

Министерство образования Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

*В. В. Кузьмин*

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ МАШИИИ И УСТАНОВОК

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГТУ  
2000

Кузьмин В.В. Расчет и проектирование вакуумных машин и установок: Лабораторный практикум. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 38 с.

Способе соответствует гос образовательному стандарту по направлению 551800 "Технологические машины и оборудование". Главное внимание уделено описанию экспериментальной аппаратуры и процессу выполнения лабораторных работ. Кроме того, излагаются положения, раскрывающие физико-техническую базу выполняемых работ, что способствует усвоению теоретического материала, а также указания по статистической обработке проводимых измерений. Предназначен для магистров по специальности "Вакуумные машины и установки".

Ил. 7. Табл. 7. Библиогр.: 5 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного технического университета.

## Работа 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ДЕЙСТВИЯ ВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО НАСОСА

#### Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством вакуумного электрофизического насоса, измерительной (испытательной) установки и высоковакуумных средств измерений низких давлений;
- 2) получить представление о нормативах по испытаниям вакуумных насосов и обшей концепции этих испытаний применительно к электрофизическим средствам откачки;
- 3) получить опыт проведения испытаний вакуумных насосов и обработки их результатов.

#### Задание:

- 1) изучить документацию к вакуумному электрофизическому насосу, измерительной (испытательной) установке и к измерительным приборам;
- 2) провести испытания электрофизического насоса для определения скорости действия в рабочем диапазоне давлений;
- 3) выполнить обработку измерений в соответствии с требованиями указанными;
- 4) представить в виде графика зависимость скорости действия электрофизического насоса от давления на его входе.

#### Общие положения

Электрофизические насосы всех видов являются накопительными средствами откачки. т.е. откачиваемые газы поглощаются в насосе посредством хемосорбции и химического связывания ионизированных молекул и атомов на охлажденных поверхностях его электродов. Один из основных механизмов поглощения газа в таких насосах – ионно-сорбционный. При этом реализуется и внедрение молекул в твердую поверхность под действием электрического поля, и химическое взаимодействие откачиваемых газов с тонкими пленками активных металлов. Внедрение высокоэнергетических ионов и других частиц не может быть полным, так как при бомбардировке ими

поверхностей существует частичное их отражение и рассеивание. С помощью этих процессов определяется эффективность функционирования насоса в форме того или иного значения быстроотъекта.

Электрофизический насос типа ЭТИН состоит из двух насосов, размещенных в одном корпусе: геттерно-ионного и магнитного электроразрядного. ЭТИН разработан на базе магнито-разрядного насоса типа НМД в комплексе с прямоточными испарителями титана (с водяным охлаждением) типа ГИН. В работе задействована големка магнито-разрядной система насоса, производительность работы которой надлежит исследовать.

В основе откачивающего действия магнитного электро-разрядного насоса лежит газовый разряд в скрепленных электрическом и магнитном полях. Источник разряда — первичные электроны, возникающие в результате авиоэмиссии при подаче на электроды насоса напряжения в несколько киловольт (в насосе ЭТИН — 7 кВ). Образующиеся в разрядном промежутке положительные ионы ускоряются электрическим полем и бомбардируют катоды, изготовленные из титана марки В1-1. При этом происходит распыление материала катодов, который оседает на внутренних поверхностях насоса, главным образом, ячеек анода, с образованием химических соединений с молекулами и атомами активных газов. Под действием магнитного поля электроны, устремляющиеся к аноду, описывают спиральные траектории, совершая одновременно колесательные движения между катодами. В результате значительно увеличивается длина пробега электронов, а следовательно, и вероятность столкновения между ними и молекулами остаточного газа. Магнитные электро-разрядные насосы обладают, в принципе, значительной селективностью откачки газов и их смесей. Наименее всего подвержены поглощению молекулы инертных газов, наиболее — молекулы и атомы водорода.

Быстрота действия  $S$  любого вакуумного насоса измеряется объемом газа при давлении  $P$ , удаляемым через его входной патрубок в единицу времени:

$$S \sim \dot{Q}/P,$$

где  $\dot{Q}$  — поток газа, т.е. количество газа, проходящего в единицу времени через сечение трубопровода (через входной патрубок (фланец) насоса).

Методические и технические аспекты определения быстроотъекта насосов (особенно — в рамках их испытаний), так же как и другие параметры (прежде всего, предельное остаточное давление), — объекты международной и национальной стандартизации (например, ГОСТ 25662-83, ГОСТ 25663-83 и др.). В отраслевом стандарте ОСТ 11 295.021-74 "Насосы и аппараты вакуумные. Методы испытаний" представлены требования к методике испытаний насосов, в том числе электрофизических, и к необходимой для этого испытательной (измерительной) аппаратуре.

В соответствии с правилами испытаний, изложенными в указанном стандарте, быстрота действия высоковакуумного насоса определяется по формуле

$$S = U(P_2/P_1 - 1),$$

где  $U$  — провозможность диафрагмы (для молекулярного режима течения газа), помещенной между камерой, примыкающей к испытуемому насосу, (испытательной камерой) и камерой, из которой поступает газ (измерительной камерой);  $P_1$  и  $P_2$  — давления, фиксируемые в испытательной и измерительной камерах соответственно.

Газ, поступающий в измерительную камеру и затем через диафрагму в испытательную камеру, откачивается насосом измеряемой быстроотъекта действия. Давления  $P_1$  и  $P_2$  измеряют с помощью вакуумметров, присоединенных к соответствующим камерам.

Согласно рекомендациям ОСТ 11 295.021-74 провозможность диафрагмы  $U$  выбирается в зависимости от ожидаемой быстроотъекта действия  $S$  испытуемого насоса (предпочтительно соотношение  $U \approx S \cdot 10$ ):

$$U = 2,86 K d^2 (T M)^{1/2},$$

где  $d$  — диаметр диафрагмы;  $K$  — коэффициент Клаузиуса, учитывающий конечное отношение толщины диафрагмы к ее диаметру;  $T$  — температура окружающей среды;  $M$  — молекулярная масса откачиваемого газа.

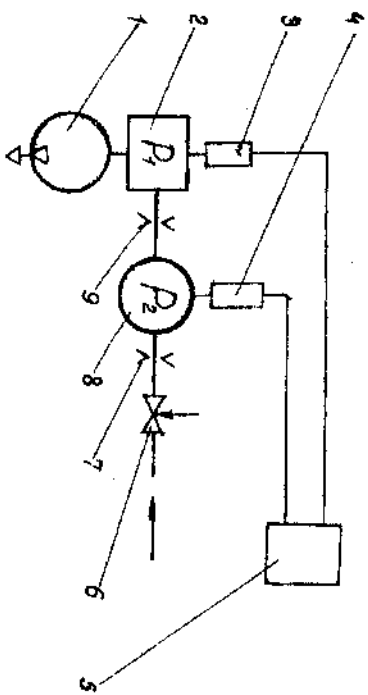
В работе для диафрагмы диаметром около 10 мм для сухого воздуха (азота) провозможность  $U$  будет равняться  $9,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  (при молекулярном режиме течения газа).

Для измерения давлений  $P_1$  и  $P_2$  используется двухканальный магнито-разрядный вакуумметр типа ВМВ1-2 (см. паспорт, а также работу [2], причем давление  $P_1$  регистрируется по каналу I, а давление  $P_2$  — по каналу II.

Известно, что быстрота действия  $S$  любого насоса зависит от давления  $P$  на его входе, — зависимость  $S = f(P)$  называется характеристикой насоса и обычно выражается в графической форме. Вид характеристики насоса отражает, во-первых, степень стабильности основного процесса откачки газа, а во-вторых, влияние отрывающихся от стенок факторов, со стороны низких давлений — влияние остаточной десорбции элементов насоса и вакуумной системы, со стороны высоких давлений — влияние разорва электрических насосов и превышение потока газовой/тепловой над потоком газопоглощения.

### Измерительная установка

Работа выполняется на установке ВДУ-1, укомплектованной и отлаженной в соответствии с требованиями ОСТ 11 295 021-74. Схема той ее части, которая используется в данной работе, приложена на рисунке



(Упрощенный вид). Запись 1 – электровакуумный геттерно-ионный насос ЭИН, 2 – испытательная камера, 3, 4 – первичные преобразователи ПММ-32-1 вакуумметра ВМБ1-2, 5 – измерительный блок вакуумметра ВМБ1-2, 6 – регулирующий патекатель, 7 – диафрагма, 8 – измерительная камера, 9 – диафрагма проводимости С.

