{1000}{4\pi^2 \cdot 2200 \cdot 75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{2}} \approx 10^8$$

Таким образом, максимальная частота колебаний ПП будет составлять  $f = 10$  кГц.

### 2.3.2 Разработка конструкции вакуумметра

Первичный преобразователь вакуумметра, блок измерения положения ПП, блок поддержания автоколебаний ПП и частотомер размещены в малогабаритном металлокерамическом корпусе (рисунок 2.28).

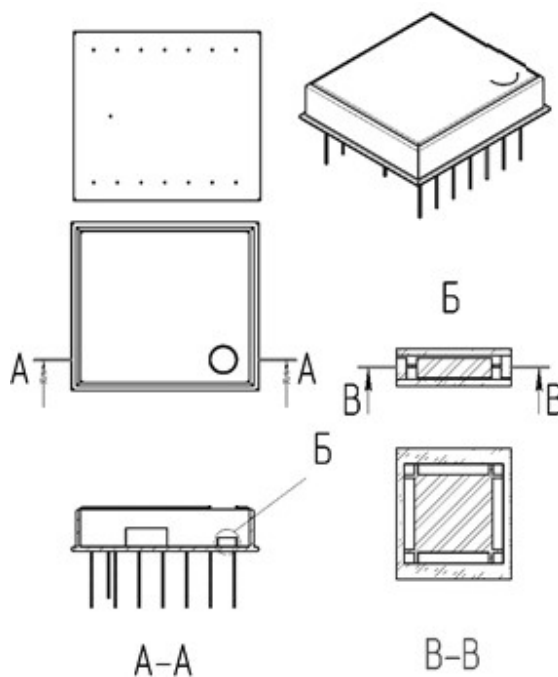


Рисунок 2.28 – Металлокерамический корпус

Первичный измерительный преобразователь (обозначен на рисунке как Б) и электронная схема собираются в металлокерамическом корпусе с габаритными размерами  $16,5 \times 16,5 \times 5,5$  мм. Масса преобразователя не более 5 г. Габаритный чертеж корпуса преобразователя приведен на рисунке 2.29.

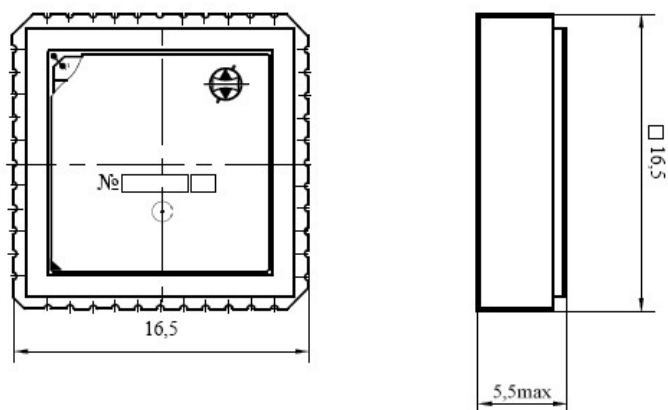
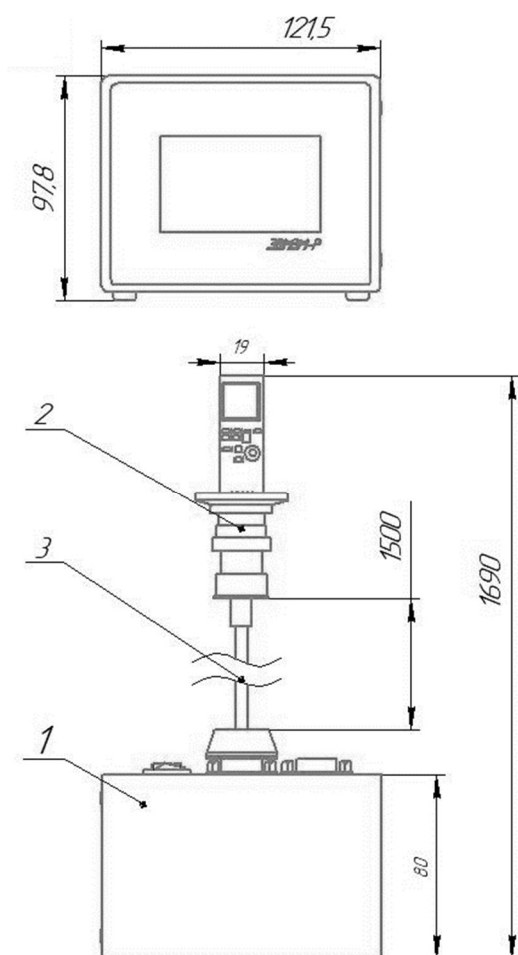


Рисунок 2.29 – Габаритный чертеж корпуса преобразователя

В отдельно стоящем корпусе размещен блок обработки данных и отсчетное устройство. Информация о измеренном значении давления отображается на жидкокристаллическом экране отсчетного устройства.

Общий вид вакуумметра, габаритные и присоединительные размеры приведены на рисунке 2.30.



1 – Отсчетное устройство, 2 – преобразователь давления, 3 – кабель  
интерфейсный

Рисунок 2.30 – Общий вид вакуумметра, габаритные и присоединительные  
размеры

На рисунке 2.31 показан внешний вид экспериментального образца эталонного вакуумметра.



Рисунок 2.31 – Фото деформационно-частотного вакуумметра

Особое внимание при разработке эталонного вакуумметра было уделено блоку автоматического регулирования давления газа, который позволяет реализовать алгоритм автоматической установки поверяемых точек давления газа в вакуумметрической установке согласно МИ 140–89 «Рекомендация. ГСИ. Вакуумметры. Методика поверки», СК-03-231-005-Т «Методика калибровки средств измерения единицы давления для области абсолютных давлений  $1 \cdot 10^{-8}$  -  $1 \cdot 10^5$  Па (вакуумметры)» и другим методикам. Алгоритм для управления процессом калибровки с автоматической установкой поверяемых точек давления газа реализован в виде программного обеспечения в составе измерительного блока эталонного вакуумметра и персонального компьютера. Внешний вид окна управления процессом автоматической калибровки на отсчётном устройстве эталонного вакуумметра показан на рисунке 2.32 а, окна протоколирования результатов измерений на персональном компьютере показан на рисунке 2.32 б.

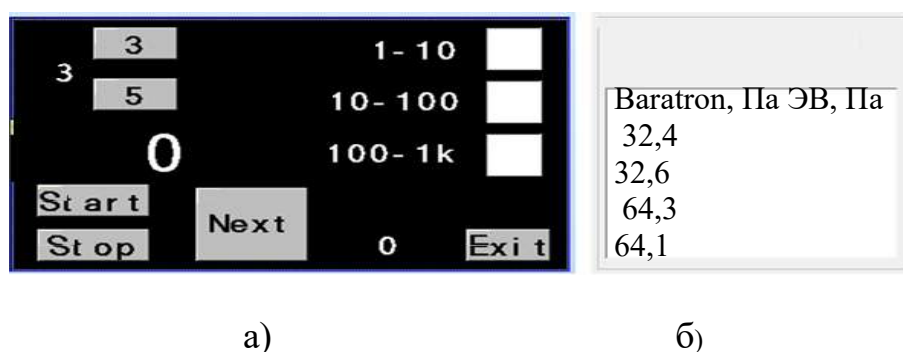


Рисунок 2.32 – Окна управления: а – процессом автоматической калибровки; б – протоколирования результатов измерений

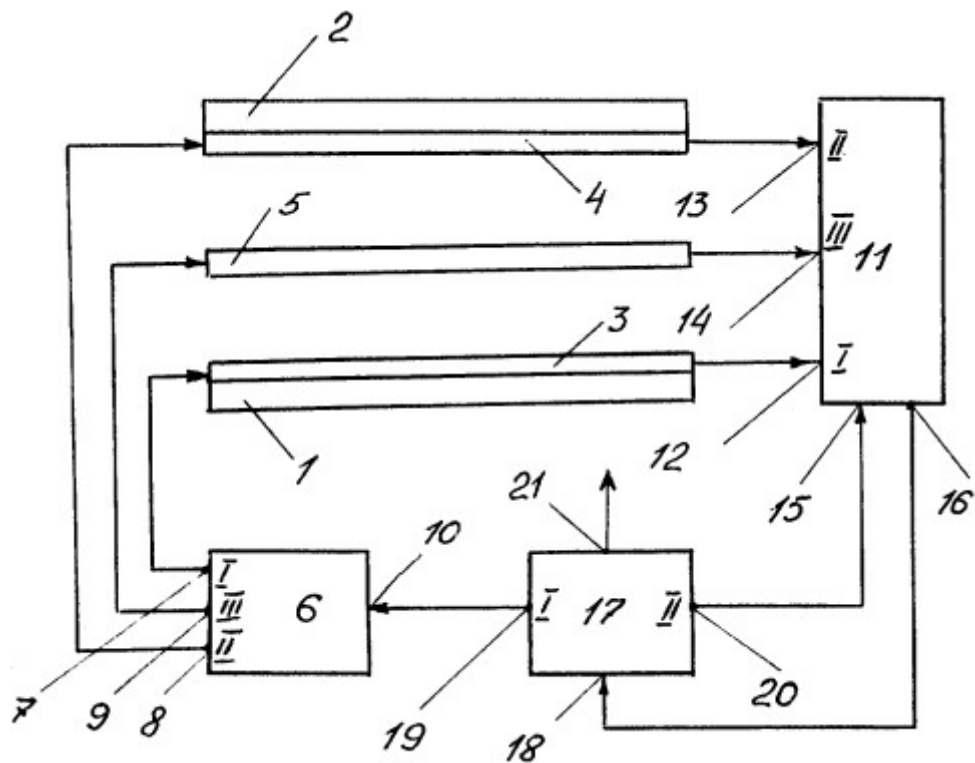
Программное обеспечение позволяет выбрать требуемые декады давления, количество поверяемых точек, осуществить протоколирование результатов измерений, в результате требуемое для калибровки вакуумметров время уменьшено более чем в два раза, что позволило повысить производительность труда поверителя, рационализировать процесс калибровки и поверки.

В результате работы, проделанной во второй главе, предложен оригинальный способ измерения низкого абсолютного давления газа; выполнено построение модели устройства для его осуществления; получено уравнение измерений, разработана методика расчёта параметров конструкции устройства для осуществления нового способа измерения давлений газа, проведено обоснование предложенной конструкции первичного измерительного преобразователя, разработан измерительный блок эталонного вакуумметра с функцией автоматического регулирования давления газа в вакуумметрической установке, изготовлен экспериментальный образец эталонного вакуумметра, реализован алгоритм автоматической калибровки средств измерения низкого давления в виде программного обеспечения, получен сертификат соответствия программного обеспечения «Калибровка вакуумметров 2310-2020» а также разработан и изготовлен программно-аппаратный комплекс, получены акты внедрения в АО «Гирооптика» и ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

## 2.3.3 Выводы к параграфу 2.3

В ходе исследований, выполненных в данном параграфе разработаны структурные электрические схемы вакуумметра. Определены требования к измерительным блокам вакуумметра. Определен верхний диапазон измерений частотомера  $f_{max} = 10$  кГц. Разработана конструкция вакуумметра в виде чертежей.

Подводя итог, работу преобразователя давления деформационно-частотного типа можно описать блок-схемой, изображенной на рисунке 2.33.



1, 2 – неподвижные пластины; 3, 4 – электроды; 5 – подвижная пластина; 6 – источник напряжения; 7, 8, 9, 10 – выходы источника напряжения; 11 – блок измерения положения ПП; 12, 13, 14, 15, 16 – входы, выходы блока измерения положения; 17 – блок поддержания автоколебаний ПП; 18, 19, 20, 21 – входы и выходы блока поддержания автоколебаний

Рисунок 2.33 – Блок-схема преобразователя давления



Преобразователь содержит первую 1 и вторую 2 неподвижные пластины из диэлектрического материала соответственно с электродами 3 и 4, подвижную проводящую пластину 5, источник напряжения 6 с первым 7, вторым 8 и третьим 9 выходами и управляющим входом 10, блок измерения положения ПП, например, измеритель емкости 11 с первым 12, вторым 14 и третьим 14 входами, управляющим входом 15 и выходом 16, а также блок поддержания автоколебаний ПП 17 с входом 18, первым 19 и вторым 20 выходами и сигнальным выходом 21, являющимся выходом преобразователя. Первый 7 и второй 8 выходы источника напряжения 6 соединены соответственно с первым 3 и вторым 4 электродами неподвижных пластин 1 и 2 и с первым 12 и вторым 13 входами измерителя емкости 11, выход 16 которого подключен к входу 18 блока управления 17, управляющие входы 10 и 15 соответственно источника напряжения 6 и измерителя емкости 11 соединены соответственно с первым 19 и вторым 20 выходами блока поддержания автоколебаний ПП 17, а третий выход 9 источника напряжения 6 соединен с ПП 5 и третьим входом 14 блока измерения положения ПП 11.

Преобразователь работает следующим образом: исследуемый газ заполняет пространство между пластинами 1,2,5 преобразователя. В начале работы на электрод 3(или 4) подается напряжение относительно ПП 5. При подаче напряжения возникает электрическое поле, действующее на ПП 5. ПП 5 смещается в сторону электрода 3 (или 4). Величина смещения определяется равенством электростатической силы и упругой силы механического подвеса ПП 5. При снятии напряжения пластина 5 начинает совершать затухающие колебания. Сигнал с блока измерения положения ПП 11 подается в блок поддержания автоколебаний ПП 17. Блок поддержания автоколебаний ПП формирует команды источнику напряжения 6 для подачи напряжений на электроды 3 и 4. Подаваемое таким образом напряжение позволяет поддерживать автоколебания ПП 5. Измеряется частота автоколебаний ПП пропорциональная давлению газа.

Результаты теоретического исследования частотно-деформационного вакуумметра и расчёты параметров конструкции первичного измерительного преобразователя оформлены в виде патента на группу изобретений (способ и устройство) в ФИПС под № RU2749644 С1 «Способ измерения вакуума и устройство для его осуществления», дата подачи заявки 23.11.2020 г.

## 2.4 Выводы к главе 2

В результате исследований, выполненных в главе 2 получены следующие результаты:

- построена модель первичного измерительного преобразователя вакуумметра, выведена формула измерения и коэффициента преобразования;
- в ходе исследований, на основании уравнения измерений, выведенного ранее, были выдвинуты требования к параметрам преобразователя с целью минимизации влияния утечек газа. Для уменьшения влияния утечки газа через боковые грани газового зазора на коэффициент преобразования вакуумметра должно выполняться условие:  $a > 200Z$ . Также были определены требования к относительной разнице между величинами газовых зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$ ,  $\gamma_Z < \pm 10\%$ .
- определены значения геометрических параметров конструкции первичного измерительного преобразователя: размер ПП  $a = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м, толщина газовых зазоров  $Z_1 = Z_2 = 3$  мкм, толщина ПП  $h = 75$  мкм. На основе найденных значений параметров были изготовлены чертежи преобразователя;
- разработаны структурные электрические схемы вакуумметра. Определены требования к измерительным блокам вакуумметра. Определен верхний диапазон измерений частотомера  $f_{max} = 10$  кГц. Разработана конструкция вакуумметра в виде чертежей. Изготовлены экспериментальные образцы вакуумметра;
- разработан блок автоматического регулирования давления газа, программное обеспечение для протоколирования результатов калибровки средств измерений низкого абсолютного давления.

### **ГЛАВА 3 Исследование метрологических характеристик экспериментального образца эталонного вакуумметра**

На основании результатов, полученных в первой и второй главах, определены параметры конструкции первичного измерительного преобразователя, разработаны схемы измерительного блока вакуумметра, конструкция вакуумметра, выполнено исследование метрологических характеристик вакуумметра.

#### **3.1 Исследование неопределенности измерений эталонного вакуумметра**

##### 3.1.1 Анализ источников погрешности

На основании уравнения измерений вакуумметра, выведенного ранее определим источники погрешности измерений вакуумметра и проведем их анализ.

Оценим погрешность коэффициента преобразования, вносимую изменением температуры. Уравнение измерений, согласно формуле 2.2 выглядит следующим образом:

$$P = K(f_p^2 - f_{p.m.}^2),$$

$K = 4\pi^2\rho hZ_0$  – коэффициент преобразования .

От температуры зависит плотность материала ПП  $\rho$  [39]. Объем квадратной ПП с линейными размерами  $a$  и толщиной  $h$  при температуре  $t = 20$  °С будет равен  $V_{20} = a \cdot a \cdot h$ , а зависимость величины объема ПП от температуры можно выразить формулой:

$$V(t) = a \cdot (1 + \alpha(t - 20)) \cdot a \cdot (1 + \alpha(t - 20)) \cdot h \cdot (1 + \alpha(t - 20)) = V_{20} \cdot (1 + \alpha(t - 20))^3,$$

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала ПП. Таким образом, зависимость плотности материала ПП от температуры можно выразить следующей формулой:

$$\rho(t) = \frac{m}{V(t)} = \frac{\rho_{20} V_{20}}{V_{20}(1+\alpha(t-20))^3} = \frac{\rho_{20}}{(1+\alpha(t-20))^3}$$

Также от температуры зависят и величина газовых зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$ . На рисунке 3.1 изображена конструкция первичного измерительного преобразователя давления.

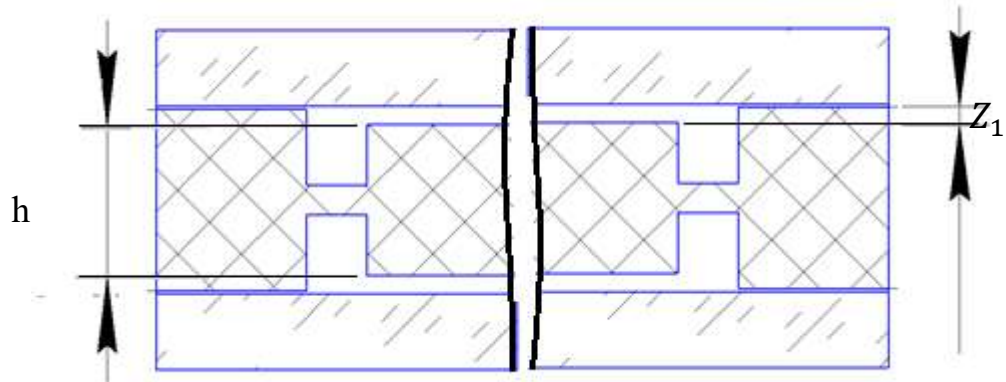


Рисунок 3.1 – Конструкция преобразователя давления

Между двумя стеклянными пластинами зажата кремниевая деталь с вытравленной ПП и элементами подвеса. Соответственно, зависимость толщины ПП от температуры выглядит следующим образом:

$$h = h_{20}(1 + \alpha(t - 20))$$

Зависимость величины газового зазора  $Z = Z_{20}(1 + \alpha(t - 20))$ .

