

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра физики твердого тела

А.В. Покоев

ПРАКТИКУМ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Учебное пособие

*для студентов дневного и вечернего отделений физического факультета
специализации «Физика металлов»*

Издательство «Самарский университет»

2001

ББК 34.2
П 485
УДК 530.1

Покоев А.В. Практикум по вакуумной технике: Учебное пособие. Самара: Издательство «Самарский университет», 2001. 40 с.

Практикум содержит описания пяти лабораторных работ по вакуумной технике, составленных в соответствии с программой лекционного курса по вакуумной технике, читаемого для студентов старших курсов физического факультета Самарского государственного университета.

В настоящий практикум включены основные лабораторные работы, которые помогут студентам закрепить теоретический материал по соответствующему лекционному курсу, ознакомят их с основными существующими лабораторными методами получения и измерения вакуума, элементами конструирования вакуумных систем, привьют им навыки самостоятельной работы на современных лабораторных вакуумных установках. Практикум послужит полезным методическим руководством студентам при выполнении курсовых и дипломных работ экспериментального характера, связанных с использованием вакуума.

Предназначен для студентов 3-5 курсов физического факультета, специализирующихся по физике твердого тела.

ББК 34.2

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.А. Дроздов

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ОДНОПОСТОВОЙ УСТАНОВКИ ВУП-4

Цель работы - изучить устройство вакуумной установки ВУП-4 и овладеть практическими навыками работы на ней при вакуумировании объектов.

Теоретическая часть

Описание вакуумной однопостовой установки ВУП-4

Вакуумная установка ВУП-4 предназначена:

- для осуществления операций электронно-микроскопического препарирования, связанных с распылением материалов в вакууме. Прибор может быть использован для металлизации материалов с помощью ионной бомбардировки;

- для работы в стационарных лабораторных условиях при температуре окружающего воздуха от 15 до 25°C и относительной влажности не более 80%. Наличие в помещении паров агрессивных веществ не допустимо.

Основные технические данные

1. Питание прибора осуществляется от трехфазной сети переменного тока. Напряжение питающей сети - 220 ± 22 В.
2. Частота колебаний питающей сети - $50 \pm 0,5$ Гц.
3. Масса прибора - не превышает 500 кг.
4. Габаритные размеры - 875x1447 x 1265 мм.
5. Потребляемая мощность - не превышает 3 кВт.

Основные параметры и характеристики

1. Остаточное давление в рабочем объеме при охлаждении ловушки водой - $1,3 \cdot 10^3$ Па. Время откачки - 15 мин.
2. Остаточное давление в рабочем объеме при охлаждении ловушки жидким азотом - $1,3 \cdot 10^4$ Па. Время откачки - 30 мин.
3. Ток накала испарителей до 200 А.
4. Температура столика для охлаждения объектов - до -150°C. Время охлаждения - до 30 мин.
5. Температура столика для нагрева объектов - до 100°C. Время нагрева - 15 мин.

6. Напряжение на выходе высоковольтного выпрямителя без нагрузки - 10 кВ.

7. Максимальный ток тлеющего разряда - 50 мА.

Циклограмма работы клапанов

Кнопки управления	Режим работы и обозначение клапанов	МВ	МВ2	МВ3
ВВ	Высокий вакуум в рабочем объеме	1 0,3		
<i>ГКБ</i>	Остановка прибора <i>Щ>Щ&УР • ~Ш^*ШлХ</i>	3-0 с	с	

Примечание. 0 - клапан открыт; 3 - клапан закрыт.

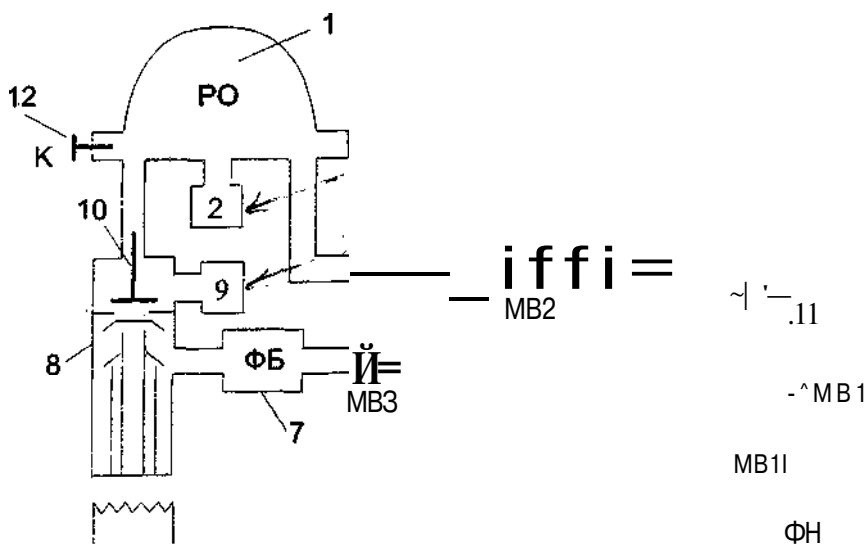


Рис. Схема вакуумной системы: 1 - рабочий объем (РО); 2 - вакуумметр ПМТ-2; 3 - вентиль откачки РО на ПВ - МВ2; 4 - вентиль отсекающий - МВ1; 5 - форвакуумный насос (ФН) 2НВР - 5М; 6 - вентиль откачки форбаллона - МВ3; 7 - форбаллон; 8 - паромасляный насос ПМИ - 2; 9 - вакуумметр ПМИ - 2; 10 - высоковакуумный клапан - ВВК; 11 - вакуумметр ПМТ - 2; 12 - кнопка напуска воздуха в РО - К

Вакуумная система

Вакуумная система служит для создания требуемого вакуума в рабочем объеме (см. рисунок).

Основными частями системы являются:

1. Рабочий объем, в котором осуществляются все операции (1).
2. Высоковакуумный насос (8) с азотной и водяной ловушками.
3. Насос предварительного вакуума (5).
4. Буферный баллон (форбаллон) (7).
5. Магнитные вентили МВ1, МВ2, МВ3.
6. Термопарная манометрическая лампа (2) типа ПМТ-4.
7. Ионизационная лампа (9) типа ПМИ-2.

Конструкция вакуумной системы обеспечивает 4 различных режима работы при эксплуатации прибора:

- а) режим «ПВ» это откачка рабочего объема на предварительный вакуум;
- б) режим «ВВ» - откачка рабочего объема на высокий вакуум;
- в) режим «О» - остановка;
- г) режим «К» - напуск воздуха в рабочий объем.

Паромасляный насос 8 откачивается форвакуумным насосом 5 через магнитный вентиль МВ3 и форбаллон 7. Паромасляный насос 8 отсекается от рабочего объема 1 с помощью высоковакуумного клапана 10. Напуск воздуха в РО осуществляется с помощью кнопки К. Измерение вакуума в РО производится манометрической лампой 2.

Напуск воздуха в форвакуумный насос производится после окончания работы автоматически.

Пульт управления

На установке имеется два пульта управления (ПУ): ПУ правой и левой стоек.

ПУ правой стойки

На ПУ правой стойки размещены схемы блока измерения вакуума и вакуумной системы. Блок измерения вакуума предназначен для измерения остаточного давления в рабочем объеме прибора, При измерении низкого вакуума $-1 \cdot 10^{13}$ Тор используется термопарный манометрический преобразователь ПМТ-4М.

Перед началом измерений нажимается кнопка «ПМТ-4М» и измеряется ток накала. При необходимости регулировка тока осуществляется резистором «Накал ПМТ-4М» (ток накала 120-130 мА),

Для измерения давления нажимается кнопка «ФВ». Показания прибора соответствуют значениям термо ЭДС. Давление ниже \sim КГ" Тор измеряется с помощью ионизационного манометра, изготовленного на основе преобразователя ПМИ-2.

Перед началом измерений нажимается кнопка «Прогрев», при этом сетка лампы ПМИ-2 подключается к выводам обмотки питающего трансформатора. На сетку подается также напряжение отрицательного смещения, чем обеспечивается защита от перегрузок цепи стабилизатора тока эмиссии.

Накал катода ПМИ-2 питается от стабилизатора тока эмиссии, который автоматически включается, когда нажимается любая из кнопок, связанных с измерителем высокого вакуума. При этом кнопки «ПМТ-4М» и «ФВ» автоматически отключаются, и автоматически включается цепь питания катода.

Контроль тока эмиссии осуществляется нажатием кнопки «Эмиссия мА». Ток эмиссии величиной 5 мА устанавливается резистором «Эмиссия мА». Величина ионного тока в цепи коллектора преобразователя ПМИ-2 однозначно определяет давление в рабочем объеме.

