

**МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
(Технический университет)

Кафедра технологических систем электроники

ДИФфуЗИОННЫЙ ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС
Методические указания к лабораторной работе по курсу
"Вакуумная техника"

Москва 1998

Составитель канд. техн. наук Ю.Д. Плотников

УДК 621.52/035/

Диффузионный пароструйный насос: Метод. указания к лабораторной работе по курсу "Вакуумная техника" / Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост. Ю.Д. Плотников. М., 1998 — 16 с.

Приводятся краткое описание теории откачки диффузионным пароструйным насосом, применяемым для получения высокого вакуума в технологическом оборудовании производств электронной техники; схема конструкции; порядок работы.

Для студентов IV курса специальности 2005 — "Электронное машиностроение".

ISBN 5-230-22336-7

Цель работы: ознакомить с теорией откачки газов направленной паровой струей, конструкцией диффузионного насоса, техническими характеристиками.

Содержание работы:

- а) ознакомиться с откачным агрегатом на основе диффузионного пароструйного насоса Н-5С-М;
- б) научиться вводить в действие откачной агрегат;
- в) экспериментально определить основные характеристики вакуумного насоса: предельный вакуум, быстродействие, производительность, наибольшее выпускное давление.

Теория пароструйной откачки

Принцип действия диффузионного насоса состоит в использовании энергии паровой струи, которая образует поток газа в направлении откачки благодаря диффузии газа в паровую струю. Рассмотрим модель диффузионного насоса (рис.1), иллюстрирующую основные процессы, связанные с откачкой газа.

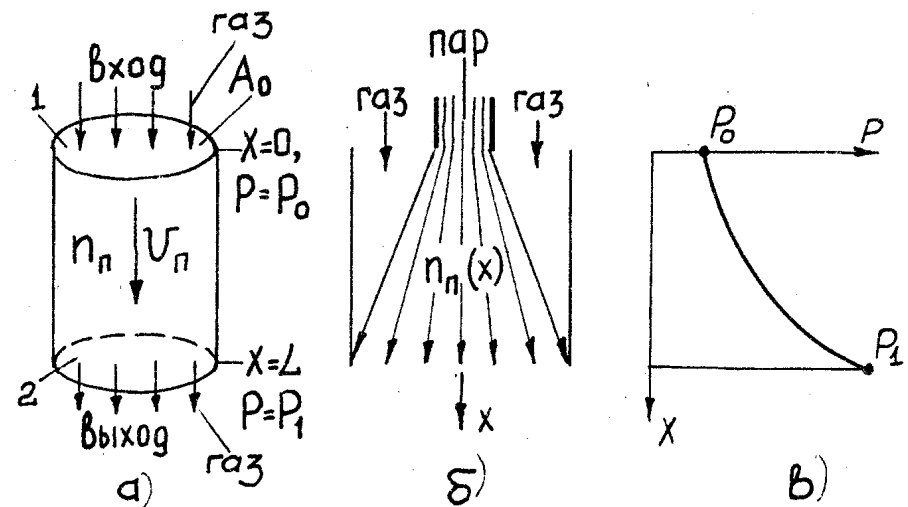


Рис.1. Схема пароструйной откачки

а) - идеализированная паровая струя, б) - форма сечения паровой струи при истечении из сопла в вакуум, в) - зависимость концентрации газа вдоль паровой струи.

Представим себе цилиндр длиной L с непроницаемыми стенками, в котором движется паровая струя, имеющая скорость U_n и концентрацию n . Верхнее сечение цилиндра можно принять за всасывающий патрубок, а нижнее основание выполняет роль конденсатора паровой струи. Все молекулы газа, попадающие в цилиндр, диффундируют в паровую струю и переносятся на расстояние L . В сечении $x=L$ паровая струя конденсируется, а молекулы продолжают движение по инерции. При истечении паровой струи вакуум происходит ее расширение за счет тепловых скоростей молекул сопровождающихся изменением плотности по длине струи.

Процесс переноса газа паровой струей можно представить в виде двух потоков молекул, направленных противоположно друг другу.

поток молекул откачиваемого газа $v' = U_n n(x)$;

поток молекул, диффундирующих в противоположном направлении $v'' = D \frac{dn(x)}{dx}$.

В этих уравнениях v' - количество молекул газа, проходящих через единичную площадь поверхности струи в секунду, D - коэффициент диффузии газа в паровую струю. Если достигнуто предельное давление, то молекулярные потоки уравниваются, откуда

$$U_n \cdot n(x) - D \frac{dn(x)}{dx} = 0. \quad (1)$$

Пологая, что газ в струе пара подчиняется уравнению газового состояния, получим

$$\frac{dn(x)}{n(x)} = \frac{dP(x)}{P(x)}, \text{ откуда } \frac{dP}{P} = \frac{U_n}{D} dx. \quad (2)$$

Проинтегрировав выражение (2) в пределах от $x=0$ до $x=L$ и от P_0 до P_1 , имеем

$$\ln \frac{P_1}{P_0} = \frac{U_n}{D} \cdot L \text{ или } \frac{P_1}{P_0} = \exp\left(\frac{U_n}{D} \cdot L\right). \quad (3)$$

Таким образом, отношение P_1/P_0 характеризует степень сжатия (компрессии) газа паровой струей. Следовательно, паровая струя в ваку-

умном диффузионном насосе не только переносит газ в направлении откачки, но и сжимает его. Анализа выражения (3) показывает, что степень компрессии, а соответственно и величина вакуума, пропорциональны скорости паровой струи U_n и ее длине и обратно пропорциональны коэффициенту диффузии D . Следовательно, для увеличения коэффициента компрессии необходимо повышать скорость паровой струи и увеличивать ее плотность. В связи с этим целесообразно применять в качестве рабочих жидкостей высокомолекулярные масла, молекулы которых имеют большую массу и размер.

