

В.В. Кузьмин

СОДЕРЖАНИЕ

Работа 1. Исследование газораспределения вакуумных материалов	3
Работа 2. Определение вакуумных характеристик гелиевого масс-спектрометрического течеискателя	7
Работа 3. Исследование теплопередачи газов при низких давлениях	12
Работа 4. Экспериментальное исследование газовых законов при низких давлениях	18
Работа 5. Калибровка магниторазрядного вакуумметра в условиях высокого вакуума	23
Работа 6. Определение быстрооткачивающего действия вакуумного насоса	30

ФИЗИКА ВАКУУМА

Учебное пособие

Пособие соответствует гос. стандарту по направлению 552700 "Энергомашиностроение". Рассмотрены методические указания к шести практическим работам, где приведены формулировки конкретной цели, описание экспериментальной аппаратуры и последовательность выполнения отдельных операций. Кроме того, излагаются положения, раскрывающие физико-техническую базу выполняемых работ, что облегчает усвоение теоретического материала, а также указания по статистической обработке проводимых измерений. Предназначено для студентов механико-машиностроительного и энергомашиностроительного факультетов СПбГПУ, изучающих курс "Физика вакуума".

Ил. 20. Табл. 5. Библиогр.: 4 назв.

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

Работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ВАКУУМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: ознакомление с устройством высоковакуумной системы экспериментальной установки и с принципами действия ее элементов, изучение кумулятивного метода измерения газового потока в вакууме, экспериментальное определение геометрических размеров исследуемого образца вакуумного материала, измерение суммарного потока газовыделения с его поверхности и расчет скорости удельного газовыделения.

Теоретические сведения

Поток газов Q , выделяющихся с поверхности образца материала в вакууме, определяется по формуле

$$Q = qA, \quad (1.1)$$

где q – скорость удельного газовыделения (десорбции) с поверхности образца; A – площадь поверхности образца, обращенной к вакууму.

В данной работе в качестве образца вакуумного материала используется квадратная пластина из листовой резины марки 7889 (рис. 1.1).

Вакуумные резины широко применяются в качестве уплотнителей в разъемных соединениях и в вакуумных вводах датчиков. Они имеют незначительную пористость и сравнительно малое газовыделение. Белая вакуумная резина марки 7889 наиболее эластична. Ее используют в качестве уплотнителей, функционирующих в диапазоне умеренных температур (до 50 °С).

Площадь внешней поверхности пластины вычисляется по формуле

$$A = 2b^2 + 4bh = 2b(b + 2h). \quad (1.2)$$

Подстановка (1.2) в (1.1) дает

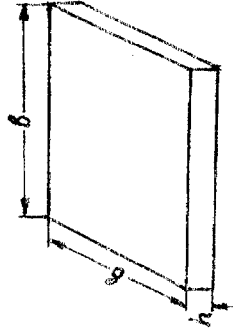


Рис. 1.1

$$Q = 2qb(b + 2h).$$

Скорость удельного газовыделения q для данного рода материала зависит от температуры, способа и времени предварительной вакуумной обработки образца. Эта зависимость, например, при комнатной температуре (20 °C) может быть такой:

$$Q = q_0 e^{-Lt}, \quad (1.3)$$

где q_0 – начальная скорость удельного газовыделения; L – константа, зависящая от рода материала и режима его предварительной обработки; t – длительность предшествующей откачки.

Пример зависимости вида (1.3) показан на рис. 1.2.

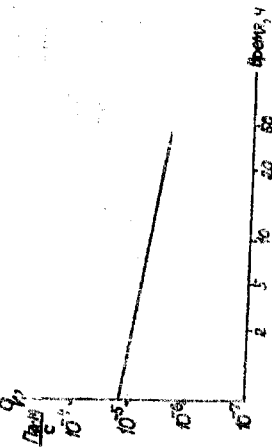
Таким образом, окончательно получаем

$$Q = 2b q_0 e^{-Lt} (b + 2h).$$

При усреднении значений скорости удельного газовыделения в пределах небольшого интервала времени, например 10-20 мин, можно записать

$$q = Q/2b(b + 2h). \quad (1.4)$$

Рис. 1.2



Методика и порядок проведения эксперимента

Иследуемый образец – пластина из резины марки 7889 помещается в вакуумную камеру установки ВУ-1А (см. паспорт 1984.00.00.0000ПС) (рис. 1.3). Здесь 1 – механический пластинчато-роторный насос типа 2НВР-5ДМ, 2 – двухроторный вакуумнасос, 3 – преобразователь ПМТ-6-3 терморезисторного вакуумметра типа ВТ1-4 (см. паспорт 8790-4106.00.00.0000ПС), 4 – аварийный клапан, 5 – диффузионный паромасляный насос типа НВДМ-400, 6 – охлаждаемая ловушка, 7, 11 – преобразователи вакуумметра, 8, 10 – преобразователи ПММ-32-1 магниторазрядного вакуумметра типа ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.00.0000ПС), 9 – высоковакуумный затвор, 12 – натекагель, 13 – вакуумная камера, 14 – исследуемый образец, 15 – регулируемый натекагель, 16, 18 – клапаны.

Пластинчато-роторный насос 1 и двухроторный насос 2 объединены в вакуумный агрегат АВР-50. Все клапаны, кроме аварийного, имеют пневматическое управление.

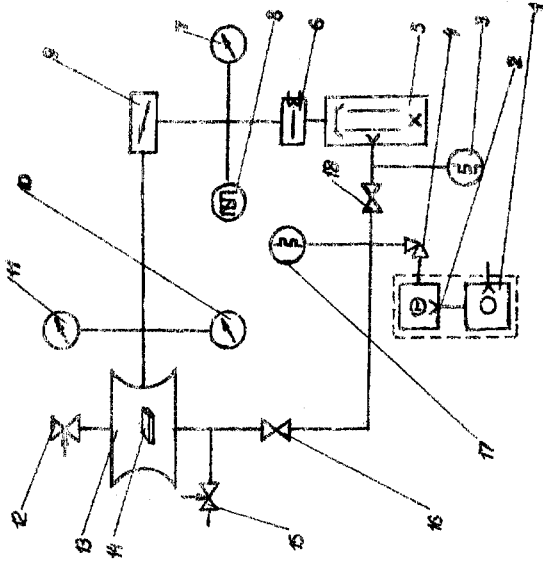


Рис. 1.3

Выполняемые операции.

1. С помощью мерительного инструмента произвести измерения размера размеров b и h пластины (см. рис. 1.1).
2. Заложить пластину 14 в вакуумную камеру 13 и закрыть ее дверцу (см. рис. 1.3).
3. Включить механический пластинчато-роторный насос 1 (при открытых клапанах 16 и 18) и после достижения остаточного давления $\sim 10^3$ Па, фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4 – III канал (с преобразователем 17 типа ПМТ-6-3), двухроторный насос 2.
4. После достижения остаточного давления ~ 10 Па, фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4 – II, III каналы (с преобразователями 3 и 17), включить диффузионный паромасляный насос 5.
5. После достижения остаточного давления $\sim 0,1$ Па, фиксируемого по магниторазрядному вакуумметру ВМБ1-2 – I канал (с преобразователем 8 типа ПММ-32-1), открыть высоковакуумный затвор 9 и закрыть клапан 16.
6. Произвести откачку камеры 13 с исследуемым образцом 14 до предельного остаточного давления $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ Па, фиксируемому по магниторазрядному вакуумметру ВМБ1-2 – II канал (с преобразователем 10 типа ПММ-32-1), после чего закрыть высоковакуумный затвор 9.
7. В процессе происходящего затем накопления (кумуляции) газа, выделяемого с поверхности образца 14, в камере 13 и роста давления в ней

Работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАКУУМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛИЕВОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯ

Цель работы: ознакомление с принципами действия масс-спектрометрического течейскаания и с устройством гелиевого течейскаателя типа ТИ1-14 и испытательного стенда на его базе, изучение методических и конструктивных особенностей функционирования мер потока гелия — искусственных контрольных течей, определение средней чувствительности и средней цены деления выходного прибора течейскаателя ТИ1-14.

Теоретические сведения

Для обнаружения мест натеканий в вакуумную систему объекта (изделия) и оценки интенсивности этих натеканий используются специальные приборы — течейскаатели и испытательные стенды. На этих стендах осуществляют контроль герметичности оболочек и соединений указанных систем. Если при испытаниях нагекание или утечка пробного газа не зафиксированы, то в пределах чувствительности метода или средства течейскаания изделие или объект считается герметичным. Количественная оценка протекающего через течи (при их наличии) потока пробного газа может быть дана исходя из указанной чувствительности и соответствующего сигнала течейскаателя.

Наиболее распространены масс-спектрометрические течейскаатели, которые можно считать не только средствами обнаружения мест натеканий (утечек), но и приборами, измеряющими поток пробного газа с помощью масс-спектрометра с вакуумной системой, настроенного соответствующим образом. В качестве пробного газа чаще всего используют гелий, так как он присутствует в атмосфере в очень незначительной концентрации и обладает наибольшей способностью к проникновению через микродефекты соединений и в оболочках ввиду малых размеров его молекул (диаметр молекулы гелия 0,218 нм).