Измерение этого тока осуществляется с помощью катодного вольтметра. Предварительно устанавливается нуль шкалы с помощью резистора «0». В этом случае выравниваются потенциалы катодов лампы Л-2 и заземленных сеток. Установка требуемого предела измерений осуществляется нажатием на пульте управления одной из соответствующих кнопок: « 10^{-4} », « 10^{-5} », « 10^{-6} », « 10^{-7} ».

Коммутация режимов работы вакуумной системы

Коммутация осуществляется кнопочными переключателями, исполнительными элементами которых являются электромагнитные вентили МВ-1 - МВ-3. При нажатии кнопки «ФН» включается пускатель двигателя форвакуумного насоса. Через 1-2 секунды открывается вентиль МВ-1. Вентиль МВ-3 открывается нажатием кнопки «ВВ» тоже через 1-2 секунды.

ПУ левой стойки

На левом ПУ размещена схема блока управления столика образца с маятниковым устройством. С помощью резисторов R4, R6 (см. электрическую схему) устанавливаются скорость и период вращения столика объектов. Положение кнопок «Установка угла» и «Наклон»

устанавливаются нажатием клавиш с соответствующими градуировками:

Знак **O** обозначает установку столика образца под углом к распыляемому веществу при повороте столика против часовой стрелки; знак **W** - по часовой стрелке. Знак **Ю/** означает колебания столика.

Стойка левая

В левой стойке прибора размещен блок питания нагревателя и охладителя образцов. Ручки управления блоков выведены на ПУ левой стойки.

Стойка правая

В правой стойке расположен накальный трансформатор для питания испарителей, автотрансформатор для регулировки канала испарителей, электромагнитные вентили МВ-1 - МВ-3, датчики измерителей вакуума, штепсельные разъемы для подключения ПУ и левой стойки прибора. На пульте правой стойки устанавливается индикатор толщины пленок.

Экспериментальная часть

Порядок работы

Прежде чем приступить к работе на установке ВУП-4, необходимо ознакомиться с описанием прибора, с инструкцией по эксплуатации и пройти инструктаж по технике безопасности у преподавателя. Во время работы на приборе в помещении около него должно находиться не менее 2-х человек, прошедших инструктаж и получивших допуск к работе.

1. Включение прибора и получение высокого вакуума

Нажмите кнопку «Сеть», при этом должна загореться сигнальная лампочка, находящаяся рядом с кнопкой;

проверьте положение высоковакуумного клапана и клапана воздуха «К»: они должны быть в закрытом положении;

- нажмите кнопку «ФН», а через 2-3 минуты включите измеритель вакуума кнопкой «ПВ». При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампочки, находящиеся под кнопками;

- откройте вентиль подачи воды в установку;
- откачайте рабочий объем до давления $\sim 10^{-2}$ - 10^{-3} Торр. Измерение давления остаточного газа проводится с помощью индикатора вакуума и манометрической лампы ПМТ-4М, присоединенной к РО. Для этого:

а) включите «Индикатор вакуума»;

б) нажмите кнопку «ПМТ-4М», прогрейте прибор (~ 10 мин) и установите ток согласно паспорту датчика и калибровке лампы;

в) нажмите кнопку «ФВ» и определите вакуум согласно градуировочной кривой датчика;

- открыть вентиль подачи воды к дифнасосу;

- после достижения указанного вакуума ($\sim 10^{-2}$ - 10^{-3} Торр) нажмите кнопку «ВВ»; $III > \backslash K \wedge U \wedge (Q)$

- после 20-30 минут откачки открыть ручной высоковакуумный клапан;

- замерить вакуум в рабочем объеме и, если он недостаточен, продолжить откачку до значений $\sim 10^{-2}$ - 10^{-3} Торр"

- включить кнопку «ДН»; через 30-40 минут стрелка термометра должна зашкалить, что будет свидетельствовать о достижении рабочего режима насоса и высокого вакуума;

- измерить высокий вакуум в РО. Для этого:

а) нажмите кнопку «ПРОГ» и выдержите в этом режиме 10-15 мин.;

б) нажмите кнопку «ЭМИС» и установите стрелку прибора на 5мВ;

в) нажмите кнопку «0» и установите «0» на измерительном приборе;

г) нажмите кнопку «Ю⁻⁴». Если стрелка измерительного прибора показывает менее 1 мВ данного диапазона, нажмите «Ю⁻⁵» и т.д.

При необходимости получения более высокого вакуума залить жидким азотом ловушку.

2. Смена объекта в рабочем объеме при работающем дифнасосе

Необходимо закрыть высоковакуумный ручной клапан;

- выключить измеритель вакуума в РО;

- открыть клапан напуска воздуха «К»;

- открыть колпак и произвести необходимые операции.

Для повторного получения высокого вакуума в рабочем объеме необходимо:

- опустить и уплотнить легким нажатием колпак РО;

- закрыть клапан напуска воздуха К;

включить кнопку «ПВ». Через 5-10 минут включить индикатор предварительного вакуума;

- после достижения вакуума -Ю-МО³ Тор нажать кнопку «ВВ» и через ~1 мин. открыть высоковакуумный ручной клапан;
- произвести замер давления индикатором высокого вакуума.

3. Выключение прибора

Для выключения прибора необходимо:

- выключить диффузионный насос, нажав кнопку «ДН»;
через 20-30 минут, убедившись по показаниям вакуумметра о снижении вакуума до уровня предварительного вакуума (т.е. об остывании диффузионного насоса), закройте высоковакуумный клапан;
- нажмите кнопку «Индикатор вакуума», при этом должна погаснуть сигнальная лампочка;
нажмите кнопку «0», «ФН», «Сеть», при этом должны погаснуть соответствующие лампочки;
- закройте вентиль подачи воды к дифнасосу;
- выключите общий рубильник.

В этом состоянии установка должна находиться до следующего включения (т.е. внутри установки сохраняется предварительный вакуум для уменьшения газопоглощения воздуха внутренними частями установки).

4. Испарение вещества

После получения высокого вакуума в соответствии с пунктом 1 настоящего раздела, произвести сборку устройства для испарения вещества.

Для этого необходимо:

- установить испаритель с распыляемым материалом и столик образцов;
- откачать РО до высокого вакуума;
установить штеккер испарителей на горизонтальном пульте в положение, соответствующее испарителю, с которого будет испаряться материал (на испарителях и переключателях имеются соответствующие гравировки);
- нажать кнопку «Исп»;
рукояткой трансформатора «Рег. напряжения», располагающейся на горизонтальном ПУ, плавно увеличить ток накаливания до значения, обеспечивающего полное испарение напыляемого материала;
- выключить испаритель в обратном порядке и охладить его.

Замечания по эксплуатации установок ВУП-4

1. Термовакuumметр включить только после того, как в камере создано предварительное разряжение (через ~1 - 2 мин).

2. После окончания работ вакуумную систему установки оставлять под вакуумом.

3. При включении диффузионного насоса давление в системе сначала несколько увеличивается, что не является неисправностью. Это объясняется тем, что, с одной стороны, при нагреве масла в насосе начинают выделяться растворенные в нем газы, а, с другой - еще не произошла разгонка масла по фракциям.

Техника безопасности при работе на установке ВУП-4

1. На включенной вакуумной установке запрещается производить любые профилактические работы

2. Во время работы установки все дверцы панели установки должны быть закрыты.

3. Все работы на приборе должны производиться с соблюдением правил техники безопасности.

4. Любые работы с вакуумом производить только с защитным колпаком РО.

5. У работающей вакуумной установки должно быть организовано постоянное дежурство.

Контрольные вопросы и задания

1. Рассказать о назначении и устройстве установки ВУП-4.

2. Как произвести смену объекта под колоколом при работающем диффузионном насосе.

3. Какие меры следует принять при:

- а) обнаружении течи под колоколом на работающей установке;
- б) внезапном прекращении подачи воды в вакуумную установку;
- в) внезапном отключении питания работающей установки?

Ответы необходимо обосновать.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством вакуумной установки ВУП-4 по данному описанию, а затем непосредственно на установке.

2. Ознакомиться с порядком работы на установке ВУП-4. Подумать и обосновать последовательность операций управления при

получении высокого вакуума, смене объектов под колоколом, выключении установки и т.д.

3. Получить инструкции по технике безопасности у преподавателя. Под наблюдением преподавателя освоить порядок работы на установке.

4. Сдать зачеты по правилам техники безопасности и на допуск к самостоятельной работе на установке ВУП - 4.

5. Ответить на контрольные вопросы и выполнить задания описания.

Задания

1. Дать характеристику состояния установки перед включением и выключением.

2. Открыть колпак РО и подготовить установку к получению тонких пленок.

3. Получить высокий вакуум в РО.

4. Сменить объекты в РО.

5. Получить высокий вакуум.

6. Получить тонкую пленку.

7. Охладить испарители и выключить установку.

Список литературы

1. Паспорт и техническое описание установки ВУП - 4. Сумы, 1979.

2. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы вакуумной техники. М.: Высшая школа, 1967.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА

Цель работы - изучить теоретические основы процесса откачки и экспериментально определить быстроту откачки вакуумной установки ВУП-4 методом постоянного объема.

Теоретическая часть

Быстротой откачки S_0 объекта (например, вакуумной камеры) называется объем газа, поступающий в единицу времени из объекта в вакуум-провод при давлении P_i в откачиваемом объекте.

Быстрота откачки объекта с изменением в нем давления меняется. Поэтому для определения быстроты откачки S_0 надо брать малый промежуток времени dt , в течение которого из откачиваемого объекта в вакуум-провод входит объем dV_0 газа, так что изменением давления в объекте можно пренебречь:

$$S_{0i} = \frac{dV_0}{dt} \text{ при давлении } P_i.$$

Быстротой действия насоса S_H называется объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени при данном впускном давлении. Быстрота действия насоса также величина переменная, поэтому по определению:

$$S_H = \frac{dV_H}{dt} \text{ при давлении } P_H,$$

где dV_H - объем газа, поступивший в насос за время dt при давлении P_H .

Аналогично можно определить быстроту откачки S при давлении P в любом сечении вакуум-провода:

$$S = \frac{dV}{dt} \text{ при давлении } P \text{ в данном сечении.}$$

Рассмотрим, как изменяется давление в объекте с течением времени. Пусть V - объем откачиваемого объекта, P - давление газа в объекте. При работающем насосе по истечении времени dt из откачиваемого объема будет удален объем газа dV , а давление понизится на величину dP . Предположим, что давление и температура всех частей вакуумной системы постоянны, тогда в силу $PV = \text{const}$ можно записать

$PV = (P+dP)(V+dV) = PV + PdV + VdP + dPdV$;
пренебрегая $dPdV$, получим

$$pdV = -VdP \quad \text{и} \quad dV = -V \frac{dP}{P}$$

Разделим обе части на dt

$$s = \frac{dV}{dt} = - \frac{VdP}{P dt} \quad \text{0)}$$

Рассмотрим теоретически возможный случай, когда быстрота откачки объекта S постоянна (идеальный насос). Тогда после разделения переменных в (1) и интегрирования в пределах давлений от P_0 до P_i , соответствующих моментов времени t_0 и t_i , получим

$$s = \frac{-V_{i0} \ln \frac{P_i}{P_0}}{t_i - t_0} = \frac{2.3V}{h - t_0} \frac{P_0 - P_i}{P_0} \quad \text{(2)}$$

Полученная формула (формула Геде) позволяет вычислить среднюю быстроту действия насоса в интервале от P_0 до P_i .

Из формулы (2) найдем закон уменьшения давления в откачиваемом объекте:

$$P = P_0 \exp(-it). \quad \text{(3)}$$

Следовательно, идеальным насосом никогда не может быть достигнут совершенный вакуум.

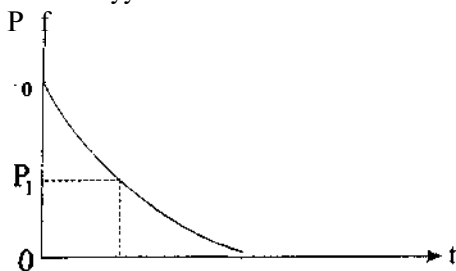


Рис. 1. Кривая откачки

На рис. 1 изображена зависимость $P=P(t)$, которую называют кривой откачки. Быстроту действия реальных насосов можно считать постоянной лишь для интервала давлений, протяженность которого зависит от типа насоса. Кроме того, любой насос может понизить давление в объекте лишь до некоторого предельного минимального значения. Величина предельного давления P_{∞} (предельного вакуума) определяется наличием негерметичностей в вакуумной системе, вредных пространств, давлением паров рабочих жидкостей и т. д.

Если учитывать предельное давление, формула (3) принимает вид:

$$P = (P_i - P_{\infty}) \exp\left(-\frac{S}{V} t\right) + P_{\infty} \quad \text{(4)}$$

где P_{00} - предельное давление. Кривая откачки в этом случае асимптотически приближается не к нулевому значению, а к $P=P_{00}$.

Средняя быстрота откачки объекта в интервале $P_0(t_0) - P_i(t_i)$ рассчитывается по формуле

$$S = \frac{2.3V}{g} \lg \frac{P_0}{P_i} - \frac{E}{m} \quad (5)$$

Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Получить задание у преподавателя.
3. После инструктажа по технике безопасности на вакуумных установках экспериментально измерить кривую откачки и определить быстроту откачки вакуумной установки в соответствии с выданным заданием.
4. Обработать результаты измерений с использованием программы Microsoft Excel, выполнить их анализ, сформулировать выводы.
5. Оформить отчет и отчитаться по лабораторной работе.

Список заданий

Задание № 1. *Определить быстроту откачки РО установки ВУП-4, производя откачку форвакуумным насосом по низковакуумной линии.*

Измерения проводить следующим образом. Одновременно с подключением форвакуумного насоса к вакуумной камере с помощью клапана МВ2 включается секундомер и измеряется зависимость $P=P(t)$.

Далее строится кривая откачки в координатах $\lg P - t$, на которой находят участки линейного изменения зависимости $\lg P_0(t_0) - \lg P_i(t_i)$ и по формуле Геде определяют быстроту откачки РО для небольших промежутков времени $t_0 - t_i$ на начальной, средней и конечной стадиях откачки. Объем РО вакуумной установки принять равной $V=18$ л.

Задание № 2. *Определить быстроту откачки вакуумной камеры установки ВУП-4, производя откачку форвакуумным насосом по высоковакуумной линии.*

Схема измерений аналогична заданию № 1.

Задание № 3. Определить быстроту откачки вакуумной камеры установки ВУП-4, производя откачку форвакуумным насосом по двум линиям вакуум-проводов - низко- и высоковакуумной.

Схема измерений аналогична заданию № 1. После обработки результатов измерений, выполнить анализ соотношения величины проводимостей вакуумопроводов заданий № 1-3.

Задание № 4. Откачать камеру установки ВУП-4 до высокого вакуума (с помощью диффузионного насоса) и определить быстроту откачки камеры диффузионным насосом.

При выполнении данного задания отсчет времени производить от момента открытия высоковакуумного клапана 10 (см. рисунок лабораторной работы № 1), соединяющего работающий диффузионный насос с откачиваемой камерой.

Сравнить экспериментально измеренную быстроту откачки камеры с быстротой действия насоса (по паспортным данным). Объяснить их различия.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности явления переноса в условиях высокого вакуума?
2. Какие причины обуславливают величину пропускной способности вакуум-провода?
3. Как влияет пропускная способность вакуум-провода на скорость откачки объекта?
4. Получить формулы для расчета пропускной способности вакуум-проводов следующих конструкций (см рис.2).

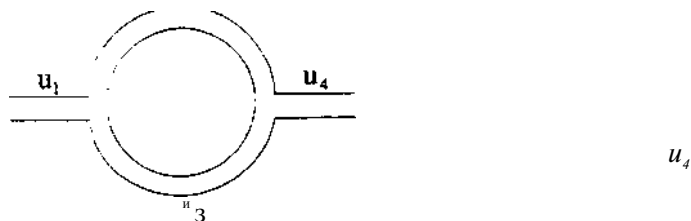


Рис. 2. Схема некоторых конструкций вакуум-проводов

5. Почему быстрота откачки насоса зависит от давления?

Список литературы

1. Шампе Р. Физика и техника электровакуумных приборов. М.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Королев Б.И. Основы вакуумной техники. М. : Энергия, 1975.
3. Ворончев Г.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. М.: Высшая школа, 1967.
4. Левин Г. Основы вакуумной техники. М: Энергия, 1969.
5. Паспорт и техническое описание установки ВУП - 4. Сумы > 1979.

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ДИФФУЗИОННОГО ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА

Цель работы - изучить устройство и принцип действия диффузионного насоса (типа Н-1С-2 или ЦВЛ-100).

Теоретическая часть

1. Принцип действия и общая классификация пароструйных насосов

В 1993 году исполнилось 80 лет со времени изобретения ртутного пароструйного насоса В. Геде. Через три года после этого изобретения И. Лэнгмюр придумал насосу тот вид, который он в основном сохраняет до настоящего времени. Его общая схема привела к конструкциям насосов, обладающих очень большими скоростями откачки.

Благодаря небывало большим скоростям откачки в области высокого вакуума пароструйный диффузионный насос совершил революцию в применении высокого вакуума как в ряде технологических процессов, так и во многих экспериментальных физических исследованиях. Несмотря на изобретение новых типов насосов, обладающих преимуществами для некоторых определенных целей, диффузионный насос остается стандартным средством получения вакуума в широком диапазоне давлений от $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Тор до наименьших, достигаемых в настоящее время ($\sim 10^{-m}$ Тор).