Зависимость коэффициента преобразования от температуры:

$$\begin{aligned} K(t) &= 4\pi^2 \rho(t) h(t) Z_3(t) = \\ &= 4\pi^2 \frac{\rho_{20}}{(1 + \alpha * (t - 20))^3} h_{20} (1 + \alpha(t - 20)) Z_{20} (1 + \alpha(t - 20)) \\ &= \frac{K_{20}}{1 + \alpha(t - 20)} \end{aligned}$$

$K_{20}$  - значение коэффициента преобразования при 20 °С.

Оценим погрешность измерения частоты колебаний ПП. Частота колебаний ПП измеряется частотомером методом дискретного счета числа периодов за калиброванный интервал времени [40]. Значение частоты можно вычислить следующей формулой:

$$f = \frac{N}{T}$$

$N$  – количество дискретных периодов за интервал времени  $T$ .

Погрешность данного метода будет складываться из погрешности отсчета интервала времени  $T$  и погрешности дискретного счета периодов колебаний, абсолютная величина которой не может превысить 1 период колебаний.

Пример построения схемы цифрового дискретного частотомера показан на рисунке 3.2.

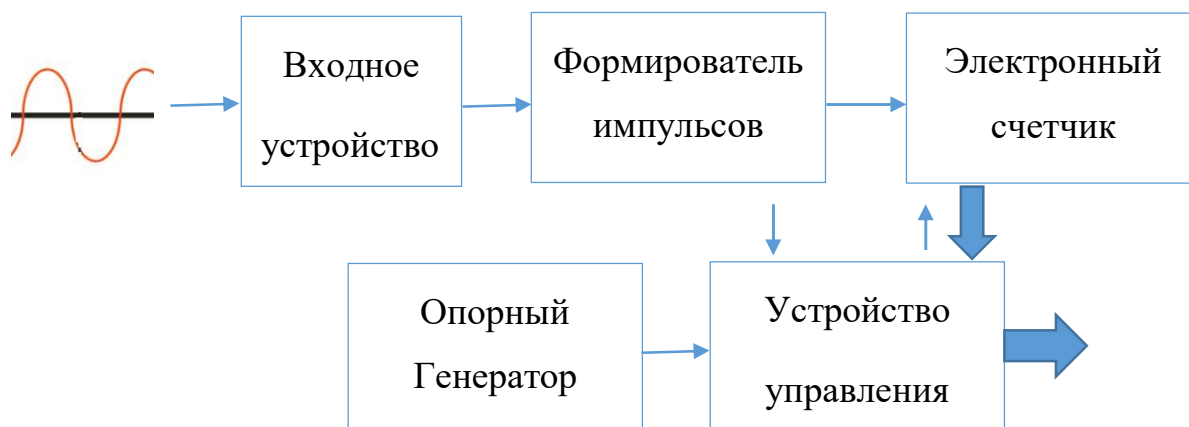


Рисунок 3.2 – Схема цифрового частотомера

Входное устройство, состоящее из широкополосного усилителя и аттенюатора, предназначено для согласования частотомера с источником сигнала. Опорный генератор может быть выполнен на базе высокостабильного кварцевого генератора частотой 16.000 МГц, с температурным коэффициентом не более 0,1 импульса на 1 °С. На вход Формирователя импульсов поступает синусоидальное напряжение с выхода Входного устройства. Формирователь преобразует синусоидальное напряжение в последовательность импульсов постоянной

амплитудой с большой крутизной фронтов, частота следования которых равна частоте измеряемого сигнала. С выхода Формирователя на Электронный счетчик поступают счетные импульсы. Устройство управления обнуляет счетчик в начале временного интервала измерения  $T$ , и считывает его показания по окончании  $T$ , а также отправляет показания счетчика на Блок отображения информации. Временные диаграммы, поясняющие работу частотомера приведены на рисунке 3.3.

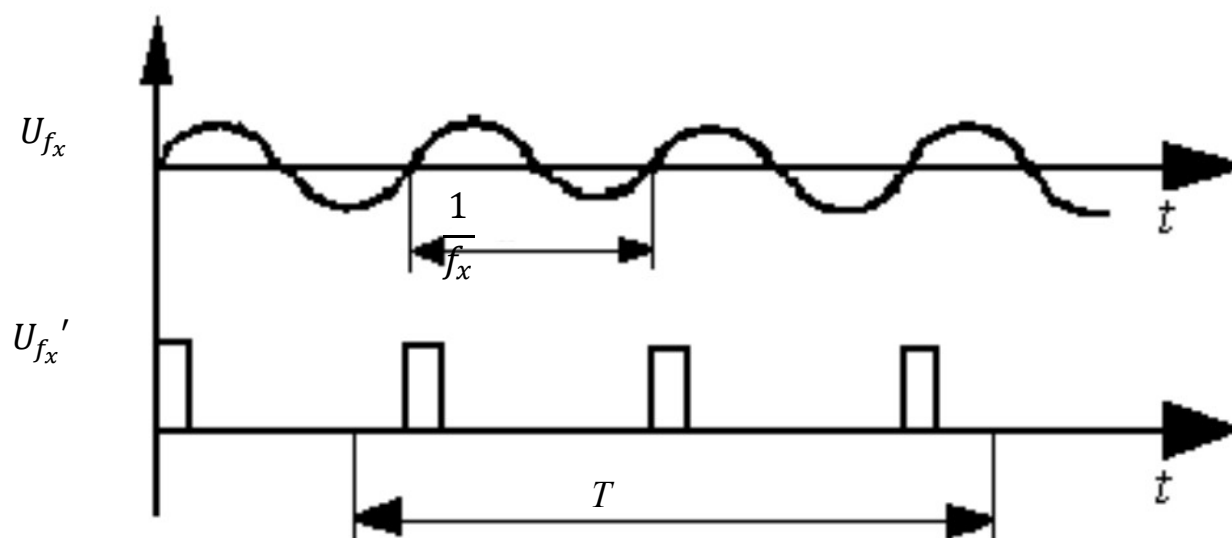


Рисунок 3.3 – Временные диаграммы, поясняющие работу формирователя импульсов дискретного частотомера

Формирователь преобразует синусоидальное напряжение в последовательность импульсов той же частоты.

Относительная погрешность измерения частоты может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T}{T}$$

Значение первого слагаемого  $\frac{\Delta N}{N}$  погрешности дискретности зависит от соотношения времени измерения  $T$  и периода исследуемого сигнала  $\frac{1}{f}$ .

Погрешность дискретности обусловлена несовпадением моментов появления счетных импульсов относительно фронта и спада импульса  $T$ . При этом максимальная абсолютная погрешность счета импульсов не превышает одного импульса  $\Delta N = \pm 1$ . Значение второго слагаемого погрешности  $\frac{\Delta T}{T}$  определяется нестабильностью частоты кварцевого генератора, задающего временной интервал  $T$ . Относительная погрешность времени измерения равна относительной погрешности частоты кварцевого генератора  $\delta_0$  и равна значению порядка  $10^{-7}$ . Формулу погрешности частотомера можно записать следующим образом:

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{N} + \delta_0 = \frac{1}{fT} + \delta_0$$

Значение относительной погрешности обратно пропорционально измеряемому значению частоты.

Абсолютная погрешность измерения частоты составит:

$$\Delta f = \delta_f \cdot f = \frac{1}{T} + \delta_0 \cdot f$$

При периоде измерения частоты  $T = 1$  секунда:

$$\Delta f = 1 + \delta_0 \cdot f$$

3.1.2 Оценка неопределённости измерений по типу В градуировочного коэффициента вакуумметра.

Основываясь на уравнении измерений, полученном во второй главе, выполним оценку неопределённости по типу В градуировочного коэффициента вакуумметра. Построим бюджет неопределённости вакуумметра. Уравнение измерений вакуумметра выглядит следующим образом:

$$P = K(f^2 - f_M^2)$$

где  $K$  – градуировочный коэффициент, определенный экспериментальным методом сличения вакуумметра с эталонным вакуумметром,  $f$  - частота колебаний ПП,  $f_M$  - частота колебаний ПП в отсутствии газа в зазорах преобразователя. Для градуировки вакуумметра использовался эталонный вакуумметр из состава Государственного первичного специального эталона (ГСПЭ) единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне  $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^3$  Па ГЭТ 49–2016, в результате была построена градуировочная характеристика (ГХ), то есть функциональная зависимость на основе результатов измерений входных  $f_i^2$  и соответствующих выходных величин  $P_{эi}$  в  $n$  точках диапазона ( $i = 1, \dots, n$ ). Значение собственной частоты колебаний  $f_1$  при  $P_{э1} \approx 0$ , равно значению собственной частоты колебаний, зависящей только от коэффициента упругости механического подвеса ПП  $f_1 = f_M$ . Построение ГХ проводилось с использованием дополнительной функциональной возможности вакуумметра по автоматической установке точек давления [41] и выполнено в соответствии с [42].

В процессе построения ГХ МЭМС вакуумметра в виде таблицы (в соответствии с пунктом 1.2 МИ 2175-91) записывались показания эталонного вакуумметра (давление в паскалях) и значения частоты (квадрат частоты колебаний ПП в герцах в квадрате).

Процесс градуировки выполнялся в соответствии с [43]. В соответствии с пунктом 6.5.5 МИ 140-89 давление в измерительной камере было понижено до



предельного остаточного давления  $P_0$ , связанного с нижним пределом  $P_{min}$  диапазона измерения градуируемого МЭМС вакуумметра соотношением :

$$P_0 = \alpha P_{min},$$

где  $\alpha$ - коэффициент, значение которого при индивидуальной градуировке рекомендуется выбирать менее 0,01. После установления остаточного давления в измерительной камере в градуировочную таблицу были записаны входная и выходная величина (квадрат частоты колебаний ПП МЭМС вакуумметра и значение остаточного давления  $P_0$ ). С учетом того что нижний диапазон измерения МЭМС вакуумметра  $P_{min} = 10$  Па, технически вакуум на уровне  $P_0$  может быть создан при использовании турбомолекулярного насоса.

Структурная схема измерительной вакуумметрической установки [44] изображена на рисунке 3.4 (условные графические изображения выполнены согласно [45]).

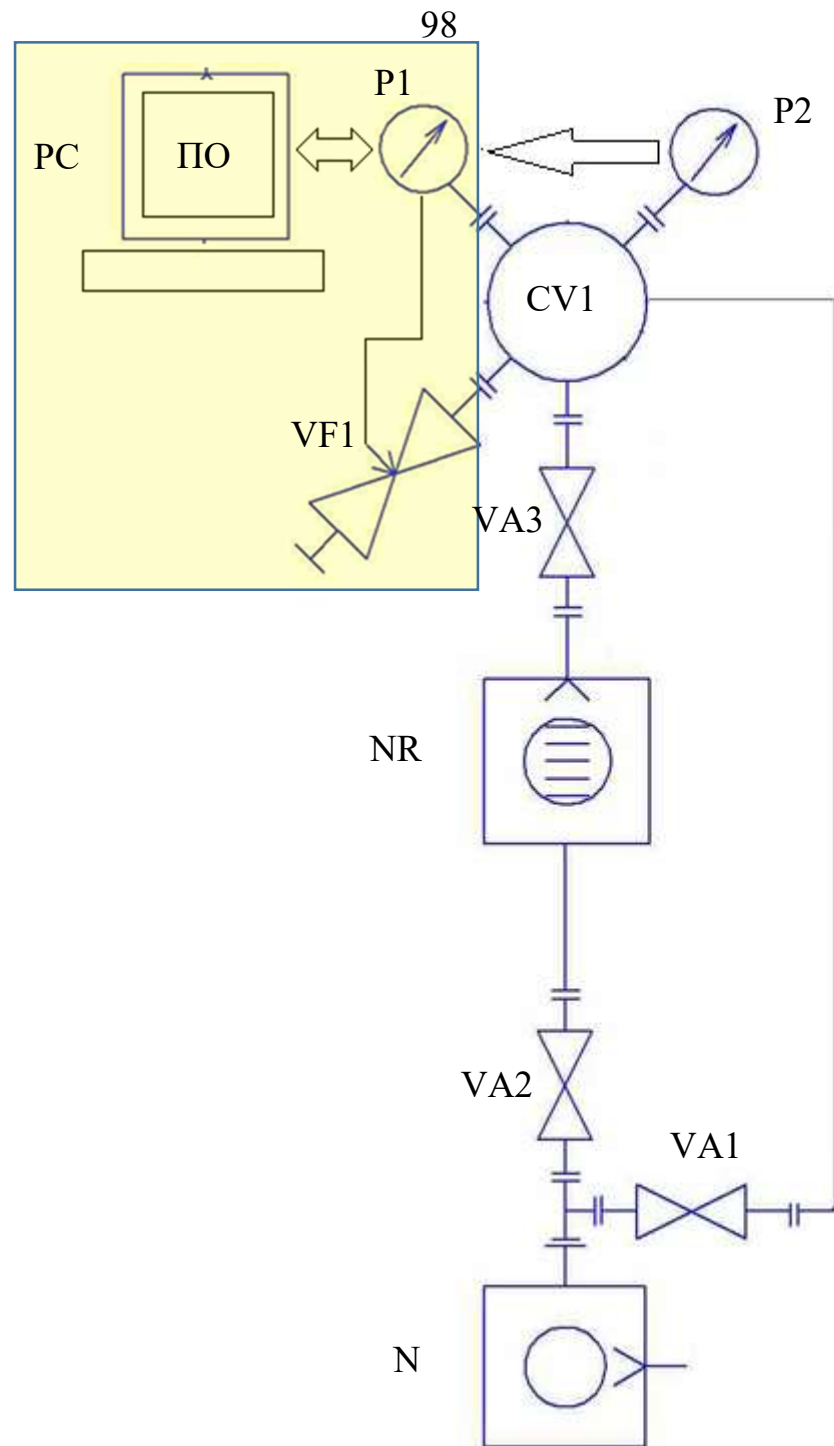


Рисунок 3.4 – Структурная схема вакуумметрической установки

Перед градуировкой экспериментального образца эталонного вакуумметра P1 методом экспериментального сличения с эталонным вакуумметром P2, клапан VA1 приводится в открытое состояние, а клапана VA2, VA3 в закрытое. Включается насос вакуумный механический N. При снижении давления в измерительной камере CV1 до давления, при котором возможно включение

турбомолекулярного насоса NR, открываются клапана VA2, VA3, включается турбомолекулярный насос NR. В соответствии с пунктом 6.5.6 МИ 140-89 осуществлялась регулируемая подача газа в измерительную камеру. В диапазоне измерения давления ( $P_{\text{нпи}} - P_{\text{впи}}$ ) дискретно, последовательно, в порядке возрастания устанавливались градуировочные точки с интенсивностью не менее 5 точек на декаду. В соответствии с пунктом 6.5.7 МИ 140-89 градуировка осуществлялась в статическом режиме (допускается при градуировке вакуумметров, не влияющих на состав газа) с помощью разработанного программного обеспечения, которое управляет вакуумметрической установкой (управление клапанами), протоколирует показания эталонного прибора и показания частотомера деформационно-частотного вакуумметра. Дискретная таблица с ГХ со значениями показаний эталонного вакуумметра P2 в паскалях и частоты колебаний ПП вакуумметра  $f$  в герцах по окончании градуировки записывается в память блока обработки данных вакуумметра. Пример таблицы ГХ содержащей  $n$  точек в диапазоне 10 – 1000 Па показан в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Пример таблицы ГХ МЭМС вакуумметра

$i$	$P_{эi}$ , Па	$f_i^2$ , Гц <sup>2</sup>
1	0.0	$f_M^2 = 2,746E+05$
2	20,5	2,375E+06
3	30,6	3,409E+06
4	40,1	4,381E+06
-	-	-
n	1000,5	1,027E+08

ГХ показана на в виде графика показана на рисунке 3.5.

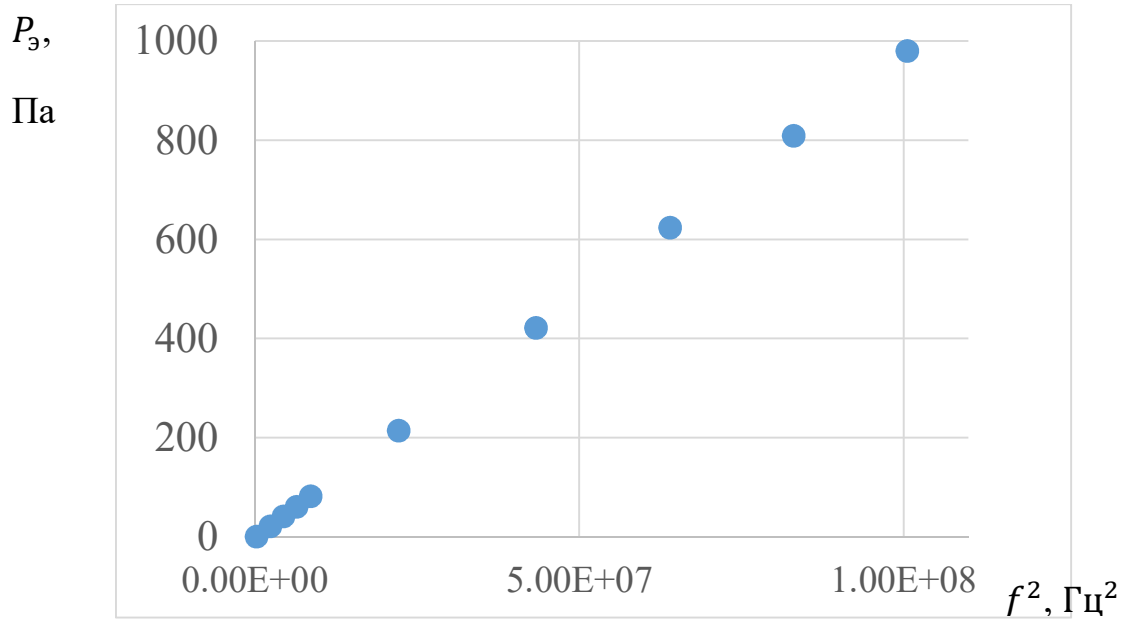


Рисунок 3.5 – Представление ГХ в графическом виде

Значение собственной частоты колебаний  $f_1$  при  $P_{31} \approx 0$ , равно значению собственной частоты колебаний зависящей от коэффициента упругости механического подвеса ПП  $f_1 = f_M$ , часть ГХ с точкой  $f_1 = f_M$  показана на рисунке 3.6.