Широко используемой схемой испытаний на герметичность является схема обдува испытываемого изделия (объекта) гелием (рис. 2.1) с помощью специального устройства, прилагаемого к течейскаателю, в том числе типа ТИ1-14, исследуемого в данной работе (см. паспорт 2.832.024ПС).

Оценку потока гелия Q , фиксируемого (при наличии течи или течей) с помощью течейскаателя, производят путем сопоставления его сигнала s' с

зафиксировать моменты времени t_1 и t_2 , в которые по магниторазрядному вакуумметру ВМБ1-2-П канал (с преобразователем ЦММ-32-1) регистрируются значения давлений $p_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ Па и $p_2 = 1 \cdot 10^{-1}$ Па соответственно.

8. Вычислить поток газовой выделения Q в камере 13 по формуле

$$Q = (p_2 - p_1)V/(t_2 - t_1),$$

где V — объем камеры 13, равный 36,86 дм³.

9. Рассчитать усредненную в пределах промежутка времени $t = t_2 - t_1$ скорость удельного газовой выделения q по (1.4).

Содержание отчета

1. Схема вакуумной системы экспериментальной установки ВУ-1А. Назначение элементов схемы с необходимыми пояснениями.
2. Краткое описание методики эксперимента и сводка результатов измерений.
3. Расчеты величин A , Q и q .
4. Выводы (сравнение справочных данных и результатов эксперимента).

Контрольные вопросы

1. Какие факторы определяют значение удельной скорости газовой выделения резины?
2. В чем суть кумулятивного метода измерения газового потока?
3. Какие средства откачки содержатся в вакуумной системе экспериментальной установки ВУ-1А?
4. Каков принцип действия терморезисторного и магниторазрядного вакуумметров?
5. В каких единицах измеряются в системе СИ величины A , Q и q ?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 1990.
2. Вакуумная техника: Справ. М.: Машиностроение, 1992.
3. Пилко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979.

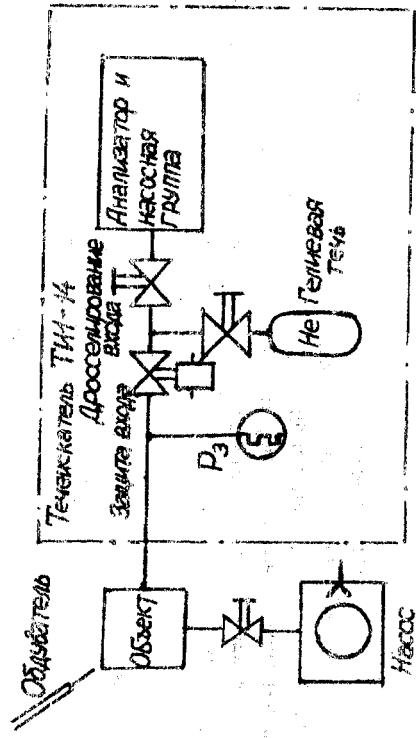


Рис. 2.1

сигналом s , зарегистрированным при градуировке прибора по известному источнику Q (при том же режиме работы):

$$Q' = Q(s - s_0)/(s' - s_0),$$

где s_0 , s'_0 — фоновый сигнал течеискателя, обусловленный рядом побочных явлений.

Обычно исходный поток задается искусственной течью пробного газа, т.е. калиброванной мерой потока гелия. Для выпускаемых отечественной промышленностью гелиевых масс-спектрометрических течеискателей, в том числе типа ТИИ-14, эти функции выполняют диффузионные контрольные течи Гелит 1 и Гелит 2 (см. паспорт ТДМКО.339.022ПС). В них проникаемый (только для гелия!) элемент (рис. 2.2) представляет собой тонкую сферическую

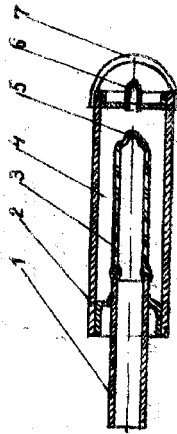


Рис. 2.2

перегородку 5 из кварца, припаянную к стеклянной трубке 3, которая с другой стороны соединена с коваровой трубкой 1. По этой трубке поступающий благодаря диффузии через перегородку 5 гелий, содержащийся в резервуаре 4, направляется в вакуумную систему течеискателя. Кроме этого, проникаемый элемент состоит из корпуса течи 2, трубки 6, которую после подачи гелия пережимают и запаивают, и защитного колпачка 7.

Ввиду различий в наполнении контрольных течей гелием (давление в резервуаре 4 — от $(3-5)10^3$ до $(0.8-1.0)10^5$ Па), а также вследствие некоторых

отклонений в размерах проникаемой перегородки отдельные экземпляры течей Гелит 1 и Гелит 2 воспроизводят потоки Q в диапазоне:

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

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

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

Установлено, что поток диффузионных течей зависит от температуры окружающей среды, и эта зависимость выглядит в общем случае как экспоненциальная функция:

$$Q_T = CTe^{-E/RT},$$

где Q_T — поток течи при температуре T ; C — постоянная, определяемая типом течи; E — энергия активации молекулы пробного газа.

Однако в довольно узком интервале температур, встречающихся в практике испытаний, — от 10 до 35 °С — данную зависимость с достаточной для технических приложений точностью можно линеаризовать в форме

$$Q_t = Q_{20}[1 + L(t - 20.0)], \quad (2.1)$$

где Q_t — поток течи при произвольной температуре t ; Q_{20} — номинальный поток при температуре 20 °С; L — коэффициент, который в пределах погрешности измерений можно считать постоянным (см. далее).

Вакуумные характеристики течеискателя ТИИ-14 определяют посредством градуировки его с помощью указанных искусственных калиброванных течей. К основным вакуумным характеристикам относятся:

$$\text{средняя чувствительность } K = (s - s_0)/Q, \text{ дел}/\text{с}/\text{м}^3 \cdot \text{Па};$$

$$\text{средняя цена деления } C = 1/K, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{дел}/\text{с}.$$

Экспериментальное определение величин K и C составляет основное содержание данной работы.

Методика и порядок проведения эксперимента

Определение основных вакуумных характеристик гелиевого масс-спектрометрического течеискателя производят на специальном стенде. Принципиальная схема его вакуумной системы приведена на рис. 2.3. Здесь 1 — вакуумметр, 2 — камера, 3 — клапан, 4 — механический пластинчатогопорный насос, 5 — калиброванная искусственная течь типа Гелит 1.

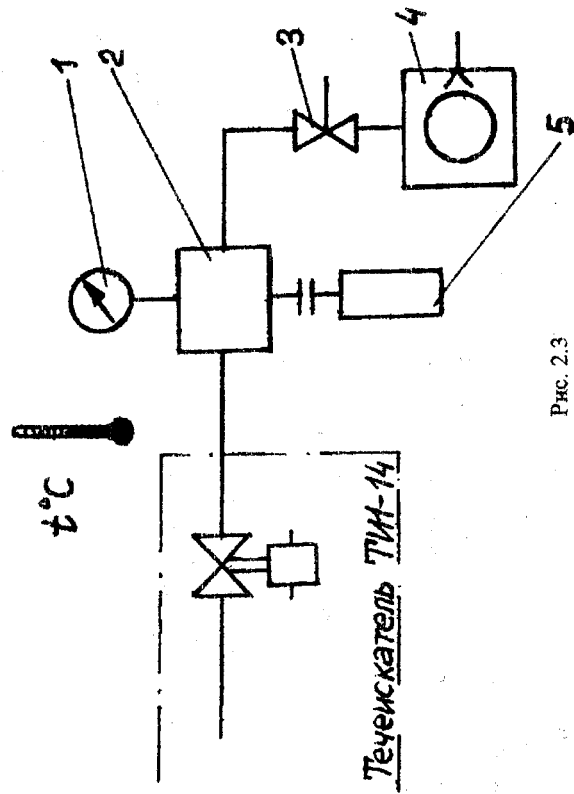


Рис. 2.3

Выполняемые операции:

1. Присоединить калиброванную течь типа Гелит 1 с известным потоком \dot{Q} к камере 2.
2. Включить гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИИ-14 и произвести действия и регулировки, предусмотренные по паспорту 2.832.024ПС, для приведения его в рабочее состояние.
3. Отсчитать фоновый сигнал течеискателя 3.
4. Включить механический пластинчато-роторный насос 4.
5. Открыть клапан (кран) 3.
6. Произвести откачку камеры 2 вместе с присоединительной трубкой искусственной течи 5 до предельного остаточного давления не более ~ 10 Па, фиксируемого по вакуумметру 1.
7. Открыть входной клапан гелиевого масс-спектрометрического течеискателя ТИИ-14 так, чтобы зарегистрировать (после достижения равновесного состояния) по его выходному прибору отчет s , соответствующий потоку \dot{Q} гелия от искусственной течи 5. Зафиксировать температуру окружающей среды t .
8. Закрыть входной клапан гелиевого масс-спектрометрического течеискателя ТИИ-14 и клапан (кран) 3.
9. Выключить гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИИ-14 и механический пластинчато-роторный насос 4.
10. Результаты измерений занести в таблицу.

