

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

Составители: канд. техн. наук Г.И. Липатов,
канд. физ.-мат. наук Е.П. Николаева

УДК 621.52

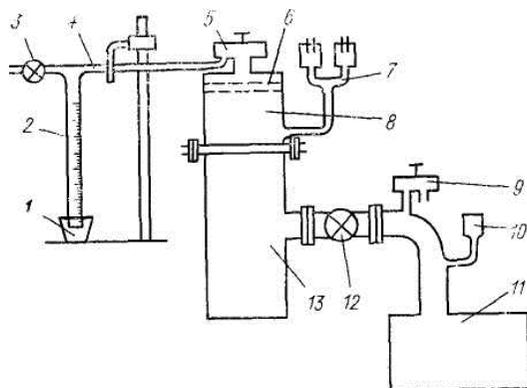
Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1, 2 по дисциплине «Вакуумная техника» для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Электронное машиностроение» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Г.И. Липатов, Е.П. Николаева. Воронеж, 2016. 33 с.

В методических указаниях изложены необходимые теоретические сведения и методика выполнения лабораторных работ № 1 «Изучение методов измерения вакуума» и № 2 «Изучение масляно-роторационных насосов».

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2003 и содержатся в файле МУ ВТ 1ч.pdf.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1, 2
по дисциплине «Вакуумная техника»
для студентов направления подготовки
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
профиля «Электронное машиностроение»
очной формы обучения



Ил. 9. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Т.В. Свистова

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук, проф.
С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Во-
роневского государственного технического университета

Воронеж 2016

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2016

Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

Цель работы: ознакомиться с принципом действия и конструкцией термопарного и ионизационного манометрических преобразователей, произвести их калибровку. Изучить вакуумметр ВИТ-2, получить практические навыки работы с ним.

Оборудование. Диффузионный и масляно-ротационный насосы в составе вакуумного агрегата. Измерительный колпак. Манометрическая лампа (преобразователь) ЛТ-2. Манометрическая лампа (преобразователь) ЛМ-2. Вакуумметр ВИТ-2. Пульт включения насосов. Регулируемый натекагель. Вскрытая лампа ЛТ-2 (отдельно от установки).

1. Теоретические сведения

Степень разрежения газа измеряют в единицах давления. Единица давления 1 Па=1 Н/м². Единица давления 1 Торр=1 мм рт. ст. — это давление столба ртути высотой 1 мм при её плотности 13,5951 г/см³ и ускорении силы тяжести 980,665 см/с. Связь между измерениями одного и того же давления в этих единицах:

$$1 \text{ Па}=133,322 \text{ Торр или } 1 \text{ Торр}=0,00750 \text{ Па.}$$

Объемная концентрация любого газа при 0 °С связана с его давлением соотношением:

$$n(\text{см}^3)=2,6537 \cdot 10^{14} p(\text{Па})=3,538 \cdot 10^{14} p(\text{Торр}).$$

Диапазон давлений, в котором работает вакуумная техника, составляет 16 порядков. Различные участки его перекрываются манометрами различного принципа действия. Все манометры можно разделить на два типа. Манометры абсолютного типа измеряют непосредственное давление как силу ударов молекул о поверхность. Такими манометрами являются гидростатические, мембранные, компрессионные. Их работа не зависит от рода газа. Манометры косвенного типа измеряют параметры физических процессов, зависящих от степени разрежения газа, такие, как теплопроводность, ионизация и т. д., поэтому датчики этих манометров называют преобразователями. Такие манометры требуют градуировки по образцовым эталонам.

Тепловые манометры. В тепловых манометрах используется зависимость молекулярной теплопроводности газа от давления газа

при высоком вакууме. Датчик теплового манометра представляет собой колбу с нитью, нагреваемой электрическим током. Если подводимая к нити электрическая мощность $Q_{эл}$ постоянна, то температура нити зависит от давления. В стационарном состоянии при установившейся температуре нити имеет место баланс мощностей:

$$Q_{эл}=Q_k+Q_l+Q_m, \quad (1)$$

где Q_k — мощность теплоотвода по конструктивным элементам манометра; Q_l — мощность, отводимая лучеиспусканием; Q_m — мощность, отводимая от нити соударяющимися с ней молекулами.

В уравнении (1) только Q_m зависит от давления; поскольку с ростом давления p коэффициент теплопроводности газа увеличивается, $\lambda=\lambda'p$, так же ведет себя и Q_m . Следовательно, при $Q_{эл}=\text{const}$ равновесная температура нити возрастает при понижении давления (если длина свободного пути молекул газа $l \gg d$, где d — характерный геометрический размер системы). Поэтому в тепловом манометре необходимо измерить температуру нити и результаты измерений проградуировать в единицах давления.

Более подробно уравнение баланса мощностей в тепловом манометре имеет вид

$$I^2 R_0 [1 + \alpha_R (T_n - T_k)] = \pi r^2 \lambda_n (T_n - T_k) + 2\pi r L \sigma (T_n^4 - T_k^4) + 2\pi r L (T_n - T_k) \lambda' p.$$

Здесь I — ток, проходящий через нить; α_R — температурный коэффициент сопротивления; T_n, T_k — температура нити и колбы; r, L — радиус и длина нити; σ — коэффициент Стефана—Больцмана; λ_n — коэффициент теплопроводности по сечению нити.

Чувствительность теплового манометра зависит от рода газа, заполняющего колбу, поскольку молекулярная теплопроводность газа при единичном давлении (1 Торр) λ' , Вт/(К·Торр·см²),

$$\lambda' = 1,47 \cdot 10^{-5} \alpha_a \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\frac{273}{T}}, \quad (2)$$

где α_a — коэффициент аккомодации; γ — показатель адиабаты (для двухатомных газов $\gamma=1,4$). Одинаковые показания теплового манометра по различным газам 1, 2, ... соответствуют не одинаковым давлениям, а условию $\lambda_1' p_1 = \lambda_2' p_2 = \dots$. Если прибор имеет градуировку по воздуху, а измеряется давление некоторого газа «г», то пересчет на давление p_g от показаний по воздуху p_v производится по

формулам

$$p_r = q_r p_b; \quad q_r = \lambda'_b / \lambda'_r \quad (3)$$

со следующими значениями пересчетного коэффициента для тепловых манометров:

газ: ...	воздух	H ₂	He	Ne	CH ₄	Ar	CO ₂
q _r : ...	1,00	0,67	1,12	1,31	0,61	1,65	0,94.

По способу измерения температуры нити различают два типа тепловых манометров: манометры сопротивления и термопарные. В первых используется зависимость сопротивления нити от ее температуры; нить манометра выполняет две функции: источника тепла и измерителя температуры. В вакуумметре сопротивления датчик представляет собой трубку диаметром 20 и длиной 175 мм. Нить имеет очень малый диаметр (около 18 мкм), благодаря чему верхний предел манометра по давлению составляет 30 Торр. Прибор работает в режиме постоянной температуры нити, мерой давления служит необходимый для этого ток нити. Имеется электронное реле, подающее сигнал и размыкающее блокировочные контакты при достижении заданного давления в диапазоне от 30 до 0,1 Торр. Существуют также термисторные манометры сопротивления, обладающие высокой чувствительностью из-за резкого убывания сопротивления с ростом температуры.

В диапазоне давлений 1-10⁻³ Торр наиболее широко применяют термопарные манометры. Для измерения температуры нити применяется термопара, напряжение U_{тп} которой зависит от разности температур T_н-T_к. Нить здесь выполняет только функцию источника тепла. Термопарные лампы ЛТ-2 (стеклянная) и ЛТ-4 (металлическая) аналогичны по конструкции (рис. 1); они имеют тепловыделяющую нить из платины диаметром 0,1 мм и термопару типа хромель-копель. Лампы работают в режиме постоянного

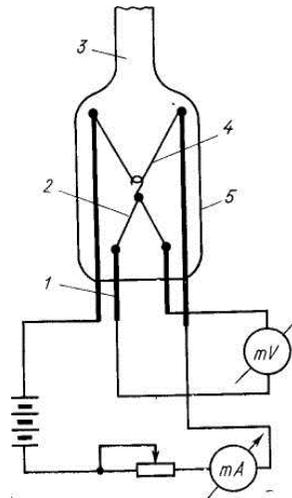


Рис. 1. Схема термопарного манометра:

- 1 — ввод питания;
- 2 — термопара;
- 3 — присоединительная трубка; 4 — нить;
- 5 — колба

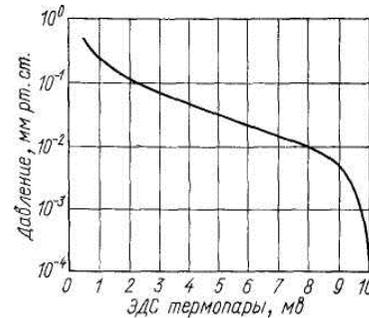


Рис. 2. Градуировочная кривая термопарного манометра ЛТ-2

тока накала, который регулируется перестройкой балластного сопротивления.