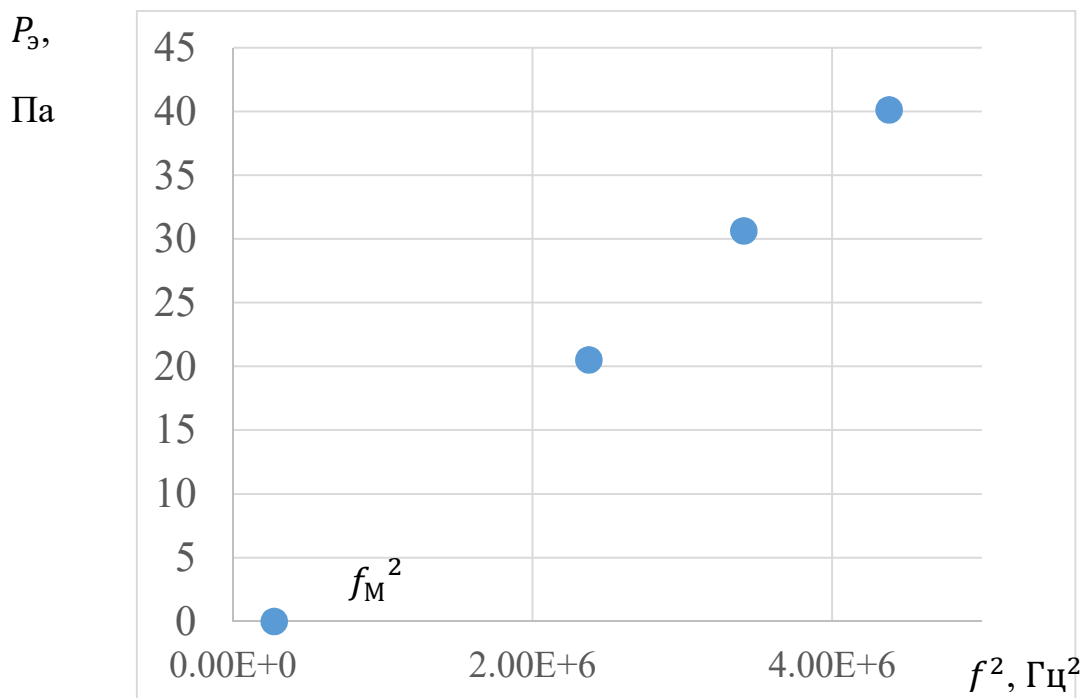


Рисунок 3.6 – Представление ГХ в графическом виде

При измерении давления газа вакуумметром, значение давления может быть вычислено методом кусочно-линейной аппроксимации на основе значения частоты колебаний ПП, полученной от преобразователя и значений таблицы ГХ. Кусочно-линейная аппроксимация выражается в предварительном вычислении тангенса угла наклона прямой линии между соседними точками ГХ (рисунок 3.7).

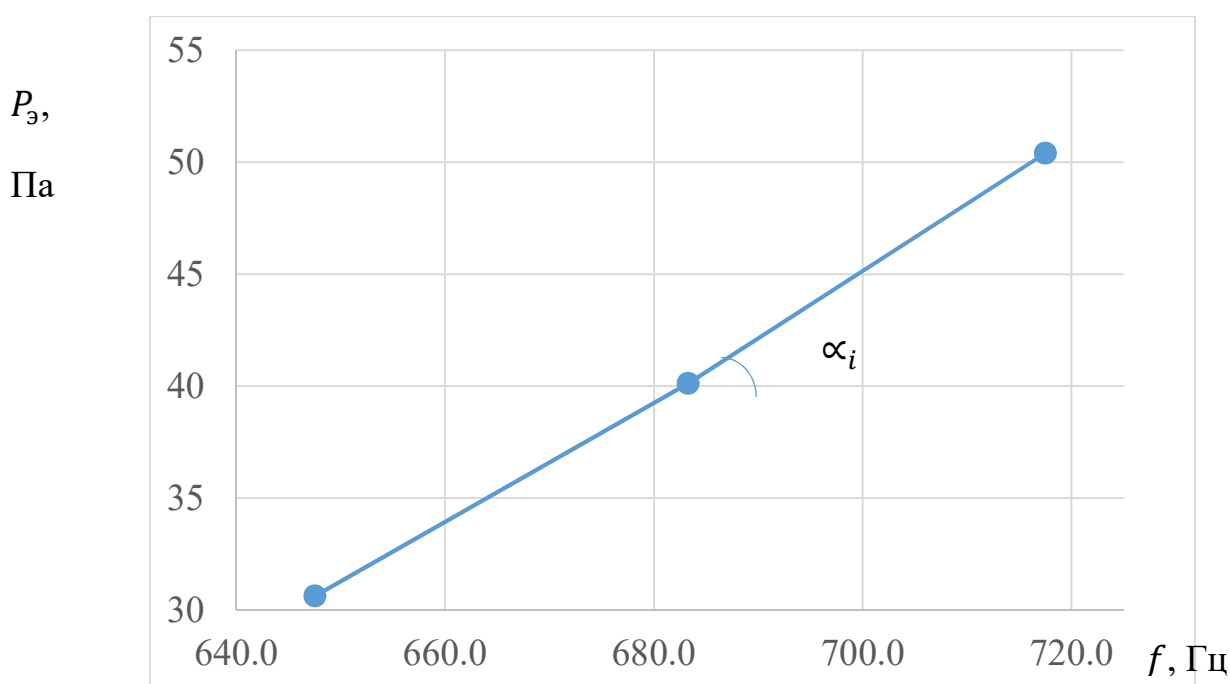


Рисунок 3.7 – Кусочно-линейная аппроксимация ГХ

Значение тангенса угла наклона аппроксимирующей линии может быть найдено по формуле:

$$tg \alpha_i = \frac{P_{эi+1} - P_{эi}}{f_{i+1} - f_i}$$

Таким образом, значение давления вычисляется по следующей формуле:

$$P = tg \alpha_i * (f - f_i) + P_{эi}$$

При использовании кусочно-линейно градуировочной характеристики при вычислении результата измерения  $P$  будет возникать методическая погрешность, обусловленная несовершенством метода измерения, поэтому более перспективным представляется метод линейной аппроксимации ГХ.

Для линейной аппроксимации ГХ применим взвешенный МНК (метод наименьших квадратов) [46]. Задача аппроксимации заключается в нахождении такого коэффициента линейной зависимости  $K$ , при котором функция от переменной  $K$ :

$$F(K) = \sum_{i=1}^n \frac{(P_{\text{э}i} - K(f_i^2 - f_M^2))^2}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} \quad (3.3)$$

принимает наименьшее значение. То есть, при найденном  $K$ , сумма отношений квадратов отклонений экспериментальных данных от найденной прямой к квадратам среднеквадратичного отклонения значения  $P_{\text{э}i}$  будет наименьшей, таким образом, решение сводится к нахождению экстремума функции. Для нахождения экстремума функции (3.3) найдем ее частную производную по переменной  $K$ .

$$\frac{\partial F}{\partial K} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{(P_{\text{э}i} - K(f_i^2 - f_M^2))^2}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} \right)' = \sum_{i=1}^n \left( \frac{2}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (P_{\text{э}i} - K(f_i^2 - f_M^2)) (-f_i^2 + f_M^2) \right)$$

Для нахождения значения  $K$  приравняем полученную производную нулю:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{2}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (P_{\text{э}i} - K(f_i^2 - f_M^2)) (-f_i^2 + f_M^2) \right) = 0$$

Упростим полученное выражение вынеся постоянный множитель 2 за оператор суммирования и раскрыв скобки:

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (P_{\text{э}i} - K(f_i^2 - f_M^2)) (-f_i^2 + f_M^2) \right) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n \left( -\frac{P_{\text{э}i}}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (f_i^2 - f_M^2) + \frac{1}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} K(f_i^2 - f_M^2)^2 \right) &= 0 \\ -\sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{э}i}}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (f_i^2 - f_M^2) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} K(f_i^2 - f_M^2)^2 &= 0 \\ K \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (f_i^2 - f_M^2)^2 &= \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{э}i}}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (f_i^2 - f_M^2) \end{aligned}$$

Таким образом, коэффициент К находится из формулы:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{P_{эi}}^2} P_{эi} (f_i^2 - f_M^2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{P_{эi}}^2} (f_i^2 - f_M^2)^2} \quad (3.4)$$

Методом непосредственного сличением с рабочими эталоном 1-го разряда из состава ГЭТ 49–2016, вакуумметром Баратрон 690, по формуле 3.4, было получено значение градуировочного коэффициента:

$$K = 9,77 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}$$

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в области низкого абсолютного давления имеет следующие измерительные возможности согласно таблице калибровочных и измерительных возможностей (Calibration and Measurement Capabilities CMC) по данным международного бюро мер и весов [47] [48]:

- в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^3$  Па неопределённость измерений давления газа  $p$  определяется выражением  $7,2 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-4} \cdot p$ .

- в диапазоне  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^3$  Па (при доверительной вероятности 95 % и коэффициенте охвата  $k = 2$ ) расширенная неопределённость измерения давления линейно возрастает от  $1 \cdot 10^{-5}$  Па до 6,6 Па. Зависимость  $\Delta P_3$  от давления представлена на рисунке 3.8.

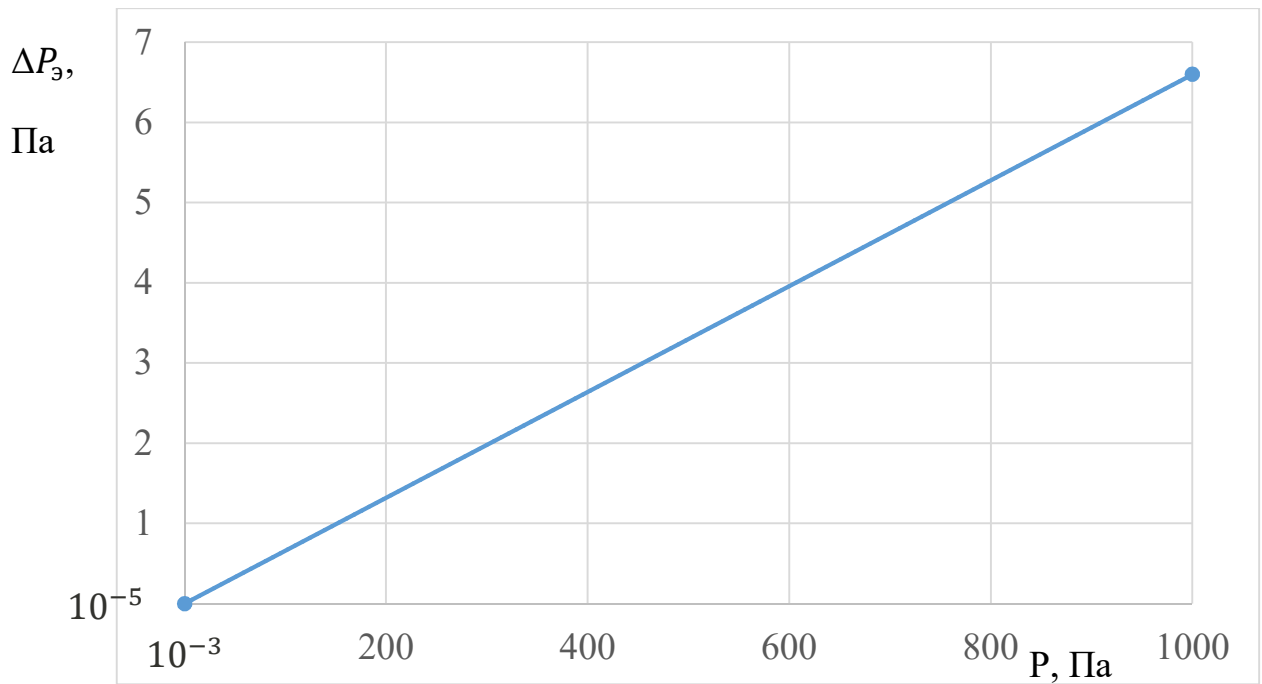


Рисунок 3.8 – зависимость  $\Delta P_3$  от давления

Таким образом, зависимость  $\Delta P_3$  от давления будет выражаться следующей формулой:

$$\Delta P_3 = 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot P + 3,4 \cdot 10^{-6}$$

Предел неопределённости значения давления эталонного вакуумметра  $P_{эi}$ , равен:

$$\Theta_{P_i} = \Delta P_3 = 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot P_{эi} + 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па.}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} u_B(P_{эi}) &= \frac{\Theta_{P_{эi}}}{2} = \frac{6,6 \cdot 10^{-3} \cdot P_{эi} + 3,4 \cdot 10^{-6}}{2} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_{эi} + 2 \cdot 10^{-6} \\ &\approx 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_{эi} \text{ Па} \end{aligned}$$

Так как  $\sigma_{P_{эi}} = u_B(P_{эi}) = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_{эi}$ , перепишем формулу 3.4 в следующем виде:



$$\begin{aligned}
 K &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} P_{\text{э}i} (f_i^2 - f_M^2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{P_{\text{э}i}}^2} (f_i^2 - f_M^2)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{э}i})^2} P_{\text{э}i} (f_i^2 - f_M^2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{э}i})^2} (f_i^2 - f_M^2)^2} \\
 &= \frac{\frac{1}{(3,3 \cdot 10^{-3})^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_{\text{э}i}^2} P_{\text{э}i} (f_i^2 - f_M^2)}{\frac{1}{(3,3 \cdot 10^{-3})^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_{\text{э}i}^2} (f_i^2 - f_M^2)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\text{э}i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2}}
 \end{aligned}$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности по давлению для каждого из  $P_{\text{э}i}$   $c_{P_i} = \frac{\partial K}{\partial P_{\text{э}i}}$  рассчитав частную производную полученной формулы по  $P_{\text{э}i}$ :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial K}{\partial P_{\text{э}i}} &= \left( \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\text{э}i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2}} \right)' \\
 &= \frac{\left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\text{э}i}} \right)' \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\text{э}i}} \right) \left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2} \right)'}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2} \right)^2} \\
 &= \frac{-\frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\text{э}i}^2} \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\text{э}i}} \right) \left( -\frac{2(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^3} \right)}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\text{э}i}^2} \right)^2}
 \end{aligned}$$

Абсолютную погрешность измерения частоты найдем по формуле (2.3):

$$\Delta f_i = 1 + \delta_0 \cdot f_i \text{ Гц}$$

Неопределённость измеренного значения частоты, равно  $\Theta_{f_i} = \Delta f_i$ . Тогда:

$$u_B(f_i) = \frac{\Theta_{f_i}}{\sqrt{3}} = \frac{1 + \delta_0 \cdot f_i}{1,73} \text{ Гц}$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности по частоте как частную производную  $c_{f_i} = \frac{\partial K}{\partial f_i}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial f_i} &= \left( \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\partial i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\partial i}^2}} \right)' \\ &= \frac{\left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\partial i}} \right)' \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\partial i}^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\partial i}} \right) \left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\partial i}^2} \right)'}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\partial i}^2} \right)^2} \\ &= \frac{\frac{2f_i}{P_{\partial i}} \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\partial i}^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{\partial i}} \right) \cdot 2(f_i^2 - f_M^2) \cdot 2f_i}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{\partial i}^2} \right)^2} \end{aligned}$$

Формула выражающая стандартную неопределённость коэффициента  $K$  будет выглядеть следующим образом:

$$u_B(K) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial K}{\partial P_{\partial i}} \cdot u_B(P_{\partial i}) \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial K}{\partial f_i} \cdot u_B(f_i) \right)^2}$$

Рассчитанная зависимость значения  $u_B(K)$  равна соответственно:

$$u_B(K) = 4,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}.$$

Используя результаты исследований, полученных ранее (уравнение измерений, зависимость коэффициента  $K$  от температуры, погрешность измерения частоты), составим бюджет неопределённости руководствуясь рекомендациями из [1].

Проведем оценку стандартных неопределённостей измерений по типу В, обусловленных источниками неопределённости, имеющими систематический характер, при равномерном распределении внутри их пределов. Уравнение измерений МЭМС вакуумметра выглядит следующим образом:

$$P = \frac{K_{20}}{1 + \alpha \cdot (t - 20)} (f^2 - f_M^2) \quad (3.5)$$

$P$  – абсолютное давление газа, Па;

$K_{20}$  – градуировочный коэффициент вакуумметра;

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала ПП преобразователя, град<sup>-1</sup>;

$t$  – температура преобразователя, °С;

$f$  – частота колебаний ПП, Гц;

$f_M$  – частота колебаний ПП при «отсутствии» газа в газовых зазорах.

Рассчитаем коэффициент чувствительности по градуировочному коэффициенту как производную формулы 3.3 по параметру  $K$ :

$$c_K = \frac{\partial P}{\partial K} = \frac{(f^2 - f_M^2)}{1 + \alpha \cdot (t - 20)}$$

Принимая  $t = 21$  °С имеем:

$$c_K = \frac{(f^2 - f_M^2)}{1 + \alpha}$$

Согласно формуле 4.3  $(f^2 - f_M^2) = \frac{P \cdot (1 + \alpha)}{K}$ , тогда :

$$c_K = \frac{\frac{P \cdot (1 + \alpha)}{K}}{1 + \alpha} = \frac{P}{K}$$

Зависимость  $(\frac{dP}{dK})^2 \cdot u_B^2(K)$  от давления представлена на рисунке 3.12.