Номер искусственной течи типа Гелит 1	Показания течеискателя, дел.		Температура t , $^{\circ}\text{C}$	Поток искусственной течи, $\text{м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$
	фоновое, s_0	рабочее, s		

11. Вычислить поток гелия \dot{Q} искусственной течи при температуре измерения t по (2.1), причем для течи типа Гелит 1 $L = 0,03$.

12. Вычислить значения чувствительности течеискателя и цены деления его выходного прибора.

Примечание. Данные о номинальном значении потока гелия (при температуре $20,0^{\circ}\text{C}$) для калиброванной течи приведены на ее корпусе.

Содержание отчета

1. Принципиальная схема вакуумной системы испытательного стенда для определения вакуумных характеристик гелиевого масс-спектрометрического течеискателя ТИИ-14.
2. Краткое описание методики эксперимента и выполняемых операций.
3. Таблица с данными измерений.
4. Сводка результатов вычислений основных вакуумных характеристик гелиевого масс-спектрометрического течеискателя ТИИ-14 – значений чувствительности и цены деления его выходного прибора.

Контрольные вопросы

1. Как проводится испытание на герметичность с помощью течеискателя?
2. В чем состоит способ обдува при проведении испытаний на герметичность?
3. В чем преимущество гелия как пробного газа?
4. Каково устройство искусственной гелиевой течи типа Гелит 1?
5. В чем состоит градуировка гелиевого масс-спектрометрического течеискателя?
6. Как выражается зависимость потока гелия искусственной диффузионной течи от температуры?
7. Как связаны между собой чувствительность гелиевого масс-спектрометрического течеискателя и цена деления его выходного прибора?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ГАЗОВ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Цель работы: ознакомление с устройством высоковакуумной системы экспериментальной установки и с принципами действия ее элементов, изучение механизма теплопередачи газов в преобразователе теплового вакуумметра, экспериментальное определение зависимости его сигнала от давления газа, измерение коэффициента относительной чувствительности прибора к инертному газу (аргону).

Теоретические сведения

Процесс теплопередачи через газ лежит в основе принципа действия обширного класса тепловых (теплоэлектрических) приборов. Наиболее эффективно этот принцип проявляется, когда внутри первичного преобразователя вакуумметра создан и поддерживается градиент температур. Очевидно, что для этого должны использоваться поверхности с разными температурами, между которыми возникает энергетический обмен в форме теплопереноса. Закономерности процесса теплопередачи осуществляются через связь характеристик прибора с давлением разреженного газа.

Разность температур между поверхностями обычно реализуют, нагревая чувствительный элемент, имеющий форму проволоки, ленты, пленки, напыленной на диэлектрическую подложку, и т.д., в то время как другая поверхность — стенок корпуса преобразователя находится при температуре окружающей среды T_k . Площадь нагретой до температуры T поверхности обычно намного меньше площади поверхности стенок, и поэтому температуру находящегося в объеме преобразователя газа идентифицируют с величиной T_k . Теплопередача, существующая при наличии разности температур T и T_k , проявляется в вакуумметрическом преобразователе, прежде всего, в форме теплопроводности газа. Кроме нее в отдельных случаях следует принимать во внимание такие виды теплопереноса, как конвекция, излучение чувствительного элемента и теплопроводность по вводам этого элемента.

Мощность W электрического тока (переменного или постоянного), пропускаемого через нагревательный элемент, такова:

$$W = I^2 R_0 [1 + L(T - T_k)] + U^2 / \{R_0 [1 + L(T - T_k)]\},$$

где I и U — ток и напряжение на вводах элемента соответственно; R_0 — сопротивление элемента при температуре T_k ; L — температурный коэффициент сопротивления материала элемента.

Измерить величины I и U можно с помощью электронизмерительной аппаратуры, а разность температур $(T - T_k)$ или температуру T при известном значении T_k двумя способами: 1) термометром сопротивления, причем в качестве терморезистора используют, как правило, сам чувствительный элемент преобразователя, что реализуется в терморезисторных вакуумметрах, или 2) термпарой, специально устанавливаемой внутри преобразователя вблизи нагревательного элемента или в контакте с ним, что реализуется в терморезисторных вакуумметрах.

Мощность тепловых потерь W' может быть рассчитана, если известен механизм теплоотвода через газ. Этот механизм зависит, в свою очередь, от условий молекулярных взаимодействий в преобразователе, а также в камере, к которой он присоединен. Режимы таких взаимодействий — свободномолекулярный, вязкостный и промежуточный (между первыми двумя) — характеризуются соответствующими диапазонами значений критерия Кнудсена $Kn = b/d_k$ (b — средняя длина свободного пробега молекул в данном объеме, d_k — характеристический размер последнего). В принципе, все режимы воздействуют на рабочую область тепловых вакуумметров. Согласно обобщенной модели конвективно-кондуктивной теплопередачи, в которой наряду с теплопроводностью через газ, имеющей место при любом давлении, учтено при относительно высоких давлениях (выше $10^3 - 10^4$ Па) конвекционное перемещение газовых масс под влиянием силы тяжести. Поток энергии W' в объеме преобразователя теплового вакуумметра таков:

$$W' = Af(T - T_k),$$

где A — конвективно-кондуктивный коэффициент, связанный, в свою очередь, с коэффициентами accommodation, т.е. учитывающий неполноту энергетического обмена в условиях разных режимов молекулярного взаимодействия; F — площадь нагретой поверхности чувствительного элемента.

Если потерями тепла, обусловленными излучением нагреваемого элемента — проволоки, нити и т.д., и теплопроводностью по вводам его можно пренебречь, то можно записать

$$W - W' = I^2 R_0 [1 + L(T - T_k)] = 3,14 Adl(T - T_k), \quad (3.1)$$

где d и l — диаметр и длина проволоки (нити) соответственно.

Сигналом теплового вакуумметра, связанным зависимостью (в общем случае — нелинейной) с давлением P , может быть:

- 1) разность температур $(T - T_k)$ при постоянном токе I или напряжении U (режим постоянного тока);
- 2) ток I или напряжение U при постоянной разности температур $(T - T_k)$ (режим постоянной температуры).

К сожалению, многие параметры в (3.1), прежде всего коэффициент A , заранее неизвестны и могут изменяться с течением времени. Поэтому

воспользоваться ими для расчета давления P не представляется возможным, и общепринятой является градуировка прибора экспериментальным путем.

В традиционной схеме термоманного вакуумметра (рис. 3.1) преобразователь содержит нагревательный элемент 1, через который пропускают ток от источника 4.

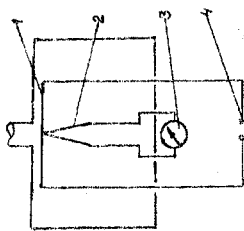


Рис. 3.1

Термо-эле, возникающая при нагреве спая термопары 2 и измеряемая по выходному прибору 3, является функцией температуры спая, или, точнее, разности температур $(T - T_k)$. Значение E , обусловленное теплопроводом рассматриваемых ранее видов, связано с параметрами электрического режима и с давлением газа функцией $E = f(P)$. При постоянном токе I нагревателя э.д.с E представляет собой однозначную характеристику измеряемого давления P . Типовая градуировочная кривая (по воздуху) для преобразователя ПМТ-4М показана на рис. 3.2.

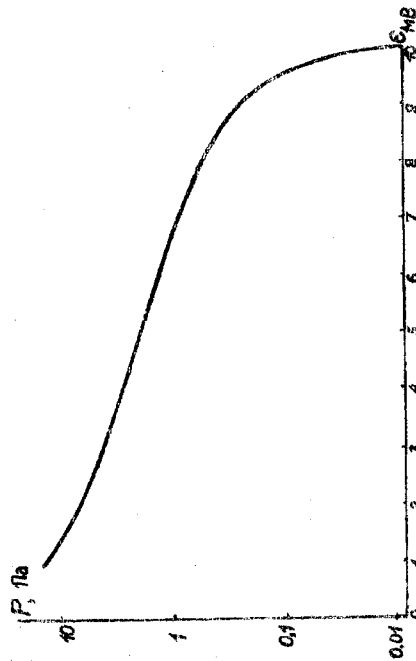


Рис. 3.2

Обычно промышленные вакуумметры градуированы непосредственно по шкале выходного прибора или косвенно — через прилагаемые градуировочные кривые по сухому воздуху или азоту. Если необходимо измерить давления других газов, то нужно учитывать род газа:

$$P_r = P_v q_r, \quad (3.2)$$

где P_v — показание вакуумметра, градуированного по воздуху; P_r — действительное значение давления газа; q_r — коэффициент относительной чувствительности вакуумметра к газу.

Числовые значения q_r индивидуальны для каждого конкретного типа теплового преобразователя и режима его работы. При давлениях выше 100 Па

значения q_r считаются примерно постоянными в пределах погрешностей измерений.