Теоретическая быстрота действия диффузионного пароструйного насоса в связи с малым количеством откачиваемого газа определяется размерами сопла и давлением газа в паровой струе:

$$S_{теор} = \frac{A}{n} (v' - v''), \quad (4)$$

где A - проекция поверхности паровой струи на плоскость, перпендикулярную вектору откачки (оси X), v' и v'' - количество молекул, пересекающих единичную площадку в противоположных направлениях в секунду, n - концентрация газа в сечении $x=L$.

В соответствии с выражениями для v' и U_n формулу для определения быстроты действия насоса можно переписать:

$$S_{теор} = \frac{A}{4n} \sqrt{\frac{8K}{\pi p_0}} (p\sqrt{T} - p_{гс}\sqrt{T_{гс}}), \quad (5)$$

где T и $T_{гс}$ - температура газа у входа в насос и в паровой струе; $p_{гс}$ - концентрация газа в паровой струе.

Так как $p_{гс}/n = P_{пред}/P$, формула для определения теоретического быстродействия диффузионного пароструйного насоса приобретает следующий вид:

$$S_{теор} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} A \left(1 - \frac{P_{пред}}{P} \sqrt{\frac{T_{гс}}{T}}\right), \quad (6)$$

$$\text{или } S_{теор} = 36,4 \sqrt{\frac{T}{M}} A \left(1 - \frac{P_{пред}}{P} \sqrt{\frac{T_{гс}}{T}}\right). \quad (7)$$

- 3 -

Основные характеристики диффузионных пароструйных насосов

Диффузионный пароструйный насос описывается следующими характеристиками:

- пределный вакуум $P_{пред}$, то есть наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в сечении входного патрубка насоса или в объеме, непосредственно присоединенном к насосу;

- быстродействие (скорость откачки) насоса S_H , измеряемое объемом газа, проходящего через сечение входного патрубка в секунду при давлении P_H ;

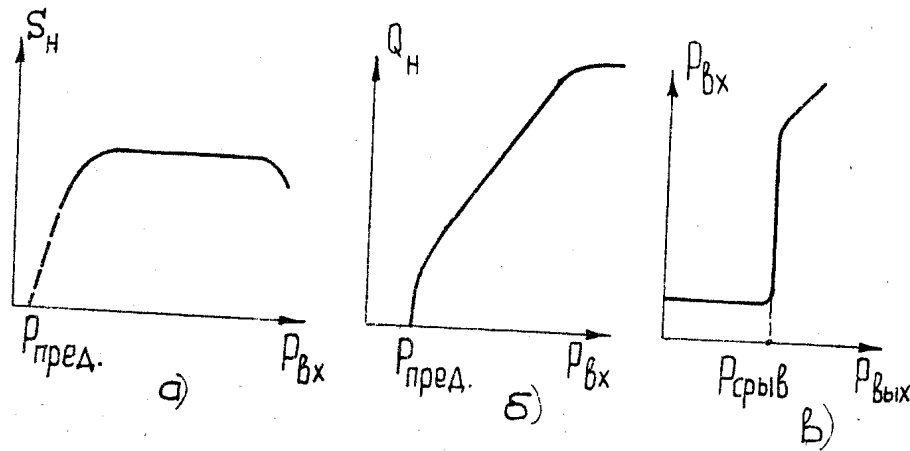


Рис. 2. Характеристики диффузионного насоса

а)-быстродействие (скорость откачки), б)-производительность, в)-наибольшее выпускное давление

- производительность насоса Q_H , измеряющаяся потоком газа, проходящего через сечение входного патрубка насоса при данном P_H ;

- наибольшее выпускное давление $P_{срыв}$ - максимально допустимое давление газа на выходном патрубке диффузионного пароструйного насоса.

- 7 -

Конструкция диффузионного пароструйного насоса

Диффузионные высоковакуумные насосы нашли широкое применение в технике получения среднего и высокого вакуума. Они сочетают простоту конструкции, исключительную надежность при непрерывной откачке в течение дней и даже недель, длительный срок эксплуатации. Схема конструкции диффузионного пароструйного насоса представлена на рис. 3.