Принципиальная схема простейшего пароструйного насоса Лэнгмюра, работа которого основана на откачивающем действии паровой струи, показана на рис. 1. Источником пара является рабочая жидкость (ртуть или вакуумное масло), залитая в кипятильник 1, которая нагревается до рабочей температуры нагревателем 2.

Откачиваемый газ, поступающий через выпускной патрубков 9, захватывается в рабочей камере струей пара и увлекается к охлажденным стенкам рабочей камеры, где он конденсируется, и конденсат по сливной трубке 8 с затвором возвращается в кипятильник, а газ, сжатый струей, выбрасывается через выпускной патрубков 10, откачиваемый форвакуумным насосом (на рисунке не показан).

Механизм увлечения газа струей в пароструйном насосе зависит от режимов течения откачиваемого газа и истечения паровой струи. В зависимости от области рабочих давлений различают три вида пароструйных насосов, отличающихся механизмом увлечения газа,

конструктивным оформлением и применяемыми рабочими жидкостями:

1. Эжекторные - $760-10^{-2}$ Тор;
2. Бустерные - $10-10^{-10}$ Тор;
3. Диффузионные - ниже 10^{-14} Тор.

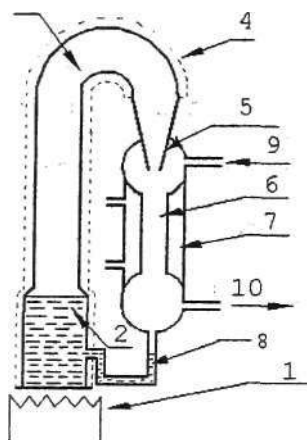


Рис. 1. Схема простейшего пароструйного вакуумного насоса: 1 - нагреватель; 2 - кипятыльник; 3 - паропроводящая труба; 4 - теплоизоляция; 5 - сопло; 6 - рабочая камера насоса; 7 - холодильник; 8 - труба для стока конденсата в кипятыльник; 9 - вход откачиваемого газа; 10 - выход откачиваемого газа

На рисунке 2 схематически показаны три механизма увлечения газа паровой струей. В области высоких впускных давлений насоса $760-10^{-2}$ Тор струя пара должна иметь достаточно большую плотность; в зависимости от расхода пара через сопло, режим его истечения может быть либо турбулентным (а), либо вязкостным (б).

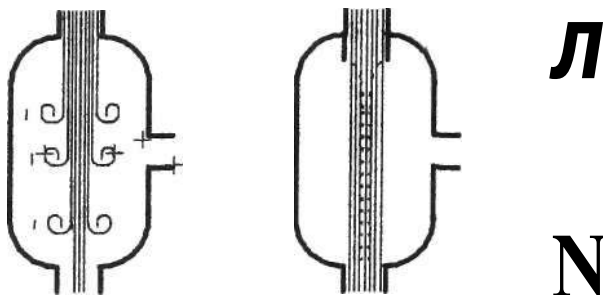


Рис. 2. Механизмы увлечения газа паровой струей: а - турбулентный захват газа в эжекторных насосах при высоких давлениях газа (260-10 Тор); б - вязкостный захват газа при малой диффузии газа в струю эжекторных насосов при давлениях 10^2 - 10^3 Тор, заметная диффузия в достаточно плотную струю газа с вязкостным захватом в бустерных насосах при давлении 10^3 - 10^4 Тор; в - диффузия молекул в струю малой плотности в диффузионных насосах при давлении $\sim 10^{-4}$ Тор

При турбулентной струе увлечение газа происходит в основном благодаря перемешиванию газа с вихреобразно движущейся массой струи, происходит также и вязкостное увлечение (за счет трения граничных слоев струи и прилегающих слоев газа) и некоторая диффузия газа в струю, однако роль последних двух факторов незначительна.

По мере уменьшения расхода пара через сопло роль вязкостного увлечения увеличивается, а турбулентного уменьшается, и, наконец, при ламинарной струе пара увлечение газа осуществляется в основном за счет вязкостного захвата и частично диффузии.

При дальнейшем понижении давления откачиваемого газа плотность струи должна быть еще меньше, и при давлении $\sim 10^{-4}$ Тор, когда длина свободного пробега молекул становится соизмеримой с размерами рабочей камеры насоса, вязкостное взаимодействие практически исчезает, и механизм увлечения газа целиком определяется диффузией молекул газа в струю, где молекулы в результате столкновения с частицами пара получают составляющую скорости в направлении струи.

Эжекторные, бустерные и диффузионные насосы отличаются не только режимами работы, но и конструкционно.

Эжекторные насосы используются в основном в областях низкого вакуума и поэтому далее не рассматриваются.

Бустерные насосы используются для откачки больших количеств газа при давлении на впуске 10^{-4} Тор. и сравнительно высоком выпускном давлении, достигающем у отдельных насосов до нескольких Тор. Название бустерные (вспомогательные) они сохранили с тех пор, когда использовались на выходе крупных диффузионных насосов.

В отличие от эжекторных и бустерных насосов, работающих при высоких впускных давлениях, диффузионные насосы для устойчивой работы требуют создания предварительного вакуума (форвакуума) на выходе порядка долей Тор.

2. Паромасляный диффузионный насос

Схематическое устройство типичного паромасляного диффузионного насоса показано на рис. 3. Использование масла в качестве рабочей жидкости вносит ряд особенностей в конструкцию, обеспечивающую фракционирование масла. Вакуумные масла не однородны и состоят из нескольких фракций, имеющих различную температуру кипения. В диффузионных паромасляных насосах предусмотрено автоматическое фракционирование (разделение) масла на фракции, причем тяжелые фракции (с высокой температурой кипения и низким давлением насыщенного пара) направляются в сопло высоковакуумной ступени откачки (диффузионное сопло), чем обеспечивается низкое остаточное давление и высокое быстродействие насоса в целом, а легкие фракции (с низкой температурой кипения и высоким давлением насыщенного пара) направляются в сопло последней ступени (обычно это парозежекторное сопло), обеспечивая нормальную работу насоса при высоком впускном давлении остаточного газа. Такие насосы называются фракционирующими или разгоночными. В нижней части насоса находится испаритель 2. Пар поднимается вверх по концентрическим паропроводам, включающим систему трех кольцевых" диффузионных сопел 6. Верхнее сопло предназначено для работы при наиболее низком давлении.

Над этим соплом находится водоохлаждающий маслоотражатель 3, а выше отражателя обычно устанавливается азотная ловушка 4. Маслоотражатель служит для конденсации рабочей жидкости и возвращения ее в испаритель. В насосе, изображенном на рис. 3. применен отражатель шевронного типа. Ловушки представляют собой охлаждаемые сжиженными газами поверхности, на которых удерживаются газы и пары, в частности, конденсированные пары рабочей жидкости.

Пар направляется диффузионными соплами вниз по направлению к водоохлаждаемым стенкам и выпускному отверстию насоса. Откачиваемый газ диффундирует в струю пара рабочей жидкости, и его молекулы под действием молекул струи получают импульс в том

же направлении. Здесь пар конденсируется, масло стекает в испаритель, а откачиваемый газ струей пара эжекторной ступени 7 переносится в форвакуумную линию 5.

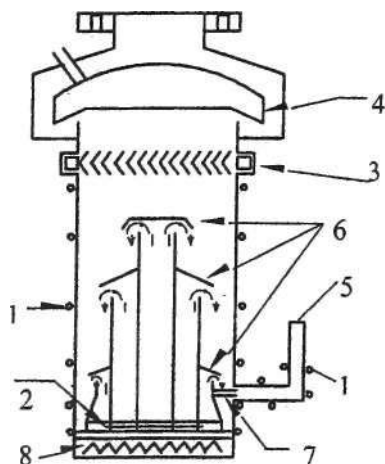


Рис. 3. Схема устройства паромасляного разгонного диффузионного насоса: 1 - змеевик водяного охлаждения; 2 - фракционирующий испаритель; 3 - маслоотражатель; 4 - охлаждаемая ловушка; 5 - форвакуумная линия; 6 - диффузионные сопла (1, 2 и 3 ступеней); 7 - эжекторное сопло; 8 - нагреватель

Конфигурация сопел в насосе имеет принципиальное значение, так как в них происходит преобразование энергии давления пара в кинетическую энергию струи. От формы сопел зависят скорость, плотность и степень рассеивания струи. На рис. 4 и 5 приведены некоторые конструкции сопел.

Фракционирование масла осуществляется с помощью лабиринтных колец или углублений в дне испарителя, удлиняющих путь масла (на рис. 3 не показаны) до поступления в центральную зону кипятильника, откуда питается паром высоковакуумное диффузионное сопло первой ступени, так что легкие фракции успевают испариться на периферии кипятильника, откуда они поступают на второе и третье диффузионные и эжекторное сопла.