### Порядок выполнения работы

1. Включить электровакуумный геттерно-ионный насос 1.
2. Включить двухканальный магниторазрядный вакуумметр ВМБ1-2.
3. Произвести откачку камер до остаточного давления: испытательной камеры 2 – до  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Па, измерительной камеры 8 – до  $(1-2) \cdot 10^{-5}$  Па. Давление регистрировать по каналам I и II вакуумметра ВМБ1-2 соответственно.
4. Открыть патекатель 6 и установить в камере 2 примерное давление сухого воздуха (азота)  $5 \cdot 10^{-5}$  Па.
5. Измерить значения давлений  $P_1$  и  $P_2$  по каналам I и II вакуумметра 5 соответственно.
6. Регулируя с помощью патекателя 6 давление в камере 2, измерить значения  $P_1$  и  $P_2$  в процессе их роста (приблизительно по 5-10 экспериментальных точек на каждую декаду давления) вплоть до  $P_1 \sim 5 \cdot 10^{-3}$  Па.
7. Закрыть патекатель 6 и вновь откачать камеры 2 и 8 до остаточного давления (см. п. 3).
8. Выключить вакуумметр ВМБ1-2.
9. Выключить электровакуумный геттерно-ионный насос ЭИН.

### Обработка измерений

1. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давлений, Па по ВМБ1-2		Отношение $P_2/P_1$
	$P_1$	$P_2$	

2. Вычислить отношение  $P_2/P_1$  для каждой экспериментальной точки.

3. Вычислить значение скорости действия насоса для каждой экспериментальной точки по формуле

$$S = 9,04 \cdot 10^{-3} (P_2/P_1 - 1), \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Представить характеристику насоса ЭИН – зависимость  $S = f(P_1)$  в виде графика: по оси абсцисс – давление  $P_1$ , по оси ординат – скорость действия  $S$ .

5. Сделать вывод о диапазоне давлений, в котором насос ЭИН наиболее эффективен.

### Оформление отчета

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, требуемые вычисления, график  $S = f(P_1)$  и вывод.

### Контрольные вопросы

1. Как и в каких единицах определяется скорость действия вакуумного насоса?
2. Каков механизм удаления газа в геттерно-ионном и магниторазрядном насосах?
3. Какова роль хемосорбции в процессе откачки газа с помощью геттерно-ионного насоса?
4. От чего зависит вакуумная проводимость отверстия при молекулярном режиме течения разреженного газа?
5. Почему уменьшается скорость действия магниторазрядного насоса у нижнего и верхнего пределов его рабочей области?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розноев Д.И. Вакуумная техника. М.: Вышш. шк., 1990.
2. Пило А.Я., Пискожевский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979.
3. Вакуумная техника: Справ. М.: Машиностроение, 1952.

## Работа 2

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ МАГНИТОРАЗРЯДНОГО ВАКУУМЕТРА ПО СТАЦИОННОМУ ИОНИЗАЦИОННОМУ ВАКУУМЕТРУ

#### Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством высоковакуумной установки, стационарного ионизационного и рабочего магниторазрядного вакууметров;
- 2) получить навыки работы с высоковакуумными технологиями;
- 3) получить опыт обработки результатов поверки рабочего магниторазрядного вакуумметра по стационарному ионизационному вакуумметру.

#### Задание:

- 1) изучить документацию к вакуумной установке и к измерительным приборам;
- 2) ввести в действие вакуумную установку и осуществить технологические операции, необходимые для воспроизведения давления газа в области высокого вакуума;
- 3) выполнить ряд поверочных процедур, связанных со штатным функционированием ионизационного и магниторазрядного вакуумметров в пределах диапазона поверки;
- 4) произвести обработку измерений в соответствии с приведенными ниже указаниями.

#### Общие положения

Магниторазрядные (магнитные электровакуумные) вакуумметры представляют собой приборы для измерений низких давлений газа, в которых для регистрации остаточных газовых молекул используется сочетание электрического и магнитного полей. Вакуумметры подразделяют на приборы с рамочным (колывальным) или цилиндрическим анодом (ячейка Ленгмита), ионизируемые для измерения давления от  $10^{-5}$ – $10^{-2}$  до  $10$ – $100$  Па, и

вакуумметры с магнетронным или инверсно-магнетронным преобразователем, предназначенные для измерения давлений от  $10^{11}$ – $10^{10}$  до  $0,1$ – $1$  Па. В работе используются инверсно-магнетронный двухканальный вакуумметр ВМБ-1-2 (см. соответствующий паспорт). В его первичном преобразователе ПММ-32-1 имеется система из двух основных электродов: наружный корочекапый катод и стержневой осевой анод. Эта система помещена в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом (он же – катод) с индукцией более  $0,1$  Тл. На анод через балластный резистор (номиналом более  $1$  МОм) подается напряжение  $2,5$  кВ.

Появляющиеся в междуэлектродном пространстве электроны под действием электрического и магнитного полей, векторы напряженности которых взаимно перпендикулярны, совершают движения, траектории которых представляют кривые, близкие к гипоциклоидам. В результате соударений электронов с молекулами остаточного газа возникают положительные ионы, направляющиеся на катод и выбивающиеся с его поверхности вторичные электроны. Те электроны, которые появляются в результате актов ионизации, участвуют в процессе дальнейшей ионизации и после соударений с молекулами переходят на орбиты, близкие к аноду. Пусть, проходимый каждым электроном перед тем, как попасть на анод, баллодаря действия магнитного поля немного больше расстояния между электродами. Разрядный ток  $I_p$  измеряемый в цепи катода, представляет собой сумму ионного тока на катод и тока электронов на анод и является мерой давления газа  $p$ . Когда сопротивление разрядного промежутка намного больше номинала балластного резистора, эта зависимость может быть описана упрощенной эмпирической формулой

$$I_p = K \cdot p^n,$$

где  $K$  и  $n$  – постоянные (для определенного диапазона давлений), зависящие от конструкции и режима работы вакуумметра и определяемые экспериментально – путем градуировки.

На практике зависимость  $I_p = f(p)$  чаще всего выражают графически – в виде градуировочной кривой. В вакуумметре ВМБ-1-2 указанная зависимость заложена в шкале выходного прибора, охватывающей давления от  $10^{-6}$  до  $1$  Па.

Решение задачи поверки высоковакуумных средств измерений низких давлений газа, к числу которых относится и вакуумметр ВМБ-1-2, осложняется тем, что при давлениях ниже  $0,1$ – $1$  Па эталонные абсолютные вакуумметры фактически отсутствуют. Поэтому в области высокого и сверхвысокого вакуума в качестве эталонного средства измерений второго разряда в Российской Федерации функционирует прецизионный электронный ионизационный вакуумметр типа ВЮ-1, хотя он и не является абсолютным прибором.

Как известно, электроны ионизационные вакуумметры – приборы, действие которых основано на регистрации числа ионизированных в объеме первичного преобразователя молекул остаточного газа. При определенных

условиях это число в достаточно широких пределах пропорционально измеряемому давлению.

Первичный преобразователь ионизационного вакуумметра содержит источник электронов — прямонакальный катод, накопительный подложительный потенциалом относительно корпуса (экрани), анод, ускоряющий и отводный электроды, и специальный приемник ионов — коллектор, потенциал которого ниже потенциала катода. Часть эмитированных катодом электронов, которые устремляются к аноду, по пути сталкиваются с молекулами остаточного газа, находящимися в преобразователе, и ионизируют их. Определенная доля положительных ионов собирается коллектором и образует в цепи коллектор-корпус ток, измеряемый, как правило, с помощью усилителя постоянного тока. Число актов ионизации, а следовательно, и ионов, созданных при низких давлениях фиксированным пучком электронов, пропорционально молекулярной концентрации газа  $n$ . Давление газа  $p$  и концентрация  $n$  связаны между собой соотношением

$$p = nkT,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура газа.

Таким образом, коллекторный (ионный) ток можно использовать в качестве меры давления газа (при известной температуре). Для этого необходимо поддерживать постоянной температуру. Для этого характерному подерживать постоянной интенсивность ионизации молекул, характерному электронам током эмиссии  $I_e$  (обычно 0,5 — 5 мА). Практически это достигается стабилизацией тока эмиссии, например, посредством регулирования мощности накала катода. Ввиду сложности взаимосвязи между эффективностью образования и сбора ионов и распределением энергии и траекторий электронов вид связи между коллекторным током  $I$  и давлением  $p$  — достаточно точно определяется только путем градуировки вакуумметра по эталонному средству измерения давления.

Уравнение измерения ионизационного вакуумметра таково:

$$I = S_e p = I_e K_e p - p/C,$$

где  $S_e$  — чувствительность;  $K_e$  — приведенная (удельная) чувствительность;  $C$  — постоянная вакуумметра.

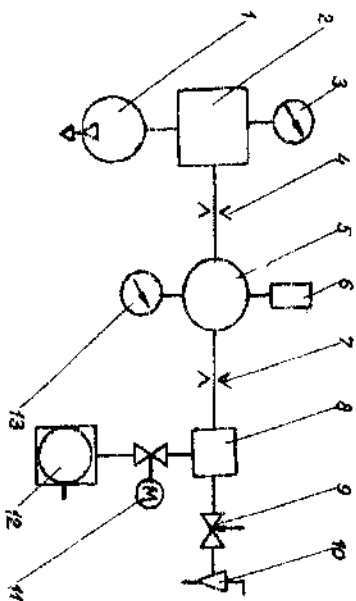
Значения  $S_e$ ,  $K_e$  и  $C$ , зависящие от конструкции и электрического режима преобразователя, а также от рода газа, подлежат определению по результатам градуировки прибора.