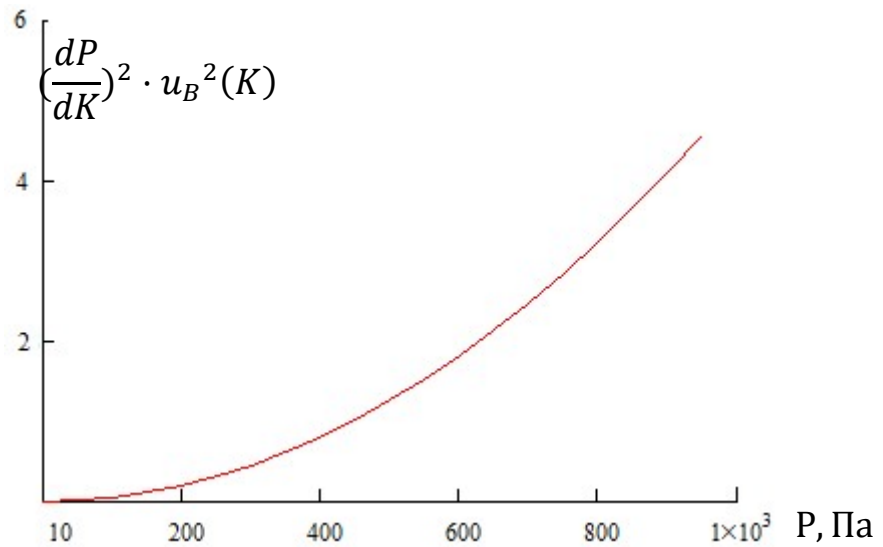


Рисунок 3.12 – Зависимость значения  $(\frac{dP}{dK})^2 \cdot u_B^2(K)$  от давления

- Пределы неопределённости значения температурного коэффициента линейного расширения материала П, равны  $\Theta\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Тогда:

$$u_B(\alpha) = \frac{\Theta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{1,732} = 2,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности по температурному коэффициенту линейного расширения материала ПП:

$$c_\alpha = \frac{\partial P}{\partial \alpha} = - \frac{K \cdot (f^2 - f_M^2) \cdot (t - 20)}{(1 + \alpha \cdot (t - 20))^2} = - \frac{K \cdot \frac{P \cdot (1 + \alpha)}{K}}{(1 + \alpha)^2} = - \frac{P}{1 + \alpha}$$

Зависимость  $(\frac{dP}{d\alpha})^2 \cdot u_B^2(\alpha)$  от давления представлен на рисунке 3.13.

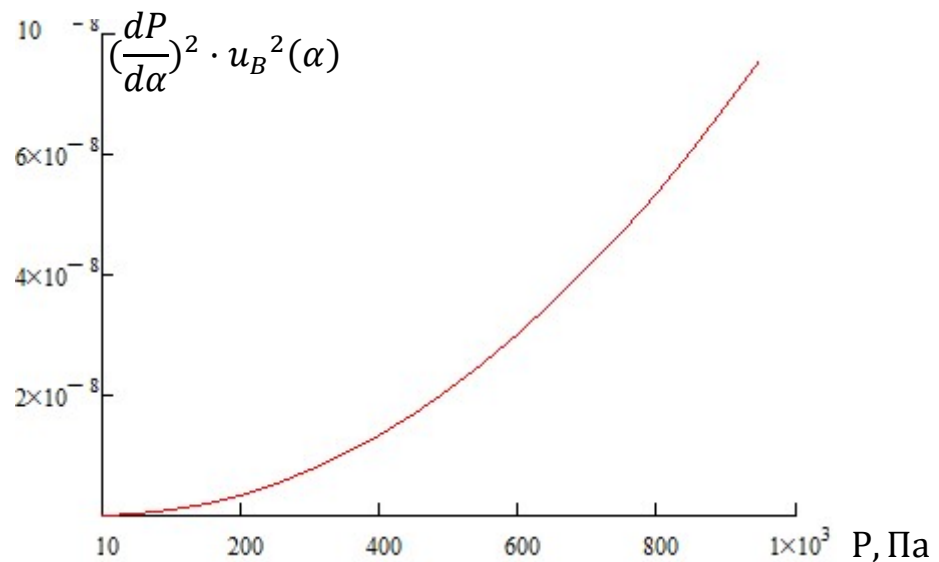


Рисунок 3.13 – Зависимость значения  $(\frac{dP}{d\alpha})^2 \cdot u_B^2(\alpha)$  от давления

- Пределы неопределённости значения температуры преобразователя, равны  $\Theta_t = \pm 0,05$  °С. Тогда:

$$u_B(t) = \frac{\Theta_t}{\sqrt{3}} = \frac{0,05}{1,732} = 0,029 \text{ °С}$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности по температуре:

$$\begin{aligned} c_t = \frac{\partial P}{\partial t} &= - \frac{K \cdot (f^2 - f_M^2) \cdot \alpha}{(1 + \alpha \cdot (t - 20))^2} = - \frac{K \cdot (f^2 - f_M^2) \cdot \alpha}{(1 + \alpha)^2} = - \frac{K \cdot \frac{P \cdot (1 + \alpha)}{K} \cdot \alpha}{(1 + \alpha)^2} \\ &= - \frac{P \cdot \alpha}{1 + \alpha} \end{aligned}$$

Зависимость  $(\frac{dP}{dt})^2 \cdot u_B^2(t)$  от давления представлен на рисунке 3.14.

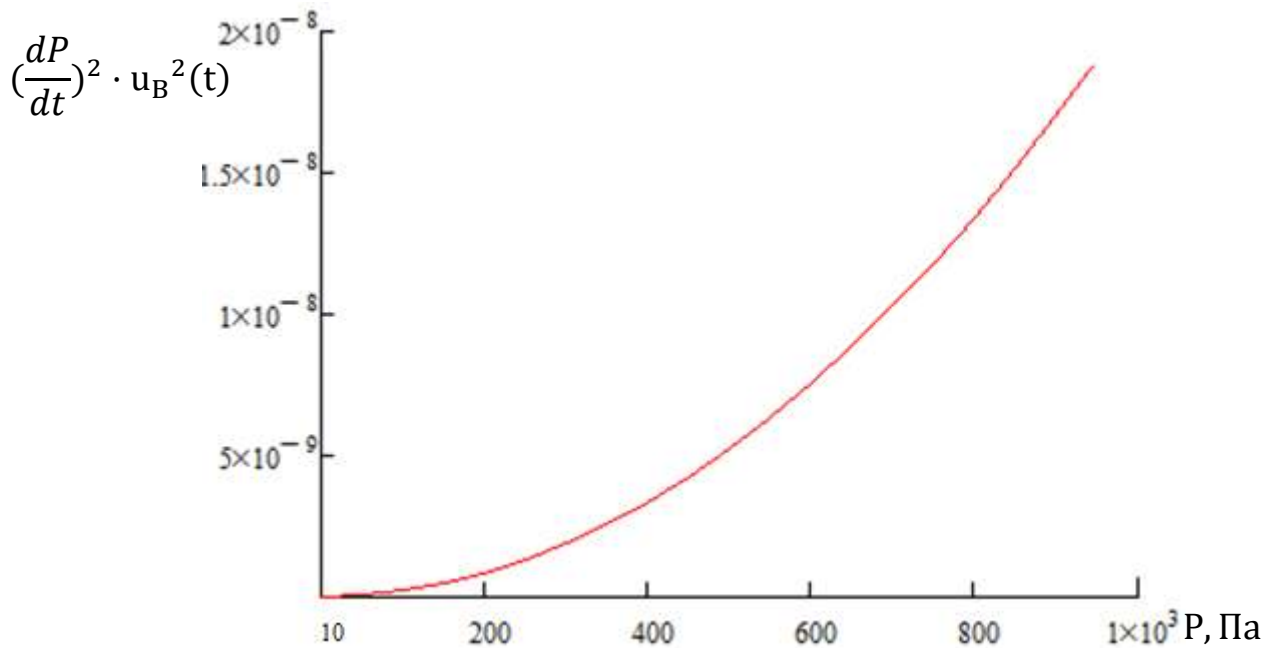


Рисунок 3.14 – Зависимость значения  $(\frac{dP}{dt})^2 \cdot u_B^2(t)$  от давления

- Пределы неопределённости измерения значения частоты колебания  $f$  ПП, согласно формуле (4.2)  $u_B(f) = 0,58$  Гц

Рассчитаем коэффициент чувствительности по частоте:

$$c_f = \frac{\partial P}{\partial f} = \frac{2 \cdot K \cdot f}{1 + \alpha \cdot (t - 20)} = \frac{2 \cdot K \cdot f}{1 + \alpha} = \frac{2 \cdot K}{1 + \alpha} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot (1 + \alpha)}{K} + f_M^2}$$

Зависимость  $(\frac{dP}{df})^2 \cdot u_B^2(f)$  от давления представлена на рисунке 3.15.

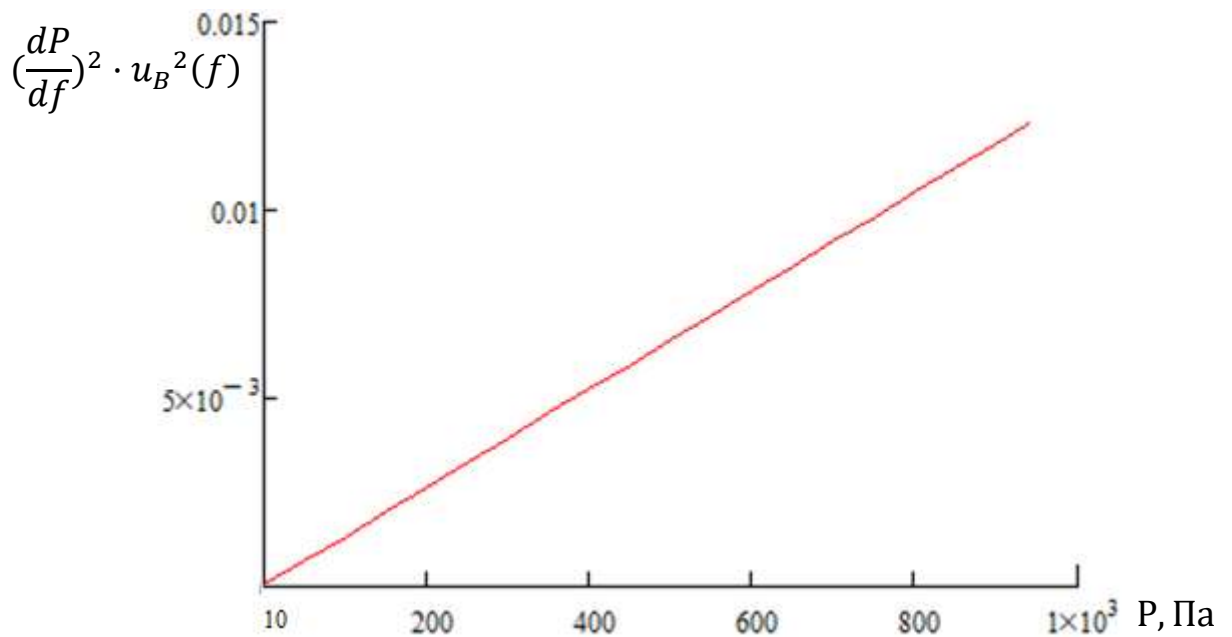


Рисунок 3.15 – Зависимость значения  $(\frac{dP}{df})^2 \cdot u_B^2(f)$  от давления

При «отсутствии» газа в газовых зазорах преобразователя, собственная частота колебаний  $f_M$  равна 524 Гц. Абсолютную погрешность измерения частоты найдем по формуле (4.1):

$$\Delta f = 1 + \delta_0 \cdot f = 1 + 10^{-7} \cdot 524 = 1 \text{ Гц}$$

Неопределённость измеренного значения частоты, равно  $\Theta_{f_M} = 1 \text{ Гц}$

- Пределы неопределённости измерения значения частоты колебания  $f_M$  ПП при условии отсутствия газа в газовом зазоре:

$$u_B(f_M) = \frac{\Theta_{f_M}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{1,732} = 0,58 \text{ Гц}$$

Рассчитаем коэффициент чувствительности по частоте колебания  $f_M$  ПП при условии «отсутствия» газа в газовых зазорах преобразователя:

$$c_{f_M} = \frac{\partial P}{\partial f_M} = -\frac{2 \cdot K \cdot f_M}{1 + \alpha \cdot (t - 20)} = -\frac{2 \cdot 9,77 \cdot 10^{-6} \cdot 524}{1 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot (21 - 20)} = -1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}}$$

$$\text{Значения } \left(\frac{dP}{df_M}\right)^2 \cdot u_B^2(f_M) = (-1 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,58^2 = 3,5 \cdot 10^{-5}$$



Составляющие суммарной стандартной неопределённости результата измерений эталонного вакуумметра приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Составляющие суммарной стандартной неопределённости результата измерений эталонного вакуумметра

Составляющая стандартной неопределённости $u(x_n)$	Источник неопределённости	Значение стандартной неопределённости $u(x_n)$	$c_n = \frac{\partial P}{\partial x_n}$	$u_n(P) =  c_n u(x_n)$ , Па
$u(K_{20})$	Градуировочная характеристика	$4,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}$	$1,0 \cdot 10^6 \text{ Гц}^2$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
$u(\alpha)$	Коэффициент теплового расширения материала ПП	$3,0 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$	$-10 \text{ Па} \cdot ^\circ\text{C}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
$u(t)$	Температура первичного измерительного преобразователя	$1,5 \cdot 10^{-1} ^\circ\text{C}$	$-5,0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Па}}{^\circ\text{C}}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
$u(f)$	Частота автоколебаний ПП	$5,8 \cdot 10^{-1} \text{ Гц}$	$2,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
$u(f_M)$	Частота автоколебаний ПП при $P < \frac{P_{\text{нпн}}}{10^3}$	$5,8 \cdot 10^{-1} \text{ Гц}$	$-1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
$u_A$	Стандартная неопределённости измерений, оцениваемая по типу А(при N=10)	$2,0 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$	1	$2,0 \cdot 10^{-2}$
$u_{\Sigma}$	Стандартная неопределённости значения единицы, воспроизводимого или хранимого вышестоящим эталоном	$3,3 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$	1	$3,3 \cdot 10^{-2}$
$u_c(P) = \sqrt{\sum_{n=1}^7 ( c_n u(x_n))^2} = 5,9 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$				

Суммарная стандартная неопределённость измерений оценена по формуле:

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{dP}{dK}\right)^2 \cdot u_B^2(K) + \left(\frac{dP}{d\alpha}\right)^2 \cdot u_B^2(\alpha) + \left(\frac{dP}{dt}\right)^2 \cdot u_B^2(t) + \left(\frac{dP}{df}\right)^2 \cdot u_B^2(f) + \left(\frac{dP}{df_M}\right)^2 \cdot u_B^2(f_M)}$$

Наибольший вклад в суммарную стандартную неопределённость вносит значение  $\left(\frac{dP}{dK}\right)^2 \cdot u_B^2(K)$ , следовательно можно записать :

$$u_B \approx \frac{dP}{dK} \cdot u_B(K) = \frac{P}{K} \cdot u_B(K) = \frac{P}{9,77 \cdot 10^{-6}} \cdot 4,4 \cdot 10^{-8} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot P$$

Проведём расчёт суммарной и расширенной неопределённостей. При передаче размера единицы при калибровке увеличивается неопределённость размера единицы. Стандартная неопределённость значения единицы, полученного деформационно-частотным вакуумметром при калибровке будет выражаться формулой:

$$u_C = \sqrt{u_3^2 + u_A^2 + u_B^2},$$

где  $u_3$  – стандартная неопределённость значения единицы, воспроизводимого или хранимого вышестоящим эталоном, использованным при калибровке,

$u_A$  – стандартная неопределённость измерений, оцениваемая по типу А, источниками которой являются случайные погрешности эталона, калибруемого СИ и метода измерений,

$u_B$  – стандартная неопределённость измерений, оцениваемая по типу В, обусловленная погрешностями передачи размера единицы.

$$u_C = \sqrt{(3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P)^2 + (4,5 \cdot 10^{-3} \cdot P)^2} \approx 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot P$$

Расширенную неопределённость при  $k=2$  оценивают по формуле:

$$U_{0,95} = k \cdot u_C = 2 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot P \approx 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot P \text{ Па}$$

Полученное значение доказывает высокий уровень точности деформационно-частотного вакуумметра. Осуществленный вакуумметр прошел

экспериментальное метрологическое исследование в ходе приемочных испытаний, о чем составлен акт (приложение Б). Проведённое экспериментальное исследование подтвердило правильность положений и расчётов, проведённых в данной диссертационной работе.

### 3.1.3 Выводы к параграфу

В результате исследований, выполненных в параграфе 3.1 были достигнуты следующие результаты:

- в результате выполненных исследований источников погрешности была проведена оценка влияния температуры на коэффициент преобразования К:

$$K(t) = \frac{K_{20}}{1+\alpha(t-20)}$$

- проанализирована погрешность измерения частоты колебаний ПП с помощью дискретного частотомера. Абсолютная погрешность измерения частоты составит:  $\Delta f = \delta_f \cdot f = \frac{1}{T} + \delta_0 \cdot f$ , где  $\delta_0 = 10^{-7}$  – относительная погрешность частоты опорного генератора, T – временной интервал подсчета импульсов,  $f$  – значение частоты;

- построена ГХ деформационно-частотного вакуумметра;

- выполнена оценка неопределённости по типу В градуировочного коэффициента вакуумметра  $u_B(K) = 4,4 \cdot 10^{-8}$ ;

- выполнена оценка неопределённости измерений по типу В вакуумметра  $u_B = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot P$ ;

- выполнен расчёт расширенной неопределённости вакуумметра

$$U_{0.95} = 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot P \text{ Па.}$$

## 3.2 Экспериментальное исследование метрологических характеристик эталонного вакуумметра

### 3.2.1 Экспериментальное исследование метрологических характеристик эталонного вакуумметра

Испытания проводились в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Результаты экспериментального исследования метрологических характеристик эталонного вакуумметра представлены в Приложении В. Исследования проводились методом непосредственного сличением с рабочими эталонами 1-го разряда из состава ГЭТ 49–2016, вакуумметром Баратрон 690. Была проведена поверка диапазона измерений единицы давления и определение основной погрешности, а также значение среднеквадратического отклонения в результате серий измерений. Результаты одной из серий измерений представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерений.