При давлении ниже 10⁻³ Торр показание термопарного манометра достигает асимптотического предела 10 мВ (100 делений) и остается постоянным (рис. 2). Согласно уравнению (1), при малых давлениях может быть достигнуто состояние Q_м << Q_г + Q_к, когда молекулярный теплоотвод перестает играть роль

из-за своей малости. Температура нити при этом постоянная, не зависит от давления и определяется только потерями тепла нитью через лучеиспускание Q_л и теплопроводность по конструктивным элементам Q_к.

Для уменьшения нижнего предела термопарных манометров необходимо ослабить побочные процессы теплоотвода. Для уменьшения Q_к нить должна быть тонкой и иметь большое сопротивление тепловому потоку. Для уменьшения Q_л нужно понизить среднюю температуру нити, так как по закону Стефана-Больцмана Q_л ~ T_н⁴. Однако это уменьшает разницу температур нити и колбы T_н-T_к и приводит к потере чувствительности. Компромисс достигается при T_н=300-400 °С, при этом нижний предел термопарных манометров 10⁻³ Торр, ток накала ламп ЛТ-2 и ЛТ-4 около 110-135 мА.

Верхний предел термопарных манометров определяется двумя явлениями: 1) при высоком давлении нарушается условие l/d >> 1, и теплопроводность газа перестает зависеть от давления; 2) при высоком давлении интенсивный молекулярный теплоотвод сильно снижает температуру нити, уменьшает разность температур T_н-T_к и приводит к потере чувствительности. При токе около 120 мА лампа ЛТ-2 имеет верхний предел по давлению примерно 10⁻¹ Торр. Для борьбы с потерей чувствительности при высоком давлении достаточно увеличить температуру нити, т. е. повысить ток накала. При токе 250-300 мА лампа ЛТ-2 может измерять давления в диапазоне от 1 до 10⁻¹ Торр. Для этого диапазона точное значение тока накала подбирают при атмосферном давлении, когда лампа вскрыта, т. е.

производится привязка градуировочной кривой к правому верхнему асимптотическому пределу манометра.

Ограничение верхнего предела тепловых манометров из-за требования $l/d \gg 1$ является принципиальным. В связи с этим необходимо более детально рассмотреть, какой размер лампы играет роль характерного параметра d . Кажется бы, под d следует понимать диаметр колбы D

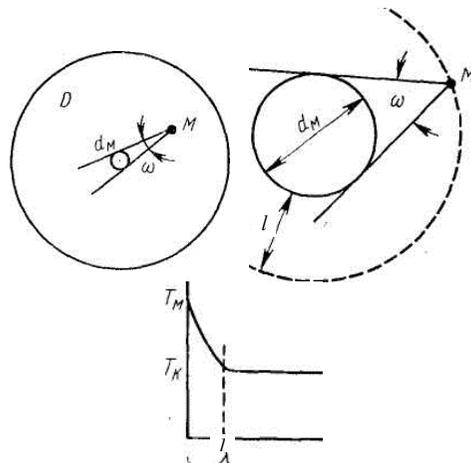


Рис. 3. К определению верхнего предела манометра ЛТ-2

(рис. 3), однако в действительности важен диаметр нити d_n . Если давление таково, что $d_n/2 < l < D/2$, то весь перепад температуры от T_n до T_k происходит на расстоянии порядка l . Выберем точку наблюдения M на расстоянии от нити, равном или немного большем l . Из этой точки нить видна под малым телесным углом ω , поэтому в эту точку приходят молекулы в основном с температурой, определяемой колбой. Роль «колбы» с температурой T_k играет слой газа, отстоящий от нити на расстоянии l . Если же $l < d_n/2$, то температура в точке M в основном определяется нитью.

Современная технология волочения проволок позволяет изготавливать их диаметром до 1 мкм, однако условия крепления и прочности не позволяют использовать нити тоньше 10 мкм. Полагая $l = d_n/2 = 5$ мкм, по уравнению l (см) = $5/p$ (Торр) получаем верхний предел манометров с такой нитью 10 Торр. Жертвуя точностью, можно измерять тепловыми манометрами давления до 30-50 Торр. Помимо ламп ЛТ-2 и ЛТ-4 вакуумметры содержат выпрямитель для питания нити током до 150 и до 300 мА на двух пределах измерений и прибор для измерений напряжения термопары в единицах давления. Диапазоны измерений составляют 10^{-3} - 10^{-1} и 10^{-1} -1 Торр.

Электронные ионизационные манометры. Ионизационные манометры получили широкое распространение для измерения высокого и сверхвысокого вакуума. В датчике любого ионизационно-

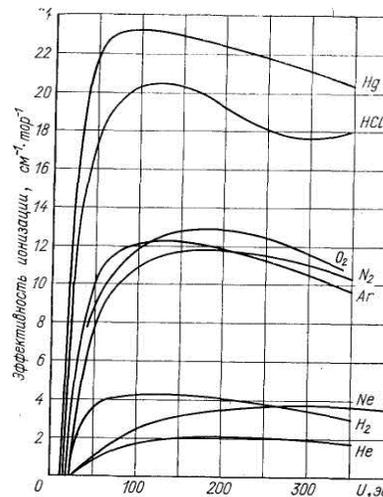


Рис. 4. Зависимость эффективности ионизации газов от энергии электронов

го манометра есть две системы: для ионизации остаточного газа и для отбора ионов. В установившемся режиме манометра скорость ионизации равна скорости отбора ионов, а ионный ток пропорционален давлению газа. По способу ионизации манометры делят на три типа: 1) *электронные* с ударной ионизацией электронным потоком, имеющие нагретый катод; 2) *магниторазрядные* с холодными электродами и самостоятельным разрядом в магнитном поле; 3) *радиоизотопные* с источником ионизирующего излучения.

Эффективность ионизации характеризуется числом пар ионов, создаваемых на 1 см пути частицы при давлении 1 Торр. Зависимость эффективности ионизации ϵ , $\text{см}^{-1} \cdot \text{Торр}^{-1}$, от энергии (рис. 4) имеет характерный вид: начинается ($\epsilon > 0$) с $eU > eU_i$; достигает максимума примерно при 100-200 эВ и медленно спадает. Потенциал ионизации U_i определяется минимальной энергией отрыва верхнего электрона, равной 13,59 эВ для H_2 , 14,54 эВ для N_2 , 12,6 эВ для O_2 . От эффективности можно перейти к сечению ионизации по формуле $\epsilon p = \sigma n$, из которой получаем важное соотношение

$$I_n/I_3 = \epsilon p l_n = \sigma n l_n, \quad (4)$$

где I_n , I_3 — ионный и электронный токи; l_n — длина пути ионизации электрона. Следовательно,

$$I_n/I_3 = K p, \quad (5)$$

где K (Торр^{-1}) — чувствительность электронного манометра, которая зависит только от геометрии и напряжений на электродах лампы. Иногда используют соотношение

$$I_n = K_a p, \quad (6)$$

где величина $K_a = K I_3$, мкА/Торр есть постоянная электронного ма-

нометра, приводимая в паспорте.

Для измерения давления можно использовать любой приемно-усилительный триод, измеряя сеточный ионный ток при постоянном электронном токе на анод. Однако при этом мала эффективность ионизации из-за короткого пути электронов от катода к аноду. Кроме того, оксидные катоды триодов

подвержены отравлению и не допускают напуска атмосферы, что иногда необходимо делать в манометрах. Поэтому разработаны специальные манометрические лампы с вольфрамовыми катодами и удлиненным пробегом электронов.

Типовая лампа ЛМ-2 получила массовое распространение для давлений 10^{-3} - 10^{-7} Торр (рис. 5). Катод прямого накала в форме шпильки из вольфрама служит источником электронов. Сетка в форме цилиндрической спирали, на которую подают напряжение +200 В, является анодом для электронов. Цилиндрический коллектор с потенциалом -26 В имеет отдельный вывод на горловине лампы для уменьшения утечки электронов с него на сетку по цоколю и стеклу. Стабилизированный ток эмиссии в лампе ЛМ-2 составляет 5 мА. Электроны пролетают редкую сетку, отталкиваются полем коллектора и колеблются у сетки. Постоянная преобразователя ЛМ-2 равна $K_a=10^5$ мкА/Торр.

В комбинированном вакуумметре ВИТ-2 имеется термопарная часть для работы в диапазоне давлений от 10^{-1} до 10^{-3} Торр и ионизационная часть для давлений от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Манометры ЛГ-2 и ЛМ-2 хорошо сочетаются по пределам, а единый блок вакуумметра охватывает диапазон от 10^{-1} до $5 \cdot 10^{-8}$ Торр среднего и высокого вакуума. Ионизационная часть прибора ВИТ-2 имеет четыре переключаемых поддиапазона по давлению (в Торрах): $(1-10) \cdot 10^{-4}$; $(1-10) \cdot 10^{-5}$; $(1-10) \cdot 10^{-6}$; $(1-10) \cdot 10^{-7}$. Блок вакуумметра со-

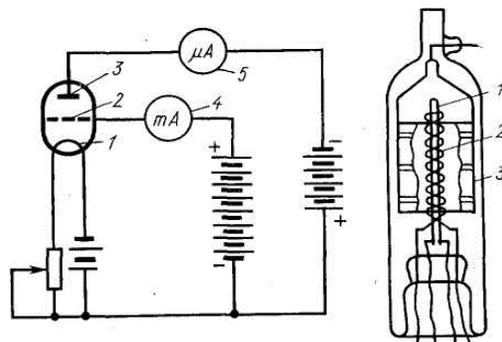


Рис. 5. Электронный ионизационный манометр ЛМ-2 и схема его включения:
1 — катод; 2 — сетка-анод; 3 — коллектор; 4, 5 — приборы контроля тока электронов и ионов

держит выпрямители, стабилизатор эмиссии и высокостабильный усилитель постоянного тока, измеряющий при давлении 10^{-7} Торр ток коллектора 0,01 мкА.