Известна эмпирическая формула для коэффициента q_r :

$$q_r = a_s (g_s + 1) (g_s + 1) (M_s / M_v)^{0.5} / a_v (g_s + 1) (g_s - 1), \quad (3.3)$$

где a_s и a_v — коэффициенты accommodations молекул воздуха и газа соответственно; g_s и g_v — отношения теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме для воздуха и газа соответственно; M_s и M_v — молекулярная масса воздуха и газа соответственно.

Однако неопределенность и неостоянство величин a_s и a_v не дают возможности воспользоваться формулой (3.3) для определения значения q_r . Поэтому самый надежный способ для обеспечения точных измерений низких давлений по разным газам — это прямая градуировка вакуумметра по эти газам, например, путем сличения его с абсолютным (жидкостным, деформационным) вакуумметром. В этом случае для опытного определения коэффициента относительной чувствительности q_r следует использовать соотношение, непосредственно вытекающее из (3.2):

$$q_r = P_r / P_v.$$

При этом производятся измерения давления одних и тех же значений давлений, находящихся в пределах рабочего диапазона теплового вакуумметра, дважды: вначале — по воздуху, затем — по другому исследуемому газу, в качестве которого выбран аргон. Для установления того, что давления в обоих случаях действительно одинаковы, требуются, очевидно, показания которого, в отличие от абсолютного вакуумметра, т.е. вакуумметра, показания которого, в отличие от теплового прибора, не зависят бы от рода газа. В работе применен достаточно чувствительный деформационный (мембранно-емкостный) вакуумметр типа ВД-1 (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации). Его диапазон измерений от 1 до 10^3 Па, и в области давлений от 10 до 100 Па допускаемая относительная погрешность не превышает $\pm (5 - 8) \%$.

В качестве исследуемой модели в работе применен современный термомантный вакуумметр ВТ-8 с полупроводниковым преобразователем (на базе планарной технологии микроэлектроники) типа ПДТ-8 (см. паспорт МПШ.406200.001ПС).

Методика и порядок проведения эксперимента

Сравнительные измерения выполняются на установке ВУ-1А (см. паспорт 1984.00.00.0000ПС). Принципиальная схема вакуумной системы установки показана на рис. 3.3. Здесь 1 – механический пластинчато-роторный насос типа

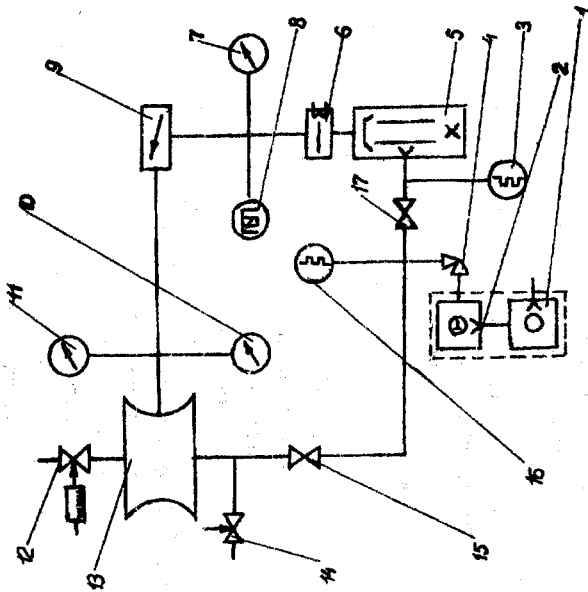


Рис. 3.3

2НВР-5ДМ, 2 – двухроторный вакуумнасос, 3, 16 – преобразователи ПМТ-6-3 терморезисторного вакуумметра типа ВТ1-4 (см. паспорт 8790-4106.00.0000ПС), 4 – аварийный клапан, 5 – диффузионный паромасляный насос типа НВД-400, 6 – охлаждаемая ловушка, 7 – преобразователь вакуумметра, 8 – преобразователь ПММ-32-1 магниторазрядного вакуумметра типа ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.0000ПС), 9 – высоковакуумный затвор, 10 – преобразователь ПДТ-8 термомпарного вакуумметра ВТ-8, 11 – преобразователь деформационного вакуумметра типа ВД-1, 12 – нагреватель, 13 – вакуумная камера, 14 – регулируемый нагреватель, 15, 17 – клапан.

Пластинчато-роторный насос 1 и двухроторный насос 2 объединены в вакуумный агрегат АВР-50. Все клапаны, кроме аварийного, имеют пневматическое управление.

Выполняемые операции:

1. Включить механический пластинчато-роторный насос 1 (при открытых клапанах 15 и 17) и после достижения остаточного давления $\sim 10^3$ Па,

фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4 – III канал (с преобразователем 16 типа ПМТ-6-3), включить двухроторный насос 2.

2. Включить абсолютный деформационный вакуумметр ВД-1 и исследуемый термомпарный вакуумметр ВТ-8 (с преобразователем II типа ПДТ-8).

3. После достижения остаточного давления $\sim (5-10)$ Па, фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4–II и III каналы (с преобразователями 3 и 16 типа ПМТ-6-3), открыть нагреватель 12 и установить в камере 13 примерное давление воздуха ~ 50 Па.

4. Измерить давления: P_1^* – по вакуумметру ВД-1 и $P_{в1}$ – по вакуумметру ВТ-8.

5. Регулируя с помощью нагревателя 12 давление воздуха в камере 13, измерить значения P_1^* и $P_{в1}$ в процессе их роста (приблизительно пять – шесть экспериментальных точек) вплоть до примерного давления ~ 100 Па.

6. Закрыть нагреватель 12 и вновь откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim (5-10)$ Па.

7. Присоединить к вакуумной системе баллон с инертным газом – аргоном.

8. Открыть нагреватель 12 и установить в камере 13 давление воздуха ~ 50 Па.

9. Измерить давления: P_1^* по вакуумметру ВД-1 и $P_{в1}$ – по вакуумметру ВТ-3.

10. Регулируя с помощью нагревателя 12 давление в камере 13, измерить значения P_1^* и $P_{в1}$ в процессе их роста – те же экспериментальные точки, какие были зафиксированы в п. 5, строго контролируя при этом равенство значений P_1^* с теми, которые были ранее (см. п. 5).

11. Закрыть нагреватель 12 и вновь откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim (5-10)$ Па.

12. Выключить вакуумметры ВД-1 и ВТ-8.

13. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давлений Па		Коэффициент относительной чувствительности
	по ВД-1 P_1^*	по ВТ-8 $P_{в1}$	
		$P_{в1}$	$P_{в1}$

14. Вычислить значения относительной чувствительности термомпарного вакуумметра ВТ-8 по аргону для каждой экспериментальной точки:

$$q_{А1} = P_{в1}/P_1^*$$

15. Вычислить среднее значение относительной чувствительности:

$$q_{\text{АФ}} = (q_{\text{А1}} + q_{\text{А2}} + \dots + q_{\text{Аn}}) / n.$$

Содержание отчета

1. Схема вакуумной системы экспериментальной установки ВУ-1А. Назначение элементов схемы с необходимыми пояснениями.
2. Краткое описание методики эксперимента и сводка результатов измерений.
3. Расчеты величин $q_{\text{А1}}$ и $q_{\text{АФ}}$.
4. Выводы (сравнение результатов эксперимента со справочными данными).

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия тепловых вакуумметров?
2. В чем отличие термометрических вакуумметров от терморезисторных?
3. Что представляет собой коэффициент относительной чувствительности вакуумметра к газу и какие факторы влияют на его значение?
4. Что означает термин «абсолютный вакуумметр»?
5. Чем можно объяснить отклонение полученных в работе значений от справочных данных?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Работа 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Цель работы: ознакомление с устройством вакуумной системы экспериментальной установки и с принципами действия ее элементов, изучение механизма изотермического расширения газа, экспериментальное подтверждение газовых законов при низких давлениях.

Теоретические сведения

Уравнение состояния реального газа, содержащее его основные параметры – давление P , объем V и температуру T , таково:

$$P = f(V, T). \quad (4.1)$$

С учетом (4.1) можно предсказывать и рассчитывать закономерности различных технических процессов, обусловленных изменениями указанных параметров. Проведение соответствующих исследований вызывает теоретический и практический интерес. Приближенное решение этой задачи было предложено Ван-дер-Ваальсом:

$$(P + a/V^2)(V - b) = MRT/m, \quad (4.2)$$

где M и m – масса и молекулярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; a и b – поправки, с помощью которых учитываются межмолекулярные силы отталкивания и притяжения соответственно.

Принято считать, что при низких давлениях газа, например ниже 10^5 Па, поправки a и b пренебрежимо малы, и (4.2) приобретает вид, практически совпадающий с уравнением Менделеева-Клапейрона для идеального газа:

$$PV = MRT/m. \quad (4.3)$$

При $T = \text{const}$ уравнение (4.3) сводится к известному закону Бойля–Мариотта для данной массы газа. Очевидно, что температура T должна быть выше критической температуры.

На рис. 4.1 показана зависимость $PV/RT = f(P)$ при $T = \text{const} \sim 300$ К для азота и водорода. Как видно из графика, вплоть до давлений $\sim 10^6$ Па произведение PV остается практически неизменным (с точностью до 1 %).