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-Р, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	10,67	10,75	-0,7
2	31,86	32,41	-1,7
3	61,68	62,32	-1,0
4	90,93	91,73	-0,9
5	112,1	112,4	-0,3
6	303,4	303,7	-0,1
7	604,7	599,9	0,8
8	899	893,4	0,6
9	2044	2054	-0,5
10	3013	3021	-0,3
11	5967	6030	-1,0
12	9004	9072	-0,7
13	10051	10101	-0,5

Диапазон измерений составил 10-10000 Па с допускаемой относительной погрешностью не более 2 %.

Также были проведены многократные исследования метрологических характеристик для исследования стабильности точностных характеристик. Полученные значения среднеквадратических отклонений не превысили 0,5 %.

### Выводы к параграфу

В результате экспериментальных исследований метрологических характеристик эталонного вакуумметра были получены следующие результаты:

- диапазон измерений составил 10-10000 Па;
- допускаемая относительная погрешность не более 2 %.

### 3.3 Выводы к главе 3

В результате исследований, выполненных в параграфе 3.3 были достигнуты следующие результаты:

- выполнена оценка неопределённости по типу В градуировочного коэффициента вакуумметра  $u_B(K) = 4,4 \cdot 10^{-8}$ ;
- выполнена оценка неопределённости измерений по типу В вакуумметра  $u_B = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot P$ ;
- выполнен расчёт расширенной неопределённости вакуумметра  $U_{0,95} = 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot P$  Па;
- выполнено экспериментальное исследование метрологических характеристик осуществленного разработанного вакуумметра, подтвердившее правильность положений и расчётов, проведённых в данной диссертационной работе, диапазон измерений составил 10-10000 Па, допускаемая относительная погрешность не более 2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагаются новые решения актуальной научной задачи – повышение уровня метрологической обеспеченности в Российской Федерации путем разработки и исследования оригинальных научных, технических и методических решений, в частности, нового способа измерения низкого абсолютного давления газа, эталонного вакуумметра, основанного на новом способе измерения и программно-аппаратного комплекса, включающего эталонный вакуумметр, повышающего эффективность процедур поверки, калибровки средств измерений низкого абсолютного давления газа.

Выполненные исследования позволяют создать аппаратную и методическую базу для повышения уровня обеспечения единства измерений в Российской Федерации в области абсолютного давления газа. Достижение цели подтверждается успешными экспериментальными исследованиями метрологических характеристик осуществленного экспериментального образца разработанного вакуумметра, подтвердившими правильность положений и расчётов, проведённых в данной диссертационной работе. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1. На основании анализа и исследования методов измерения и характеристик современных эталонных средств измерений низкого абсолютного давления газа были определены направления разработки и целевые метрологические характеристики отечественного транспортируемого эталонного вакуумметра.

2. Исследован новый способ измерения низкого абсолютного давления газа, заключающийся в измерении собственной частоты автоколебаний пластины-осциллятора, зависящей от упругих свойств объема газа.

3. Построена модель устройства для осуществления нового способа измерения давления газа, выведено уравнение измерений.

4. Предложена методика расчёта значений геометрических параметров конструкции устройства для осуществления нового способа измерения абсолютного давления газа в виде первичного измерительного преобразователя разрабатываемого эталонного вакуумметра. Определена требуемая технология изготовления первичного измерительного преобразователя (микросистемная техника).

5. Выполнены исследования метрологических характеристик экспериментального образца разработанного эталонного вакуумметра. В процессе исследования применялось поверенное и калиброванное оборудование из состава первичного эталона, валидированные методики калибровки и поверки вакуумметров. Экспериментально определено значение градуировочного коэффициента экспериментального образца разработанного эталонного вакуумметра; раскрыты значимые факторы, влияющие на результаты измерений разработанного эталонного вакуумметра.

6. Подтверждено соответствие метрологических характеристик разработанного эталонного вакуумметра требованиям, предъявляемым к рабочим эталонам государственных поверочных схем в области измерения низкого абсолютного давления.

7. Разработаны научно-методические и технологические принципы построения, алгоритмы программно-аппаратного комплекса, включающего разработанный эталонный вакуумметр, повышающего эффективность процедур поверки и калибровки вакуумметров путём автоматизации данных процедур.

Внедрение полученных в ходе диссертационной работы результатов позволит обеспечить потребности промышленности и метрологических лабораторий в виде эталонных вакуумметров, сохранить метрологическую самостоятельность Российской Федерации, повысить эффективность процедур поверки и калибровки средств измерений низкого абсолютного давления газа.

### Перечень библиографических записей

1. Руководство по выражению неопределенности. – Санкт-Петербург : издательство ФГУП ВНИИМ, 1999. – Текст : непосредственный.
2. Розанов Л. Н. Вакуумное технологическое оборудование : учебное пособие / Л.Н. Розанов – Санкт-Петербург : издательство Политехнического Университета, 2012.– 26 с. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ 8.271–77 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений давления. Термины и определения. Государственный стандарт : введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 19 декабря 1977 г. № 2934 / разработан Всесоюзным ордена Красного Знамени научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева – Текст : непосредственный.
4. Государственная поверочная схема для средств измерений абсолютного давления в диапазоне 0,1 Па – 10 МПа : утверждена приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6.12.2019 / разработана ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева"– Текст : непосредственный.
5. РМГ 29-2013. Метрология. Термины и определения. Рекомендации : утверждены Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2013 г. № 2166 / Разработаны ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с. – Текст: непосредственный.
6. Кузьмин В.В. Вакуумные измерения : учебное пособие / В.В. Кузьмин – Ленинград : Издательство стандартов, 1992. – 52 с. – Текст : непосредственный.
7. Анцукова А.И. Испытания современных вакуумметров с целью утверждения типа за последние 10 лет / А.И. Анцукова, В.Н. Горобей, А.А. Пименова, А.А. Чернышенко – Текст : непосредственный // Труды 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА и ТЕХНОЛОГИИ – 2018", 2018. С. 384-387.
8. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения физических величин : учебное пособие / Е.П. Осадчий – Москва : Машиностроение, 1979. – 11 с. – Текст : непосредственный.
9. ВК-1. Вакуумметр компрессионный : руководство по эксплуатации // ФГУП "Уральский электрохимический комбинат" (УЭХК), г.Новоуральск, 2007. – Текст : непосредственный.



10. Садковская И.В. Особенности применения мембранно-емкостных вакуумметров Баратрон / И.В.Садковская, А.И. Эйхвальд – Текст : непосредственный // Труды 21-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА и ТЕХНОЛОГИИ – 2013", 2013. С. 45-46.
11. Розанов Л.Н. Вакуумная техника : учебное пособие / Л.Н. Розанов – Москва : Высшая школа, 1990. – 62 с. – Текст : непосредственный.
12. Мулёв Ю.В. Механические методы измерения и контроля давления : учебное пособие / Ю.В. Мулев – Москва : НПО Юмас, 2010. – 52 с. – Текст : непосредственный.
13. Лекк Д. Измерение давления в вакуумных системах : учебное пособие / Д. Лекк – Москва : Мир, 1966. – 123 с.– Текст : непосредственный.
14. Садковская И.В. Лазерный интерференционный масляный манометр / И.В. Садковская, А.И. Эйхвальд, Т.А. Эйхвальд – Текст : непосредственный // Измерительная техника - 2019. - № 3 –С. 3-7.
15. Садковская И.В. Измерение сжимаемости рабочей жидкости лазерного интерференционного масляного вакуумметра с помощью интерференционного пьезометра низкого давления / И.В.Садковская, А.И. Эйхвальд, Т.А. Эйхвальд – Текст : непосредственный // Измерительная техника, - 2018. - № 5. - С. 47-49.
16. Королев Б.И. Основы вакуумной техники : учебное пособие / Б.И. Королев – Москва : Государственное Энергетическое Издательство, 1958. С. 123.– Текст : непосредственный.
17. Болтон У. Справочник инженера метролога : учебное пособие / У. Болтон – Москва : Додэка, 2002. С. 123.– Текст : непосредственный.
18. Вайсберг А. Физические методы органической химии : учебное пособие / А. Вайсберг – Москва : Издательство иностранной литературы, 1952. С.32. – Текст : непосредственный.
19. SRG. Вакуумметр вязкостный : руководство по эксплуатации – Текст : непосредственный.
20. Кувандыков Р.Э. Разработка и исследования вакуумметров с чувствительными элементами, изготовленными по технологии МЭМС / Р.Э. Кувандыков, Р.А. Тетерук – Текст : непосредственный // Наноиндустрия. Труды 26-й научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» Республика Крым, ТОК «Судак», 2019. С. 69-77.

21. Горобей В.Н. Эталонный мембранно-емкостный манометр низких абсолютных давлений / В.Н. Горобей, Е.К. Израйлов – Текст : непосредственный. // Измерительная техника - 2011., № 4 С. 70-73.
22. Гаршин А.Я. Резонансный вакуумметрический преобразователь, созданный по технологии МЭМС / А.Я. Гаршин, В.Н. Горобей, Р.Э. Кувандыков – Текст : непосредственный // Труды 24-й всероссийской научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии, 2017. С. 51-53.
23. Гаршин А.Я. К расчету уравнения измерений МЭМС вакуумметрического преобразователя / А.Я. Гаршин, В.Н. Горобей, Р.Э. Кувандыков – Текст : непосредственный // Труды 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА и ТЕХНОЛОГИИ - 2018", 2018. С. 125-127.
24. Горобей В.Н. Резонансный вакуумметр / В.Н. Горобей, Р.Э. Кувандыков, Р.А. Тетерук – Текст : непосредственный // Законодательная и прикладная метрология, № 6, 2019. С. 24-26.
25. Горобей В.Н. Резонансный вакуумметр / В.Н. Горобей, Р.Э. Кувандыков, Р.А. Тетерук – Текст : непосредственный // Эталоны. Стандартные образцы, № 1, 2020. С. 17-23.
26. Андронов А.А. Теория колебаний : учебное пособие / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин – Москва : Наука, 1991. 35 с. – Текст : непосредственный
27. Детлаф А.А. Курс физики : учебное пособие / А.А. Детлаф – Москва : Академия, 2005 134 с.– Текст : непосредственный
28. Кувандыков Р.Э. Некоторые особенности разработки деформационно-частотного вакуумметра / Р.Э. Кувандыков, А.А. Чернышенко – Текст : непосредственный // Труды 28-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Вакуумная техника и технологии-2021", июнь 2021. С. 80-85.
29. Ландау Л.Д. Теоретическая физика : учебное пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Электродинамика сплошных сред. Москва : Наука, 1982.– Текст : непосредственный.
30. Горобей В.Н. Технология изготовления микромеханического преобразователя низкого абсолютного давления газа / В.Н. Горобей, С.А. Конаков, Р.Э. Кувандыков, И.В. Попова – Текст : непосредственный // Труды 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА и ТЕХНОЛОГИИ - 2018", 2018. С. 128-131.

31. ГОСТ 5197-85. Вакуумная техника. Термины и определения. Государственный стандарт : введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 ноября 1985 г. № 3743- Текст : непосредственный // Москва : Издательство стандартов. 13 с.
32. Курносков А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем : учебное пособие / А.И. Курносков, В.В. Юдин - Москва : Высшая школа, 1986. – Текст : непосредственный.
33. Зюко А.Г. Теория электрической связи : учебное пособие / А.Г. Зюко - Москва : Радио и связь, 1999. 87 с. - Текст : непосредственный.
34. Пустынников С.В. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / С.В. Пустынников – Томск : Томского политехнического университета, 2015 С.125 – Текст : непосредственный.
35. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах : учебное пособие / В.С. Гутников – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988 С.165 – Текст : непосредственный
36. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов : учебное пособие / В.С. Гутников – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. С.98 – Текст : непосредственный.
37. Савельев И.В. Курс общей физики -: учебное пособие / И.В. Савельев - Москва : Наука, 1987. 298 с. – Текст : непосредственный.
38. Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы : учебное пособие / П.С. Ланда – Москва : Наука, 1991. С. 324 – Текст : непосредственный.
39. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел : учебное пособие / С.И. Новикова – Москва : Наука, 1974. С.294 – Текст : непосредственный.
40. Частотомер. Методические указания в лабораторному практикуму // Оренбургский государственный университет 2017 С.26 – Текст : непосредственный.
41. Кувандыков Р.Э. Модернизация программно-аппаратного комплекса отдела государственных эталонов в области измерения давления для проведения калибровки вакуумметров и разработка поверочного тренажера / Р.Э. Кувандыков, А.А. Чернышенко – Текст : непосредственный // Труды 28-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Вакуумная техника и технологии-2021", июнь 2021. С. 73-79.

42. МИ 2175-91. ГСИ. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения, оценивания погрешностей. Рекомендация : утверждена НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" 29.03.1991 / разработана НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" – Текст : непосредственный.
43. .МИ 140-89. Рекомендация. ГСИ. Вакуумметры. Методика поверки. Рекомендация : утверждена НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" 01.07.1989 / разработана НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" – Текст : непосредственный
44. Данилин Б.С. Основы конструирования вакуумных систем : учебное пособие / Б.С. Данилин – Москва : Энергия, 1971. 145 с. – Текст : непосредственный.
45. ГОСТ 2.796-95. ОБОЗНАЧЕНИЯ УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ В СХЕМАХ. Межгосударственный стандарт: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии, сертификации (Протокол № 8 от 12 октября 1995 г.) / разработан ВНИИНМАШ Госстандарта России – Москва : Издательство стандартов, 1995 – Текст : непосредственный.
46. Малышева Т.А. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ и компьютерное моделирование. Аппроксимация функций : учебное пособие / Т.А. Малышева - Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2016 – 34 с. – Текст : непосредственный.
47. Международное бюро мер и весов [официальный сайт] - Париж - обновляется в течение суток- Текст : электронный - URL: <http://www.bipm.org> (дата обращения 16.07.2019)
48. Чернышенко А.А. Теоретические и практические вопросы разработки эталона для поверки и калибровки мер потока газа в вакууме. 2020. 44 с.– Текст : непосредственный.
49. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерений» и «неопределенность измерения». Общие принципы. Рекомендация принята Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (Протокол № 36 от 26 января 2009 г.) / разработан ВНИИФТРИ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии – Текст : непосредственный.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

Приложение	А	Описание изобретения к патенту
Приложение	Б	Акты внедрения результатов диссертационной работы
Приложение	В	Акты приемочных испытаний
Приложение	Г	Чертеж первичного измерительного преобразователя эталонного деформационно-частотного вакуумметра

## Приложение А. Описание изобретения к патенту

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11) **2 749 644** (13) **C1**(51) МПК  
*G01L 21/00* (2006.01)  
*G01L 7/06* (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01L 21/00* (2021.05); *G01L 7/06* (2021.05)

(21)(22) Заявка: 2020138456, 23.11.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.11.2020

Дата регистрации:  
16.06.2021

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 23.11.2020

(45) Опубликовано: 16.06.2021 Бюл. № 17

Адрес для переписки:  
190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19,  
ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", отдел  
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):  
Кувандыков Рустам Эгамбердыевич (RU),  
Чернышенко Александр Александрович  
(RU),  
Тетерух Роман Анатольевич (RU),  
Горобей Владимир Николаевич (RU),  
Гаршин Александр Яковлевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):  
Федеральное государственное унитарное  
предприятие "Всероссийский  
научно-исследовательский институт  
метрологии им. Д.И. Менделеева" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: Tenholte D., Kurth S., Gebner T.,  
Dotzel W. A MEMS friction gauge suitable for  
high temperature measure. Sensor and actuators  
2008 P. 166-172. RU 153752 U1 27.07.2015. SU  
1778565 A1 30.11.1992. Розанов Л.Н. Вакуумное  
технологическое оборудование. Санкт-  
Петербург: Изд. Политехнического  
Университета, 2012, С. 176.