Усилитель может быть использован в лабораторной практике и для других целей.

Электронный ионизационный манометр не является абсолютным. В принципе можно вычислить его градуировочную кривую, однако теория его сложна и неточна. Градуировка ионизационного манометра производится сравнением с компрессионным эталоном, причем показания электронного манометра зависят от рода газа из-за различий в эффективности ионизации. Перед измерением датчик ЛМ-2 должен быть обезгажен прогревом, иначе десорбция газов со стекла искажает его показания в сторону завышения. Для обезгаживания лампы через ее сетку в режиме подготовки к измерениям пропускается ток.

Для измерения лампой ЛМ-2 давлений разных газов можно пользоваться пересчетными коэффициентами, приведенными в следующей таблице:

газ: ...	N ₂	Ar	He	H ₂	O ₂	CO
K, Торр ⁻¹ :	28,6	36	3,38	10,9	29	32
q _r : ...	1	0,76	5,90	2,18	1,05	0,9

Чувствительность ионизационного манометра к различным газам считают приблизительно пропорциональной числу электронов в молекуле. Чувствительность к парам масла значительно больше, чем к простым газам. Это можно объяснить разложением на горячем катоде многоатомных молекул на простые.

Электронные ионизационные манометры обладают откачивающим действием. Откачка объясняется несколькими явлениями. Из-за хемосорбции на горячем катоде 1 см² поверхности вольфрама при 2200 К имеет быстроту откачки около 1 л/с по кислороду. В результате образуется окисел WO₃, распыляемый и осаждаемый на стенках лампы. Кроме того, важны физическая адсорбция и ионная откачка (внедрение ионов в электроды). Для лампы ЛМ-2 быстрота ионной откачки составляет примерно 0,01 л/с.

Верхний предел электронного манометра по давлению связан с двумя явлениями. Срок службы горячего вольфрамового катода ограничен при высоких давлениях: при 10^{-1} Торр катод ЛМ-2

быстро распыляется. Лампа ЛМ-3, в которой вместо вольфрамового применен воздухостойкий иридиевый катод с покрытием из окиси иттрия, имеет срок службы 100 ч при верхнем пределе 10^{-2} Торр. Кроме того, при высоком давлении нарушается линейная зависимость тока от давления из-за того, что заметную роль в ионизации газа начинают играть вторичные электроны. Для лампы ЛМ-2 средний пробег электрона от катода к аноду равен среднему пробегу на один акт ионизации при давлении $3,4 \cdot 10^{-3}$ Торр.

Нижний предел ионизационного манометра связан с фоновой компонентой тока коллектора, не зависящей от давления. Электроны при торможении на сетке дают мягкое рентгеновское излучение, которое попадает на коллектор и вызывает с него фотоэмиссию. Ток уходящих электронов I_{ϕ} имеет тот же знак, что и ток приходящих ионов $I_{и}$, однако от давления не зависит. Когда $I_{\phi} \gg I_{и}$, дальнейшее понижение давления не меняет показания манометра. В лампе ЛМ-2 цилиндрический коллектор захватывает почти все рентгеновское излучение сетки, поэтому нижний предел сравнительно высок (10^{-7} - $5 \cdot 10^{-8}$ Торр).

Был предложен датчик с обращенным расположением электродов: катод снаружи, а коллектор в виде тонкого стержня — внутри сетчатого анода. Угол видимости коллектора с поверхности сетки значительно уменьшен, рентгеновское излучение на него почти не попадает, фоновый ток очень мал. На этом принципе основан преобразователь ИМ-12 с вакуумметром ВИ-12. Диапазон вакуумметра ВИ-12 по давлению от 10^{-5} до 10^{-10} Торр, по чувствительности от 2 до 6 Торр $^{-1}$.

Градуировка манометров. Градуировка манометров производится сравнением их показаний с заведомо точно известным давлением. Это давление создается достоверным образом или измеряется эталонным манометром, градуировка которого точно определяется расчетно, независимо от каких-либо сравнительных измерений давления; их называют образцовыми манометрами первого разряда, погрешность их градуировки не более 1-5 %. Для градуировки манометров применяют также образцовые манометры второго и третьего разрядов. Их погрешность порядка 10-15 %. Образцовыми манометрами в диапазоне от 760 до 10 Торр служат обычно U-образные жидкостные манометры; до 10^{-5} Торр — компрессионные манометры. Ниже 10^{-5} Торр применяется линейная экстраполяция

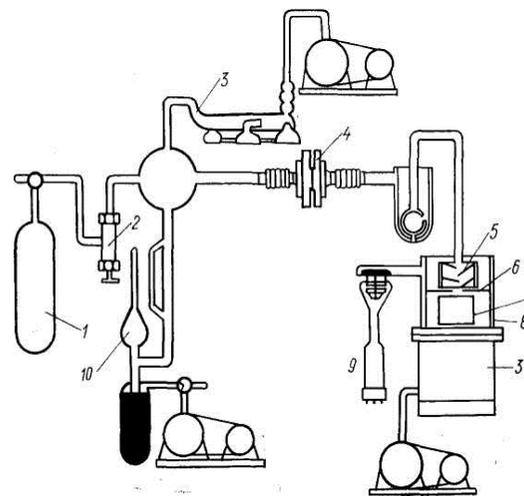


Рис. 6. Схема установки для градуировки манометров по газовым потокам:

1 — баллон с газом; 2 — натекатель; 3 — диффузионные насосы; 4 — калиброванное отверстие; 5 — рассеиватель; 6 — перегородка с отверстием; 7 — ловушка; 8 — сорбционный насос; 9 — градуируемый манометр; 10 — компрессионный манометр

ний 10^{-5} - 10^{-6} Торр необходимо регулировать и измерять малые потоки порядка $Q=10^{-2}$ - 10^{-3} л.Торр/с. Потокотермом служит второе малое калиброванное отверстие с пропускной способностью U_1 , перед которым напуском воздуха создается сравнительно высокое давление p_1 , измеряемое компрессионным манометром в условиях работы без погрешности (давление $p_1 > 10^{-3}$ Торр, отсутствуют холодные ловушки). Легко показать, что эталонное давление равно

$$p = \frac{U_1}{U + U_1} p_1. \quad (7)$$

Для получения $p_1 \cong 10^{-3}$ л/с подходит диафрагма диаметром 0,1 мм.

При градуировке измерителей парциальных давлений приходится прибегать к известным способам понижения давления, подобным описанным выше, поскольку измерить парциальное давление выше 10^{-3} Торр невозможно. Градуировка производится по каждому газу, входящему в анализируемую смесь. Для градуировки

ионизационных манометров.

Для примера рассмотрим градуировку манометров по газовым потокам. Суть метода показана на рис. 6.

Насос с быстрой откачки S отделен от объема с эталонным давлением малой диафрагмой с пропускной способностью $U \ll S$. Если в объем выпускается известный поток газа Q , то в нем устанавливается давление $p = Q/U$. Если, например, $S=100$ л/с, $U=1$ л/с, то для создания давлений

масс-спектрометрических измерителей парциальных давлений применяют стандартные многокомпонентные смеси газов с известным составом.

Особые методы применяют для измерения давления паров. Жидкость помещается в шарик *B*, который поддерживается при требуемой температуре (рис. 7). Пары, входящие в отверстие *O*, давят на диск *D*, подвешенный на тонкой нити. Давление пара определяется углом θ , на который нужно повернуть весь прибор, чтобы отверстие закрылось диском:

$$p(\text{мТорр}) = \frac{G \sin \theta}{0,00136A}. \quad (8)$$

Здесь G — вес диска, г; A — площадь отверстия, см². Для уменьшения давления пара на диск с внешней стороны применяется ловушка с жидким азотом. Проведя измерения при различных температурах, можно получить зависимость упругости пара от температуры, описываемую уравнением Клапейрона.

2. Особенности эксплуатации манометров

Особенности термопарных манометров. Для измерения давления от 1 до 10⁻³ Торр применяют термопарные вакуумметры ВТ-2 или комбинированные вакуумметры ВИТ-2 с манометрическими датчиками ЛТ-2 и ЛТ-4. Шкалы их измерительных приборов имеют двойную градуировку: в милливольт-ЭДС термопары и непосредственно в единицах давления. Когда для измерений используют шкалу в единицах милливольт, необходимо прибегать к градуировочной кривой, прилагаемой к датчику ЛТ-2 или ЛТ-4.