Экспериментальное подтверждение справедливости (4.4) при давлениях ниже 10^5 Па в пределах точности, обеспечиваемой применяемой измерительной аппаратурой, может быть осуществлено путем наблюдения процесса изотермического расширения некоторого количества перманентного газа из сосуда малого объема v в другой сосуд, большого объема V . При этом начальное (в сосуде объема v) и конечное (в сосуде объема V) давления P_1 и P_2 измеряют по вакуумметрам, специально присоединенным к указанным сосудам. Тогда, при справедливости (4.4), должно, очевидно, соблюдаться соотношение

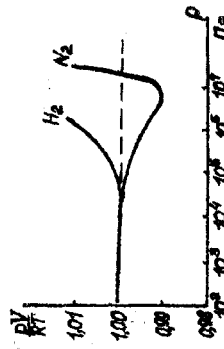


Рис. 4.1

$$P_1 \nu / P_2 \nu = 1,00. \quad (4.5)$$

Возможные отклонения от соблюдения (4.5) при экспериментальных исследованиях могут быть обусловлены помимо погрешностей в определении значений объемов ν и V и в измерении давлений P_1 и P_2 влиянием побочных процессов нагревания газа в течение цикла измерений внутри исследуемой аппаратуры, явлений взаимодействия газа с поверхностями сосудов, воздействием конечной проводимости коммуникаций на скорость установления равновесного состояния газа и т.д.

В работе известный первоначальный объем ν представлен в форме стеклянного резервуара с краном, посредством которого он соединяется с измерительной камерой объема V вакуумной установки ВУ-1А (см. паспорт 1984.00.00.0000ПС). Для выполнения измерений давлений P_1 и P_2 служат вакуумметры ВО и ВД-1.

Абсолютное давление рассчитывают по пружинному вакуумметру ВО (см. паспорт 3.9060.209ПС) исходя из показания l прибора (в делениях), общего числа делений $N = 100$, предела измерений вакуумметра $P_{\max} = 10^5$ Па, а также значения атмосферного давления P_A в месте и в момент измерения:

$$P_1 = P_A - l P_{\max} / N. \quad (4.6)$$

Измерения давлений P_2 в работе производят по деформационному вакуумметру типа ВД-1 (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации). Его диапазон измерений — от 1 до 10^3 Па, в области давлений от 100 до 1000 Па допустимая относительная погрешность не превышает $\pm 5\%$.

Методика и порядок проведения эксперимента

Экспериментальные исследования выполняются на установке ВУ-1А. Принципиальная схема вакуумной системы установки показана на рис. 4.2.

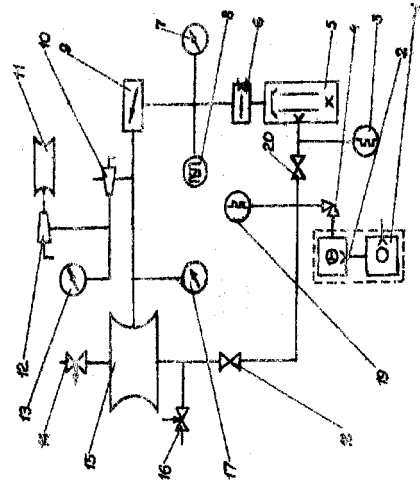


Рис. 4.2

Здесь 1 — механический пластинчато-роторный насос типа 2НВР-5ДМ, 2 — двухроторный вакуумнасос, 3, 19 — преобразователи ПМТ-6-3 терморезисторного вакуумметра типа ВТ1-4 (см. паспорт 8790-4106.00.0000ПС), 4 — аварийный клапан, 5 — диффузионный паромасляный насос типа НВД-400, 6 — охлаждаемая ловушка, 7 — преобразователь вакуумметра, 8 — преобразователь ПММ-32-1 магниторазрядного вакуумметра типа ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.0000ПС), 9 — высоковакуумный затвор, 10 — стеклянный двухходовой кран, 11 — исходный резервуар известного объема $\nu = 837,8$ см³ (837,8 мл), 12 — стеклянный одноходовой кран, 13 — пружинный вакуумметр типа ВО, 14, 16 — регулируемые нагреватели, 15 — измерительная камера известного объема $V = 343,9$ дм³, 17 — преобразователь деформационного вакуумметра типа ВД-1, 18, 20 — клапаны.

Пластинчато-роторный насос 1 и двухроторный насос 2 объединены в вакуумный агрегат АВР-50. Все клапаны, кроме аварийного, имеют пневматическое управление.

Выполняемые операции:

1. Включить механический пластинчато-роторный насос 1 и открыть клапан 18 (при закрытых затворе 9 и клапане 20).
2. Включить деформационный вакуумметр ВД-1, а также терморезисторный вакуумметр ВТ1-4.
3. Открыть краны 12 и 10 на камеру.
4. Откачать резервуар 11 объема ν и измерительную камеру 15 общего объема V до остаточного давления $\sim 10^3$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВД-1 с преобразователем 17, а также по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4 — III канал с преобразователем 19 типа ПМТ-6-3.
5. Закрыть клапан 18. Открыть нагреватель 16 и установить с его помощью, а также посредством циклических поворотов крана 10 (с атмосферного воздуха на камеру) давление воздуха $\sim 10^4$ Па, фиксируемое по вакуумметру типа ВО. Закрыть нагреватель 16.
6. Измерить l по вакуумметру ВО и рассчитать точное значение давления P_1 в резервуаре 11 по (4.6).
7. Закрыть кран 12 (при этом кран 10 открыт на камеру). Открыть клапан 18.
8. Повторить операцию 4. Включить двухроторный насос 2.
9. Откачать измерительную камеру 15 до остаточного давления $\sim (1,3-1,5)$ Па, фиксируемого по вакуумметрам, указанным в п. 4.
10. Закрыть клапан 18 и открыть клапан 12.
11. После установления равновесия измерить давление P_2 по вакуумметру ВД-1 с преобразователем 17.

КАЛИБРОВКА МАГНИТОРАЗЯДНОГО ВАКУУММЕТРА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Цель работы: ознакомление с устройством высоковакуумной системы экспериментальной установки, изучение принципа действия и особенностей магниторазрядных и ионизационных вакуумметров в условиях высокого вакуума, исследование механизма преобразования абсолютного давления в сигнал (разрядный ток) в инверсно-магнетронном вакуумметре.

Теоретические сведения

Магниторазрядные (магнитные электроразрядные) вакуумметры представляют собой приборы для измерений низких давлений газа, в которых для регистрации молекул остаточной газовой среды используется сочетание электрического и магнитного полей. Исходя из взаимной ориентации их в соответствующих преобразователях, а также из параметров электрического режима вакуумметры (рис. 5.1) подразделяют на приборы с рамочным

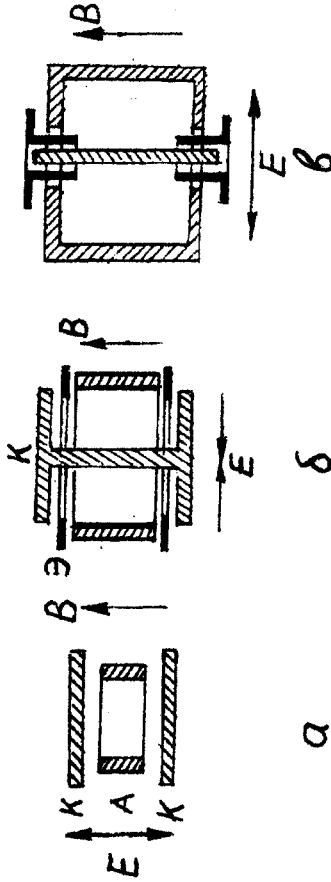


Рис. 5.1

(кольцевым) или цилиндрическим анодом – ячейка Пеннинга (рис. 5.1, а), пригодные для измерения давлений от 10^{-5} – 10^{-4} до 10 – 50 Па, и более современные вакуумметры с магнетронным или инверсно-магнетронным преобразователем (рис. 5.1, б, в), предназначенные для измерения давлений от 10^{-11} – 10^{-10} до 1 – 10 Па (на рис. 5.1 E и B – векторы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля соответственно, A и K – анод и катод соответственно).

12. Повторить экспериментальный цикл, т.е. операции 5 – 11, для значений давлений $P_1'' = 8 \cdot 10^4$ Па и $P_1''' = 9 \cdot 10^4$ Па и соответствующих значений давлений P_2'' и P_2''' . Повторить операцию 4.

13. Выключить деформационный вакуумметр ВД-1 и терморезисторный вакуумметр ВТ1-4.

14. Закрыть клапан 18, краны 10 и 12 и выключить вакуумнасосы 1 и 2.

15. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давлений, Па		Отношение $P_1^{(i)}/P_2^{(i)}$
	по ВО ($P_1^{(i)}$)	по ВД-1 ($P_2^{(i)}$)	

16. Вычислить значения отношений $P_1^{(i)}/P_2^{(i)}$ для каждого из экспериментальных циклов.