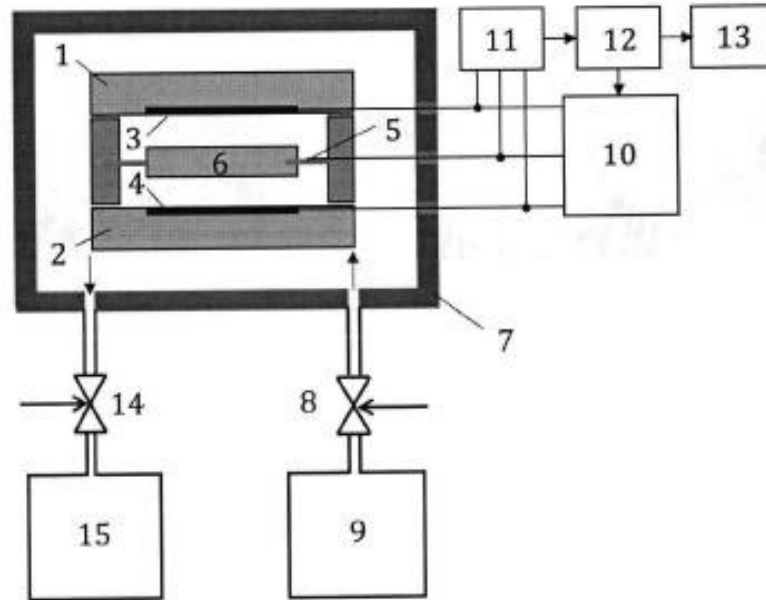
## (54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОГО АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(57) Реферат:  
Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения низкого абсолютного давления газа или газовых смесей. В предлагаемом способе измерения низкого абсолютного давления газа создают механические автоколебания заданной амплитуды тонкой пластины-осциллятора, установленной на упругом механическом подвесе плоскопараллельно с заданным зазором между двумя другими неподвижными пластинами, единой измеряют собственную частоту автоколебаний пластины-осциллятора в максимально достижимом вакууме. Затем заполняют пространство в зазорах между пластинами измеряемым газом и измеряют

собственную частоту автоколебаний пластины-осциллятора, по измеренным значениям собственной частоты автоколебаний пластины-осциллятора рассчитывают давление исследуемого газа. Причем измерение собственной частоты автоколебаний выполняют путем измерения мгновенных значений электрической емкости, образованной между пластиной-осциллятором и одной из неподвижных пластин. При этом частоту изменения электрической емкости принимают равной собственной частоте автоколебаний пластины-осциллятора. Устройство, реализующее способ, содержит пластину-осциллятор, два плоских электрода, источник напряжения, блок измерения

положения пластины-осциллятора, блок управления и частотомер. При этом пластина-осциллятор и два плоских электрода одновременно подключены к блоку измерения положения пластины-осциллятора и к источнику напряжения, который управляется блоком управления пропорционально сигналам,

поступающим с блока измерения положения пластины-осциллятора, а частотомер подключен к блоку управления. Технический результат заключается в повышении точности измерений, расширении функциональных возможностей и уменьшении длительности измерений. 2 н.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 3

RU 2749644 C1

RU 2749644 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY(19) **RU** (11) **2 749 644** (13) **C1**(51) Int. Cl.  
*G01L 21/00* (2006.01)  
*G01L 7/06* (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(52) CPC  
*G01L 21/00* (2021.05); *G01L 7/06* (2021.05)

(21)(22) Application: 2020138456, 23.11.2020

(24) Effective date for property rights:  
23.11.2020Registration date:  
16.06.2021Priority:  
(22) Date of filing: 23.11.2020

(45) Date of publication: 16.06.2021 Bull. № 17

Mail address:  
190005, Sankt-Peterburg, Moskovskij pr., 19, FGUP  
"VNIIM im. D.I. Mendeleeva", otdel intellektualnoj  
sobstvennosti

(72) Inventor(s):

Kuvandykov Rustam Egamberdyevich (RU),  
Chernyshenko Aleksandr Aleksandrovich (RU),  
Teteruk Roman Anatolevich (RU),  
Gorobej Vladimir Nikolaevich (RU),  
Garshin Aleksandr Yakovlevich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe  
predpriyatie "Vserossijskij  
nauchno-issledovatel'skij institut metrologii im.  
D.I. Mendeleeva" (RU)(54) **METHOD FOR MEASURING LOW ABSOLUTE GAS PRESSURE AND DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to measuring equipment and can be used to measure low absolute pressure of gas or gas mixtures. In the proposed method for measuring low absolute gas pressure, mechanical self-oscillations of given amplitude of a thin oscillator plate mounted on an elastic mechanical suspension are created in a plane-parallel plane with a given gap between two other fixed plates, the natural frequency of self-oscillations of the oscillator plate is measured once in the maximum achievable vacuum. Then the space in the gaps between the plates is filled with the measured gas and the self-oscillation frequency of the oscillator plate is measured, the pressure of the gas under study is calculated from the measured values of the self-oscillation natural frequency of the oscillator plate. Moreover, the measurement of the natural frequency of self-oscillations is performed by measuring the instantaneous values of the electrical capacitance

formed between the oscillator plate and one of the fixed plates. In this case, the frequency of change in electrical capacitance is taken to be equal to the natural frequency of self-oscillations of the oscillator plate. The device that implements the method contains an oscillator plate, two flat electrodes, voltage source, unit for measuring the position of the oscillator plate, a control unit and a frequency meter. In this case, the plate-oscillator and two flat electrodes are simultaneously connected to the unit for measuring the position of the plate-oscillator and to a voltage source, which is controlled by the control unit in proportion to the signals coming from the unit for measuring the position of the plate-oscillator, and the frequency meter is connected to the control unit.

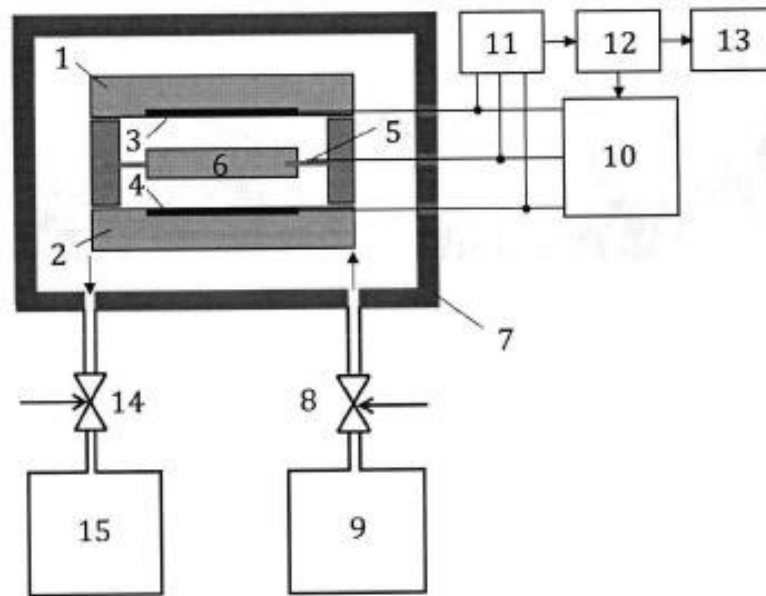
EFFECT: invention increases accuracy of measurements, expanding functionality and reducing the duration of measurements.

2 cl, 3 dwg

RU 2 749 644 C 1

RU 2 749 644 C 1





Фиг. 3

RU 2749644 C1

RU 2749644 C1

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения низкого абсолютного давления газа или газовых смесей.

На современном уровне развития науки и техники известны следующие технические решения, близкие по своей сути к предлагаемому.

5 Известен способ измерения вакуума, который заключается в том, что измеряют силу трения скольжения между двумя подвижными друг относительно друга объектами, помещенными в исследуемый объем, при заданных скорости скольжения и контактной нагрузке, и на основании измеренной силы трения определяют коэффициент трения скольжения между данными объектами, при этом искомый коэффициент покрытия  
10 определяют по предварительно построенному тарировочному графику изменения зависимости покрытия поверхностей трения объектов, обращенных в вакуум, от коэффициента трения скольжения между данными объектами, а давление остаточного газа в вакуумном объеме определяют расчетным путем на основании определенного по тарировочного графика коэффициента покрытия (патент на изобретение РФ  
15 №2316744, МПК G01L 21/24, опубл. 10.02.2008, БИ №4). Недостаток способа - относительно высокая погрешность измерений, обусловленная погрешностью определения тарировочной зависимости коэффициента покрытия поверхностей от коэффициента трения скольжения используемых объектов.

Известны компрессионные вакуумметры, принцип действия которых основан на  
20 законе Бойля-Мариотта, в частности - вакуумметр Мак-Леода, в котором величину остаточного давления измеряют косвенным способом по высоте столба рабочей жидкости в измерительном резервуаре, состоящий из измерительных капилляров, баллона и резервуара с ртутью (Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога. - М.: Додэка-XXI, 2002, с. 332-334). Для данных вакуумметров характерны большая  
25 длительность и трудоемкость операции измерения, громоздкость и хрупкость конструкции, токсичность рабочей жидкости-ртути.

Известны манометрические термопарные преобразователи, предназначенные для измерения давления газа путем измерения параметров теплового переноса (теплопроводности газа), состоящие из измерительной камеры, подогревателя и  
30 термопары, которые размещены в измерительной камере (Эшбах Г.Л. Практические сведения по вакуумной технике. - М.-Л.: Энергия, 1966, С. 105-110). Ввиду неидеальной адекватности физико-математической модели, связывающей теплопроводность газа с его давлением, измерения такого рода неточны и характеризуются высокой погрешностью, которая достигает значения 30% и более.

35 Известны также конструкции преобразователей давления, содержащие измерительную и образцовую камеры, разделенные упругим чувствительным элементом-мембраной, при этом давление в образцовой камере поддерживается отдельной системой откачки (Розанов Л.Н. Вакуумное технологическое оборудование. Санкт-Петербург: Изд. Политехнического Университета, 2012, с. 176).

40 Наиболее близким к предлагаемому способу и устройству являются вязкостный способ измерения вакуума, который основан на измерении силы сопротивления со стороны газа движущемуся телу, и как устройство реализовано в виде вязкостного вакуумметра, содержащего колеблющийся чувствительный элемент (Tenholte D., Kurth S., Gebner T., Dotzel W. A MEMS friction gauge suitable for high temperature measure. Sensor and actuators 2008 P. 166-172).

Общими недостатками известных способов и устройств, включая прототип, являются: зависимость результата измерений от рода газа, его температуры, необходимость применения отдельной системы откачки для создания образцового давления.

Цель изобретения - повышение точности измерений, расширение функциональных возможностей и уменьшение длительности процесса измерений.

Указанная цель достигается за счет того, что в предлагаемом способе измерения низкого абсолютного давления газа создают механические автоколебания заданной амплитуды тонкой пластины-осциллятора, установленной на упругом механическом подвесе плоскопараллельно с заданным зазором между двумя другими неподвижными пластинами, единожды измеряют собственную частоту автоколебаний пластины-осциллятора в максимально достижимом вакууме, затем заполняют пространство в зазорах между пластинами измеряемым газом и измеряют собственную частоту автоколебаний пластины-осциллятора, по измеренным значениям собственной частоты автоколебаний пластины-осциллятора рассчитывают давление исследуемого газа, причем измерение собственной частоты автоколебаний выполняют путем измерения мгновенных значений электрической емкости, образованной между пластиной-осциллятором и одной из неподвижных пластин, при этом частоту изменения электрической емкости принимают равной собственной частоте автоколебаний пластины-осциллятора.

Поставленная цель реализуется с помощью устройства для измерения низкого абсолютного давления газа, содержащего пластину-осциллятор, два плоских электрода, источник напряжения, блок измерения положения пластины-осциллятора, блок управления и частотомер, при этом пластина-осциллятор и два плоских электрода одновременно подключены к блоку измерения положения пластины-осциллятора и к источнику напряжения, который управляется блоком управления пропорционально сигналам, поступающим с блока измерения положения пластины-осциллятора, а частотомер подключен к блоку управления.

Сущность заявленного способа и устройства поясняется фиг. 1, 2, 3. На фиг. 1 представлена обобщенная схема для раскрытия научной основы способа, на фиг. 2 представлен поперечный разрез чувствительного элемента с пластиной-осциллятором, для которого получено уравнение измерения способа, на фиг. 3 представлена блок-схема установки, включающей устройство, реализующее заявленный способ.

Теоретическая основа заявляемого способа заключается в следующем.

Общеизвестно, что значение собственной частоты автоколебаний механического осциллятора, выполненного в виде тонкой пластины, расположенной плоскопараллельно между двумя другими пластинами с заданными зазорами, зависит от упругости газа, содержащегося в зазорах, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна абсолютному давлению этого газа. Докажем это.

Реальные газы, находящиеся при низком абсолютном давлении, с высокой степенью точности можно считать идеальными газами. Для таких газов применим закон Бойля-Мариотта, согласно которому при постоянной температуре и массе идеального газа произведение его давления и объема есть величина постоянная, т.е.:

$PV = \text{const}$ , или  $P_0 V_0 = (P_0 \pm \Delta P)(V_0 \pm \Delta V) = \text{const}$ , или

$$\frac{P_0}{(P_0 \pm \Delta P)} = \frac{(V_0 \pm \Delta V)}{V_0} = \text{const}, \quad (1)$$

где

$V_0$  - первоначальный объем газа,

$P_0$  - первоначальное давление газа,

$\Delta V$ ,  $\Delta P$  - малые приращения объема и давления газа, соответственно.

Если взять в рассмотрение две одинаковые плоскопараллельные плоские пластины, расположенные друг от друга с малым зазором толщиной  $Z_0$  (фиг. 1), который заполнен газом с низким абсолютным давлением, то, как установлено экспериментально, утечкой газа из газового зазора при колебаниях пластины можно пренебречь, когда толщина газовой зазора много меньше линейного размера пластины, т.е.  $Z_0 \ll L$ . В этом случае можно полноправно считать, что, согласно соотношению (1), изменение толщины зазора  $\Delta Z$  связано с изменением давления газа  $\Delta P$  следующим соотношением:

$$\frac{P_0 \pm \Delta P}{P_0} = \frac{V_0}{V_0 \pm S\Delta Z} = \frac{SZ_0}{SZ_0 \pm S\Delta Z}, \quad (2)$$

где

$S$  - площадь поверхности каждой плоскопараллельной пластины.

Преобразуем соотношение (2) к виду:

$$1 + \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{Z_0}{Z_0 \pm \Delta Z} = \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta Z}{Z_0}}. \quad (3)$$

Преобразуем полученное соотношение (3), для этого рассмотрим два случая:

А) 1-й случай - когда толщина  $Z$  зазора увеличивается ( $\Delta Z > 0$ ), следовательно, давление газа в зазоре уменьшается на величину  $\Delta P$ , а объем газа увеличивается на величину  $\Delta V$ . В данном случае соотношению (3) соответствует соотношение:

$$1 - \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{Z_0}{Z_0 + \Delta Z} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta Z}{Z_0}}. \quad (4)$$

Умножим правую часть соотношения (4) на множитель  $(1 - \Delta Z/Z_0)$  и найдем соотношение для изменения давления  $\Delta P$ , после всех математических операций в окончательном виде получаем:

$$\Delta P = P_0 \frac{\Delta Z/Z_0}{1 - (\Delta Z/Z_0)^2}. \quad (5)$$

Б) 2-й случай - когда толщина  $Z$  зазора уменьшается ( $\Delta Z < 0$ ), следовательно, давление газа в зазоре увеличивается на величину  $\Delta P$ , а объем газа уменьшается на величину  $\Delta V$ . В данном случае соотношению (3) соответствует соотношение:

$$1 + \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{Z_0}{Z_0 - \Delta Z} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta Z}{Z_0}}. \quad (6)$$

Умножим правую часть соотношения (6) на множитель  $(1 + \Delta Z/Z_0)$  и найдем соотношение для изменения давления  $\Delta P$ , после всех математических операций в окончательном виде получаем соотношение, идентичное (5):

$$\Delta P = P_0 \frac{\Delta Z/Z_0}{1 - (\Delta Z/Z_0)^2}. \quad (7)$$

При малых изменениях толщины  $\Delta Z$  зазора знаменатель  $1 - (\Delta Z/Z_0)^2$  в соотношениях (5), (7) мало отличается от единицы, например, при  $\Delta Z = 0,05Z$  он равен:  $1 - (\Delta Z/Z_0)^2 = 0,9975$ . Поэтому с высокой степенью достоверности данный знаменатель можно принять

равным единице, тогда соотношения (5), (7) трансформируются к виду:

$$\Delta P = P_0 \frac{\Delta Z}{Z_0}. \quad (8)$$

Приращение силы  $\Delta F$ , действующей со стороны газа в зазоре на поверхность каждой параллельной пластины, будет равно:

$$\Delta F = \Delta P S = P_0 S \frac{\Delta Z}{Z_0}. \quad (9)$$

А коэффициент упругости  $G$  газа, находящегося в зазоре между пластинами, будет равен:

$$G = \frac{\Delta F}{\Delta Z} = \frac{P_0 S}{Z_0}. \quad (10)$$

Как следует из полученного соотношения (10), коэффициент упругости  $G$  газа в газовом зазоре зависит от давления  $P_0$  и прямо ему пропорционален.

При создании автоколебаний пластины-осциллятора некоторой заданной массой  $m$  и смещении от среднего положения, описываемом уравнением  $\Delta Z(\tau) = A \sin(\omega \tau)$ , колебательное движение пластины-осциллятора при малой амплитуде колебаний  $A$  будет описываться уравнением гармонического осциллятора с одной степенью свободы (Андронов А.А., Витт А.А. Теория колебаний. - М.: Изд. ф.-м. литературы, 1959, с. 35), т.е.:

$$\Delta Z'' + \omega \Delta Z = 0, \quad (11)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{G}{m}} \text{ - собственная циклическая частота колебаний пластины-осциллятора.}$$

Таким образом, согласно соотношениям (10) и (11), циклическая частота автоколебаний будет пропорциональна давлению газа в газовом зазоре:

$$\omega = \sqrt{\frac{P_0 S}{Z_0 m}}, \quad (12)$$

а искомое давление газа в зазоре между пластинами, соответственно, равно:

$$P_0 = \frac{Z_0 m}{S} \omega^2. \quad (13)$$

В заявленном способе предложено использовать три плоскопараллельных пластины, расположенных друг от друга с зазорами  $Z_1$  и  $Z_2$  от внутренней пластины (фиг. 2), причем внутренняя пластина имеет возможность совершать механические автоколебания, т.е. осциллировать, а две наружные пластины жестко закреплены и неподвижны. Для каждой пары: внутренняя - наружная пластины справедливы приведенные выше соотношения и уравнение (13). В этом случае суммарный коэффициент упругости данной колебательной системы, состоящей из трех пластин, будет равен сумме коэффициентов упругости газа в двух зазорах  $G_1$ ,  $G_2$  и коэффициента упругости механического подвеса подвижной пластины-осциллятора  $G_m$ :

$$G = G_1 + G_2 + G_m. \quad (14)$$

где

$G_1 = P_0 S / Z_1$  - упругость газа в зазоре между одной наружной пластиной, например, пластиной 1, и пластиной-осциллятором 6 (фиг. 2) (согласно соотношению 10),

$G_2 = P_0 S / Z_2$  - упругость газа в зазоре между другой наружной пластиной, например, пластиной 2, и пластиной-осциллятором (согласно соотношению 10),

$G_m = \omega_m^2 m = (2\pi f_m)^2 m$  - упругость механического подвеса 5 пластины-осциллятора 6 (согласно соотношению 11).