Отечественный ионизационный вакуумметр ВЮ-1 (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации) состоит из первичного преобразователя открытой (флапцевой) конструкции ПМИ-39-2, блока питания преобразователя ВПП-1 и усилителя ионного тока УУ-11, снабженного пифровым вольтметром ВУ-40. Конструктивные и методические меры, принятые для повышения стабильности метрологических характеристик вакуумметра и улучшения точности их контроля, обеспечили возможность аттестации его в качестве эталонного средства измерения второго разряда в

диапазоне давлений от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$  Па (предел допускаемой относительной погрешности не более  $\pm 10\%$ ). В данной работе проверка магниторазрядного вакуумметра ВМБ-12 (по одному из каналов) производится путем сравнения с вакуумметром ВЮ-1. Приведенная чувствительность последнего известна  $K_e = 0,092$  1/Па (для тока эмиссии электронов 5,0 мА).

### Измерительная установка

Работа выполняется на установке ВОУ-1 (см. рисунок), причем при



полном функционировании и высоковакуумного, и низковольтного секторов вакуумной системы. Здесь 1 — электровакуумный геттерно-ионный насос ЭГИИ, 2 — высоковакуумная контрольная камера, 3 — контрольный магниторазрядный вакуумметр ВМБ-12, 4 — диафрагма, 5 — измерительная камера, 6 — поперек магниторазрядный вакуумметр ВМБ-12, 7 — диафрагма, 8 — низковольтная контрольная камера, 9 — регулируемый нагреватель, 10 — кран, 11 — электровакуумный затвор (с электроприводом), 12 — механический насос, 13 — эталонный ионизационный вакуумметр ВЮ-1.

### Порядок выполнения работы

1. Включить электровакуумный геттерно-ионный насос 1 и механический насос 12.
2. Открыть электровакуумный затвор 11 и кран 10.
3. Включить эталонный ионизационный вакуумметр ВЮ-1 и поперек магниторазрядный вакуумметр ВМБ-12, а также контрольные вакуумметры ВМБ-12 и ВЮ-2 (последний присоединен к камере 8 и на рисунке не показан).
4. Произвести откачку до остаточного давления: измерительной камеры 6 — до  $5 \cdot 10^{-5}$  Па, контрольных камер 2 и 8 — до  $1 \cdot 10^{-5}$  и 1 Па соответственно.

Давление регистрировать по вакууметрам, присоединенным к соответствующим камерам.

- Произвести операции, необходимые для регулировки и контроля работы вакууметров (см. техническую документацию).
- Открыть накататель 9 и установить в камере 5 давление  $5 \cdot 10^{-5}$  Па.
- Измерить значения давления  $p$  — по вакууметру ВМБ1-2 и  $p^*$  — по эталонному вакууметру ВЮ-1. Зафиксировать для контроля значения давлений  $p_1$  по вакууметру ВЮ-2 и  $p_2$  — по вакууметру ВМЦБ-12.
- Регулируя с помощью накатателя 9 давление в камере 5, измерить значения  $p$  и  $p^*$  в процессе их роста (приблизительно по пять-шесть экспериментальных точек на каждую декаду давления) вплоть до примерного давления  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, фиксируя одновременно значения давлений  $p_1$  и  $p_2$ . Рекомендуется, чтобы значения давления  $p$  совпадали с оцифрованными отметками шкалы вакууметра ВМБ1-2 или были близки к ним.
- Закрыть накататель 9 и кран 10 и вновь отключить камеру системы до остаточных давлений (см. п. 4).
- Выключить эталонный вакууметр ВЮ-1 и рабочий вакууметр ВМБ1-2, а также контрольные вакууметры ВЮ-2 и ВМЦБ-12.
- Закрыть электромагнитный затвор 11.
- Выключить электровакуумный геттерно-ионный насос 1 и механический насос 12.

**Обработка измерений**

1. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Показание эталонного вакууметра ВЮ-1	Показание рабочего вакууметра ВМБ1-2	Показания контрольных вакууметров, Па		Относительное отклонение
			$p_1$	$p_2$	
1-4	$p^*$ Па	$p$ Па			

2. Вычислить значения давления  $p^*$  по формуле  $p^* = kK_1 p$

3. Вычислить относительные отклонения  $\delta$ :

$$\delta = (p - p^*) / p^*$$

4. Вычислить среднее квадратическое отклонение ряда измерений:

$$\sigma = \sqrt{\sum \delta_i^2 / (n-1)}$$

5. Вычислить значение доверительного интервала  $\theta = K\sigma$  (коэффициент  $K = 2,86$  для доверительной вероятности 0,99).

6. Сделать вывод о соответствии доверительного интервала 0 показателям точности рабочего вакууметра ВМБ1-2.

**Оформление отчета**

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, требуемые вычисления и вывод.

**Контрольные вопросы**

- Каков механизм измерительного процесса в магнеторазрядных вакууметрах?
- Как действует наложение магнитного поля на траектории электронов в преобразователях магнеторазрядных вакууметров?
- Какие элементы составляют электродную структуру ионизационного преобразователя?
- Какая связь существует между ионным и электронным током в ионизационном преобразователе?
- Каковы структурные элементы эталонного вакууметра?

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
- Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 1990.
- Кузьмин В.В. Градуировка и поверка вакууметров. М.: Изд-во стандартов, 1987.

**Работа 3**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ВАКУУМЕТРОВ ПО ИНЕРТНЫМ ГАЗАМ**

**Цель работы:**

- ознакомиться с устройством вакуумной установки, деформационного и теплового (термонарного) вакууметров;
- получить представление о специфике технологических и измерительных операций при использовании инертных газов;
- получить опыт обработки экспериментальных данных при сравнительных измерениях по разным газам.

### Задание:

- 1) изучить документацию к вакуумной установке и к измерительным приборам;
- 2) ввести в действие вакуумную установку и дважды воспроизвести ряд эквивалентных позиций: вначале — по азоту (сухому воздуху), затем — по инертному газу (гелию);
- 3) произвести измерения по абсолютному деформационному вакуумметру и по исследуемому тепловому вакуумметру;
- 4) выполнить обработку измерений в соответствии с нижеприведенными указаниями.

### Общие положения

Известно, что показания тепловых, в том числе термометрических, вакуумметров зависят от рода газа. Это обусловлено отличиями в характере процесса теплопроводности для каждого газа, а также нераментами энергетического обмена в условиях градиента температур, в том числе при соударениях молекул газа с поверхностями термометра и стенок корпуса преобразователя, которые принято связывать с коэффициентами accommodation соответствующих поверхностей. Наиболее надежно и точно можно осуществить такую коррекцию путем эксперимента.

Обычно тепловые вакуумметры проградуированы по шкале выходящего прибора или косвенно посредством прилагаемых градуировочных кривых по сухому воздуху или азоту. Если требуется измерить давления других газов, то нужно корректировать показания вакуумметров:

$$P_r = P_a q_r \quad (3.1)$$

где  $P_a$  — показание вакуумметра, проградуированного по воздуху;  $P_r$  — действительное значение измеряемого давления газа;  $q_r$  — коэффициент относительной чувствительности (или просто относительная чувствительность) вакуумметра по газу.

Числовые значения  $q_r$  индивидуальны для каждого конкретного типа теплового преобразователя и режима его работы. Более того, как показала исследования, нельзя их в полной мере считать независимыми от давления, точнее от соотношения частот соударений молекул с поверхностью и между собой. При давлениях ниже 10 Па значения  $q_r$  считаются примерно постоянными в пределах погрешностей измерений.

С учетом (3.1) для определения коэффициента относительной чувствительности воспользуемся соотношением

$$q_r = P_r / P_a$$

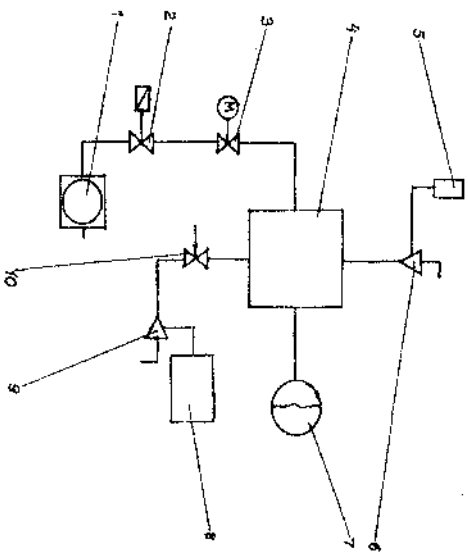
На практике часто пользуются способом, при котором измеряется одно и то же значение давления, находящегося в пределах рабочего диапазона теплового вакуумметра, дважды: вначале — по азоту (сухому воздуху), затем —

по другому исследуемому газу (в нашем примере — по инертному газу, в качестве которого избран гелий). Для установления того, что давления в обоих случаях действительно одинаковы, требуются, очевидно, отсчеты по абсолютному вакуумметру, показания которого, в отличие от теплового прибора, не зависят бы от рода газа. К числу таких средств измерений относятся жидкостные и деформационные вакуумметры. В настоящей работе применен достаточно чувствительный деформационный (мембранно-емкостный) вакуумметр с пировым отсчетом типа ВД-1 (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации). Его диапазон измерений — от 1 до  $10^5$  Па, и в области давлений от 2 до 10 Па допускаемая относительная погрешность не превышает  $\pm(5-10)\%$ .