17. Вычислить среднее значение отношений $P_1^{(i)}/P_2^{(i)}$:

$$(P_1/P_2)_{cp} = [(P_1/P_2) + (P_1/P_2) + \dots + (P_1/P_2)]/n,$$

где $n = 3$.

Примечание. 1 мм рт. ст. = 133,3 Па.

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной вакуумной системы на базе установки ВУ-1А. Назначение элементов схемы с необходимыми пояснениями.
2. Краткое описание методики эксперимента и сводка результатов измерений.
3. Расчеты значений $P_1^{(i)}/P_2^{(i)}$ и $(P_1/P_2)_{cp}$.
4. Выводы (сравнение результатов эксперимента с данными теории).

Контрольные вопросы

1. Каковы основные свойства идеального газа?
2. При каких давлениях перманентного газа поправки Ван-дер-Ваальса можно считать пренебрежимо малыми?
3. Какой из газовых законов является объектом исследований в работе?
4. Каков принцип действия деформационного, в том числе пружинного, вакуумметра?
5. Чем можно объяснить отклонение полученных в работе значений от данных теории?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

В работе исследуемым средством измерений является инверсно-магнетронный двухканальный вакуумметр типа ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.00.0000ПС). В его первичном преобразователе ПММ-32-1 (рис. 5.2)

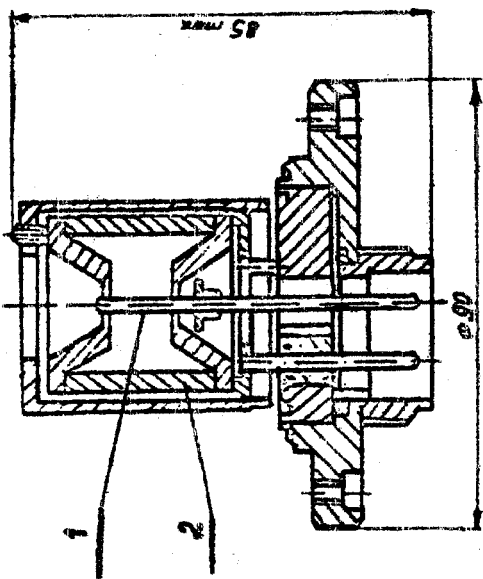


Рис. 5.2

содержится система из двух основных электродов – стержневой осевой анод 1 и наружный коробчатый катод 2.

Особенность конструкции преобразователя заключается, прежде всего, в том, что роль катода играет полый цилиндрический магнит с полусными наконечниками. Индукция магнитного поля в зазоре наконечников $B = 0,11$ Тл. На стержневой анод 3 (рис. 5.3) подается от измерительного блока 6

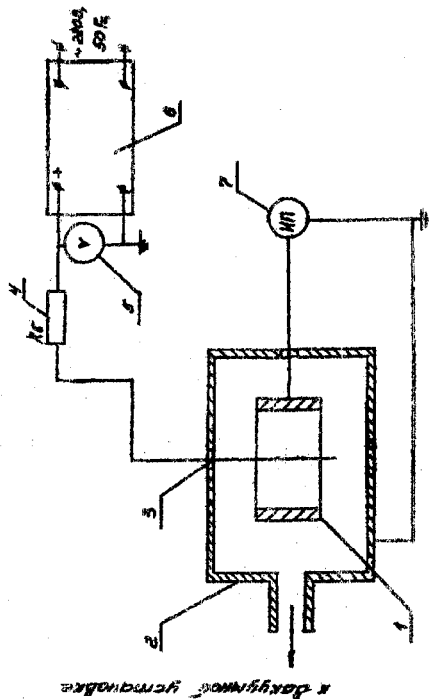


Рис. 5.3

вакуумметра напряжение $U_A = 2,5$ кВ, устанавливаемое по вольтметру 5, через балластный резистор 4 ($R_B = 1,1$ МОм). Разрядный ток в диапазоне $10^{-9} - 10^{-3}$ А измеряется по прибору 7 в цепи катода 1. Корпус преобразователя 2 открытый, т.е. вся электродная структура при соединении с ответным фланцем вакуумной камеры фактически полностью входит в объем камеры. Выходной прибор вакуумметра проградуирован в единицах давления – паскалях.

Появившиеся в межэлектродном пространстве электроны под действием электрического и магнитного полей, векторы напряженности которых взаимно перпендикулярны (см. рис. 5.1), совершают движения, траектории которых представляют собой кривые, близкие к гипоциклоидам. В результате соударений электронов с молекулами остаточного газа возникают положительные ионы, направляющиеся на катод и выбивающие с его поверхности вторичные электроны. В то же время электроны, которые появляются при ионизации молекул, участвуют в процессе дальнейшей ионизации (образовании разрядной лавины) и после соударений с молекулами переходят на орбиты, приближающиеся к аноду. Путь, пройденный каждым электроном перед тем, как попасть на анод, под воздействием магнитного поля становится намного больше расстояния между электродами. Разрядный ток I_p , измеренный в цепи катода, представляет собой сумму ионного тока на катод и тока электронов на анод. Этот ток является мерой давления газа P , но зависит от него нелинейно. Когда сопротивление разрядного промежутка намного больше номинала балластного резистора, эта зависимость может быть выражена с помощью упрощенной эмпирической формулы

$$I_p = K_M P^i,$$

где K_M и i – постоянные (для определенного диапазона давлений), зависящие от конструкции и режима работы вакуумметра и определяемые экспериментально – при калибровке прибора.

На практике зависимость $I_p = f(P)$ ранее изображали графически – в виде кривой, прилагавшей к вакуумметру (например, типа ВМБ-8). В вакуумметре ВМБ1-2 указанная зависимость заложена в шкале выходного прибора, охватывающей давления от 10^{-6} до 1 Па.

Решение задачи калибровки высоковакуумных средств измерений низких давлений газа, к числу которых относится и вакуумметр ВМБ1-2, осложняется тем, что при давлениях ниже $0,1-1$ Па эталонные абсолютные вакуумметры отсутствуют. Поэтому в области высокого и сверхвысокого вакуума в качестве вторичных эталонных средств измерений в Российской Федерации и за рубежом используют прецизионные электронные ионизационные вакуумметры.

Электронные ионизационные вакуумметры – приборы, действие которых основано на регистрации числа молекул остаточного газа, ионизированных в объеме преобразователя с помощью термоэлектронной эмиссии. Первичный преобразователь вакуумметра (рис. 5.4) содержит источник электронов –

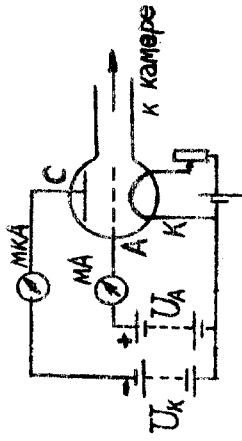


Рис 5.4

рованных катодом электронов, которые устремляются к аноду, по пути сталкиваются с молекулами остаточного газа, имеющимися в объеме преобразователя, 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 число ионов, созданных при низких давлениях фиксированным пучком электронов, пропорционально молекулярной концентрации газа N . Давление газа P и концентрация N связаны, в свою очередь, 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 постоянной температуре). Для этого необходимо поддерживать неизменной интенсивность ионизирующего фактора, характеризуемую электронным током эмиссии I_e , измеряемым в цепи анода (обычно $I_e = 0,5 - 5$ мА). Практически это достигается стабилизацией тока эмиссии, например, регулированием мощности накала катода. Ввиду сложности взаимосвязи между эффективностью образования и сбора ионов и распределением энергий и траекторий электронов вид связи между коллекторным током I и давлением таков: $I = f(P)$. Хотя она обычно и имеет линейный характер, достаточно точно определяется только экспериментально — путем градуировки вакуумметра по эталонному средству измерений низких давлений.

Уравнение измерения ионизационного вакуумметра таково:

$$I = SP - I_e KP = P/C,$$

где S — абсолютная чувствительность; K — приведенная (удельная) чувствительность и C — постоянная вакуумметра.

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

Отечественный комбинированный вакуумметр ВИТ-2 (см. паспорт 3.399.074ПС) состоит (в данном случае) из первичного преобразователя

(открытой конструкции) типа ЛМ-3-2, присоединяемого непосредственно к вакуумной системе, измерительного блока, в котором имеется термомпарная часть, не используемая в работе, и ионизационная часть, снабженная выходным электроизмерительным прибором. Этот прибор имеет ряд диапазонов, характеризующихся следующими значениями верхнего предела измерений:

Множитель шкалы	Верхний предел измерений, А
I (1)	10^{-4}
II (10^{-1})	10^{-5}
III (10^{-2})	10^{-6}
IV (10^{-3})	10^{-7}
V (10^{-4})	10^{-8}

Конструктивные и методические меры, принятые для повышения стабильности метрологических характеристик вакуумметра ВИТ-2 и улучшения точности их контроля, позволяют применять его в качестве вторичного эталонного средства измерений низких давлений. В работе калибровка магнитоэлектрического вакуумметра ВМБ1-2 (по одному из каналов) производится путем сличения его (по воздуху) с ионизационной частью вакуумметра ВИТ-2. Номинальное значение его абсолютной чувствительности $S = 7,5 \cdot 10^{-5}$ А/Па при следующем электрическом режиме:

стабилизированный ток эмиссии электронов — 0,5 мА;

напряжение анод — корпус — 250 В;

напряжение катод — корпус — 50 В.