Сконденсировавшееся на стенках насоса масло обогащено откачиваемым газом. Конструкция диффузионного насоса (рис. 3) предусматривает процесс "самоочистки" масла или его обезгаживания. Сначала масло стекает по водоохлаждаемым стенкам насоса, а на

заключительной стадии своего пути - по нагретым стенкам около испарителя. Взаимодействие тонкой пленки масла с нагретыми стенками создает благоприятные условия для выделения и испарения растворенных газов из масла и их откачки до попадания масла в испаритель.

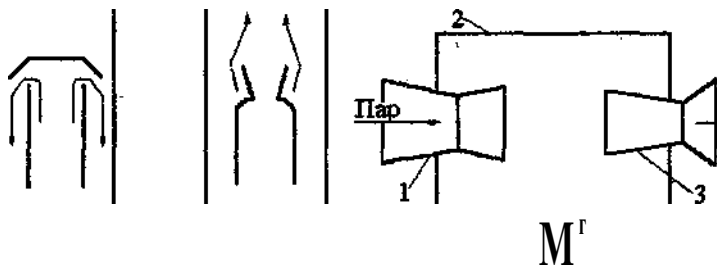


Рис.4. Диффузионное сопло:

а - зонтичного типа;

б - сопло Лаваля

Рис.5. Эжекторное сопло:

1-сопло; 2 - приемная камера;

3 - диффузор и камера смешения

3. Теоретический анализ явлений в диффузионном насосе (по Жеккелю)

Для анализа явлений, происходящих при работе диффузионного насоса, коническую поверхность струи пара можно заменить цилиндрической (рис. 6).

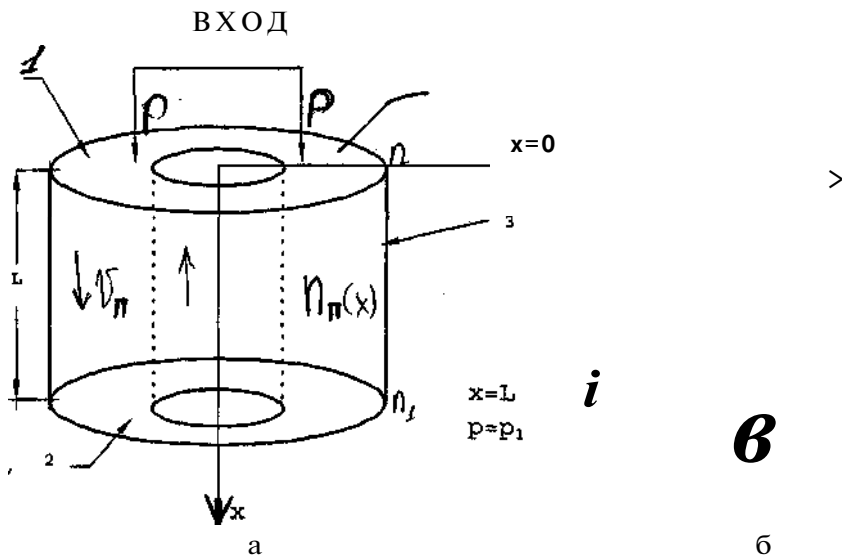


Рис. 6. Принцип работы диффузионного насоса: а - идеализированная цилиндрическая струя пара; б - изменение давления откачиваемого газа вдоль струи; 1 - диафрагма; 2 - поверхность конденсатора; 3 - цилиндрический фрагмент струи пара

Молекулы откачиваемого газа со стороны входа в насос попадают на поверхность струи, называемую диафрагмой (в данном случае диафрагма - верхнее основание цилиндра площадью A_0), и диффундируют внутри струи пара (рис. 6). Концентрация газа в струе пара после выхода из сопла очень мала, поэтому молекулы газа легко диффундируют внутрь струи. Пусть струя эта движется со скоростью V_n от диафрагмы 1 к нижнему основанию цилиндра 2, которое в данной схеме выполняет роль конденсатора. На конденсаторе 2 происходят конденсация паров масла и освобождение газа из пара.

Пусть давление газа на входе насоса равно P , а на выходе P_i ($P_i \gg P$). Концентрация газа в струе пара возрастает по мере переноса газа струей от n (при $X = 0$) до n (при $X = L$).

Концентрация пара в струе n_n обычно значительно больше концентрации газа n ; несмотря на это, часть газа под воздействием перепада давлений между входом и выходом насоса за счет диффузии возвращается по струе пара обратно, образуя обратный поток газа. Запишем основные уравнения, описывающие течение газа в диффузионном насосе.

Поток молекул газа в направлении откачки может быть выражено уравнением

$$vJ_n - V_n n, \quad (1)$$

где V_n - скорость потока молекул пара, а в обратном направлении

$$V_n = -D \frac{dn}{dx}. \quad (2)$$

В этих уравнениях v_{n+} и v_{n-} - количества молекул, проходящих через 1 см^2 сечения струи в течении 1 с, D - коэффициент диффузии газа в паре!

Из уравнений (1) и (2) можно найти предельное давление, создаваемое насосом. В состоянии динамического равновесия $v_{n+} + v_{n-} = 0$; тогда

$$V_n = D \frac{dn}{dx}. \quad (3)$$

Так как давление пропорционально концентрации, то

$$T \ll T - \frac{D}{v} \frac{dp}{dx} = * \quad (4)$$

Интегрируя (4) при $D = \text{const}$, получим

$$\ln P = -x + C, \quad (5)$$

Где C - постоянная интегрирования, которая для состояния равновесия определяется из условия $P = P_n$, при $x = 0$. Следовательно, $C = \ln P_n$.

Таким образом, получаем уравнение

$$P = P_n \exp(-x), \quad (6)$$

которое описывает распределение давления в струе рабочего тела (рис. 6,6).

При $x = L$ имеем равенство $P = P_i$, т. е.

$$P_i = P_n \exp(-L). \quad (7)$$

откуда можем найти предельное давление насоса

$$P_n = P_i \exp(L), \quad (8)$$

Таким образом, предельное давление диффузионного насоса во много раз ниже давления форвакуума P_f . Отношение давлений

$$\frac{P}{P_{\infty}} = \exp\left(-\frac{V}{D}L\right)$$

называется степенью сжатия газа струей пара. Для случая, когда давление пара значительно больше давления газа, коэффициент диффузии согласно [1] равен $P_{ш} \sim 5^2 P$

$$P = \left(\frac{M+M_n}{M M_n} \right)^{-1} \frac{\tau X}{(d+d_n)^2} P_n \quad (9)$$

где M , M_n , d и d_n - молекулярные массы и эффективные диаметры молекул газа и пара соответственно.

С учетом (9) выражение для степени сжатия газа при фиксированной температуре можно записать в виде

$$P = \exp\left\{ C(LV_n P_n [I^{--} - (c_i + d_n)^2]) \right\} = \exp\{\hat{\cdot}\}. \quad (10)$$

В формуле (10) величина $\hat{\cdot}$ является для данной температуры величиной постоянной, выражение в круглых скобках определяется конструкцией и условиями работы насоса (V_n , P_n), а выражение в квадратных скобках зависит от рода рабочего тела (пара) (M_n , d_n) и откачиваемого газа (M , d).

Полное предельное давление должно включать давление паров рабочего тела

$$P^{\wedge} = P_n + P_{\text{н}}, \quad (11)$$

где P_n - давление насыщенных паров являющееся функцией температуры $P_n = f(T_{\text{хол}}^{\text{TM}})$. За $T_{\text{хол}}$ следует принимать самую низкую температуру частей установки в пространстве высокого вакуума.

Обычно рабочее тело и температуру $T_{\text{хол}}$ подбирают из условия $P_n \ll P_{00}$. На предельное давление оказывают влияние газы, растворенные в масле, которые вместе с парами попадают в сопло и снижают эффективность работы насоса (для устранения этого влияния и применяют самоочистку).

Найдем скорость откачки насоса. Уравнение (1) записано в предположении, что при скорости струи V_n проникающий в нее под давлением P газ перемещается с той же скоростью V_n . Таким образом, струя пара подобно поршню перемещает газ. Поток газа можно выразить формулой

$$I = \frac{dV_n}{dt} \cdot \frac{dP}{dt} \cdot A_0 \quad (12)$$

где A_0 - площадь кольцевой диафрагмы насоса. Скорость откачки, соответствующая потоку I , будет равна

$$S_{\text{н}} = V_n A_0 \quad (13)$$

или

$$S_{н} = 3,64 \cdot 10^{-6} \text{ л/с}, \quad (14)$$

причем A_0 выражено в см^2 .