Значения  $q_r$  определяются в данной работе применительно к термометрическому вакуумметру ВГО-2 (с преобразователем ЦТГО-1 — см. паспорт и инструкцию по эксплуатации), а также работу 7). Этот прибор является эталонным вакуумметром второго разряда, что, однако, не меняет того факта, что его показания зависят от рода газа. Поэтому сравнительные измерения могут дать полезные сведения для коррекции показаний вакуумметра ВГО-2 при измерениях по разным газам.

### Измерительная установка

Сравнительные измерения выполняются на установке ВОВ-1 (см. рисунок). Здесь 1 — механический насос, 2 — электромагнитный клапан, 3 —



электромагнитический затвор (с электроприводом), 4 — измерительная камера, 5 — первичный преобразователь ЦТГО-1 вакуумметра ВГО-2, 6, 9 — краны, 7 —



абсолютный деформационный вакуумметр ВД-1, 8 – сосуд с инертным газом (гелием),  $P_0$  – регулируемый нагреватель.

### Порядок выполнения работы

1. Включить механический насос 1.
2. Открыть электромагнитный клапан 2, электромагнитический затвор 3, а также кран 6.
3. Включить абсолютный деформационный вакуумметр ВД-1 и исследуемый термометрический вакуумметр ВТО-2.
4. Произвести предварительную откачку измерительной камеры 4 до остаточного давления ниже  $0,1 - 0,2$  Па, т.е.  $(1-1,5)10^{-3}$  мм рт.ст. – по вакуумметру ВТО-2.
5. Открыть нагреватель  $P_0$  и кран 9 и установить в камере 4 давление азота (сухого воздуха)  $2-3$  Па, т.е.  $2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст.
6. Измерить давления  $P_1^*$  – по вакуумметру ВД-1 и  $P_{в1}$  – по вакуумметру ВТО-2.
7. Регулируя с помощью нагревателя  $P_0$  давление сухого воздуха (азота) в камере 4, измерить значения:  $P_1^*$  и  $P_{в1}$  в процессе их роста (приблизительно 10 экспериментальных точек) вплоть до давления  $10-15$  Па, т.е.  $0,1$  мм рт.ст.
8. Закрыть нагреватель  $P_0$  и кран 9 и вновь откачать камеру 4 до остаточного давления  $0,1 - 0,2$  Па.
9. Присоединить к вакуумной системе сосуд с инертным газом (гелием) 8.
10. Открыть нагреватель  $P_0$  и кран 9 и установить в камере 4 примерное давление гелия  $2-3$  Па, т.е.  $2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст.
11. Измерить давления:  $P_1^*$  по вакуумметру ВД-1 и  $P_{в1}$  – по вакуумметру ВТО-2.
12. Регулируя с помощью нагревателя  $P_0$  давление в камере 4, измерить значения  $P_1^*$  и  $P_{в1}$  в процессе их роста – т.е. же экспериментальные точки, какие были зафиксированы в п. 7, строго контролируя при этом равенство значений  $P_1^*$  с теми, которые были ранее (см. п. 7).
13. Закрыть нагреватель  $P_0$  и кран 9 и вновь откачать камеру 4 до остаточного давления  $0,1 - 0,2$  Па.
14. Включить вакуумметры ВД-1 и ВТО-2.
15. Закрыть затвор 3, кран 6 и клапан 2.
16. Выключить механический насос 1.

### Обработка измеренных

1. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значение $P_1^*$ , Па, по ВД-1	Значения давлений, Па по ВТО-2		Коэффициент относительной чувствительности
		$P_{в1}$	$P_{г1}$	

2. Вычислить индивидуальные значения относительной чувствительности теплового вакуумметра ВТО-2 по гелию для каждой экспериментальной точки:

$$q_{г1} = P_{г1} / P_{в1}$$

3. Вычислить среднее значение относительной чувствительности:

$$q_{ср} = \sum q_{г1} / n$$

4. Сопоставить полученное значение  $q_{ср}$  со справочными данными.

### Оформление отчета

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, требуемые вычисления и выводы.

### Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип действия тепловых вакуумметров?
2. В чем причина зависимости показаний тепловых вакуумметров от рода газа?
3. В чем отличие между термометрическим и терморезисторным вакуумметрами?
4. Как определяется коэффициент относительной чувствительности вакуумметра по газу?
5. Почему для определения коэффициента относительной чувствительности теплового вакуумметра требуется использование именно деформационного вакуумметра?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. Розанов Д.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 1990.
3. Вакуумная техника. Справ. М.: Машиностроение, 1992.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ГЕЛИЕВОГО ТЕЧЕИСКАТЕЛЯ

### Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством испытательного стенда (измерительной установкой) и масс-спектрометрического гелиевого теческаателя;
- 2) получить навыки выполнения испытательных процедур;
- 3) получить опыт обработки результатов измерений газового потока гелия по масс-спектрометрическому теческаателю.

### Задание:

- 1) изучить документацию к гелиевому теческаателю ПТИ-10;
- 2) ввести в действие вакуумную систему испытательного стенда (измерительной установкой);
- 3) ввести в действие гелиевый теческаатель ПТИ-10 и установить его рабочий режим;
- 4) произвести измерения потока гелия при подключении к теческаателю ряда контрольных искусственных течей;
- 5) выполнить обработку измерений в соответствии с приведенными ниже указаниями.

### Общие положения

Для обнаружения мест утечек и в вакуумную систему извне и оценки их интенсивности используются специальные устройства — теческаатели и теческаательные (испытательные) стенды. Если при испытании утечки или утечка пробного газа не зафиксированы, то в пределах чувствительности метода или средства теческания изданы или объект считается герметичным. Количественная оценка проникшего через течи (при их наличии) пробного газа может быть дана исходя из указанной чувствительности и соответствующего сигнала теческаателя. На практике нередко используются пороговым потоком наименьшим потоком пробного газа, достаточно надежно регистрируемым в процессе теческания. Обычно пороговый поток определяют как поток, составляющий (по сигналу) 2 % от всей шкалы выходного прибора в самом чувствительном его диапазоне.

Наиболее распространены масс-спектрометрические теческаатели, которые можно считать не только средствами обнаружения мест утечек (утечек), но и приборами, измеряющими поток пробного газа (обычно — гелия) с помощью масс-спектрометра с собственной вакуумной системой,

настроенного соответствующим образом. Основным узлом масс-спектрометрического теческаателя является камера анализатора, в которой молекулы газа ионизируются и разделяются по массам (точнее — по отношению массы к заряду) в магнитном и электрическом полях. Камера откачивается вакуумным насосом через полностью или частично открытый клапан с регулируемой проводимостью.

На практике оценку потока  $Q$ , фиксируемого с помощью теческаателя, производят путем сопоставления его сигнала  $Z$  с сигналом  $Z'$  зарегистрированным при калибровке прибора по известному потоку  $Q'$  (при том же режиме работы):

$$Q = Q' Z / Z'$$

Здесь сигналы  $Z$  и  $Z'$  берутся с выходов фоновых показаний или с компенсирующей их.

Чаще всего исходный поток  $Q'$  задается искусственной течью пробного газа, т.е. мерой потока газа. Таким образом, с метрологической стороны теческаатели можно рассматривать как компарирующие измерительные приборы. Для выпускаемых ответственной промышленностью гелиевых масс-спектрометрических теческаателей, в том числе типа ПТИ-10, эти функции выполняются контрольные течи Гелит 1 и Гелит 2 (см. техническое описание), в которых пронизаемый (только для гелия) элемент представляет собой тонкую сферическую перегородку из кварца, припаивенную к стеклянной трубке, которая с другой стороны соединена с коваровой трубкой. Через эту трубку поступающий через перегородку гелий направляется в соответствующую испытываемую вакуумную систему. Виду различий в давлении наполнения течи гелием (от  $(3-5)10^3$  до  $(0,8-1)10^5$  Па), а также вследствие некоторых отклонений в размерах пронизаемой перегородки отдельные экземпляры течи Гелит 1 и Гелит 2 воспроизводят потоки  $Q$  в диапазонах:

$$\text{Гелит 1} - 10^{-9} - 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па/с};$$

$$\text{Гелит 2} - 10^{-11} - 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}.$$

Каждый экземпляр искусственной течи, подвергаемый индивидуальной калибровке при фиксированной температуре, представляет собой однозначную меру потока пробного газа. В заданном промежутке времени поток течи считают постоянным в пределах, например,  $\pm 20$  % для течи Гелит 1 и  $\pm 30$  % для течи Гелит 2.