Характеристика каждой манометрической лампы ЛТ-2 или ЛТ-4 перед началом работ должна быть совмещена с типовой градуировочной кривой определенным подбором тока накала. Эта опе-

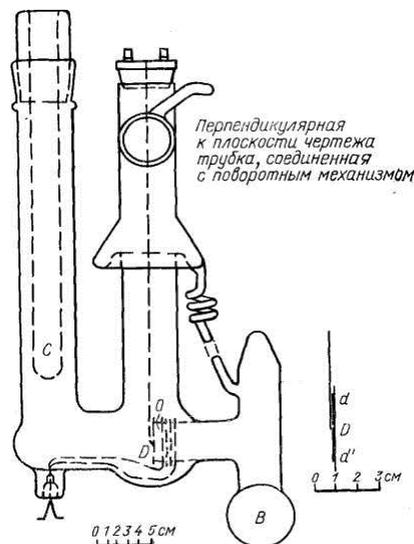


Рис. 7. Манометр для измерения давления пара

рация для ламп ЛТ-2 и ЛТ-4 несколько отличается. Для металлических открытых ламп типа ЛТ-4 заводом-изготовителем заранее установлен ток накала, величина которого обозначена на корпусе. Стеклоплавные лампы ЛТ-2 выпускают в запаянном виде с давлением порядка 10⁻⁵ Торр; для них следует подобрать ток накала до вскрытия лампы так, чтобы показания измерительного прибора соответствовали пределу шкалы (10 мВ). Только после этого лампу можно вскрыть и присоединить к откачиваемому объему.

Поскольку подбором тока в ЛТ-2 исключается не только разброс параметров лампы, но и разброс показаний милливольтметров, измерения давления датчиком ЛТ-2 точнее, чем измерения ЛТ-4.

При работе вакуумных установок с масляными насосами происходит загрязнение парами масла или другими веществами термопары и нити накала, что приводит к изменению теплового баланса и показаний прибора вакуумметра. Поэтому при длительной эксплуатации манометрических датчиков (ЛТ-2 и ЛТ-4) необходимо периодически проверять совмещение градуировочной кривой и шкалы прибора и корректировать ток накала нити в условиях, когда давление в датчике ниже 10⁻³ Торр. Значительную ошибку в измерение давления с помощью термопарных датчиков вносит изменение температуры баллона лампы. При ее увеличении температура нити также возрастает и показания прибора вакуумметра оказываются заниженными. Наоборот, охлаждение баллона лампы приводит к завышенным показаниям вакуумметра. Поэтому при установке термопарных датчиков необходимо их располагать вдали от мест с нагретыми или охлажденными деталями (печки вакуумных насосов, манометрические лампы ЛМ-2, охлаждаемые ловушки и т. д.).

Значительную погрешность в измерение давлений вносит изменение состава газа в откачиваемом объеме (см. табл. в тексте). Пары воды и органических растворителей (бензин, спирт и особенно ацетон) резко меняют тепловой баланс нити и приводят к завышенным (по давлению) показаниям прибора. Этим обстоятельством нередко пользуются для поисков течи в откачиваемом объеме. Опрыскивая предполагаемые места течей ацетоном, наблюдают за показаниями термопарного вакуумметра. При попадании паров ацетона через течь в откачиваемый объем вакуум ухудшается, что индицирует наличие течи.

Таким образом, основная погрешность термопарных манометров

метров приводит к завышенным (по давлению) показаниям вакуумметра, поэтому при считывании показаний необходимо вводить поправочный коэффициент от 0,7 до 1,3.

Особенности ионизационных манометров. Для измерения давления в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-7} Торр применяют вакуумметры ВИТ-2 с манометрическими преобразователями ЛМ-2.

Включать эти вакуумметры следует лишь после того, как в откачиваемом объеме достигнуто разрежение не менее 10^{-3} Торр для ламп ЛМ-2. Сначала вакуумметр включают в режиме обезгаживания сетки, для чего соответствующий переключатель вакуумметра устанавливают в положение «прогрев». Регулятор эмиссии устанавливают в крайнее левое положение (минимум тока эмиссии). После прогрева сетки в течение 5-10 мин устанавливают рабочее положение переключателей и ток эмиссии катода плавно увеличивают до 5 мА. До начала измерений давления проверяют установку «нуля» измерительного усилителя и его калибровку. После этого прибор готов к работе. Давление в откачиваемом объеме определяют по измерительному прибору, показания которого умножают на соответствующий множитель переключателя диапазонов давления.

Следует иметь в виду, что при откачке установки масляными насосами ионизационные датчики загрязняются парами масла. Это приводит к значительным погрешностям в измерении давления. Поэтому после измерения давления манометрический датчик вновь следует поставить в режим прогрева-обезгаживания. Периодически включая вакуумметр в режим измерения, по изменению показаний прибора определяют степень чистоты манометрической лампы. Обезгаживание следует считать законченным при получении устойчиво повторяющихся показаний.

Зависимость ионного тока манометрических ламп ЛМ-2 в условиях постоянного эмиссионного тока от рода откачиваемого газа следует учитывать при эксплуатации этих датчиков. Во-первых, при установке ламп на откачиваемом объеме необходимо принять меры по предотвращению прямого попадания паров уплотняющего материала (например, резины) в колбу лампы. Для этого при установке ламп типа ЛМ-2 в «грибковое» уплотнение (наиболее типичное соединение при металлическом исполнении вакуумной системы) следует убедиться в том, что стеклянный патрубок лампы находится непосредственно в откачиваемом объеме, а не в уплот-

няющем кольце «грибка». Во-вторых, указанная избирательная чувствительность к разным газам часто применима для нахождения течей в объеме. Однако, так как нахождение течи в данном случае проводят в условиях высокого вакуума (10^{-4} - 10^{-6} Торр), чувствительность метода оказывается значительно более высокой.

Наконец, следует особо отметить поведение манометрических ламп в условиях попадания паров воды в откачиваемый объем. При этом устанавливается специфический процесс кругового цикла водяного пара, приводящий к быстрому распылению вольфрамовой нити накала.

Манометрические лампы ЛМ-2 имеют вольфрамовый катод в виде тонкой нити и сравнительно хрупкую, легко провисающую сетку, поэтому их следует располагать на аппаратуре вертикально (цоколем вверх или вниз).

Следует также отметить, что в отдельных экземплярах ламп ЛМ-2 наблюдается явление генерации (колебания в цепи накала-коллектора), связанное с неустойчивым режимом стабилизатора. В некоторых случаях эти нежелательные колебания удается погасить установкой небольшой катушки индуктивности или небольшой емкости в коллекторной цепи.

3. Расчетная часть

Задание 1.

Расстояние между испарителем и подложкой d (10, 20, 30, 40, 50 мм). Как изменится коэффициент теплопроводности газа, если давление снизится от $5 \cdot 10^5$ Па до $5 \cdot 10^4$ Па ($1 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^3$, $10^3 \dots 50$ Па).

Если давление изменится от $1 \cdot 10^{-2}$ Па до $2 \cdot 10^{-2}$ Па ($2 \cdot 10^{-1}$, $4 \cdot 10^{-1}$, $6 \cdot 10^{-1}$, $8 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ Па).

Задание 2.

Рассчитать пределы работы термпарного датчика. Определить интервалы давлений, имеющие линейную зависимость ЭДС от давления.

Задание 3.

Обычно скорость откачивающего действия высоковакуумных датчиков ионизационного манометра к вакуумной системе, чтобы влияния откачивающего действия манометра пренебрежительно мало.

Методика расчета

Для заданного диаметра датчика определить границы режимов течения газов:

1) граница между и молекулярно-вязкостным режимами

$$P_{в,м-в} = \frac{1,32}{d} \text{ Па}$$

2) граница между молекулярно-вязкостным и молекулярным режимами

$$P_{м-в,м} = \frac{0,02}{d} \text{ Па}$$

3) коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \text{const}, \rho \cdot \lambda,$$

где ρ — плотность газа, кг/м^3 , λ — средняя длина свободного пробега, м.

Для низкого вакуума $\lambda \sim 1/P$, $\rho \sim P$, следовательно $\rho \cdot \lambda$, — не зависит от давления.

Для высокого вакуума $\lambda \sim d$, следовательно, $\rho \cdot \lambda \sim P$, т. е. в условиях высокого вакуума теплопроводность газа прямо пропорциональна давлению.

В условиях среднего вакуума $\lambda \sim d$ имеется нелинейная зависимость от давления и с приближением состояний газа к высокому вакууму зависимость теплопроводности газа приближается к прямой пропорциональности.

Содержание работы

1. До включения насосов измерить остаточный вакуум в установке лампой ЛТ-2 по верхней шкале вакуумметра ($1 \cdot 2 \cdot 10^{-1}$ Торр) согласно инструкции.

2. Включить механический насос и измерить вакуумметром предельный форвакуум, создаваемый в установке насосом.

3. Включить диффузионный насос, получить предельно высокий вакуум (~ 1 ч) и измерить его с помощью лампы ЛМ-2.

4. Одновременно с откачкой произвести калибровку лампы ЛТ-2, вскрытой на окружающую атмосферу, для определения тока накала этой лампы по верхней шкале вакуумметра.