Реальная быстрота действия насоса S_H за счет отражения части молекул от струи и противодиффузии газа меньше теоретического значения S_0 . Отношение $S_H/S_0 = \eta$, называемое коэффициентом χ_0 или вакуум-фактором насоса, составляет обычно величину 0,3...0,5 и зависит от рода пара.

С уменьшением давления на выходе диффузионного насоса в области остаточного вакуума быстрота действия насоса уменьшается, что связано с возрастанием влияния газовой выделенности и противодиффузии газа через струю. Влияние этих причин на быстроту действия насоса может быть учтено членом $(1 - P_0/P)$, и быстрота действия насоса в рабочей области давлений может быть представлена в виде — ^

$$S_H = S_0 \cdot \eta \cdot (1 - P/P_0) \quad (15)$$

4. Основные свойства рабочих жидкостей пароструйных диффузионных насосов

К рабочим жидкостям для пароструйных диффузионных насосов предъявляют следующие требования:

1. Низкое давление насыщенных паров при комнатной температуре, в противном случае без вымораживающих ловушек получение низкого остаточного давления невозможно. Масла, выпускаемые промышленностью, имеют давления паров 10^{10} ... 10^{12} Тор при 20 С.

2. Высокое давление пара при рабочей температуре в испарителе, что обеспечивает работу насоса при относительно высоких выпускных давлениях газа.

3. Однородность состава.

4. Термическая стабильность при рабочей температуре в испарителе насоса и термоокислительная устойчивость; в противном случае возможны нарушения однородности и порча рабочей жидкости.

5. Отсутствие химической активности.

6. Малая удельная теплота парообразования.

7. Малая способность к растворению газов.

Некоторые характеристики современных паромасляных насосов

1. Рабочий диапазон 10^{-2} - 10^{17} Тор.

2. Средняя быстрота действия (по воздуху) - 6 - 38000 л/с.

3. Предельное остаточное давление (без дополнительных устройств) - 10^{n7} Тор.
4. Наибольшее впускное давление - 0,3 - 4 Тор.
5. Мощность нагревателя - 0,2 - 8,5 кВт.
6. Масса - 3 - 30 кг (и более).

Практическая часть

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия диффузионного насоса (типа Н-1С-2 или ЦВЛ-100) по описанию и рекомендованной литературе.
2. Получить и разобрать насос. Выяснить назначение каждой детали.
3. Выяснить, как в данной конкретной конструкции насоса осуществляется откачка остаточного газа, фракционирование и самоочистка масла.
4. По заданию преподавателя в тетради сделать эскизы основных деталей насоса, начертить разрез диффузионного насоса.
5. Собрать насос.
6. Ознакомиться с теорией пароструйного диффузионного насоса.
7. Оформить отчет и отчитаться по работе у преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Рассказать, в чем заключается процесс фракционной разгонки масла в диффузионном насосе. Показать, как этот процесс реализуется практически в данной конструкции насоса.
2. Перечислить и дать основную характеристику основных параметров диффузионных насосов.
3. Дать качественную характеристику изменений скорости действия насоса с изменением давления на выходе.
4. Какими физическими и конструктивными причинами определяется предельно достижимое давление в насосе?
5. Чем отличается механизм увлечения газа паровой струей эжекторного сопла от диффузионного?

Список литературы

1. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. - М.: Мир, 1975.
2. Пауэр Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. - М.: Энергия, 1969.
3. Королев Б.И., Кузнецов В.И. и др. Основы вакуумной техники. М.: Энергия, 1975.
4. Физика и техника сверхвысокого вакуума. Ленинград: Машиностроение, 1968.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ
ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Цель работы - ознакомиться с теоретическим описанием процессов откачки сосредоточенного и распределенного объемов.

Теоретическая часть

1. Откачка сосредоточенного объема

Сосредоточенный объем - это объем, обладающий очень высокой проводимостью. При откачке сосредоточенного объема во всех его точках давление не зависит от координат. Размеры сосредоточенного объема обычно соизмеримы по всем трем измерениям.

На рис. 1 показана схема откачки сосредоточенного объема V насосом H . Под насосом будем понимать всю остальную часть вакуумной системы, включая вакуумопроводы, ловушки и т. д. Предполагается, что вакуумная система находится при комнатной температуре.

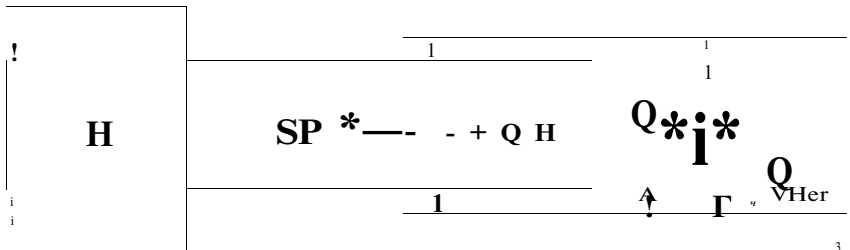


Рис. 1. Динамическое равновесие при откачке

При низких давлениях существуют два основных источника газа: Ол и Q_{Her} - соответственно газ, десорбирующий с поверхности откачиваемого объема, и газ, проникающий в объем извне через негерметичности.

Чтобы проанализировать действие системы, заменим реальный насос идеальным со скоростью откачки $SH=const$ и источником газа QH , воспроизводящим поток газа, поступающего из насоса назад, то есть имеем три источника газа со скоростью газовыделения Q_a , Q_{Her} , QH .

Основное уравнение, описывающее процесс откачки для рассматриваемого случая, будет иметь вид

$$-VdP = dt - (S_H P - Q_{f1} - Q_{Her} - Q_H), \quad (1)$$

где P - давление в объеме, t - время, V - величина откачиваемого объема. Уравнение (1) означает, что количество газа, удаленного из объема за время dt , равно количеству газа, прошедшего через насос, за вычетом количества газа, поступающего из трех источников. Знак минус соответствует уменьшению давления в объеме. При достижении состояния термодинамического равновесия установится предельное давление P^{\wedge} и $\frac{dP}{dt} = 0$, следовательно,

$$S_H P^{\wedge} = Q_A + Q_{Her} + Q_H > \quad (2)$$

откуда

$$s_H = P^{\wedge} - \quad (3)$$

Определим эффективную скорость откачки объема S_3 с учетом влияния различных источников газа с помощью уравнения (2):

$$S_3 P = S_H P - I Q = S_H (P - P^{\wedge}), \quad (4)$$

откуда

$$S_3 = S_H (1 - P^{\wedge} / P) \quad (5)$$

где S_3 является функцией давления; она становится равной нулю при предельном давлении.

Если принять, что $Q_{Her} \approx 0$ за счет улучшения вакуумной системы, то распределяется значениями Q_A и Q_H .

Источник Q_H обычно постоянен, а источники Q_A и Q_{Her} медленно меняются со временем. Если рассмотреть также интервалы времени, для которых $I Q$ пренебрежимо мала или близка к постоянной величине, то при постоянной скорости откачки можно проинтегрировать уравнение (1) и с помощью (3) получить

$$P - P_0 = (P_0 - P_m) \exp[-\lambda t], \quad (6)$$

где P_0 - давление при $t=0$. Так как $F_0 \gg P_m$, то

$$P = P_0 \exp^{-\lambda t}. \quad (7)$$

Постоянная времени $t_i = V/S_H$ может служить характеристикой эффективности действия системы откачивания.

Если насос, имеющий быстроту откачки S_H , соединен с откачиваемой системой трубопроводом проводимостью C , то скорость откачки рабочего объема системы определится из основного уравнения вакуумной техники [3]:

$$S_H C$$

Отсюда следует, что проводимость C должна быть достаточно большой, чтобы полнее использовать возможности насоса. Если это невозможно, а требуется большая скорость откачки системы, то в качестве дополнительного откачивающего устройства можно использовать часть стенки камеры. Для этого необходимо покрыть ее пленкой металла, активно адсорбирующего газ, или охладить поверхность для обеспечения криогенного способа откачки. В первом случае после достижения предельного вакуума на стенки камеры распыляют, например титан; во втором - охлаждают стенки жидким азотом (азотиты [1]).

Поскольку во время начального периода откачки поток газа является вязкостным, C вначале непостоянна. Это усложняет ситуацию и делает неосуществимым интегрирование уравнения (1). Однако часто вследствие малого сопротивления трубопроводов по отношению к вязкостному потоку во время начального периода откачки $C \gg S_H$ и $S_c = S_H$.