Метрологические характеристики теческаателя ПТИ-10 (см. паспорт) определяют с помощью указанных калиброванных искусственных течи. К этим характеристикам относятся:

$$\text{средняя чувствительность } K = Z/Q, (\text{м}^3 \text{ Па/В} \cdot \text{с})^{-1};$$

$$\text{цена деления прибора } C = 1/K, \text{ м}^3 \text{ Па/В} \cdot \text{с};$$

рабочая область измерений потоков;

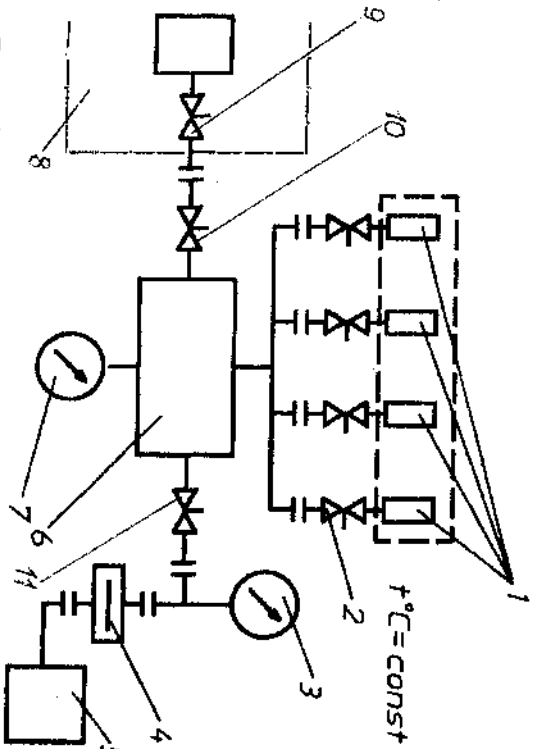
нижний предел измерений (пороговая чувствительность)  $Q_{\text{мин}} = 0,02 C Z_{\text{мин}}$ ,

$$\text{м}^3 \text{ Па/с};$$

верхний предел измерений  $Q_{\max} = C_{\text{гелия}} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$ ,  
 где  $Z_{\min}$  – верхний предел наиболее чувствительного диапазона теческаателя  
 (для прибора типа ПТИ-10  $Z_{\min} = 0,1$  В);  $Z_{\max}$  – верхний предел наименее  
 чувствительного диапазона (для ПТИ-10  $Z_{\max} = 30$  В).

### Измерительная установка

Определение метрологических характеристик гелиевого масс-спектрометрического теческаателя производится на установке, схема вакуумной системы которой приведена на рисунке. Здесь 1 – калиброванные искусственные



течи типа Гелиг 1 (в настоящей работе течи 1 элит 1 присоединяются поочередно), 2 –  
 крайки, 3 – пневматический-термометрический вакуумметр ВПТ-3, 4 – охлаждаемая ловушка  
 (в данных измерениях не задействована), 5 – механический насос, 6 – камера, 7 –  
 ручной компрессионный вакуумметр (в данных измерениях не участвует), 8 –  
 гелиевый масс-спектрометрический теческаатель типа ПТИ-10, 9 – входной клапан  
 теческаателя ПТИ-10, 10 – кран, 11 – электромагнитный затвор (с электроприводом).

### Порядок выполнения работы

1. Включить теческаатель 8.
2. Включить механический насос 5.
3. Открыть электромагнитный затвор 11 и кран 10.
4. Присоединить искусственную гелиевую течу типа Гелиг 1.
5. Открыть кран 2.

6. Произвести откачку камеры 6 до остаточного давления ниже 1 Па  
 ( $\sim 7,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) по вакуумметру 3.
7. Отрегулировать рабочий режим теческаателя 8 и измерить его  
 фоновый сигнал  $Z_{f0}$  (при токе эмиссии 5 мА).
8. Открыть входной клапан теческаателя 9 и произвести (после  
 достижения равновесного состояния) отсчет  $Z_1$  по выходному прибору  
 теческаателя, соответствующий потоку  $Q_1$  искусственной течи 1.  
 Зафиксировать при этом температуру окружающей среды. Повторить  
 измерения три раза и вычислить среднее значение  $Z_{1cp}$ .
9. Закрыть входной клапан 9 и кран 2.
10. Повторить операции 4-8 для последующих искусственных течей (с  
 измерением сигналов  $Z_{2cp}, Z_{3cp}, \dots$ , соответствующих потокам течей  
 $Q_2, Q_3, Q_4, \dots$ ).
11. Закрыть входной клапан 9, краны 2 и 10, а также электромагнитский  
 затвор 11.
12. Включить теческаатель 8 и механический насос 5.

### Обработка измерений

1. Результаты всех измерений занести в таблицу.

Номер искусствен- ной течи	Показания теческаателя, В		Поток искус- ственной течи при температуре $t_0$ , $\text{М}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$	Чувствитель- ность теческаателя $K_p$ $\text{В} \cdot \text{с} / \text{М}^3 \cdot \text{Па}$
	фоновое $Z_{f0}$	рабочее $Z_i$		

2. Вычислить поток гелия для каждой искусственной течи при  
 температуре измерения  $t_i$ :

$$Q_i = Q_{\text{ном}} [1 + \alpha(t_i - 20)],$$

где  $Q_{\text{ном}}$  – номинальный поток гелия при температуре 20° С;  $\alpha$  – температурный  
 коэффициент (для течей Гелиг 1  $\alpha = 0,03$ ).

3. Вычислить чувствительность теческаателя:

$$K_i = (Z_i - Z_{f0}) / Q_i.$$

4. Вычислить среднее значение чувствительности теческаателя:

$$K_{cp} = \sum K_i / n, \quad (\text{М}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{В} \cdot \text{с})^{-1}.$$

5. Вычислить среднее значение погрешности деления выходного прибора  
 теческаателя:

$$C_{cp} = 1 / K_{cp}, \quad \text{М}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{В} \cdot \text{с}.$$

6. Вычислить нижний и верхний пределы диапазона измерений  
 теческаателя с использованием вычисленного значения  $C_{cp}$  и указанных ранее  
 значений  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$ .

7. Сделать выводы о соответствии вычисленных пределов измерений теческатора паспортным данным для них (см. л. 66 паспорта к теческатору ПТИ-10).

Примечание. Номинальные значения потока гелия для каждой искусственной течи (при температуре 20 °С):

- Гелиг 1 № 1 —  $1,0 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/Па/с;
- Гелиг 1 № 2-13 —  $2,57 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Па/с;
- Гелиг 1 № 2-34 —  $2,40 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Па/с;
- Гелиг 1 № 2-120 —  $5,66 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Па/с;
- Гелиг 1 № 2-214 —  $6,60 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Па/с.

### Оформление отчета

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, сводка требуемых вычислений и выводы.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное назначение теческатора?
2. На чем основан принцип действия масс-спектрометрического теческатора?
3. Как определяется пороговый поток теческатора?
4. Почему в качестве пробного газа в теческаторе чаще всего используют гелий?
5. В чем заключается функция искусственной течи пробного газа?
6. Как устроена гелиевая контрольная течь типа Гелиг 1?
7. Каковы допускаемые относительные отклонения для номинальных значений потоков гелиевых течей типов Гелиг 1 и Гелиг 2?
8. Каковы основные характеристики теческатора ПТИ-10 и в каких единицах они измеряются?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Розанов Д.И.* Вакуумная техника М.: Высш шк., 1990.
2. *Кузнецов В.В.* Вакуумные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
3. Вакуумная техника. Справ. М.: Машиностроение, 1992.

### Работа 5

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЗАИМНЫХ СЛИЧЕНИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВАКУУМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

### Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством вакуумной установки и деформационных вакуумметров;
- 2) получить навыки проведения измерительных операций;
- 3) получить опыт обработки результатов измерений низких давлений.

### Задание:

- 1) изучить документацию к вакуумной установке и к измерительным приборам;
- 2) ввести в действие вакуумную установку и создать ряд экспериментальных позиций;
- 3) произвести измерения по деформационным вакууметрам;
- 4) выполнить обработку измерений в соответствии с нижеприведенными указаниями.

### Общие положения

В деформационных вакуумметрах мерой измеряемого низкого давления газа служит деформация упругого чувствительного элемента, происходящая при появлении разности давлений по обе стороны от него. Поэтому деформационные вакуумметры измеряют не собственно давление, а разность давлений и относятся к дифференциальным приборам. Показание деформационных вакуумметров не зависит от рода газа, давление которого подлежит измерению.

По виду чувствительного элемента деформационные вакуумметры подразделяются на три группы:

- 1) трубчатые (пружинные);
- 2) мембранные;
- 3) сильфонные.

По способу регистрации деформационные вакуумметры можно разделить на три группы:

- 1) механические и оптико-механические;
- 2) электрические (индуктивные, емкостные и тензочувствительные);
- 3) электронно-механические (механотронные).

В различных моделях деформационных вакуумметров могут присутствовать разные сочетания видов и типов чувствительных элементов и систем отсчета.

В наиболее распространенных (при низких давлениях) — мембранных вакуумсторах упругим деформируемым элементом служит тонкая мембрана, притяг которой зависит от разности давлений по обе стороны от нее. Обычно неравнинный мембранный преобразователь состоит из двух камер, разделенных мембраной. В одной из них — опорной (се также называют эталонной, минусовой, нулевой, сравнительной) чаще всего поддерживают остаточное давление  $P_0$ , которое намного ниже измеряемого давления  $P$ . Для этого обязательно непрерывно откачивают опорную камеру. Она может быть откачана заранее и герметизирована. Газ под измеряемым давлением подводится ко второй камере вакуумметра — измерительной (плюсовой).