5. При высоком вакууме в установке произвести калибровку

лампы ЛТ-2, входящей в установку, для определения ее тока накала по нижней шкале вакуумметра ($10^{-1} \cdot 10^{-3}$ Торр).

6. Произвести сравнительную градуировку манометрического преобразователя ЛМ-2. Для этого, осторожно открывая натекатель, постепенно повышать давление в установке с предельно низкого до $(7 \cdot 9) \cdot 10^{-4}$ Торр, одновременно записывая показания манометра ЛМ-2.

При сравнительной градуировке показаний манометрических преобразователей следует брать равные интервалы между показаниями рабочего вакуумметра и сравнивать их с показаниями эталонного вакуумметра во всем диапазоне. Результаты измерения должны быть представлены в виде графика, по оси ординат которого отложены показания рабочего вакуумметра, а по другой оси — эталонного.

7. Произвести градуировку манометрического преобразователя ЛТ-2. Для этого выключить манометр ЛМ-2 и диффузионный насос. Затем, по мере повышения давления в установке, записывать показания манометра ЛТ-2.

Предупреждения. 1. Манометр ЛМ-2 включать, когда в установке достигнуто разрежение 10^{-3} Торр. При превышении этого давления в установке в процессе работы манометр ЛМ-2 необходимо выключить. 2. После окончания измерений по пп. 6, 7 сразу же закрыть натекатель.

Контрольные вопросы

1. Какие типы манометров Вы знаете?
2. Что такое механические манометры, каковы их конструкции, принцип действия и пределы измеряемых давлений?
3. Каков принцип действия компрессионных манометров?
4. Какие типы тепловых манометров Вы знаете?
5. Чем отличаются по конструкции манометрические преобразователи ЛТ-2 и ЛТ-4?
6. Каков принцип работы манометра сопротивления и термпарного манометра?
7. От каких факторов зависит чувствительность тепловых манометров?
8. Как проводится градуировка тепловых манометров?
9. Каковы пределы измерения давления термпарным манометром? Какими факторами обусловлена невозможность измерения

давления ниже 10^{-3} Торр? Какими способами можно расширить пределы измерения давления термоманометров?

10. Какова конструкция и принцип действия ионизационного манометра?

11. Чем ограничены пределы измерения давления манометром ЛМ-2?

12. Каковы способы увеличения пределов измерения давления манометром ЛМ-2?

13. Какова конструкция и принцип действия магниторазрядных манометров?

14. Каковы преимущества и недостатки магниторазрядных манометров по сравнению с ионизационными?

15. Каков принцип действия инверсно-магнетронного манометра?

16. Какова конструкция и принцип действия радиоизотопного манометра?

17. Какова конструкция и принцип действия измерителя парциальных давлений омега-трона?

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ МАСЛЯНО-РОТАЦИОННЫХ НАСОСОВ

Цель работы: ознакомиться с конструкцией масляно-ротационных вакуумных насосов на примере пластинчато-статорного насоса ВН-461, освоить элементарные наладочные приемы. Выбрать механический насос при заданном максимальном потоке основного насоса, проверить согласование насосов.

Оборудование. Насос масляно-ротационный. Измерительный колпак. Регулируемый натекагель. Манометры ЛТ-2 и ЛМ-2. Вакуумметр ВИТ-2.

1. Теоретические сведения

Вакуумные насосы классифицируют по принципу действия и по диапазонам давлений, причем в основном эти группы совпадают, так как для различных разрежений разработаны насосы с различными принципами. Существует три больших класса насосов: механические, пароструйные и сорбционные.

Механические насосы бывают двух видов.

1. *Объемные насосы* имеют периодически расширяющуюся и сжимающуюся рабочую полость, которая соответственно соединяется то с откачиваемым объемом, то с окружающей атмосферой. Эти насосы могут быть поршневыми с возвратно-поступательным движением, однако наибольшее распространение получили ротационные насосы, в которых расширение и сжатие рабочего объема достигается при вращении ротора. Широко применяемые масляно-ротационные насосы делят на три типа: пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и золотниковые или плунжерные. К объемным относят также двухроторные насосы.

2. *Молекулярные насосы* сообщают молекулам газа, соударяющимся с быстро вращающимся ротором, преимущественные скорости, направленные к выходному патрубку. Промышленное распространение получили только турбомолекулярные насосы.

Насосы классифицируют по назначению на газобалластные для откачки газов с большим содержанием паров, герметичные, предназначенные для откачки без потерь ценных или вредных газов, и др.

Пароструйные насосы работают по принципу увлечения молекул газа быстрой струей паров ртути или масла. Они делятся на две группы по роду рабочей жидкости. Существует три вида пароструйных насосов: *эжекторные* — низковакуумные; *бустерные* — средневакуумные и *диффузионные* — высоковакуумные.

Сорбционные насосы не перекачивают газ из объема наружу, а поглощают его на своих внутренних поверхностях. Они бывают трех видов.

1. *Геттерные* (хемосорбционные) насосы с возобновляемой пленкой титана по способу ее осаждения делят на два типа: геттерно-испарительные и магниторазрядные. Сорбционно-ионные насосы снабжены ионизирующими устройствами для усиления откачки инертных газов, азотитные насосы оснащены охлаждаемыми жидким азотом поверхностями для использования низкотемпературной сорбции и т. д.

2. *Адсорбционные насосы* используют пористые поглотители газа (цеолиты, угли и другие).

3. *Конденсационные насосы* поглощают газы за счет их конденсации, т. е. перевода в твердую фазу на поверхностях, охлажда-

емых до температур жидкого водорода и гелия. Иногда их называют криогенными.

Любые насосы независимо от принципа действия характеризуются следующими общими параметрами.

1. Начальное давление $p_{нач}$ — это наибольшее давление на входе насоса, при котором он может начать нормальную работу. Механические и адсорбционные насосы могут начинать откачку с атмосферного давления; насосы пароструйные и сорбционно-ионные требуют предварительного разрежения.

2. Наибольшее выпускное давление $p_{вып}$ — максимальное допустимое давление на выходе насоса, не нарушающее его работы. Обычно $p_{вып}$ одного порядка с $p_{нач}$.

3. Предельный вакуум, или остаточное давление насоса $p_{пр}$ — важнейший параметр: это самое низкое давление, которое насос может обеспечить при работе «на себя», т. е. с закрытым входным патрубком. Как правило, для любого насоса $p_{пр}$ определяется равновесием откачиваемого потока газа и обратных потоков (вследствие растворимости газа в масле насоса, газоотделения со стенок насоса и т. д.).

4. Быстрота откачки насоса ($S_n = dV/dt|_{p_n}$), л/с, — объем газа, удаляемый насосом в единицу времени при том давлении p_n , которое существует на входе насоса; с другой стороны, $S_n = Q_n/p_n$ — быстрота откачки есть отношение потока газа, откачиваемого насосом, к входному давлению. Быстрота откачки в широкой области рабочих давлений обычно не зависит от давления.

5. Производительность насоса — поток газа, откачиваемый насосом ($Q_n = S_n p_n$), л·Па/с. Производительность насоса сильно убывает с уменьшением давления.

Кроме этих основных вакуумных параметров существуют еще дополнительные эксплуатационные параметры насосов, такие, как потребляемая мощность, число ступеней откачки, габариты и вес, количество рабочей жидкости, стоимость и эксплуатационная надежность. Насос выбирают, исходя из конкретного назначения вакуумной установки с учетом необходимого разрежения и быстроты откачки, а также условий работы; например, сорбционные насосы применяют для получения «чистого» (безмасляного вакуума). Как правило, механические насосы — низковакуумные (до 100–0,1 Па), пароструйные (диффузионные) — высоковакуумные

(до 10^{-5} Па) сорбционные — сверхвысоковакуумные (до 10^{-7} Па).

Эффективная быстрота откачки объема S_o убывает сравнительно с номинальной быстротой откачки насоса S_n при приближении давления к предельному вакууму насоса из-за малых обратных потоков газа в установку через насос $Q_{обр}$. Очевидно, откачиваемый насосом поток газа равен $Q_n = S_n p_n = S_o p$. Но эффективный откачиваемый поток равен $Q_o = Q_n - Q_{обр}$. В условиях предельного вакуума $Q_o = 0$, $p = p_{ост}$; введем $S_o = Q_o/p$, в результате получим

$$S_o = S_n(1 - p_{пр}/p). \quad (1)$$

Когда давление сравнительно велико ($p \gg p_{пр}$), то $S_o \approx S_n$; когда давление понижается ($p \rightarrow p_{пр}$), эффективная быстрота откачки уменьшается $S_o \rightarrow 0$.

Для измерения быстроты откачки насосов с низким быстродействием применяют метод постоянного объема. Механический насос присоединяют к объему V , большому для замедления падения давления, через трубопровод с большой пропускной способностью. Если можно пренебречь течами и газоотделением, то $-pS = V dp/dt$, откуда получим

$$S = 2,3 \frac{V}{\Delta t} \lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (2)$$

Здесь p_1 и p_2 — две точки на измеренной зависимости падения давления во времени, разделенные интервалом времени Δt . Метод не предполагает постоянства S , т. е. можно измерить меняющуюся быстроту откачки при любом давлении. Однако он непригоден для высоковакуумных условий, когда особенно сказывается влияние течей и газоотделения. Кроме того, для диффузионного насоса с быстротой откачки $S = 500$ л/с пришлось бы использовать объем V не менее 5 м^3 , чтобы давление уменьшалось не быстрее чем в 2,7 раза за 1,5 мин.