Пример: Рассмотрим типичную задачу откачки (рис. 2). Внутри сферы из нержавеющей стали диаметром 1000 мм после 24 часов откачки необходимо поддерживать давление 10^{-6} Тор. В некоторый момент времени в камеру подают азот до тех пор, пока не будет достигнуто давление 10^{-3} Тор. Это давление затем поддерживается постоянным, что создает непрерывный поток азота без остановки насоса. Предполагается, что используется диффузионный насос с предельным давлением на выходе $2 \cdot 10^{-1}$ Тор. Оценим требуемые параметры элементов системы. Откачиваемая камера имеет объем V , составляющий 525 л, и площадь поверхности, равную $31\,400 \text{ см}^2$. Так

как скорость газовыделения стали равна $K)^9$ л-Тор/см²-с (см. [2]), то $Q_{-д} = 310^{-5}$ л-Тор/с. Из уравнения (3) следует, что для $P_{лв} = 10^{-6}$ Тор Блв³⁰ л/сек. Поэтому решаем использовать насос с быстродействием 100 л/с и высоковакуумный трубопровод проводимостью $C_{лв} = 100$ л/с, в результате для всей системы получаем $Q_{лв} = 50$ л/с. Газовая нагрузка на насос с учетом потока азота составляет $<3n = P_n - Q_{лв} = 5 \cdot 10^{-2}$ Тор-л/с.

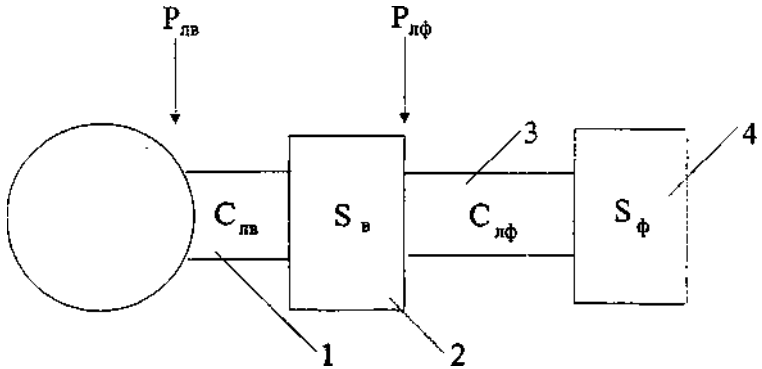


Рис. 2. Схематическое изображение вакуумной системы: 1 - высоковакуумная линия; 2 - высоковакуумный насос; 3 - форвакуумная линия; 4 - форвакуумный насос

Это требует скорости предварительной откачки $Q_{лф} = <3n / P_{лф}$, т. е. $Q_{лф} = 0,25$ л/с. Требуемая производительность форвакуумного насоса определяется допустимым временем откачки. Предположим, что система должна быть откачена до низкого давления, допускающего использование диффузионного насоса, т. е. до 10^{-1} Тор в течение 30 минут. При таких высоких давлениях газовыделением можно пренебречь, поэтому из (7) находим, что

$$S_{лф} = \frac{V}{0,434t} \cdot P_{лф}^{-1} = 2,6 \text{ л/с}$$

2. Откачка распределенного объема

Рассмотрим далее откачку трубопровода с распределенным объемом с учетом газовыделения со стенок. На рис. 3 показана трубка длиной L , один конец которой запаян, а другой соединен с насосом,

имеющим скорость откачки S . Предположим, что насос идеальный, $Q_H=0$ и трубопровод абсолютно герметичен, т.е. $Q_{гер}=0$. Введем удельные значения скорости газовыделения $g=Q_a/L$, проводимости $c=CL$ и объема трубопровода $v=V/L$. Изменение потока газа при откачке на элементе dx трубопровода равно $c \frac{dP}{dx}$, где dP - изменение

давления на том же участке.

$$x = 0 \qquad x \quad x + dx \qquad x = L$$

Рис. 3. Откачка распределенного объема

С другой стороны, изменение потока между поперечными сечениями с координатами x и $x+dx$ будет равно разности скоростей газовыделения и удаления газа, содержащегося в объеме, следовательно

$$c \frac{dP}{dx} - g - v \frac{dP}{dt} = 0 \quad (9)$$

Поскольку направление потока противоположно градиенту давления, то правая часть уравнения отрицательна.

Предположим сначала, что скорость газовыделения мала и поток газа молекулярный. Тогда из уравнения (9) следует, что

$$\frac{dP}{dx} = \frac{v}{c} \frac{dP}{dt} - g \quad (10)$$

Это уравнение идентично уравнению диффузии с коэффициентом диффузии CL^2/V . Чтобы решить его, необходимо задать начальные и граничные условия. Предположим, что сначала в трубке поддерживалось постоянное давление P_0 . В момент времени $t=0$ в точке $x=0$ присоединяется насос с очень большой скоростью откачки ($S \gg C$).

Тогда краевые условия будут иметь вид:

$$P = P_0, \quad 0 < x < L, \quad t = 0;$$

$$P = 0, \quad x = 0, \quad t > 0$$

$$\frac{dP}{dx} = 0, \quad x = L, \quad t > 0$$

Последнее условие вытекает из того факта, что поток газа при $x=L$ отсутствует. Решением уравнения (10) является (см. [2])

$$P = -P_0 I (2n+1)^n \sin \frac{(2n+1)\pi x}{2L} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (\Pi)$$

Полученное выражение идентично уравнению, описывающему диффузию газа из равномерно насыщенной им пластины конечной толщины $d=2L$, т.е. длина равна половине толщины пластины. Ряд в выражении (11) весьма быстро сходится, причем сходимость его тем лучше, чем больше t . При $t > 4,5 \cdot 10^{-2} V/\phi$ можно ограничиться одним первым членом ряда, делая при этом ошибку, не превышающую 1 % ; тогда

$$P = -P_n \sin \frac{\pi x}{2L} \exp \left[-\frac{\pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (12)$$

Максимум давления находится при $x=L$:

$$P = -P_0 \exp \left[-\frac{\pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (13)$$

Сравним это уравнение с уравнением (7) для откачки сосредоточенного объема. Видно, что постоянная времени откачки распределенного $T_2 = 4L^2/\pi^2 D$ на 60 % меньше x , т.е. для $t > 4,5 \cdot 10^{-2} V/\phi$ давление на конце трубки падает быстрее по сравнению с сосредоточенным объемом.

Рассмотрим теперь условия равновесия, установившегося в результате откачки, если скорость газовой выделенной постоянна и равна g . Из уравнения (9) следует, что

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = -\frac{g}{S} \quad (14)$$

Граничными условиями являются:

$$\frac{dx}{dx} = gL, \quad x=0.$$

Второе условие утверждает, что производительность насоса равна общей скорости газовой выделенной. Интегрируя получим

$$P = g \frac{L}{S} + \frac{x}{c} \left(gL - \frac{x}{2} \right) \quad (15)$$

$$P_{\max} = g \frac{L^2}{2S} \quad (16)$$

то есть давление P уменьшается параболически от P_{\max} при $x=L$ до $P=gL/S$ при $x=0$ у входа в насос.

Практическая часть

1. Определить быстроту откачки кварцевой трубки форвакуумным, диффузионным насосом. Сравнить результаты с паспортными данными насоса.

2. Пользуясь учебно-справочной литературой, оценить: газоотделение со стенок трубки, проводимость кварцевой трубки, проводимость вакуум-провода, постоянную времени процесса откачки.

3. Установить, к какому типу объемов относится откачиваемая кварцевая трубка.

4. Построить график распределения давления по длине трубки при стационарном режиме откачки.

Примечание: При обработке результатов измерений заданий использовать программу Microsoft Excel.

Контрольные вопросы

1. Какие возможны режимы течения газа по трубопроводу?
2. Оценить изменение газоотдачи кварцевой трубки при в движении ее в печь на половину длины. Температура печи $-500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Показать, что $s = CL$.
4. Каким условиям должны удовлетворять параметры форвакуумного насоса, соответствующего данному диффузионному?
5. Дать характеристику явления адсорбции газов твердыми телами. Какими причинами она определяется?

Список литературы

1. Сб. Физика и техника сверхвысокого вакуума. - М.: Машиностроение, 1968.
2. Левин Г. Основы вакуумной техники. - М.: Энергия, 1969.
3. Королев Б.И., Кузнецов В.И. и др. Основы вакуумной техники. М.: Энергия, 1975.
4. Горшковский Я. Техника высокого вакуума. - М.: Мир, 1975.
5. Глазков А.А., Малышев И.Ф., Саксаганский Г.Л. Вакуумные системы электрофизических установок. - М.: Атомиздат, 1975.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕМА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы - ознакомиться с существующими методами определения внутреннего объема вакуумных систем и экспериментально измерить внутренний рабочий объем вакуумной системы одной из лабораторных установок.