При разности давлений  $\Delta P = (P - P_0) > (10^2 - 10^3)$  деформация мембраны может быть зафиксирована с помощью оптико-механической системы. Таким прибором является оптический микроманометр типа ОМ 6 (ОМ 2) с диапазоном измерений от 0 до  $4 \cdot 10^4$  Па (0–300 мм рт. ст.), класс точности 1,0 (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации).

В мембранно-емкостных вакуумсторах против мембраны вызывает изменение электрической емкости конденсатора, образуемого мембраной и неподвижным («индикаторным») электродом, или соотношения емкостей конденсаторов, образованных мембраной и двумя неподвижными электродами. Это изменение регистрируется, например, с помощью прецизионного емкостного моста с питанием от высокочастотного генератора. При использовании компенсационного метода измерения деформирующую мембрану возвращают в исходное состояние электристатической силой, возникающей при подаче измеряемого напряжения  $U$  между мембраной и «индикаторным» (или «компенсационным») электродом. Напряжение  $U$ , при котором достигается первоначальное равновесие моста, может служить мерой разности давлений  $\Delta P$  или самого измеряемого давления  $P$  (при  $P_0 \ll P$ ). Функция преобразования такого вакуумметра имеет вид

$$P = \frac{\epsilon}{2l^2} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 U^2,$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость разреженной газовой среды при данной температуре,  $l$  — расстояние между мембраной и электродом;  $d_1$  и  $d_2$  — диаметр электрода и мембраны соответственно.

Введя постоянную вакуумметра  $C$ ,

$$C = \frac{\epsilon}{2l^2} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2,$$

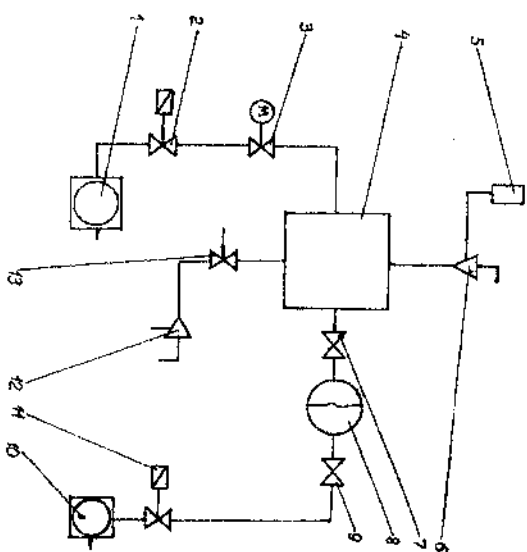
$$P = CU^2.$$

Получим

Мембранно-емкостный вакуумметр ВД-3 (с цифровым отсчетом) имеет верхний предел измерений  $(2-3) \cdot 10^4$  Па и предел допускаемой относительной погрешности  $\pm 5\%$  (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации).

#### Измерительная установка

Вязкость диапазонов измерений вакуумметра ВД-3 и микроманометра ОМ 6 (ОМ 2) позволяет провести их взаимные слепые. Они проводятся на установке ВОУ-1. Схема той части вакуумной системы, которая используется при слепых, приведена на рисунке. Здесь 1, 10 — механические насосы, 2, 11 —



электромагнитные клапаны, 3 — электромагнитный затвор (с электроприводом), 4 — измерительная камера, 5 — первичный преобразователь ПВД-3 вакуумметра ВД-3, 6, 12 — манометр, 7, 9 — ручные клапаны, 8 — оптический микроманометр ОМ 6 (ОМ 2), 13 — ручной пружинный накачал.

#### Порядок выполнения работ

1. Включить механические насосы 1 и 10.
2. Открыть электромагнитные клапаны 2 и 11, электромагнитный затвор 3 и ручные клапаны 7 и 9, а также краны 6 и 12.

3. Включить вакуумметр ВД-3 и оптический микроанометр ОМ 6 (ОМ 2).
4. Произвести предварительную откачку измерительной камеры 4 до остаточного давления ниже 1 Па ( $10^{-2}$  Па) по обом приборам.
5. Проверить установку нуля микроанометра 8.
6. Открыть нагнетатель 13 и установить в камере 4 примерное давление 30-40 гПа (10-15 мм рт. ст.).
7. Произвести отсчет давления  $P_2$  по микроанометру ОМ 6 (ОМ 2) и давления  $P_1$  по вакуумметру ВД-3.
8. Регулируя с помощью нагнетателя 13, а также затвора 3 давление в камере 4, сделать измерения значений  $P_1$  и  $P_2$  в процессе их роста через каждые 10-15 гПа вплоть до примерного давления 250-350 гПа.
9. Закрыть нагнетатель 13 и кран 12 и вновь откачать камеру 4 до остаточного давления ниже 1 гПа.
10. Выключить вакуумметр ВД-3 и оптический микроанометр ОМ 6 (ОМ 2).
11. Закрыть все катаны, а также затвор 3 и кран 6.
12. Выключить механические насосы 1 и 10.

### Обработка измерений

1. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давления $P_1$ по ВД-3		Значения давления $P_2$ по ОМ 6		Относительное отклонение
	гПа	мм рт. ст.	гПа	мм рт. ст.	

2. Вычислить относительные отклонения показаний обоих приборов:

$$\delta = \frac{P_1 - P_2}{(P_1 + P_2) / 2}$$

3. Вычислить среднее квадратическое отклонение ряда измерений  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\sum \delta^2 / (n - 1)}$$

4. Вычислить доверительный интервал  $\theta = \pm k\sigma$  (коэффициент  $k = 2,86$  для доверительной вероятности 0,99).

5. Сделать вывод о соответствии доверительного интервала  $\theta$  показателям точности обоих приборов.

### Оформление отчета

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, требуемые вычисления и вывод.

### Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип действия деформационных вакуумметров?
2. Какими способами можно регистрировать деформацию в данных вакууметрах?
3. В чем основная особенность компенсационного метода измерения в мембранно-емкостных вакууметрах?
4. Каковы функции минусовой и плюсовой камер при измерении абсолютного давления по дифференциальному деформационному прибору?
5. Каковы допускаемые относительные погрешности вакуумметра ВД-3 и микроанометра ОМ 6 (ОМ 2)?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 1990.
3. Вакуумная техника. Справ. М.: Машиностроение, 1992.

### Работа 6

## ОБРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМА КАМЕРЫ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

### Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством измерительной установки;
- 2) получить представление о возможности измерений объема сложных камер, их особенностях и подготовке к таким измерениям;
- 3) получить навыки обработки экспериментальных данных при проведении парных измерений.

### Задание:

- 1) изучить документацию к измерительной установке и к используемым средствам измерений;
- 2) ввести в действие измерительную установку и выполнить последовательный ряд операций с коммутирующими элементами;

- 3) привести парные отсчеты по измерительным приборам в соответствие с этапами всей совокупности измерительных циклов;
- 4) выполнить обработку измерений согласно изложенным указаниям.

### Общие положения

Проблема измерений объема (емкостности) сосудов, резервуаров, камер возникает в тех случаях, когда последние не имеют правильной геометрической формы и, следовательно, расчет объема по линейным размерам сосуда в соответствии с известными формулами (например, для цилиндра, параллелепипеда, сферы и др.) не дает результата приемлемой точности. Таких случаев оказалось, однако, столь много, что был отработан ряд экспериментальных методов измерения объемов сосудов произвольной конфигурации и различных размеров. К числу наиболее надежных и доступных методов относятся гравиметрический метод, основанный на зависимости

$$V = m/\rho,$$

где  $V$  — искомый объем,  $m$  — непосредственно измеренная масса жидкости, заполняющей сосуд объема  $V$ ;  $\rho$  — известная плотность указанной жидкости.

Фактически данный метод осуществляется путем взвешивания на точных весах вначале пустого сосуда (резервуара, камеры), а затем заполнения жидкостью постоянной плотности (наиболее часто — дистиллированной водой, ртутью и т.п.), причем взвешивание производится при одной и той же температуре окружающего воздуха и с учетом соответствующих поправок. Словршено очевидно, что данный метод пригоден для измерения сравнительно небольших объемов и при возможности переноса сосуда (резервуара, камеры) к весам. Наконец, очень важно, чтобы сосуд можно было заполнить жидкостью и чтобы существовала реальная возможность проконструировать полноту такого заполнения, т.е. гарантировать отсутствие воздушных карманов. Далеко не всегда эти условия выполняются. К таким сложным сосудам относятся, например, вакуумные камеры, состоящие из целого ряда элементов (трубки, колена, различные коммутирующие узлы, вспомогательные полости, арматура, датчики, люльки и т.п.). После соединения этих элементов суммарный объем такой системы, образующий единый объем, определить гравиметрическим методом практически невозможно, а рассчитать искомую величину можно только весьма приближенно.