Пластинчато-статорный насос ВН-461 — один из наиболее распространенных для откачки до давлений порядка 1–0,1 Па. В нём ось вращения ротора не совпадает с осью статора, но совпадает с осью полости статора. Точка касания ротора скользит по статору, при этом пластина совершает колебательное движение вверх-вниз в прорези статора. Пластина и ротор делят полость насоса на два объема: расширяющийся и снимаемый; первый объем соединен с откачиваемым объемом, второй — с атмосферой через клапан.

Камера насоса помещена в бак с маслом, которое предотвращает проникновение воздуха вдоль привода вала и через торцовые сочленения камеры. Масло частично проникает в камеру и уплотняет скользящие линии соприкосновения ротора и статора, ротора и пластины, по которым возможен прорыв воздуха из области сжатия в область разрежения. В любой момент в насосе содержатся две порции газа, причем каждая порция откачивается за два полных оборота ротора: за один оборот всасывается, за следующий выталкивается. Эти порции газа взаимно сдвинуты по фазе откачки (углу поворота ротора) на 360° .

Обозначим $V_{\text{макс}}$ объем зазора между роторами и статором, равный максимальному объему откачиваемой порции газа в момент наибольшего расширения. Тогда за 1 мин откачивается объем газа $V_{\text{макс}}n/2$, где n — число оборотов ротора в 1 мин. Геометрическая быстрота откачки насоса равна $S_r = 2(V_{\text{макс}}n/2) = V_{\text{макс}}n$, так как одновременно откачиваются две порции газа. С учетом предельного вакуума насоса и пропускной способности его входного патрубка U

$$S = S_r \frac{1 - p / p_{\text{пр}}}{1 + S_r / U}. \quad (3)$$

Быстрота откачки насоса зависит от его размеров ($V_{\text{макс}}$), скорости вращения ротора n , давления и конструкции (U).

Предельный вакуум масляно-ротационных насосов складывается из давлений продуктов масла и остаточных газов воздуха. Второе слагаемое определяется растворимостью воздуха в масле насоса, герметичностью корпуса насоса и его газоотделением, качеством масляного уплотнения и величиной «вредного» пространства в полости насоса, откуда воздух не может быть вытолкнут ротором. Масло растворяет ориентировочно до 10 % воздуха от своего объема.

Предельный вакуум по воздуху у масляно-ротационных насосов порядка 0,26 Па, причем для улучшения предельного вакуума насосы выполняют с двумя последовательными ступенями откачки на одном валу. Предельный вакуум по общему давлению воздуха и паров масла определяется парами масла и летучими продуктами (легкими фракциями) разложения масла из-за нагрева и трения между деталями насоса (фрикционно-термический крекинг), он имеет порядок 1 Па. В паспортах масляно-ротационных насосов

указывается $p_{\text{пр}}$ как по воздуху, так и по общему давлению.

Промышленность выпускает для ротационных насосов масла марки ВМ-4 и ВМ-6. Упругость паров масла ВМ-6 при 20°C составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па, при $105-130^\circ\text{C}$ — 1,3 Па. От масла зависит качество уплотнения и смазки трущихся частей, предельный вакуум и потребляемая мощность. Вязкость масла выбирают оптимальным образом: для улучшения уплотнения вязкость должна быть большая, а для уменьшения сопротивления вращению требуется малая вязкость. Мощность, потребляемая насосом, определяется работой по преодолению сил трения ротора в масле и работой сжатия откачиваемого газа. Мощность откачки, Вт, равна

$$P_{\text{отк}} = 10^{-3} S p \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[(p_a / p)^{(\gamma - 1) / \gamma} - 1 \right], \quad (4)$$

где $\gamma = 1,4$ для воздуха. В момент начала откачки $W_{\text{отк}} = 0$, поскольку при $p = p_a$ нет сжатия газа. С уменьшением давления на входе насоса мощность откачки также становится малой. В процессе откачки $W_{\text{отк}}$ достигает максимума при промежуточных давлениях порядка $(3-3,3) \cdot 10^4$ Па.

Выпускаются как большие насосы, например ВН-500 с быстротой откачки 500 л/с, так и малые — ВН-01 в герметичном исполнении на 0,1 л/с. У двухступенчатых насосов предельный вакуум (полный) доведен до 0,1 Па, по воздуху до 0,01 Па.

Унифицированные масляно-ротационные насосы могут быть выполнены с одной и двумя ступенями откачки. Насосы малой производительности пластинчато-роторного типа имеют шесть типоразмеров (от 0,1 до 6 л/с) и все снабжены газобалластными устройствами. Насосы средней производительности плунжерного типа имеют пять типоразмеров от 6 до 150 л/с. Насосы имеют одинаковый профиль сечения разных размеров, применяется широкая унификация основных узлов и деталей (клапаны, плунжеры и т. д.).

Герметичные насосы перекачивают без потерь из одного сосуда в другой такие газы, утечка которых в атмосферу недопустима из-за их ценности (гелий-3, аргон) или вредности (например, токсичные газы). Такие насосы заливаются обезгаженным маслом, они имеют герметичный выходной фланец. Привод насоса осуществляется индукционным способом: ротор асинхронного двигателя короткозамкнут и находится в вакууме на одном валу с ротором насо-

са. Трехфазная обмотка, создающая вращающееся магнитное поле, размещена вне вакуума снаружи на герметичном немагнитном тонкостенном стакане, отделяющем её от ротора. У насоса типа НВГ-5 с быстротой откачки 5,5 л/с остаточное давление по воздуху составляет $4 \cdot 10^{-3}$ Па. Потребляемая мощность из-за индукционного привода (1,6 кВт) несколько больше, чем у обычных насосов (ВН-10-2 на 6 л/с потребляет 1,0 кВт). Выходное давление в собирающем сосуде до 2,5 ат не ухудшает работы герметичного насоса — компрессора.

Газобалластные насосы служат для откачки газов с большим содержанием паров, например в химическом или фармацевтическом производстве. В обычном объемном насосе выхлопной клапан открывается, когда давление сжимаемого газа в камере достигает атмосферного. Однако еще раньше пар становится насыщенным, его давление достигает насыщения и больше не растет, а избыток пара конденсируется в жидкую фазу. В результате пар не поддается откачке, а образующийся конденсат портит масло. Например, вода дает эмульсию и активирует кислоты масла, вследствие чего повышается давление паров масла, портится вакуум, происходит коррозия и осмаливание рабочих поверхностей насоса.

Пусть максимальное сжатие в насосе ε_{\max} , чтобы открыть клапан, необходимо выполнение условия $\varepsilon_{\max} p_{\text{г}} + p_{\text{упр}} > p_{\text{п}}$, где $p_{\text{упр}}$ — упругость насыщенного пара; $p_{\text{г}}$ и $p_{\text{п}}$ — начальные давления газа и пара, или

$$\varepsilon_{\max} \geq (p - p_{\text{упр}}) / p_{\text{г}}. \quad (5)$$

Откачка с конденсацией происходит при условии $\varepsilon_{\text{конд}} < \varepsilon_{\max}$, где $\varepsilon_{\text{конд}} = p_{\text{упр}} / p$. Количество пара в камере насоса в момент начала сжатия равно $p_{\text{п}} V$, в момент выхлопа — $p_{\text{упр}} V / \varepsilon_{\max}$. Отсюда доля сконденсированного пара равна

$$\frac{p_{\text{п}} V - p_{\text{упр}} V / \varepsilon_{\max}}{p_{\text{п}} V} = 1 - \frac{p_{\text{упр}}}{p_{\text{п}}} \varepsilon_{\max}. \quad (6)$$

Пусть, например, $p_{\text{п}} = p_{\text{г}} = 667$ Па; при рабочей температуре насоса 60 °С для воды $p_{\text{упр}} = 2 \cdot 10^4$ Па. Тогда $\varepsilon_{\max} = 122$, $\varepsilon_{\text{конд}} = 30$, доля неоткачиваемого сконденсированного пара составляет 75 %.

В газобалластных насосах помимо входного и выхлопного отверстий существует третье отверстие, через которое в нужный мо-

мент цикла сжатия в камеру насоса автоматически впускается атмосферный воздух. В результате полное давление в камере насоса поднимается, клапан открывается, а парциальное давление пара не достигает упругости, вследствие чего становится возможной откачка пара параллельно с воздухом без конденсации.