Исходя из соотношения (11) собственная частота колебаний пластины-осциллятора 6 будет описываться следующим соотношением:

$$\omega^2 = (2\pi f)^2 = \frac{G_1 + G_2 + G_m}{m}, \quad (15)$$

Преобразовав соотношение (15) с учетом (14), (11), (10), получаем уравнение измерений заявленного способа:

$$P_0 = K(f^2 - f_m^2), \quad (16)$$

где

$$K = 4\pi^2 \rho h \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} - \text{коэффициент преобразования,}$$

$\rho$  - плотность материала пластины-осциллятора,

$f_m$  - собственная частота колебаний внутренней пластины-осциллятора в отсутствие газа в зазоре между пластинами,

$f$  - собственная частота колебаний внутренней пластины-осциллятора в присутствии исследуемого газа в зазоре между пластинами

$h$  - толщина пластины-осциллятора.

В частном случае, когда зазоры между пластинами равны, т.е.  $Z_1 = Z_2 = Z_0$ , коэффициент преобразования рассчитывается по соотношению:

$$K = 2\pi^2 \rho h Z_0. \quad (17)$$

Таким образом, для осуществления способа необходимо измерить значение собственной частоты автоколебаний  $f_m$  пластины-осциллятора 6 при отсутствии газа в газовом зазоре и значение собственной частоты автоколебаний  $f$  этой же пластины-осциллятора 6 в присутствии исследуемого газа в зазоре между пластинами 1, 2, 6, затем по уравнению измерений (16) рассчитать значение абсолютного давления исследуемого газа  $P_0$ .

Способ реализуется с помощью устройства, блок-схема которого показана на фиг. 3. Устройство содержит первую 1 и вторую 2 неподвижные плоскопараллельные пластины, которые выполнены из диэлектрического материала, причем, на поверхности каждой пластины, обращенной внутрь газового зазора между ними, установлены планарные металлические электроды 3, 4. Между пластинами 1, 2 плоскопараллельно им и с заданными зазорами  $Z_1$ ,  $Z_2$  от них на упругом механическом подвесе 5

расположена электропроводящая тонкая подвижная пластина-осциллятор 6, при этом толщина зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$  между пластинами 1, 2 и пластиной-осциллятором 6 может быть как одинакова и равна  $Z_0$ , так и различна. Для упрощения демонстрации расчета конструктивных параметров чувствительного элемента устройства примем, что

$Z_1=Z_2=Z_0$ . Значение  $Z_0$  определено расчетным путем, исходя из верхнего предела измеряемого абсолютного давления газа  $P_{0,max}$ . Кроме этого толщина  $h$  пластины-осциллятора 6 также определена расчетным путем, исходя из ожидаемого значения нижнего предела измеряемого абсолютного давления  $P_{0,min}$ . Пластины 1,2 вместе с электродами 3, 4 и пластина-осциллятор 6 заключены в герметичный корпус 7, который посредством вентиля 8 соединен с емкостью 9, содержащей измеряемый газ и посредством вентиля 14 соединен с устройством откачки 15. Электроды 3 и 4, пластина-осциллятор 6 подключены к источнику напряжения 10 и к блоку измерения положения 11 пластины-осциллятора, который, в свою очередь, подключен к блоку управления 12. Блок управления подает сигналы в источник напряжения 10 и частотомер 13.

В заявленном устройстве механические автоколебания пластины-осциллятора 6 создаются и поддерживаются электростатическим приводом, за счет подачи электрического напряжения заданной величины на электроды 3 и 4. Для создания данных автоколебаний сила электростатического привода  $F_e$  должна превышать упругую силу газа  $F$ , находящегося в зазоре между пластинами 1, 2, т.е.  $F_e > F$ .

Модуль электростатической силы равен:

$$|F_e| = \frac{U^2 \epsilon \epsilon_0 S}{2Z_0^2}, \quad (18)$$

где

$U$  - напряжение, прикладываемое к одному из электродов 3, 4,

$\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость газа, находящегося в зазоре между пластинами 1, 2.

Упругая сила газа определяется по соотношению:

$$F = G \Delta Z \quad (19)$$

Так как смещение  $\Delta Z$  пластины-осциллятора 6 от среднего положения  $Z_0$  на практике незначительно и обычно составляет  $\Delta Z \approx 0,01 Z_0$ , то согласно (19) с учетом соотношения (10) правомерно записать:

$$F = \frac{P_0 S}{Z_0} 0,01 Z_0 = 0,01 P_0 S. \quad (20)$$

Условие  $F_e > F$  с учетом соотношений (20) и (18) принимает вид:

$$\frac{U^2 \epsilon \epsilon_0 S}{2Z_0^2} > 0,01 P_0 S. \quad (21)$$

Из (21) получают условие для задания толщины зазора  $Z_0$ :

$$Z_0 > \sqrt{\frac{U^2 \epsilon \epsilon_0}{0,02 P_{0,max}}}, \quad (22)$$

где

$P_{0,max}$  - верхний предел измеряемого абсолютного давления.

Для поддержания автоколебаний пластины-осциллятора 6 на электроды 3 и 4 относительно пластины-осциллятора 6 должно подаваться напряжение, пропорциональное силе трения, действующей на пластину-осциллятор 6 со стороны



газа и зависящей от ее скорости и давления газа. Скорость движения пластины-осциллятора 6 пропорциональна первой производной от ее смещения от среднего положения  $\Delta Z(\tau) = A \sin(\omega\tau)$ , то есть амплитуде и частоте ее колебаний и имеет фазовый сдвиг  $90^\circ$  относительно сигнала, поступающего с блока измерения положения 11. Таким образом, сигнал от блока измерения положения 11 пластины-осциллятора 6 передается в блок управления 12, где осуществляется его фазовый сдвиг на  $90^\circ$ , выполняется регулирование амплитуды и подача сигнала на источник напряжения 10. Так как электростатическая сила пропорциональна квадрату разности напряжения и действует только как притягивающая сила, то на электроды 3 и 4 подается однополупериодное выпрямленное напряжение, при движении пластины-осциллятора 6 от электрода 3 напряжение подают на электрод 4, при движении от электрода 4 напряжение подают на электрод 3.

Для расчета требуемой толщины  $h$  пластины-осциллятора 6, в первом приближении принимают, что при давлении измеряемого газа, равном его нижнему пределу  $P_{0,\min}$ , значение собственной циклической частоты колебаний со пластины-осциллятора 6 равно:

$$\omega^2 = \frac{G}{m} = \frac{2P_{0,\min}S}{Z_0 m} = \frac{2P_{0,\min}S}{Z_0 \rho h S} = \frac{2P_{0,\min}}{Z_0 \rho h}, \quad (23)$$

где

$\rho$  - плотность материала пластины-осциллятора.

Данное приближение вполне оправдано, ввиду того, что упругость механического подвеса пластины-осциллятора 6, равная  $G_m = \omega_m^2 m = (2\pi f_m)^2 m$ , меньше упругости измеряемого газа  $G$ . Учитывая, что  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ , где  $T$  - период колебания пластины-осциллятора 6, соотношение (23) записывают в виде:

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{2P_{0,\min}}{Z_0 \rho h}.$$

Откуда следует соотношение для периода колебания пластины-осциллятора:

$$T^2 = \frac{2\pi^2 Z_0 \rho h}{P_{0,\min}}. \quad (24)$$

Для выполнения сформулированного ранее условия о малости утечек газа из зазоров между пластинами 1, 2 через их боковые грани при колебаниях пластины-осциллятора 6, как установлено экспериментально, период колебаний не должен превышать 0,002 с, т.е.  $T < 0,002$  с, следовательно, с учетом (24), условие для задания толщины пластины-осциллятора 6 имеет вид:

$$h < 4 \cdot 10^{-6} \frac{P_{0,\min}}{2\pi^2 Z_0 \rho}. \quad (25)$$

Устройство для измерения абсолютного низкого давления газа работает следующим образом. Единожды закрывают клапан 8, открывают клапан 14 и с помощью устройства откачки 15 откачивают газ, содержащийся в зазорах между пластиной-осциллятором и неподвижными пластинами до давления на 2-3 порядка меньшего, чем  $P_{0,\min}$ , т.е. до максимально-достижимого вакуума. На электрод 3 или на электрод 4 (на выбор), который считают потенциальным электродом, от источника постоянного напряжения 10 подают постоянное электрическое напряжение заданной величины. При



подаче постоянного электрического напряжения возникает электростатическая сила, которая воздействует на пластину-осциллятор 6. Пластина-осциллятор 6 смещается к потенциальному электроду. Величина смещения пластины-осциллятора 6 определяется равенством электростатической силы и упругой силы механического подвеса 5 пластины-осциллятора 6. При снятии постоянного электрического напряжения пластина-осциллятор 6 начинает совершать колебания. Сигнал с блока измерения положения 11 пластины-осциллятора, пропорциональный электрической емкости между пластиной-осциллятором и одним из электродов 3, 4 пластин 1, 2, подается в блок управления 12. Блок управления формирует команды источнику напряжения 10 для подачи электрических напряжений на электроды 3 и 4, поддерживающие автоколебания пластины-осциллятора 6, компенсируя работу сил, действующих на пластину-осциллятор 6 со стороны газа, и диссипацию энергии в материале механического подвеса 5. С блока управления 12 сигналы поступают в частотомер 13, с помощью которого измеряется значение собственной частоты автоколебаний  $f_m$  пластины-осциллятора при отсутствии газа в зазорах между пластинами 1, 2, т.е. в максимально-достижимом вакууме.

После выполнения перечисленных выше операций закрывают клапан 14 и открывают клапан 8, в результате чего измеряемый газ или смесь газов, находящиеся в емкости 9, полностью заполняют внутреннее пространство герметичного корпуса 7 и пространство в зазорах между пластинами 1, 2, 6. После установления газостатического равновесия между пространствами герметичного корпуса 7 и емкости 9 с помощью частотомера 13 выполняют операции, аналогичные операциям при измерении собственной частоты автоколебаний пластины-осциллятора 6 в максимально-достижимом вакууме. В результате измеряют значение собственной частоты автоколебаний  $f$  пластины-осциллятора 6 в присутствии измеряемого газа и из уравнения измерений (16), (17) рассчитывают значение абсолютного давления газа.

Конкретное устройство имеет следующие характеристики:

- нижний предел измерения давления газа  $P_{0,min}=10$  Па,
- верхний предел измерения давления газа  $P_{0,max}=1000$  Па,
- толщина зазора, рассчитанная по соотношению (22) при электрическом напряжении  $U < 10$  В,  $\epsilon=1$  (азот),  $Z_0=3$  мкм,
- материал пластины-осциллятора - кремний плотностью  $\rho=2300$  кг/м<sup>3</sup>,
- толщина пластины-осциллятора рассчитана по соотношению (25)  $h=75$  мкм,
- линейный размер пластины-осциллятора, выбранный из условия  $Z_0 \ll L$  при квадратной форме пластины-осциллятора (длина и ширина), а при круглой форме (диаметр) равен  $L=1$  мм.

Использование предлагаемого способа и устройства обеспечивает ряд преимуществ - независимость от рода газа, возможность получения линейной зависимости квадрата значения собственной частоты колебаний пластины-осциллятора от измеряемого давления. Кроме этого устройству не требуется каждый раз отдельная система откачки газа для создания образцового давления. Данные технические решения позволяют существенно повысить точность измерений и уменьшить длительность процесса измерений, расширяют функциональные возможности. Оценочная относительная неопределенность измерений не превышает 2%.

#### (57) Формула изобретения

1. Способ измерения низкого абсолютного давления газа, заключающийся в том, что создают механические автоколебания заданной амплитуды тонкой пластины-

осциллятора, установленной на упругом механическом подвесе плоскопараллельно с заданным зазором между двумя другими неподвижными пластинами, заполняют пространство в зазорах между пластинами исследуемым газом, измеряют собственную частоту автоколебаний пластины-осциллятора и по ней рассчитывают давление исследуемого газа, при этом измерение частоты автоколебаний выполняют путем измерения мгновенных значений электрической емкости, образованной между пластиной-осциллятором и одной из неподвижных пластин, частоту изменения электрической емкости принимают равной частоте автоколебаний пластины-осциллятора.

2. Устройство для измерения низкого абсолютного давления газа, содержащее пластину-осциллятор, два плоских электрода, источник напряжения, блок измерения положения пластины-осциллятора, блок управления и частотомер, при этом пластина-осциллятор и два плоских электрода размещены в исследуемой газовой среде и одновременно подключены к блоку измерения положения пластины-осциллятора и к источнику напряжения, источник напряжения управляется блоком управления пропорционально сигналам, поступающим с блока измерения положения пластины-осциллятора, частотомер подключен к блоку управления.

20

25

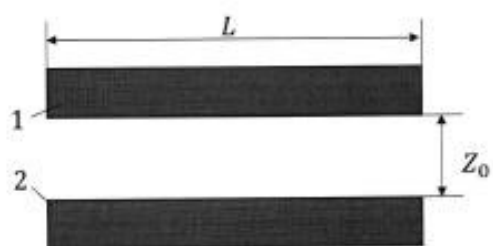
30

35

40

45

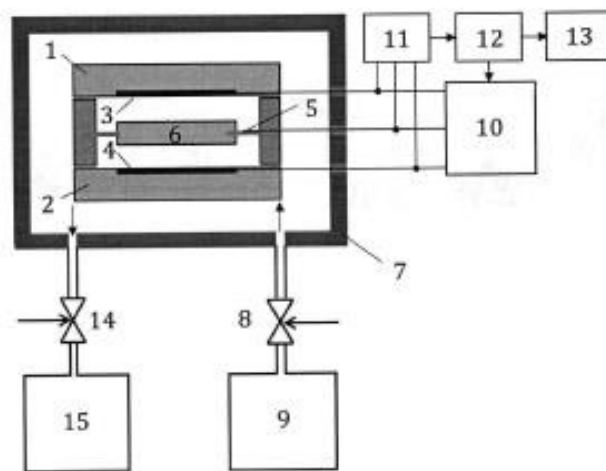
1



Фиг.1

2





Фиг. 3

## Приложение Б. Акты внедрения

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
РОССТАНДАРТ



Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Всероссийский  
научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева»

**ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»**

190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19. Тел. (812) 251-76-01, факс (812) 713-01-14

e-mail: [info@vniim.ru](mailto:info@vniim.ru), <http://www.vniim.ru> ОКПО 02566450, ОГРН 1027810219007 ИНН/КПП 7809022120/783901001  
Зарегистрирован в Государственном реестре под № 30001-10

УТВЕРЖДАЮ

и.о. генерального директора  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

А.Н. Пронин

ОКТ 2020 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
ведущего инженера научно-исследовательского отдела государственных эталонов в области  
измерений давления НИО 231 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»  
Кувандыкова Рустам Эгамбердыевича

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель НИО 231 Тетерук Р.А., руководитель НИЛ 2310 Чернышенко А.А., ведущий научный сотрудник НИЛ 2301 Снегов В.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Разработка и исследование отечественного транспортируемого эталонного вакуумметра для проведения сличений, поверки, калибровки средств измерений низкого абсолютного давления», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в НИО 231 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»:

1. Разработано и внедрено устройство автоматического управления системами создания и поддержания давления в эталонных вакуумметрических установках НИЛ 2310 и в государственном первичном специальном эталоне единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне  $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^3$  Па ГЭТ 49-2016.
2. Разработано и внедрено программное обеспечение для автоматизации процесса поверки(калибровки) вакуумметров.

Внедрение указанных результатов диссертационной работы позволило увеличить производительность поверочных работ и усовершенствовать систему метрологического обеспечения в области низких абсолютных давлений.

Председатель комиссии  
руководитель НИО 231, к.т.н.

Тетерук Р.А.

2.10.2020

Члены комиссии:  
Руководитель НИЛ 2310, к.т.н.

Чернышенко А.А.

2.10.2020

Ведущий научный сотрудник НИЛ 2301, к.т.н.

Снегов В.С.

2.10.2020

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор  
АО «ГИРООПТИКА»

И.В. Попова

«10» 08 2022г.

## АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
ведущего инженера научно-исследовательского отдела государственных эталонов в области  
измерений давления НИО 231 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»  
Кувандыкова Рустам Эгамбердыевича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы  
«Разработка и исследование отечественного транспортируемого эталонного  
вакуумметра для проведения сличений, поверки, калибровки средств измерений  
низкого абсолютного давления »

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в  
АО «Гирооптика» при выполнении работ по созданию МЭМС вакуумметра. В результате  
создан экспериментальный образец вакуумметра со следующими метрологическими  
характеристиками:

- диапазон измерений давления от 10 до  $1 \cdot 10^3$  Па;
- предел относительной погрешности измерений давления 2 %.

Внедрение указанных результатов представляет интерес для разработчиков  
вакуумной техники и метрологов.

Начальник отдела




**Приложение В. Акт приемочных испытаний**

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ФГУП «ВНИИМ

им. Д.И.Менделеева»

 А.Н. Пронин

8 октября 2019 г.

**АКТ**

приемочных испытаний

опытных образцов, созданных по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года по теме 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 (MEMS)»  
(Шифр ОКР «Элемент»)

г. Санкт-Петербург



Комиссия по проведению приемочных испытаний опытных образцов, созданных в рамках 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 (MEMS)» (Шифр ОКР "Элемент"), выполняемой по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года, назначенная приказом и. о. директора ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» № 163 от 11 октября 2019 г. в составе:

Федоров Алексей Владимирович	Профессор факультета систем управления и робототехники ФГАОУВО «Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики», д.т.н. (председатель комиссии)
Кривцов Евгений Петрович	Заместитель директора по научной работе ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», к.т.н.
Книжагулов Игорь Юрьевич	Преподаватель факультета систем управления и робототехники ФГАОУВО «Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики», к.т.н.
Витковский Олег Сергеевич	Научный сотрудник лаборатории 2311 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», к.т.н.

в период с 14 октября 2019 г. по 18 октября 2019 г. провела приемочные испытания опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного *X02.832.057* и компрессионно-компенсационного *X02.832.058*.

Испытания проводились в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева» (ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева») в соответствии с программой и методикой приемочных испытаний *X00.283.002 ПМ1* «Программа и методика приемочных испытаний. Эталонные вакуумметры», разработанной ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», согласованной и.о. директора ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» и утвержденной Заместителем руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 08.10.2019 г.