Методика и порядок проведения эксперимента

Исследования выполняются на установке ВУ-1А. Принципиальная схема высоковакуумной системы установки показана на рис. 5.5. Здесь 1 — механический пластинчато-роторный насос типа 2НВР-5ДМ, 2 — двухроторный вакуумнасос, 3, 1, 6 — преобразователи ПМТ-6-3 терморезисторного вакуумметра типа ВП1-4 (см. паспорт 8790-4106.00.000ПС), 4 — аварийный клапан, 5 — диффузионный паромасляный насос типа НВД-400, 6 — охлаждаемая ловушка, 7 — преобразователь ЛМ-3-2 комбинированного вакуумметра ВИТ-2 (см. паспорт 3.399.074ПС), 8, 10 — преобразователь ПММ-32-1 магнитоэлектрического вакуумметра ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.00.000ПС), 9 — высоковакуумный затвор, 11 — преобразователь деформационного вакуумметра ВД-1, 12, 14 — регулирующие нагнетатели, 15, 17 — клапаны.

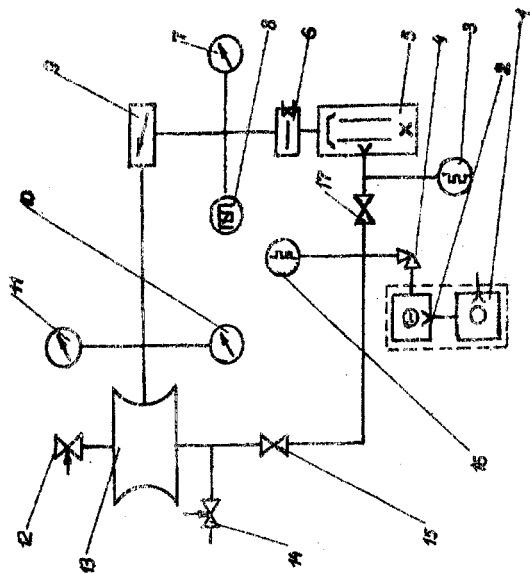


Рис. 5.5

Пластинчато-роторный насос 1 и двухроторный насос 2 объединены в вакуумный агрегат АВР-50. Все клапаны, кроме аварийного, имеют пневматическое управление.

Выполняемые операции:

1. Включить вакуумный агрегат 1-2 и открыть клапан 15 (при закрытых клапане 17 и затворе 9).
2. Включить терморезисторный вакуумметр ВТ1-4 и магнитоизрядный вакуумметр ВМБ1-2.
3. Откачать камеру 13 до остаточного давления ~ 1 Па, фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4, а также по деформационному вакуумметру ВД-1.
4. Закрыть клапан 15, открыть клапан 17 и откачать паромасляный насос 5 типа НВД-400 и охлаждаемую ловушку 6 до остаточного давления ~ 1 Па, фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4.
5. Включить паромасляный насос 5 типа НВД-400 и после откачки до остаточного давления $\sim 0,1$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВМБ1-2 (преобразователь ПММ-32-1), открыть затвор 9.
6. Откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim 10^{-2}$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВМБ1-2 (преобразователи 8 и 10 типа ПММ-32-1).
7. Включить вакуумметр ВИТ-2 и произвести технологические и регулировочные операции в соответствии с указаниями, приведенными в паспорте 3.399.074ПС.

8. Откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВИТ-2.

9. Открыть нагреватель 14 и установить примерное давление $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ Па.

10. Произвести одновременные отсчеты значений давления P — по вакуумметру ВМБ1-2 и давления P^* — по вакуумметру ВИТ-2.

11. Осуществляя регулирование давления с помощью нагревателя 14, измерить значения P и P^* в процессе их роста (приблизительно пять — шесть экспериментальных точек) вплоть до примерного давления $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ Па. Рекомендуются, чтобы значения давления P совпадали с оцифрованными отметками шкалы вакуумметра ВМБ1-2 или были близки к ним.

12. Закрыть нагреватель 14 и вновь откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВМБ1-2.

13. Включить вакуумметры, закрыть затвор 9 и выключить паромасляный насос 5.

14. После охлаждения насоса 5 закрыть клапан 17 и выключить вакуумный агрегат 1 2.

15. Результаты всех измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давлений, Па		Относительное отклонение
	по ВМБ1-2 (P)	по ВИТ-2 (P^*)	

16. Вычислить индивидуальные значения относительного отклонения $b = [(P - P^*) / P^*] \cdot 100\%$ для каждой экспериментальной точки.

Содержание отчета

1. Схема вакуумной системы экспериментальной установки ВУ-1А. Назначение элементов схемы с необходимыми пояснениями.
2. Блок-схема вакуумметра ВМБ1-2 с расшифровкой позиций.
3. Краткое описание методики эксперимента и сводка результатов измерений.
4. Расчеты значений относительного отклонения b .
5. Выводы — сравнение значений b с пределом основной допускаемой погрешности прибора (от -45 до $+80\%$).

Контрольные вопросы

1. В чем сходство и в чем различие принципов действия магнитоизрядных и электронных ионизационных вакуумметров?
2. Какова роль магнитного поля в магнитоизрядных вакуумметрах?

3. В чем различие магниторазрядных вакуумметров с рамочным (кольцевым) или цилиндрическим анодом от магнетронных и инверсно-магнетронных вакуумметров?

4. Каковы функции основных электродов в преобразователе электронного ионизационного вакуумметра?

5. В чем принципиальное отличие разрядного тока в магниторазрядных вакуумметрах от коллекторного тока в ионизационных вакуумметрах?

6. Какова связь между абсолютной и приведенной (удельной) чувствительностью в ионизационных вакуумметрах?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. М.: Выш. шк., 1990.
2. Кузьмин Б. В. Вакуумные измерения. М.: Изд.-во стандартов, 1992.

Работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ОТКАЧИВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВАКУУМНОГО НАСОСА

Цель работы: ознакомление с устройством высоковакуумной системы испытательного стенда и с принципами действия ее элементов, изучение механизма откачивающего действия диффузионного паромасляного насоса, метода и аппаратуры для определения быстроты действия вакуумного насоса, экспериментальное определение характеристик паромасляного насоса.

Теоретические сведения

Большую и очень важную часть средств откачки воздуха и других газов составляют струйные насосы, в которых молекулы воздуха (газа) получают дополнительную составляющую скорости (к тепловой скорости хаотического движения) от струи жидкого рабочего тела (ртути, вакуумного масла), вследствие чего возникает течение газа к выходу насоса. Откачиваемый газ диффундирует в струю паров жидкости, которая переносит его в область предварительного разрежения у выхода насоса (порядка 10 – 100 Па). Чтобы этот процесс происходил достаточно интенсивно, скорость и плотность паров в струе должны быть довольно большими по сравнению со скоростью и плотностью откачиваемого газа. Увлекая газ к стенкам насоса, струя

пара сжимает газ до выпускного давления, а газ прорывается вдоль стенки в узком пристеночном слое к выпускному патрубку насоса.

Современный диффузионный насос (рис. 6.1) содержит, прежде всего, кипятильник 5, основную часть которого составляет электронагреватель, паропровод 2 с соплами, корпус 3, охлаждаемый проточной водой. В верхней части насоса располагается маслоотражатель 1, предотвращающий в некоторой степени попадание паров масла в полость откачиваемого объекта. В большинстве пароструйных насосов у выхода ставят эжекторное сопло 6. Конфузор 7 этой последней ступени откачки служит одновременно патрубком, соединяющим корпус насоса с выпускным фланцем 8. Кроме того, присутствуют теплозащитный кожух 4 и входной фланец 9.

Рис. 6.1

К основным характеристикам диффузионных насосов относятся: предельное остаточное давление P_m , быстрота действия S и производительность насоса Q , равная произведению быстроты действия S на давление P у входа в насос. Быстрота откачивающего действия S выражается с помощью уравнения

$$S = A \frac{1 - P_0 \sqrt{\frac{T_r}{T}}}{P} \sqrt{\frac{RT}{2 \cdot 3 \cdot 14 m}} \quad (6.1)$$

где T и T_r – температура газа в паровой струе и у входа в насос; m – молекулярная масса газа; A – проекция поверхности паровой струи на горизонтальную плоскость; R – универсальная газовая постоянная.

Таким образом, быстрота действия диффузионного насоса зависит от температуры и рода газа. Реальная быстрота действия оказывается меньше теоретического значения, рассчитанного по уравнению (6.1), из-за неполного захвата молекул откачиваемого газа паровой струей.