Более универсальным методом считается метод определения объема (емкостности) сосуда (резервуара, камеры), основанный на применении изотермического расширения газа, который в простейшем виде описывается законом Бойля-Мариотта. Если, например, имеется некоторый сосуд известного объема  $V_1$ , соединенный через затворный элемент (кран) с искомым

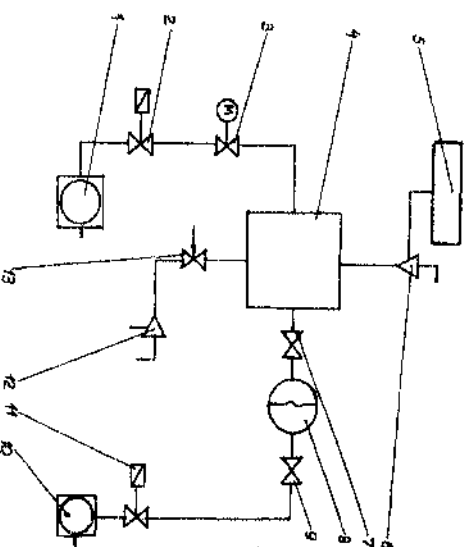
объемом  $V_2$ , а газ, находившийся первоначально в объеме  $V_1$  под известным или измеренным давлением  $P_1$  после открытия крана расширяется в заранее отключенный объем  $V_2$  и соответственно результирующее давление в нем  $P_2$  также можно измерить, то согласно закону Бойля-Мариотта (при постоянной температуре газа)

$$V_2 = V_1(P_1 - P_2)/P_2.$$

Здесь не учтен ряд побочных эффектов: влияние остаточных давлений в камерах, процесс нагнетания или утечки газа в течение цикла измерений, явления взаимодействия газа с поверхностью камер, воздействие конечной проводимости крана на скорость расширения газа и т.д. Кроме того, все-таки остается проблема измерения исходного объема  $V_1$ , который, правда, может быть выбран достаточно удобным для теоретического расчета по линейным размерам или для определения гравиметрическим методом. И все же возможности использования метода для измерения объема камер самых различных конфигураций и размеров обусловили его широкое распространение.

В данной работе известный объем  $V_1$  осуществляется в форме стеклянного резервуара № 40 с краном, посредством которого он соединяется с измерительной камерой установки ЮУ-1, объем которой  $V_2$  надлежит измерить. Для измерения давления  $P_1$  и  $P_2$  применяется оптический микроманометр типа ОМ 6 (ОМ 2) класса точности 1,0 с диапазоном измерений  $0-4 \cdot 10^4$  Па ( $0-300$  мм рт. ст.) (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации, а также работу 5).

### Измерительная установка



Измерения объема камеры произвольной конфигурации выполняются на установке ВОР-1 (см. рисунок). Элементы 1, 10 – механический насос, 2, 11 – электромагнитный клапан, 3 – электромагнитный затвор (с электроприводом), 4 – измерительная камера известного объема  $V_2$ , 5 – исходный резервуар известного объема  $V_1 = 837,8 \text{ см}^3$  (837,8 мл), 6, 12 – краны, 7, 9 – ручные клапаны, 8 – оптический микроанометр типа ОМ 6 (ОМ 2), 13 – регулируемый нагнетатель.

### Порядок выполнения работы

1. Включить механические насосы 1 и 10.
2. Открыть электромагнитные клапаны 2 и 11, электромагнитный затвор 3 и ручные клапаны 7 и 9, а также краны 6 и 12.
3. Включить оптический микроанометр ОМ 6 (ОМ 2).
4. Произвести предварительную откачку измерительной камеры 4 и резервуара 5 до остаточного давления ниже 1 гПа ( $10^2 \text{ мм рт. ст.}$ ) по микроанометру ОМ 6 (ОМ 2).
5. Проверить установку нуля микроанометра 8.
6. Закрыть затвор 3, открыть нагнетатель 13 и установить в камере 4 и резервуаре 5 определенное давление 330 гПа (250 мм рт. ст.), после чего закрыть нагнетатель 13.
7. Произвести отсчет давления  $p_1$  по микроанометру ОМ 6 (ОМ 2).
8. Закрыть кран 6.
9. Открыть затвор 3 и вновь откачать камеру 4 до остаточного давления ниже 1 гПа по микроанометру 8.
10. Закрыть затвор 3 и открыть кран 6.
11. После установления результирующего давления  $p_2$  в камере 4 и резервуаре 5 измерить его по микроанометру ОМ 6 (ОМ 2).
12. Вновь открыть затвор 3 и, регулируя нагнетатель 13, повторить операции 4–11 для различных значений давления  $p_1$  в области от 330 до 400 гПа (250–300 мм рт. ст.) – всего не менее 10 экспериментальных точек.
13. Открыть затвор 3 и откачать камеру 4 и резервуар 5 до остаточного давления ниже 1 гПа.
14. Включить оптический микроанометр ОМ 6 (ОМ 2).
15. Закрыть все клапаны, а также затвор 3 и краны 6 и 12.
16. Включить механические насосы 1 и 10.

### Обработка измерений

1. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давлений, гПа (мм рт. ст.)		Отношение $[(p_1 - p_2) / p_2]$	Отклонение $\delta_i$
	$p_1$	$p_2$		

30

2. Вычислить частные значения отношения показаний микроанометра ОМ 6 (ОМ 2):  $[(p_1 - p_2) / p_2]_i$ .

3. Вычислить среднее значение отношения показаний прибора:

$$[(p_1 - p_2) / p_2]_{\text{ср}} = \Sigma \{[(p_1 - p_2) / p_2]_i\} / n,$$

где  $n$  – общее число измерений.

4. Вычислить частные значения отклонений:

$$\delta_i = [(p_1 - p_2) / p_2]_i - [(p_1 - p_2) / p_2]_{\text{ср}}.$$

5. Вычислить среднее значение объема камеры  $V_2$ :

$$V_2 = V_1 [(p_1 - p_2) / p_2]_{\text{ср}}$$

где  $V_1 = 837,8 \text{ см}^3$ .

6. Вычислить среднее квадратическое отклонение ряда измерений:

$$\sigma = \sqrt{\Sigma \delta_i^2 / (n - 1)}$$

7. Вычислить доверительный интервал  $\theta = \pm k\sigma$  (коэффициент  $k = 2,86$  для доверительной вероятности 0,99).

8. Сделать вывод о соответствии доверительного интервала  $\theta$  показателям точности микроанометра ОМ 6 (ОМ 2).

### Оформление отчета

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, требуемые вычисления и вывод.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип гравиметрического метода измерения объема сосуда (камеры)?
2. В чем заключается преимущество метода измерения объема, основанного на использовании закона Бойля-Мариотта, перед гравиметрическим методом?
3. Каковы условия правомерности приложения теоретических зависимостей, вытекающих из закона Бойля-Мариотта, при практических измерениях объема сосуда (камеры)?
4. Каково должно быть соотношение между остаточным давлением в камере при измерении ее объема и конечным давлением, устанавливаемым в ней после расширения газа?
5. Какими могут быть источники отклонений, наблюдаемых в различных циклах расширения газа?



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Д.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 1990.
2. Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
3. Конструирование и расчет вакуумных систем/ А.И. Пипко и др. М.: Энергия, 1975.

### Работа 7

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕРКИ ТЕПЛОВЫХ ВАКУУММЕТРОВ

### Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством вакуумной установки и тепловых вакуумметров;
- 2) получить навыки выполнения поверочных процедур;
- 3) получить опыт обработки результатов проверки термометрических и терморезисторных вакуумметров по эталонному термометрическому вакуумметру.

### Задание:

- 1) изучить документацию к вакуумной установке и к измерительным приборам;
- 2) внести в действие вакуумную установку и воспроизвести ряд экспериментальных позний;
- 3) произвести измерения по эталонному вакуумметру и поверочным рабочим вакуумметрам;
- 4) выполнить обработку измерений в соответствии с нижеприведенными указаниями.

### Общие положения

Тепловые или термоэлектрические вакуумметры — измерительные приборы. Принцип действия которых основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от его давления. Эта зависимость имеет явно выраженный характер в области давлений от  $10^{-2}-10^{-1}$  до  $10^2-10^3$  Па. Имеются две основные разновидности тепловых вакуумметров: термометрические и терморезисторные. Сейчас, как и ранее, тепловые вакуумметры относятся к самым массовым видам вакуумметрической аппаратуры.

В термометрических вакуумметрах чувствительным элементом в первом преобразователе служит термометр, стая которой поддерживается при повышенной температуре обычно путем пропускания тока по нагревательному

элементу, имеющему прямой или косвенный контакт со спаем. Термо-элемент является функцией температуры спая, зависящей от теплопроводности газа. Граничами (по давлению) этой зависимости определяется область измерений прибора. При постоянном токе нагрева нагревателя э.д.с. термометра однозначно характеризует измеренное давление. К сожалению, чувствительность теплового вакуумметра непостоянна в пределах рабочего диапазона давлений и зависит от режима измерений и схемы включения преобразователя, а также от рода газа. Нижний предел измерений термометрических вакуумметров обусловлен тем, что при давлениях ниже  $10^{-2}-10^{-1}$  Па тепловые потери за счет излучения чувствительного элемента и теплоотвода через его выводы становятся намного больше мощности теплопередачи через газ. Верхний предел измерений связан с понижением чувствительности вакуумметра по мере перехода к вязкостному режиму газовой среды и, следовательно, к выравниванию температур в объеме преобразователя.