### Цель испытаний

Проверка и подтверждение соответствия изделия требованиям технического задания на опытно-конструкторскую работу: «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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»), и принятие решения о готовности результатов ОКР «Элемент» к предъявлению приемочной комиссии Государственного заказчика для их приемки в целом.

### Результаты приемочных испытаний

На испытания предъявлены:

- опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) *Хд2.832.057* и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) *Хд2.832.058* (№ 1, № 2);
- комплект эксплуатационной документации на эталонные вакуумметры микроэлектромеханические резонансный *Хд2.832.057* и компрессионно-компенсационный *Хд2.832.058*;
- ТЗ на ОКР «Совершенствование методов и средств метрологического обеспечения измерений давления и больших масс, прослеживаемых к эталонам единиц массы и силы» (Шифр ОКР «Масса и сила»);
- программа и методика приемочных испытаний *Хд0.283.002 ПМ1*;
- акты и протоколы предварительных испытаний опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного *Хд2.832.057* и компрессионно-компенсационного *Хд2.832.058*.

Испытания проведены в соответствии с Программой и методикой приемочных испытаний *Хд0.283.002 ПМ1*.

Оценка соответствия опытных образцов требованиям технического задания на опытно-конструкторскую работу: «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 (MEMS)», выполненная по результатам приемочных испытаний представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Оценка соответствия опытных образцов требованиям ТЗ

№	Наименование испытаний (контролируемый параметр)	Номер пункта		Номер опытного образца	Место испытаний	Отметка о соответствии (несоответствии) характеристик требованиям ТЗ
		технических требований (л.п. ТЗ)	метода испытаний			
1	Проверка соответствия требованиям технической документации	5.1	7.2.1	№1	ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	соответствует
				№2		соответствует
2	Проверка соответствия объекта испытаний его конструкторской документации	5.1	7.2.2	№1	ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	соответствует
				№2		соответствует
3	Проверка диапазона измерения единицы давления	3.2.4	7.2.3	№1	ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	соответствует
				№2		соответствует
4	Определение основной погрешности	3.2.4.1	7.2.3	№1	ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	соответствует
				№2		соответствует
5	Проверка комплектности	3.1.4	7.2.4	№1	ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	соответствует
				№2		соответствует

**Выводы комиссии:**

- характеристики и параметры опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Х02.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Х02.832.058 (№ 1, № 2), созданных в рамках ОКР "Элемент", проверены в объеме приемочных испытаний и соответствуют требованиям, заданным в ТЗ;

- опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Х02.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Х02.832.058 (№ 1, № 2) готовы к предъявлению приемочной комиссии Государственного заказчика для их приемки в целом.

Председатель комиссии:

Профессор факультета систем управления и робототехники ФГАОУВО «Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики», д.т.н.



А.В. Федоров

Члены комиссии:

Заместитель директора по научной работе  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», к.т.н.



Е.П. Кривцов

Преподаватель факультета систем управления и робототехники ФГАОУВО «Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики», к.т.н.



И.Ю. Кинжагулов

Научный сотрудник лаборатории 2311  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», к.т.н.



О.С. Витковский

**Приложение к Акту приемочных испытаний по ОКР «Элемент»**

*Протокол № 1 от 17.10.2019 г.*

приемочных испытаний опытных образцов, разработанных по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года по теме 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»)

**Объект испытаний:**

Опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) ХД2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) ХД2.832.058, заводские номера № 1, № 2.

**1. Цель испытаний:**

Проверка соответствия опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного требованиям технической документации.

**2. Оцениваемые показатели:**

Соответствие стандартов и технических условий на материалы и комплектующие изделия, применяемые в опытном образце изделия, требованиям технической документации.

**3. Место и дата проведения испытаний:**

Место проведения испытаний – ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», дата проведения испытаний 17 октября 2019 г.

**4. Условия проведения испытаний:**

Не устанавливались.

**5. Методика проведения испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.1 Программы и методики приёмочных испытаний ХД0.283.002 ПМ1 проверку соответствия требованиям технической документации проводится путем сравнения требований, указанных в ТЗ, с результатами, полученными в ходе испытаний.

**6. Средства испытаний:**

Не устанавливались.

**7. Результаты испытаний:**

Опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) ХД2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) ХД2.832.058 соответствуют требованиям технической документации.



**Выводы:**

Результат испытаний положительный, опытные эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Хд2.832.057 и компенсационно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Хд2.832.058, заводские номера № 1, № 2, соответствуют требованиям пункта 5.1 Технического задания на 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»).

Испытания проводили:

Председатель комиссии:



А.В. Федоров

Члены комиссии:



Е.П. Кривцов

И.Ю. Кинжагулов

О.С. Витковский

**Приложение к Акту приемочных испытаний по ОКР «Элемент»**

*Протокол № 2 от 17.10.2019 г.*

приемочных испытаний опытных образцов, разработанных по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года по теме 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»)

**Объект испытаний:**

Опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) ХД2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) ХД2.832.058, заводские номера № 1, № 2.

**1. Цель испытаний:**

Проверка соответствия опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного требованиям конструкторской документации.

**2. Оцениваемые показатели:**

Соответствие стандартов и технических условий на материалы и комплектующие изделия, применяемые в опытном образце изделия, требованиям конструкторской документации.

**3. Место и дата проведения испытаний:**

Место проведения испытаний – ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», дата проведения испытаний 17 октября 2019 г.

**4. Условия проведения испытаний:**

Не устанавливались.

**5. Методика проведения испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.2 Программы и методики приёмочных испытаний ХД0.283.002 ПМ1 проверку конструкторской документации на изделие проводят, определяя соответствие конструкторской документации номенклатуре и комплектности КД по ГОСТ 2.102-2013 и документации, необходимой для обеспечения эксплуатации изделия, по ГОСТ 2.601-2013.

**6. Средства испытаний:**

Не устанавливались.

**7. Результаты испытаний:**

Конструкторская документация и эксплуатационная документация на изделие соответствуют требованиям п. 5.1 ТЗ.

**Выводы:**

Результат испытаний положительный, конструкторская и эксплуатационная документация на опытные эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Хд2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Хд2.832.058, заводские номера № 1, № 2, и соответствуют требованиям п. 5.1 ТЗ Технического задания на ОКР «Разработка и исследование высокоточных деформационных средств измерений низких абсолютных давлений в диапазоне  $1 \cdot 10^{-3}$  -  $1 \cdot 10^6$  Па, создаваемых по технологии микроэлектромеханических систем (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»).

Испытания проводили:

Председатель комиссии:



А.В. Федоров

Члены комиссии:



Е.П. Кривцов

И.Ю. Кинжагулов

О.С. Витковский



**Приложение к Акту приемочных испытаний по ОКР «Элемент»**

*Протокол № 3 от 17.10.2019 г.*

приемочных испытаний опытных образцов, разработанных по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года по теме 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»)

**Объект испытаний:**

Опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) ХЭ2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) ХЭ2.832.058, заводские номера № 1, № 2.

**1. Цель испытаний:**

Проверка диапазона измерений давления опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного.

**2. Оцениваемые показатели:**

Соответствие диапазона измерений давления опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного требованиям ТЗ.

**3. Место и дата проведения испытаний:**

Место проведения испытаний – ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», дата проведения испытаний 17 октября 2019 г.

**4. Условия проведения испытаний:**

Температура окружающего воздуха, °С	+21,1
Относительная влажность воздуха, %	51,3
Атмосферное давление, кПа	99,6

**5. Методика проведения испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.3 Программы и методики приемочных испытаний ХЭ0.283.002 ПМ1.

**6. Средства испытаний:**

Эталонные комплексы из состава ГЭТ 49-2016	Среднее квадратическое отклонение результата измерений в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ – 10 Па, $S_{\sigma}$ , не более $0,15 \cdot 10^{-2}$ , относительная расширенная неопределенность в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ – 10 Па, $U_{2\sigma}$ ( $k=2$ ), $0,36 \cdot 10^{-2}$
--------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**7. Результаты испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.3 Программы и методики приёмочных испытаний *Хд0.283.002 ПМ1* определение диапазона измерений единицы давления и основной погрешности ОИ проводят методом непосредственного сличения показаний объекта испытаний с эталонным СИ.

Определение диапазона измерений проводилось на этапе определения основной погрешности измерений опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного.

Результаты испытаний приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 1) опытного образца ЭВМЭМ-Р (зав. №1)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-Р, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	10,67	10,75	-0,7
2	31,86	32,41	-1,7
3	61,68	62,32	-1,0
4	90,93	91,73	-0,9
5	112,1	112,4	-0,3
6	303,4	303,7	-0,1
7	604,7	599,9	0,8
8	899	893,4	0,6
9	2044	2054	-0,5
10	3013	3021	-0,3
11	5967	6030	-1,0
12	9004	9072	-0,7
13	10051	10101	-0,5

Таблица 2 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 1) опытного образца ЭВМЭМ-КК (зав. № 2)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-КК, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	0,0014	0,0013	7,7
2	0,0043	0,004	7,5
3	0,0079	0,0084	-6,0
4	0,011	0,0117	-6,0
5	0,020	0,019	5,3
6	0,041	0,039	5,1
7	0,062	0,065	-4,6
8	0,098	0,095	3,2
9	0,151	0,154	-1,9
10	0,311	0,320	-2,8
11	0,62	0,64	-3,1
12	0,91	0,93	-2,2
13	3,51	3,57	-1,7
14	6,51	6,61	-1,5
15	9,49	9,59	-1,0

Диапазон измерений опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) ХД2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) ХД2.832.058, заводские номера № 1, № 2, соответствуют значениям, указанным в ТЗ и эксплуатационной документации.

**Выводы:**

Результат испытаний положительный, диапазон измерений опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Хд2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Хд2.832.058, заводские номера № 1, № 2, и соответствуют требованиям п. 3.2.4 ТЗ Технического задания на 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»).

Испытания проводили:

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



А.В. Федоров  
Е.П. Кривцов  
И.Ю. Книжагулов  
О.С. Витковский

**Приложение к Акту приемочных испытаний по ОКР «Элемент»**

*Протокол № 4 от 17.10.2019 г.*

приемочных испытаний опытных образцов, разработанных по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года по теме 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»)

**Объект испытаний:**

Опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Х02.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Х02.832.058, заводские номера № 1, № 2.

**1. Цель испытаний:**

Определение основной относительной погрешности опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного.

**2. Оцениваемые показатели:**

Соответствие основной относительной погрешности образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного требованиям п. 3.2.4.1 ТЗ.

**3. Место и дата проведения испытаний:**

Место проведения испытаний – ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,

Дата проведения испытаний 17 октября 2019 г.

**4. Условия проведения испытаний:**

Температура окружающего воздуха, °С	+21,1
Относительная влажность воздуха, %	51,3
Атмосферное давление, кПа	99,6

**5. Методика проведения испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.4 Программы и методики приёмочных испытаний Х00.283.002 ПМ1.

**6. Средства испытаний:**

Эталонные комплексы из состава ГЭТ 49-2016	Среднее квадратическое отклонение результата измерений в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ – 10 Па, $S_0$ , не более $0,15 \cdot 10^{-2}$ , относительная расширенная неопределенность в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ – 10 Па, $U_{90}$ ( $k=2$ ), $0,36 \cdot 10^{-2}$
--------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**7. Результаты испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.4 Программы и методики приёмочных испытаний *Хд0.283.002 ПМ1* определение диапазона измерений единицы давления и основной относительной погрешности проводят методом непосредственного сличения показаний объекта испытаний с эталонным СИ. Результаты определения основной погрешности измерений опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного и компрессионно-компенсационного приведены в таблицах 1-6.

Таблица 1 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 1) опытного образца ЭВМЭМ-Р (зав. №1)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-Р, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	10,67	10,75	-0,7
2	31,86	32,41	-1,7
3	61,68	62,32	-1,0
4	90,93	91,73	-0,9
5	112,1	112,4	-0,3
6	303,4	303,7	-0,1
7	604,7	599,9	0,8
8	899	893,4	0,6
9	2044	2054	-0,5
10	3013	3021	-0,3
11	5967	6030	-1,0
12	9004	9072	-0,7
13	10051	10101	-0,5

Таблица 2 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 2) опытного образца ЭВМЭМ-Р (зав. № 1)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-Р, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	11,11	11,03	0,7
2	31,96	32,14	-0,6
3	62,42	63,39	-1,5
4	92,16	93,37	-1,3
5	110,3	111,1	-0,7
6	304,9	303,8	0,4
7	602,5	600,7	0,3
8	901,4	895,2	0,7
9	2054	2060	-0,3
10	3006	3032	-0,9
11	5987	6050	-1,0
12	9036	9092	-0,6
13	10041	10167	-1,2



Таблица 3 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 3) опытного образца ЭВМЭМ-Р (зав № 1)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-Р, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	10,92	10,97	-0,5
2	31,88	32,25	-1,1
3	62,56	63,31	-1,2
4	93,77	93,54	0,2
5	110,8	111,3	-0,4
6	305,4	303,4	0,7
7	603,2	601,1	0,3
8	900,1	892,4	0,9
9	2046	2054	-0,4
10	3002	3012	-0,3
11	5978	6061	-1,4
12	9007	9082	-0,8
13	10017	10112	-0,9

Таблица 4 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 1) опытного образца ЭВМЭМ-КК (зав № 2)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-КК, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	0,0014	0,0013	7,7
2	0,0043	0,004	7,5
3	0,0079	0,0084	-6,0
4	0,011	0,0117	-6,0
5	0,02	0,019	5,3
6	0,041	0,039	5,1
7	0,062	0,065	-4,6
8	0,098	0,095	3,2
9	0,151	0,154	-1,9
10	0,311	0,320	-2,8
11	0,62	0,64	-3,1
12	0,91	0,93	-2,2
13	3,51	3,57	-1,7
14	6,51	6,61	-1,5
15	9,49	9,59	-1,0

Таблица 5 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 2) опытного образца ЭВМЭМ-КК (зав № 2)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-КК, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	0,0014	0,0015	-6,7
2	0,0038	0,0041	-7,3
3	0,0086	0,0089	-3,4
4	0,012	0,013	-7,7
5	0,025	0,023	8,7
6	0,034	0,032	6,3
7	0,071	0,067	6,0
8	0,092	0,087	5,7
9	0,13	0,122	6,6
10	0,351	0,364	-3,6
11	0,664	0,655	1,4
12	0,983	0,998	-1,5
13	3,51	3,57	-1,7
14	6,93	6,81	1,8
15	9,82	9,71	1,1

Таблица 6 – Определение диапазона измерений давления и основной относительной погрешности (серия 3) опытного образца ЭВМЭМ-КК (зав № 2)

№	Действительное значение давления, Па	Показания опытного образца ЭВМЭМ-КК, Па	Основная относительная погрешность измерений, %
1	0,0011	0,0012	-8,3
2	0,0031	0,0032	-3,1
3	0,0092	0,0089	3,4
4	0,012	0,013	-7,7
5	0,019	0,02	-5,0
6	0,034	0,035	-2,9
7	0,066	0,068	-2,9
8	0,09	0,089	1,1
9	0,122	0,125	-2,4
10	0,338	0,327	3,4
11	0,654	0,670	-2,4
12	0,982	0,964	1,9
13	3,58	3,62	-1,1
14	6,92	6,84	1,2
15	9,81	9,90	-0,9



**Выводы:**

Результат испытаний положительный, значения относительной погрешности опытных образцов эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Хд2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Хд2.832.058, заводские номера № 1, № 2, и не превышают значений, указанных в п. 3.2.4.1 ТЗ Технического задания на 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»).

Испытания проводили:

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



А.В. Федоров  
Е.П. Кривцов  
И.Ю. Кинжагулов  
О.С. Витковский

**Приложение к Акту приемочных испытаний по ОКР «Элемент»**

*Протокол № 5 от 17.10.2019 г.*

приемочных испытаний опытных образцов, разработанных по Государственному контракту № 120-88 от 16.06.2017 года по теме 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»)

**Объект испытаний:**

Опытные образцы эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Хд2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Хд2.832.058, заводские номера № 1, № 2.

**1. Цель испытаний:**

Подтверждение соответствия комплектности в опытных образцов изделия, требованиям технической документации.

**2. Оцениваемые показатели:**

Соответствие стандартов и технических условий на материалы и комплектующие изделия, применяемые в опытном образце изделия, требованиям технической документации.

**3. Место и дата проведения испытаний:**

Место проведения испытаний – ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», дата проведения испытаний 17 октября 2019 г.

**4. Условия проведения испытаний:**

Не устанавливались.

**5. Методика проведения испытаний:**

В соответствии с п. 7.2.4 Программы и методики приёмочных испытаний Хд0.283.002 ПМ1 проверку состава и комплектности изделия проводят на соответствие действительных состава и комплектности данным п. 3.1.4 ТЗ, утвержденной схеме деления структурной для ЭВМЭМ-Р Хд2.832.057 Е1 и для ЭВМЭМ-КК Хд2.832.058 Е1, спецификациям на изделие и его составные части.

**6. Средства испытаний:**

Не устанавливались.

**7. Результаты испытаний:**

Состав и комплектность опытных образцов изделия соответствуют п. 3.1.4 ТЗ, утвержденной схеме деления структурной для ЭВМЭМ-Р Хд2.832.057 Е1 и для ЭВМЭМ-КК Хд2.832.058 Е1, спецификациям на изделие и его составные части и таблице 1 Программы и методики приёмочных испытаний Хд0.283.002 ПМ1.

**Выводы:**

Результат испытаний положительный, опытные эталонного вакуумметра микроэлектромеханического резонансного (ЭВМЭМ-Р) Хд2.832.057 и компрессионно-компенсационного (ЭВМЭМ-КК) Хд2.832.058, заводские номера № 1, № 2, соответствуют требованиям пункта 3.1.4 Технического задания на 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 (MEMS)» (Шифр ОКР «Элемент»).

Испытания проводили:

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



Е.П. Кривцов

И.Ю. Кизжагулов

О.С. Витковский

Приложение Г

Чертеж первичного измерительного преобразователя эталонного деформационно-частотного вакуумметра