Быстрота действия диффузионных насосов обычно изображается графически – в виде кривой $S = f(P)$ (рис. 6.2). В основной части диапазона давлений P быстрота действия S насоса остается постоянной, не зависящей от давления P . Быстрота действия S уменьшается в области низких давлений и в области высоких давлений. Уменьшение быстроты действия при низких давлениях обусловлено тем, что в этой области более оптимой становится противодиффузия газа через паровую струю. Кроме того, существенную роль

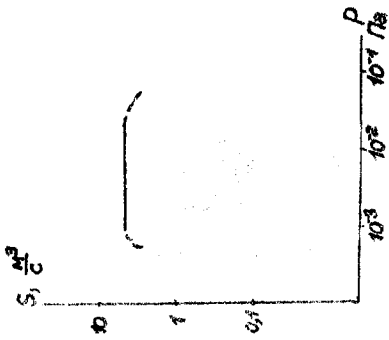


Рис. 6.2

играют газы, выносимые с паровой струей из испарителя насоса, а также процессы газовой конденсации стенок насоса. При конденсации паровой струи на стенках насоса некоторое количество газа, сжатого его до повышенного давления, особенно в пространных, предварительного разрежения, растворяется в конденсате и попадает вместе с ним в испаритель насоса, что в значительной степени определяет предельное давление насоса и снижает эффективную быстроту его действия. При высоких давлениях уменьшение быстроты действия S обусловлено возрастанием выпускного давления и нарушением механизма функционирования паровой струи.

Производительность откачки определяется разностью прямого и обратного потоков газа. Прямой поток молекул откачиваемого газа в диффузионном насосе реализуется благодаря соударениям молекул газа и пара и их совместному движению с паровой струей, а обратный поток возникает за счет теплового движения молекул, диффундирующих в противоположном направлении.

Быстрота откачивающего действия S при данном давлении P определяется как объем газа, поступающего в работающий насос и удаляемый им в единицу времени (при этом давлении). Для измерения быстроты действия можно воспользоваться уравнением

$$S = Q/P,$$

где Q — поток газа, поступающего в вакуумную систему.

В работе производится экспериментальное определение быстроты действия диффузионного паромасляного насоса типа НВД-400 в комплексе с установленной на входе насоса ловушкой (без заливки хладагента). Для измерения давлений P применен магнитоэлектрический вакуумметр ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.0000ПС).

Измерение вводимого в вакуумную систему испытательного стока воздуха производится с помощью специального устройства — калиброванного регулятора-нагревателя (производства фирмы "Carl Zeiss, Jena"). Микрометрическая шкала нагревателя, проградуированная (в делениях n), связана с потоком Q зависимостью, выраженной в виде графика $Q = f(n)$, показанного на рис. 6.3. Таким образом, нагреватель выполняет здесь две функции: и как устройство, воспроизводящее поток в некотором диапазоне, и как средство измерения этого потока. Потоки воздуха Q ,

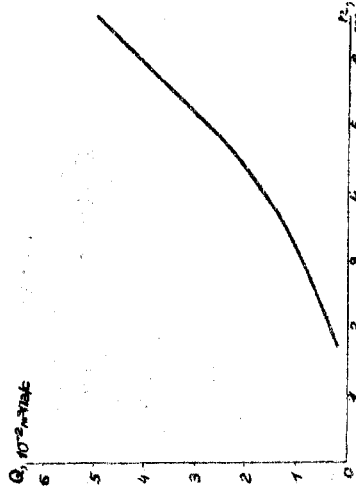


Рис. 6.3

воспроизводимые и измеряемые с помощью нагревателя, лежат в такой области, которой соответствуют, с одной стороны, рабочий диапазон вакуумметра ВМБ1-2, а с другой стороны, реальные возможности испытываемого диффузионного насоса НВД-400.

Методика и порядок проведения эксперимента

Экспериментальные измерения выполняются на установке ВУ-1А (см. паспорт 1984.00.00.0000ПС). Принципиальная схема вакуумной системы установки показана на рис. 6.4. Здесь 1 — механический пластинчатый-роторный

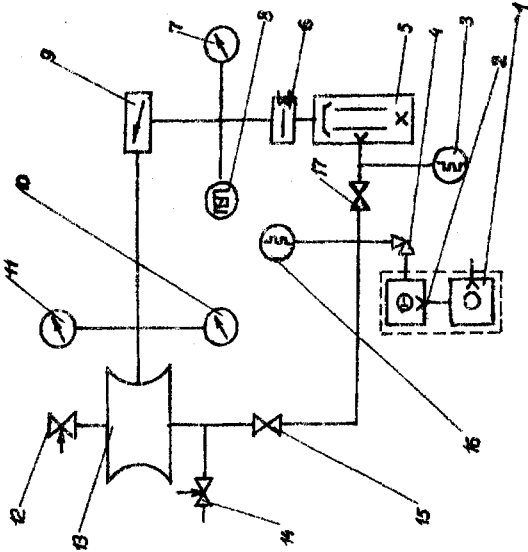


Рис. 6.4

насос типа 2НВР-5ДМ, 2 – двухроторный насос, 3,16 – преобразователь ПМТ-6-3 терморезисторного вакуумметра типа ВТ1-4 (см. паспорт 8790-4106.00.0000ПС), 4 – аварийный клапан, 5 – испытуемый диффузионный паромасляный насос типа НВД-400, 6 – ловушка, 7 – преобразователь вакуумметра, 8,10 – преобразователи ПММ-32-1 магниторазрядного вакуумметра типа ВМБ1-2 (см. паспорт 8790-4107.00.00.0000ПС), 9 – высоковакуумный затвор, 11 – преобразователь ПМИ-2 ионизационно-термопарного вакуумметра типа ВИТ-2 (см. паспорт 3.399.074ПС), 12 – регулируемый натекагель-потокомер, 13 – камера, 14 – регулируемый натекагель, 15,17 – клапаны.

Пластичнато-роторный насос 1 и двухроторный насос 2 объединены в вакуумный агрегат АВР-50. Все клапаны, кроме аварийного, имеют пневматическое управление.

Выполняемые операции:

1. Включить вакуумный агрегат 1-2 и открыть клапан 15 (при закрытых клапанах 17 и затворе 9).
2. Включить терморезисторный вакуумметр ВТ1-4 и магниторазрядный вакуумметр ВМБ1-2.
3. Откачать камеру 13 до остаточного давления ~ 1 Па, фиксируемого по вакуумметру ВТ1-4.
4. Закрыть клапан 15, открыть клапан 17 и откачать паромасляный насос 5 типа НВД-400 и ловушку 6 до остаточного давления ~ 1 Па, фиксируемого по терморезисторному вакуумметру ВТ1-4.
5. Включить диффузионный паромасляный насос 5 типа НВД-400 и после откачки до остаточного давления $\sim 0,1$ Па, фиксируемого по магниторазрядному вакуумметру ВМБ1-2 (преобразователь ПММ-32-1), открыть затвор 9.
6. Откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВМБ1-2 (преобразователи 8 и 10 типа ПММ-32-1).
7. Открыть регулируемый натекагель-потокомер 12 и установить $n \sim (1,5-2)$ деления его микрометрической шкалы.

8. После установления равновесного давления P отсчитать показание вакуумметра ВМБ1-2 и определить по графику (см. рис. 6.3) соответствующее значение потока воздуха Q .

9. Осуществляя регулирование потока Q с помощью натекагель-потокомера 12, измерить значения n и P в процессе их роста (приблизительно шесть – восемь точек) вплоть до давления $\sim 1 \cdot 10^{-1}$ Па. Рекомендуются, чтобы значения давления P совпадали с оцифрованными отметками шкалы вакуумметра ВМБ1-2 или были близки к ним.

10. Закрыть натекагель-потокомер 12 и вновь откачать камеру 13 до остаточного давления $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ Па, фиксируемого по вакуумметру ВМБ1-2.

11. Выключить вакуумметры, закрыть затвор 9 и выключить диффузионный паромасляный насос 5.

12. После охлаждения корпуса насоса 5 закрыть клапан 17 и выключить вакуумный агрегат 1-2.

13. Результаты измерений занести в таблицу.

№ п/п	Значения давления по ВМБ1-2 P , Па	Показания натекагель-потокомера		Значение быстроты действия S , м ³ /с
		n , дел.	Q , м ³ Па/с	

14. Вычислить значения быстроты действия S для каждого давления P .

15. Построить график $S = f(P)$ на основе полученных экспериментальных данных.

Содержание отчета

1. Схема вакуумной системы экспериментального испытательного стенда на базе установки ВУ-1А. Назначение элементов схемы с необходимыми пояснениями.
2. Краткое описание методики эксперимента и сводка результатов измерений.
3. Расчеты индивидуальных значений быстроты откачки S .
4. График зависимости $S = f(P)$ по экспериментальным точкам.
5. Выводы: сравнение графика экспериментальной зависимости $S = f(P)$ с графиком на рис. 6.2.

Контрольные вопросы

1. Каков физический механизм действия диффузионного пароструйного насоса?
2. Каковы основные характеристики диффузионных вакуумных насосов?
3. В чем причины уменьшения быстроты действия пароструйных насосов при низких и высоких давлениях?
4. Как зависит быстрота действия пароструйных насосов от рода откачиваемого газа?
5. Как производилось регулирование подаваемого в вакуумный насос потока воздуха?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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