Теоретическая часть

В различных физических экспериментах часто возникает необходимость определения внутреннего объема вакуумной системы, например, для оценки быстроты откачки вакуумной системы, количественной оценки массы десорбирующего газа, влияющего на протекание изучаемых процессов и т.д. Рассмотрим простейшие методы определения объема вакуумных систем, не требующие для этого специальных устройств и потому нашедшие наиболее широкое использование в лабораторной технике:

1. Жидкостный метод заключается в том, что измеряемый объем заполняется жидкостью, после чего жидкость сливают и с помощью мерной колбы определяют ее объем. Метод имеет ограниченное применение, так как не всякую вакуумную систему можно заполнить жидкостью (большой объем, конструктивные особенности камеры, вредное воздействие жидкости и т.д.). Однако для небольших откачиваемых объемов, не подверженных воздействию таких жидкостей, как вода, спирт и т. д., жидкостный метод, благодаря своей простоте, высокой точности и малым затратам времени имеет неоспоримые преимущества перед другими.

2. Метод расширения фиксированного количества газа заключается в том, что газ, первоначально занимавший объем V_1 при давлении P_1 , расширяется и занимает объем $V_1 + V_2$, где V_2 - определяемый объем. По установившемуся равновесному давлению газа P_0 в объеме $V_1 + V_2$ (и первоначальному давлению P_1 газа в объеме V_1 , если он там присутствовал до сообщения объема V_2 и V_1) можно определить V_2 . Точность метода определяется, в основном, точностью измерения давления. Метод довольно прост, не требует сложного оборудования.

3. Метод откачки. Предположим, что мы располагаем насосом с известной средней быстротой действия S в некотором интервале давлений P_1 - P_2 . Соединив этот насос вакуум-проводом проводимостью U с откачиваемой вакуумной системой, объем которой V требуется определить, произведем откачку системы;

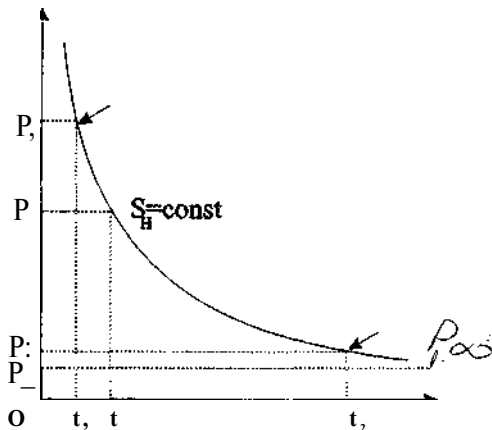


Рис. 1. К определению внутреннего объема методом откачки

одновременно снимаем данные для построения кривой откачки $P=P(t)$. Если V - сосредоточенный объем, то уравнение кривой откачки имеет вид (см. рис. 1)

$$P = (P_0 - P_\infty) \exp(-\frac{t}{\tau}) + P_\infty.$$

0)

где P_0 и P_∞ - начальное и предельно достижимое давление в откачиваемом объеме, S_0 - быстрота откачки определяемого объема.

Согласно основному уравнению вакуумной техники имеем

$$S_0 = \frac{S_H \cdot U}{V} \quad (2)$$

Из уравнения (1) для интервала давлений $P_1 - P_2$, где $S_H = \text{const}$, можно найти V :

$$V = \frac{S_0^{**}}{P - p}$$

(3)

где $P] < P < P_r$, Δt - промежуток времени, соответствующий падению давления от P_i до P_r .

В частном случае, когда $U \rightarrow \infty$ и $P_{00} = 0$, формула упрощается

$$V = \frac{S}{p^*} \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что для определения V необходимо знать величину быстродействия насоса S_H . Обычно сведения об этой величине весьма приближенны, что является основным недостатком метода.

4. Метод последовательного заполнения определяемого объема [2] является, по существу, модификацией метода 2. На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки, используемой в данном методе. Кран K_1 соединяет вакуумную систему с внешним механическим насосом, а кран K_2 - известный объем V_K с неизвестным V_u . Объем V_K включает в себя объем манометрической лампы M , баллона B , соединительных трубок и т. д. Предполагается, что $V_K \ll V_u$. Неизвестный объем откачивается до давления $P_K = P_0 (=0)$, определяемого с помощью манометрической лампы M . Затем кран K_2 закрывается. Давление в известном объеме V_K путем напуска воздуха через кран K_1 поднимают до величины P_K .

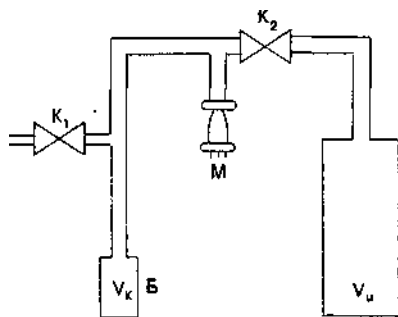


Рис. 2. Схема вакуумной установки

После чего кран K_2 открывают. После установления равновесного давления фиксируют его. Затем кран K_2 закрывают и давление в

известном объеме вновь поднимают до P_k . Далее описанный цикл повторяется много раз. Важно отметить, что давление в неизвестном объеме P_u для каждого последующего впуска должно равняться давлению на предыдущем, т. е. система не должна иметь течей.

Получим выражение для определения V_u с помощью такой методики. После того как давление выровнялось по объемам V_k и V_u (после открытия крана K2), можно записать

$$P_n(V_u + V_k) = PKV_k + P_n \cdot iV_u, \quad (5)$$

где p - номер впуска, P_n - равновесное давление после n -го впуска, а также давление в V_u перед следующим впуском, $P_{0,1}$ - первоначальное давление в вакуумной системе, P_k - давление в объеме V_k . При $p = 1$ имеем

$$P \frac{3U_K + PpU_{II}}{1 \quad V_K + V_u} \quad (6)$$

а при $p = 2$

$$p \frac{P_k U_K + P_u U_I}{2 \quad V_u + V_k} \quad (7)$$

Подставив (6) в (7), получим

$$UK \quad UK \quad " \quad k$$

Точно так же для p - го шага можно получить

$$P V \quad V \quad V \quad V \quad V'' \\ " \quad V \setminus \quad V_u + V_k \quad V_u + V_k \quad V_u + V_k \quad (V_u + V_k) \ll$$

При $V_u \gg V_k$ уравнение (9) примет вид

$$P_n = P_k \frac{V_k}{V_u} + P_o \quad (10)$$

Построив зависимость P_n в функции от p , получим прямую линию

$$(10), \text{ тангенс угла которой равен } \frac{P_k V_k}{i k}$$

Точность определения V_u зависит от герметичности системы, выполнения условия $V_k \ll V_u$ и от разности давлений $P_k - P_o$.

Необходимо стремиться к тому, чтобы при данной разности давлений было произведено возможно большее число впусков ($n > 5$ -н 10).

Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методами измерения внутреннего объема вакуумных систем.
2. Получить задание на выполнение работ у преподавателя.
3. После ознакомления с экспериментальной установкой под руководством преподавателя уточнить схему откачки вакуумной системы.
4. Получить инструктаж по технике безопасности при работе на электровакуумном оборудовании.
5. Получить приборы и оборудование, необходимые для выполнения работы, выполнить работу.
6. Оформить работу в тетради и отчитаться по ней.

Список заданий

Задание №1. Определить объем стеклянного вакуумного колокола установки ВУП-4 жидкостным методом.

Практические указания: измерения провести не менее трех раз, в отчете привести результаты трех измерений.

Задание №2. Определить объем вакуумной системы методом расширения фиксированного количества газа.

Практические указания:

а) при выполнении работы использовать только механический насос;

б) принять за V_1 - объем вакуумного колокола, манометрической лампы и вакуум-проводов, за V_2 - объем колонны высокого вакуума;

в) рекомендуемое давление P_0 - предельно достижимое давление насоса.

Задание №3. Определить объем вакуумной системы методом откачки.

Практические указания: а) ознакомиться с паспортными данными используемого насоса, записать их в отчете;

б) проанализировать величину быстроты откачки S в используемой схеме откачки;

в) с использованием программы Microsoft Excel построить экспериментальную кривую откачки и определить величину объема системы.

Задание №4. Определить объем вакуумной системы методом последовательного заполнения объема.

Практические указания:

а) уточнить схему откачки;

б) выбрать значения P_k , V ; в) произвести измерения объема.

Контрольные вопросы

1. Какими законами описывается состояние разряженного газа в вакуумной технике?

2. Дать характеристику области применимости модели идеального газа в **вакуумной** технике.

3. Ввести формулу для расчета объема вакуумной системы методом 3-

4. Вывести основное уравнение вакуумной техники. Объяснить физический смысл входящих в него величин.

5. Перечислить методы измерения вакуума. Рассказать о принципе действия основных видов манометрических устройств, их точности, пределах измерения.

Список литературы

1. Kendal B.R.F. //J. Vac. Sci. Tehnol. -1974. - V. 11. - P. 610.

2. Lee CO., Peavey T.H. // J. Vac. Sci. Technol. - 1976.- V. P_f 13. P. 1108.

3. Ворончев Т.А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. М.: Высшая школа, 1967.

4. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964.