Необходимый поток балластного газа $Q_{\text{б}}$ и его давление $p_{\text{б}}$ определяют из условия

$$p_{\text{а}} \leq p_{\text{б}} + (p_{\text{г}} + p_{\text{п}}) \varepsilon_{\max}.$$

Поскольку $\varepsilon_{\max} \leq p_{\text{упр}} / p_{\text{п}}$ (конденсация отсутствует), получим

$$p_{\text{б}} / \varepsilon_{\max} \geq p_{\text{а}} / \varepsilon_{\max} - (p_{\text{г}} + p_{\text{п}}). \quad (7)$$

Если бы балластный газ всасывался через входной патрубок насоса вместе с откачиваемой смесью, то его давление равнялось бы $p_{\text{б}} / \varepsilon_{\max}$, а поток $S p_{\text{б}} / \varepsilon_{\max}$. Отсюда необходимый поток балластного газа равен

$$Q_{\text{б}} = S p_{\text{п}} [(p_{\text{а}} / p_{\text{упр}} - 1) - p_{\text{г}} / p_{\text{п}}]. \quad (8)$$

Величина $Q_{\text{б}}$ требуется тем больше, чем выше парциальное давление пара или чем меньше содержание газа в смеси.

Газобалластные насосы выполняются на базе обычных ротационных насосов, которые снабжают дополнительным клапаном и дозатором для балластного газа. Производительность насоса по пару, г/ч, равна

$$G = 26,2 M S p_{\text{п}} \quad (9)$$

где M — молекулярный вес пара. Например, для насоса ВН-2Г производительность $G = 75$ г/ч по водяному пару, максимальный поток $Q_{\text{б}} = 1,465 \cdot 10^4$ л·Па/с, максимальное давление водяного пара на входе $p_{\text{п}} = 533$ Па; предельный вакуум (полный) $p_{\text{пр}} = 33,3$ Па.

Двухроторные насосы предназначены для достижения большой быстроты откачки (порядка 500 л/с и более) в промежуточном диапазоне давлений 100-0,1 Па. В рабочей камере насоса два ротора в форме восьмерок вращаются навстречу друг другу, при этом расширяется всасывающая полость и сжимается выталкивающая. Точная профилировка роторов такова, что между ними и стенками камеры при вращении существуют малые зазоры порядка 0,1 мм. Отсутствие масла и трения между роторами позволяет придать им большие скорости вращения (до $3 \cdot 10^3$ об/мин). Однако через зазоры

в насосе протекает обратный поток воздуха, вследствие чего давление на выходе двухроторного насоса должно понижаться последовательно присоединенным ротационным насосом.

Пусть осевая длина ротора равна L , площадь сечения двух впадин Δ , число оборотов в минуту n . Тогда геометрическая быстрота откачки двухроторного насоса равна $S_r = 2 \cdot 10^{-3} \Delta L n / 60$ л/с. Обычно $\Delta \approx 0,5 \pi D^2 / 4$, где D — диаметр окружности, описываемой ротором, следовательно,

$$S_r = 10^{-3} \frac{\pi D^2}{4} L \frac{n}{60}. \quad (10)$$

Если $D=50$ см, $n=1000$ об/мин, то $S_r=15 \cdot 10^3$ л/с. Эффективная быстрота откачки меньше S_r из-за наличия обратного потока воздуха:

$$S_0 = S_r - Q_{обр} / p_{вх} = S_r - U_3 (p_{вых} / p_{вх} - 1). \quad (11)$$

Здесь U_3 — пропускная способность зазоров, $p_{вых}$ и $p_{вх}$ — выходное и входное давления насоса. При молекулярном режиме $U_3 = 11,6 A_3 k$, где A_3 — общая площадь щелевых зазоров между двумя роторами, боковыми и торцовыми поверхностями роторов и стенками камеры; $k=0,2$ учитывает щелеобразный характер диафрагмы.

Предельный вакуум у двухроторных насосов достигает 10^{-2} (полный) и 10^{-3} Па (по воздуху), он содержит продукты масла из подшипников и из присоединенного ротационного насоса. Объединение двухроторного и масляно-ротационного насосов в один агрегат дает выгоду, так как первый из них обеспечивает большую быстроту откачки при малых давлениях, а второй позволяет получить большой перепад давлений, недостижимый с помощью одного двухроторного насоса.

Двухроторные насосы используют также в качестве механических бустеров, т. е. как промежуточные вспомогательные насосы между последовательно соединенными мощными высоковакуумными пароструйными насосами и низковакуумными масляно-ротационными насосами.

2. Особенности эксплуатации механических насосов

Используемые во всех лабораторных работах пластинчато-статорные насосы ВН-461 имеют масляное уплотнения. Масло ВМ-4, применяемое в качестве уплотняющего, представляет собой продукт вакуумной перегонки машинного масла, из которого откачаны

12-15 % низкокипящих фракций. При температуре ниже 15 °С масло в насосе загустевает, вязкость его увеличивается, что отрицательно сказывается на работе механических насосов (затрудняется вращение ротора и смазывание трущихся деталей).

При температуре выше 60 °С выделяются легколетучие фракции, что ухудшает предельный вакуум в системе. Вследствие местных перегревов масляной пленки в местах трения деталей также происходит разложение тяжелых молекул масла на более легкие, т. е. частичное изменение состава масла с постоянным образованием более летучих фракций (крекинг). Такие температурные особенности масла накладывают определенные ограничения на условия работы механических насосов: температура воздуха в помещении должна быть в пределах $10-45$ °С. При температуре окружающего воздуха ниже 10 °С включать насосы не рекомендуется.

В процессе работы механического насоса на внутренних стенках и на трущихся поверхностях появляются смолистые слои (осмаливание поверхности), которые могут привести к «заеданию» движущихся деталей насоса. Важным условием нормальной работы механических насосов является поддержание определенного уровня масла, чтобы масло полностью закрывало клапанное устройство. Необходимый уровень масла контролируется по специальному маслуказателю — окну в корпусе насоса.

Недостаток масла в насосе приводит к резкому ухудшению предельного вакуума. Избыток масла в камере также нежелателен, так как при включении насоса после продолжительного перерыва в работе или на систему с давлением, близким к атмосферному, может произойти выброс масла через выхлопной патрубок.

При включении механических насосов рекомендуется придерживаться следующего правила. Насосы запускать в работу только при закрытом входном вентиле, несколькими короткими включениями электродвигателя, при которых ротор поворачивается на один - два оборота.

После того как остаточный газ и масло удалены из камер насоса, двигатель включается на продолжительную работу. Входной вентиль открывают плавно, чтобы не допустить резкого вскипания и выброса масла. Нормальное уменьшение масла периодически восполняется через специальное заливное отверстие в крышке корпуса насоса.

Масляные механические насосы в нормальных условиях обычно работают достаточно надежно. Основные причины, вызывающие неудовлетворительную работу насосов, можно разделить на три группы: а) нарушение герметичности насоса и подводящих трубопроводов; б) попадание легко конденсирующихся паров жидкостей и влаги в вакуумную систему или насос; в) механические повреждения, царапины на внутренних поверхностях, заклинивание пластин и т. д.

В практике лабораторных работ неисправности, вызванные первыми двумя группами причин, наиболее вероятны. Для определения причин плохой работы механических насосов рекомендуется: а) произвести осмотр вакуумной системы и насоса, обращая особое внимание на уровень масла в насосе, отсутствие капель воды на корпусе насоса и на механические повреждения стеклянных деталей вакуумной системы, таких, как манометрические лампы, краны и т. д.; б) если при внешнем осмотре причины ухудшения вакуума не выяснены, следует определить характер натекания, т. е. выяснить, течь или газоотделение является причиной.

Можно сравнительно просто определить характер натекания, для чего необходимо снять так называемую кривую натекания. Для этого, откачав систему до предельного вакуума, закрывают вентиль к механическому насосу и снимают зависимость возрастающего давления в системе от времени. Используя полученную зависимость, легко найти полный поток натекания $Q(t)$.

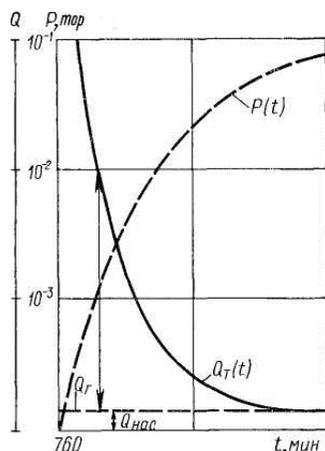


Рис. 1. Зависимости $p(t)$ и $Q_T(t)$ для определения герметичности системы

Подобная зависимость приведена на рис. 1. Нетрудно видеть, что по характеру кривой $Q_T(t)$ легко найти величину скорости натекания в систему и определить, течь или газоотделение играет роль в данном случае.

$$Q(t) = \frac{\Delta p}{\Delta t} V.$$

Действительно, поток натекания в систему практически не зависит от давления в системе и определяется лишь величиной отверстия, через которое атмосферный воздух попадает в откачиваемый объем. Однако поток газоотделения сильно меняется с давлением и уменьшается при приближении давления к давлению паров насыщения данного загрязнителя (масло, вода и т. д.). Поэтому суммарное натекание приближается к величине истинной течи, что и позволяет оценить ее.