В современных моделях полупроводниковых термометрических преобразователей — ЦДТ-8, ЦДТ-9 и др. батареи измерительной и нагревательной термометрической подготовки путем вакуумного напыления тонких слоев на диэлектрическую подложку базовой пластины. Например, в преобразователе ЦДТ-8 вакуумметра ВТ-8 сигнал от батареи термометрических преобразователей передается термометру, существующему в его объеме. В электронном измерительном блоке вакуумметра осуществляется усиление и аналого-цифровое преобразование сигнала датчика. Помимо этого блок вакуумметра обеспечивает контроль и регулирование тока нагрева (с погрешностью до 1 мкА) (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации).

Наиболее совершенная модель термометрического прибора реализована в эталонном вакуумметре 2-го разряда ВТО-2 (с преобразователем ЦДТ-1). Повышенная точность вакуумметра (относительная погрешность менее  $\pm 10\%$ ) обеспечивается термостабилизацией корпуса преобразователя, улучшенной конструкцией последнего и тщательным контролем электрического режима (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации). Прямое сравнение с эталонным средством измерений, которое является оптимальным вариантом метрологического обслуживания рабочих вакуумметров, может быть осуществлено путем одновременных отсчетов показаний эталонного вакуумметра ВТО-2 и рабочих вакуумметров ВТ-8 и ВК-3 (см. далее), соответствующих одним и тем же значениям давления газа, в пределах общей части их рабочего диапазона.

Терморезисторные вакуумметры (в зарубежной литературе — вакуумметры Пирани) — самый распространенный вид тепловых вакуумметрических приборов. Преобразователь вакуумметра содержит металлический термочувствительный элемент обычно в форме проволоки из материала с большим температурным коэффициентом сопротивления. Для этого элемента — резистора (тонкой проволоки из вольфрама, платины или

никели) сопротивление представляет линейную функцию температуры разреженной газовой среды в объеме преобразователя, зависящую от инвариантности теплоотвода через газ. Терморезистор представляет собой плечо мостовой схемы, ток избытка которой или (что является более удобным) напряжение питания, необходимое для поддержания ее электрического равновесия, — мера давления газа.

Границы зависимости значений параметров электропитания мостовой схемы от давления определяются в основном следующим: для нижнего предела измерений — возрастание влияния побочных компонентов теплоотвода от терморезистора и для верхнего предела — ослабление связи сигнала с давлением при его возрастании. Для большинства терморезисторных вакуумметров благодаря использованию в качестве чувствительного элемента очень тонких проволок и применению режима постоянной температуры диапазон измерений сдвинут по сравнению с термопарными приборами в сторону высоких давлений.

Относительная промысленность длительное время выдает терморезисторные вакуумметры на базе преобразователей ПМТ-6-3. Термочувствительным резистором здесь является отрезок платиновой проволоки диаметром 0,012 мм и длиной 80 мм. Рабочая температура терморезистора (470 К) поддерживается постоянной с помощью специальной схемы авторегулирования.

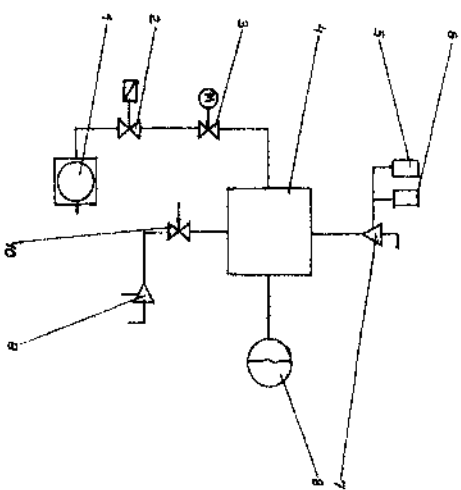
Вакуумметр ВК-3 является комбинированным прибором, используемым в комплекте с преобразователем ПМТ-6-3, а также с магнитопарадным преобразователем ПММ-32-1. Он имеет восемь каналов измерений, оснащён аналоговым выходом и блокировочными устройствами (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации).

### Измерительная установка

В соответствии с ГОСТ 8.107-81 проверка тепловых вакуумметров, и в частности вакуумметров ВТ-8 и ВК-3, производится путем сличения с эталонным тепловым вакуумметром в данном случае ВТО-2. Сличение выполняется на установке ВДУ-1 (см. рисунок). Здесь 1 — механический насос, 2 — электромагнитный клапан, 3 — электромеханический затвор (с электроприводом), 4 — измерительная камера, 5 — первичный преобразователь ПМТ-6-3 вакуумметра ВК-3, 6 — первичный преобразователь ПМТ-8 вакуумметра ВТ-8, 7, 9 — кран, 8 — эталонный вакуумметр ВТО-2, 10 — регулируемый нагреватель.

### Порядок выполнения работы

1. Включить механический насос 1.



2. Открыть электромагнитный клапан 2, электромеханический затвор 3, а также кран 7.
3. Включить эталонный вакуумметр ВТО-2 и рабочие вакуумметры ВК-3 и ВТ-8.
4. Произвести предварительную откачку измерительной камеры 4 до остаточного давления ниже  $1 \text{ Па}$  ( $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ ) по вакуумметру ВТО-2.
5. Открыть нагреватель 10 и установить в камере 4 примерное давление  $5 \text{ Па}$  ( $3-4 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ ).
6. Измерить давление:  $p_1$  — по эталонному вакуумметру ВТО-2,  $p_2$  — по вакуумметру ВТ-8 и  $p_3$  — по вакуумметру ВК-3.
7. Регулируя с помощью нагревателя 10 давление в камере 4, измерить значения  $p_1$ ,  $p_2$  и  $p_3$  в процессе их роста (приблизительно по 5-10 экспериментальных точек на каждую декаду давления) вплоть до примерно давления  $500 \text{ Па}$  ( $3-4 \text{ мм рт. ст.}$ ).
8. Закрывать нагреватель 10 и кран 9 и вновь откачать камеру 4 до остаточного давления ниже  $1 \text{ Па}$ .
9. Включить эталонный вакуумметр ВТО-2 и рабочие вакуумметры ВТ-8 и ВК-3.
10. Закрывать затвор 3, кран 7 и клапан 2.
11. Включить механический насос 1.

### Обработка измерений

1. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давлений $P_1, P_2$ по эталонному вакуумметру	Значения давлений, Па		Относительные отклонения	
		$P_2$ по ВТ-8	$P_2$ по ВК-3	$\delta$	$\delta'$

2. Вычислить относительные отклонения:
 
$$\delta = (P_2 - P_1) / P_1;$$

$$\delta' = (P_2 - P_1) / P_1;$$
3. Вычислить средние квадратические отклонения рядов *назад* и *вперед*.
 
$$\sigma = \sqrt{\sum \delta^2 / (n-1)};$$

$$\sigma' = \sqrt{\sum \delta'^2 / (n-1)};$$
4. Вычислить доверительные интервалы  $\theta = k\sigma$  и  $\theta' = k\sigma'$  (коэффициент  $k = 2,86$  для доверительной вероятности 0,99).
5. Сделать выводы о соответствии доверительных интервалов  $\theta$  и  $\theta'$  и показателей точности рабочих приборов ВТ-8 и ВК-3.

### Оформление отчета

В отчет о выполненной работе включаются: краткое описание работы, схема измерительной установки, таблица с результатами измерений, требуемые вычисления и выводы.

### Контрольные вопросы

1. На чем основан общий принцип действия всех тепловых вакуумметров?
2. Каковы основные разновидности тепловых вакуумметров?
3. Какую роль играют побочные эффекты (излучение чувствительного элемента преобразователя, теплопровод через его вывод) при измерении давления по тепловым вакуумметрам?
4. Чем обусловлен верхний предел диапазона измерений термометрических и терморезисторных вакуумметров?
5. У какого из рабочих вакуумметров выше точность измерений давления по результатам поверки?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. Розинюк Т.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 1990.
3. Кузьмин В.В. Радиуровка и поверка вакуумметров. М.: Изд-во стандартов, 1987.

### СОДЕРЖАНИЕ

Работа 1. Определение быстроты действия вакуумного электро-физического насоса.....	3
Работа 2. Обработка результатов поверки магниторазрядного вакуумметра по эталонному ионизационному вакуумметру.....	8
Работа 3. Определение относительной чувствительности тепловых вакуумметров по инертным газам.....	13
Работа 4. Определение метрологического характера спектров масс-спектрометрического гелиевого теческалеля.....	18
Работа 5. Обработка результатов взаимных сравнений деформационных вакуумметров различных типов.....	25
Работа 6. Обработка измерений объема камеры произвольной конфигурации.....	27
Работа 7. Обработка результатов поверки тепловых вакуумметров.....	32