При известных параметрах насоса, таких, как $p_{пр}$ и $S_H(p)$, а также скорости натекания системы можно решить вопрос о качестве работы механического насоса и принять меры по устранению причин отсутствия вакуума. В случае преобладания газоотделения следует разобрать вакуумную систему и с помощью растворителей устранить загрязнение. Если же преобладает натекание через отверстие, его находят и устраняют соответствующими способами. Когда же скорость общего натекания в систему лежит в допустимых пределах, а предельный вакуум в объеме хуже расчетного, то причиной является неисправность механического насоса.

В этом случае следует проверить работу клапанного устройства. При исправности клапана можно заменить или просушить масло в насосе. Последняя операция производится подачей сухого воздуха на вход насоса. Для насосов ВН-461 воздух подают через специальный натекатель.

Если замена или сушка масла не дала результатов, то, следовательно, произошло механическое повреждение насоса. Рассмотрим кратко возможные механические повреждения насосов и способы их устранения. Основной причиной механических неисправностей следует считать попадание посторонних предметов, например, мелких осколков стекла, в рабочую камеру насоса. При этом на поверхности ребра и уплотняющих пластинах появляются раковины и царапины, которые приводят к разгерметизации камеры сжатия. Иногда причиной разгерметизации служит осмаливание рабочих поверхностей окисленным маслом. Кроме того, возможны нарушения работы насоса вследствие заклинивания уплотняющих пластин и клапана на выпускном патрубке насоса, а также в результате износа валов, износа и поломки шарикоподшипников, разработки шпоночных пазов и эксцентрика, износа сальников. Эти неисправности легко обнаружить по изменению характерного стука

или шума работающего насоса. В некоторых конструкциях для насосов (например, ВН-461) такого рода неисправности легко устраняются при вскрытии крышки корпуса насоса. В других насосах неисправности устраняют при разборке насоса.

3. Расчетная часть

Большинство насосов, таких, как пароструйные турбомолекулярные, геттеро-ионные магниторазрядные имеют $P_{нач} < P_{атм}$, т. е. требуют предварительного разряжения в вакуумной системе включая насос.

Выбор вспомогательного насоса основан на том, что поток откачиваемых газов должен быть одинаковым в любом сечении вакуумной системы. Таким образом, поток газов Q одинаков в данный момент времени для основного и вспомогательного насосов, соединенных последовательно.

$$Q = S_n^{осн} P_1 = S_n^{всп} P_2,$$

где $S_n^{осн}$ — быстрота действия основного насоса при давлении P_1 на входе в основной насос; $S_n^{всп}$ — быстрота действия вспомогательного насоса при давлении P_2 на входе во вспомогательный насос.

Давление P_2 на входе во вспомогательный насос должно быть меньше $P_{нач}^{осн}$ и $P_{вып}^{осн}$ на выходе из высоковакуумного насоса, т. е. $P_{вып}^{осн}$ является наибольшим давлением на выходе, при котором еще работает основной насос ($P_{вып}^{осн}$ приводится в паспорте насоса). Т. о. для выбора вспомогательного насоса необходимо:

1) определить по характеристикам основного насоса тип вспомогательного насоса:

$$P_{нач}^{осн} \leq P_{пред}^{всп},$$

где $P_{нач}^{осн}$ — начальное давление основного насоса (приложение 1)

$$P_2 = (0,7 - 0,75) P_{вып}^{осн} \leq P_{пред}^{всп};$$

2) определить быстроту действия вспомогательного насоса из условия:

$$S_n^{всп} = \frac{Q_{max}^{осн}}{P_2},$$

где $Q_{max}^{осн}$ — максимальный поток газов, который может быть удален основным насосом.

$$S_{н.расч}^{всп} = \frac{Q_{max}^{осн} \cdot K}{P_2} = \frac{Q_{max}^{осн} \cdot K}{(0,7 - 0,75) P_{вып}^{осн}},$$

т. е.:

$$S_{н.расч}^{всп} = \frac{S_n^{осн} \cdot P_{max,расч}^{осн}}{(0,7 - 0,75) P_{вып}^{осн}} \cdot K,$$

где K — коэффициент использования насоса.

Для пароструйных и криогенных насосов $K=2$, для сорбционных насосов $K=4$, для механических $K=1,2$;

3) по расчетным параметрам и техническим характеристикам механических насосов выбрать размер вспомогательного насоса из условий:

$$P_{пред}^{всп} \leq P_{нач}^{осн}, P_{вып}^{осн}$$

$$S_n^{всп} \geq S_{н.расч}^{всп};$$

4) рассчитать проводимость магистрали, соединяющей насосы. Как видно из рис. 2, магистраль включает трубопровод длиной l диаметром 32 мм, электромагнитный клапан ДУ-32 (рис. 2).

Провести проверочный расчет и определить давление, которое обеспечивает вспомогательный насос в сечении выпускного патрубка основного насоса с учетом сопротивления трубопровода.

$$S_{о.}^{всп} = \frac{U + S_n^{всп}}{U \cdot S_n^{всп}},$$

$$P_{вып}^{осн} \geq \frac{Q_{max} (U + S_n^{всп})}{U + S_n^{всп}}$$

4. Содержание работы

Экспериментальная часть

1. Произвести разборку, осмотр, герметичную сборку насоса. Обратить внимание на конструкцию пластинчатого устройства и выхлопного клапана, состояние рабочих поверхностей элементов

насоса.

2. При закрытых входном вентиле 5 и напекателях 3 и 6, рис. 2, запустить насос несколькими короткими включениями электродвигателя. Визуально и на слух убедиться в его нормальной работе.

3. Плавно открыть входной вентиль и включить двигатель на продолжительную работу.

4. После нескольких минут работы насоса включить вакуумметр 1, снять зависимость $p(t)$ и определить быстроту откачки насоса методом постоянного объема.

5. По достижении предельного вакуума закрыть входной вентиль и при разных степенях открытия напекателя 3 снять зависимость возрастающего давления в системе от времени.

6. Используя полученную зависимость, найти полный поток напекания и по характеру кривой $Q_r(t)$ определить, течет или газоотделение играет роль в данном случае.

7. Произвести выключение вакуумной системы в следующей последовательности: выключить вакуумметр, выключить насос, открыть напекатель 6.

Расчетная часть

Выбор и согласование насосов, работающих последовательно

По техническим характеристикам основного насоса (по заданию преподавателя) определить:

1. Тип вспомогательного насоса.

2. Рассчитать максимальный поток газа $Q_{\max}^{\text{осн}}$, удаленный основным насосом

$$Q_{\max}^{\text{осн}} = P_{\max, \text{раб}}^{\text{осн}} S_n^{\text{осн}}.$$

3. Рассчитать быстроту откачки вспомогательного насоса.

4. Определить тип вспомогательного насоса и привести основные характеристики этого насоса.

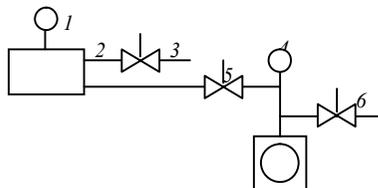


Рис. 2. Схема лабораторной установки

5. Рассчитать проводимость магистрали, соединяющей насосы.

6. Провести проверочный расчет и определить давление, которое обеспечивает вспомогательный насос в сечении выпускного патрубка основного насоса с уче-

том соединяющей насос магистрали.

Отчет должен содержать

1. Краткие сведения области применения насосов.
2. Параметры и характеристики вакуумных насосов.
3. Принцип действия, механизм конструкции насосов.
4. Практические указания по эксплуатации насосов и содержанию экспериментальной части работы.
5. Методику выбора и согласования насосов.
6. Расчетную часть по выбору и согласованию насосов.

Контрольные вопросы

1. Какое масло применяется для уплотнения во вращательных механических насосах?

2. При какой температуре окружающей среды допускается работа механических насосов, и какими причинами она ограничивается?

4. Когда и почему необходимо ограничивать входное давление механических насосов?

5. К чему может привести попадание влаги в механический насос?

6. Какое предельное разрежение получается с помощью масляно-ротационных насосов, и чем оно ограничено? Каков характер изменения быстроты откачки насоса в зависимости от давления?

7. Каков принцип работы пластинчато-статорных насосов?

8. Каков принцип работы двухроторных насосов?

9. Для чего применяется система газового балласта в механических насосах?

10. Каковы основные причины ненормальной работы механических насосов?

11. Перечислите способы обнаружения неисправностей и их устранения в механических насосах.

12. Методика согласования насосов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника [Текст]: учебник для вузов по специальности "Электронное машиностроение" направления "Электроника и микроэлектроника" / Л. Н. Розанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2007. – 391 с.

2. Вакуумная техника [Текст]: справочник / К. Е. Демихов, и др.; общ. ред. Ю. В. Панфилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2009. – 590 с.

3. Шешин, Е. П. Вакуумные технологии [Текст]: учеб. пособие / Е. П. Шешин. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 504 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1, 2
по дисциплине «Вакуумная техника»
для студентов направления подготовки
11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»,
профиля «Электронное машиностроение»
очной формы обучения

Составители Липатов Геннадий Иванович
Николаева Елена Петровна
В авторской редакции
Компьютерный набор М.В. Желтотрубовой

Подписано к изданию 11.03.2016.
Уч.-изд. л. 2,1.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный техниче-
ский университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14