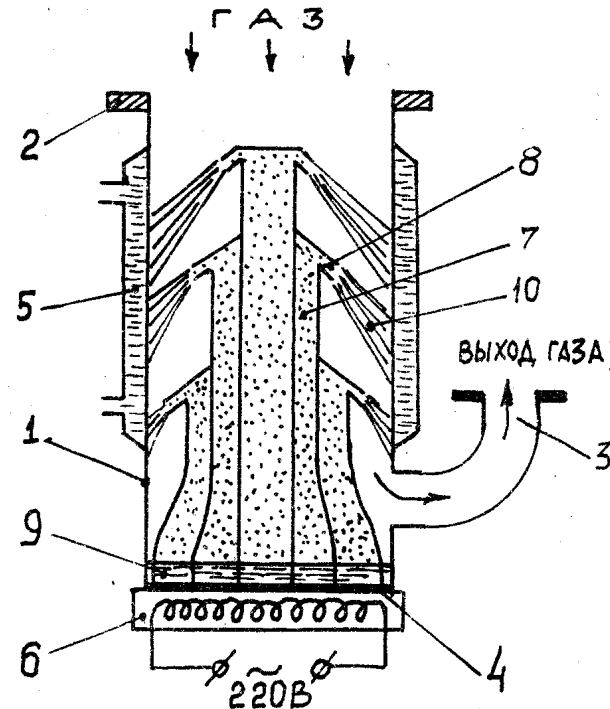


Рис. 3. Схема многоступенчатого диффузионного пароструйного насоса

1 - корпус насоса; 2 - соединительный фланец; 3 - выходной патрубок; 4 - днище насоса; 5 - охлаждающая рубашка; 6 - съемный нагреватель; 7 - паропроводы; 8 - зонтичные сопла; 9 - рабочая жидкость (кремнийорганическое масло); 10 - паровая струя

Корпус диффузионного насоса представляет собой цилиндр (1), выточенный из стали, с приваренным к нему днищем (подом насоса) (4). Корпус насоса снабжен фланцем (2) и патрубком (3) для присоединения другим элементам вакуумной системы. Для конденсации паровой струи предусмотрено принудительное охлаждение корпуса насоса проточной водой через водяную рубашку (5). Нагрев рабочей жидкости производится специальным нагревателем (6), укрепленным на днище насоса. Внутри корпуса насоса коаксиально (или соосно) установлены паропроводы (7), в верхней части которых находятся конические сопла (8), образующие кольцевые щели сложного профиля.

Таким образом, нижняя часть диффузионного пароструйного насоса образует резервуар (емкость) с рабочей жидкостью (кремнийорганическим маслом) (9), которая нагревается до кипения, сопровождаемого активным парообразованием. Пар поднимается по паропроводам (7), которые оканчиваются коническими соплами (8), формирующими паровую струю (10) в виде усеченного конуса, направленного в сторону выходного патрубка насоса.

Процесс откачки газа представляется как диффузия молекул газа в паровую струю, при этом газовые молекулы получают импульс движения в направлении паровой струи, и, следовательно, в сторону откачки. Таким образом, реализуется важнейшее условие откачки газа - формирование направленного потока газа. При контакте паровой струи с внутренней поверхностью корпуса насоса, имеющего постоянную комнатную температуру, происходит конденсация пара (но не откачиваемого газа), и в виде капель рабочей жидкости (масло) стекает в кипятильник, где процесс нагрева рабочей жидкости и парообразования вновь повторяется. Газ после отделения от паровой струи движется по инерции в зону действия следующей струи и в конечном счете выталкивается в выпускной патрубок (3), откуда по коммуникации удаляется насосом предварительного разрежения.

Важным функциональным элементом диффузионного насоса является рабочая жидкость, к которой предъявляют следующие требования:

- малая упругость паров при температуре кипения;
- никакая растворимость газов;
- инертность к воздействию газов и по отношению к конструкционным материалам;
- стойкость к химическому разложению при нагреве.

В настоящее время в качестве рабочих жидкостей для пароструйных насосов используют специальные сорта кремнийорганических масел (марка ВКЖ-9 или ПМСО-2), сочетающие указанные свойства. Промышленностью выпускается ряд диффузионных насосов различной производительности (смотри табл. 1), которые в сочетании с механическими вытеснительными насосами образуют высоковакуумные откачные агрегаты.

Таблица 1

Характеристики диффузионных паромасляных насосов унифицированной серии

Основные характеристики	Марка насоса				
	H-100/350	H-160/700	H-250/72500	H-400/77000	H-630/18000
Диапазон рабочих давлений, Па	$10^{-3}-10^{-1}$	$10^{-3}-10^{-1}$	$10^{-3}-10^{-1}$	$10^{-3}-10^{-1}$	$10^{-3}-10^{-1}$
Скорость откачки по воздуху, м ³ /с	0,25	0,640	1,8	4,9	15,5
Предельное рабочее давление, Па	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее давление на выходном патрубке, Па	27	33	27	27	27
Диаметр входного патрубка, мм	100	160	250	400	630
Диаметр выходного патрубка, мм	25	40	63	63	100
Масса насоса, кг	6,5	16	31	80	230

Оборудование и методика

Основой лабораторного стенда для измерения характеристик диффузионного пароструйного насоса является типовой вакуумный агрегат ВА-0,5-4, схема которого показана на рис.4.

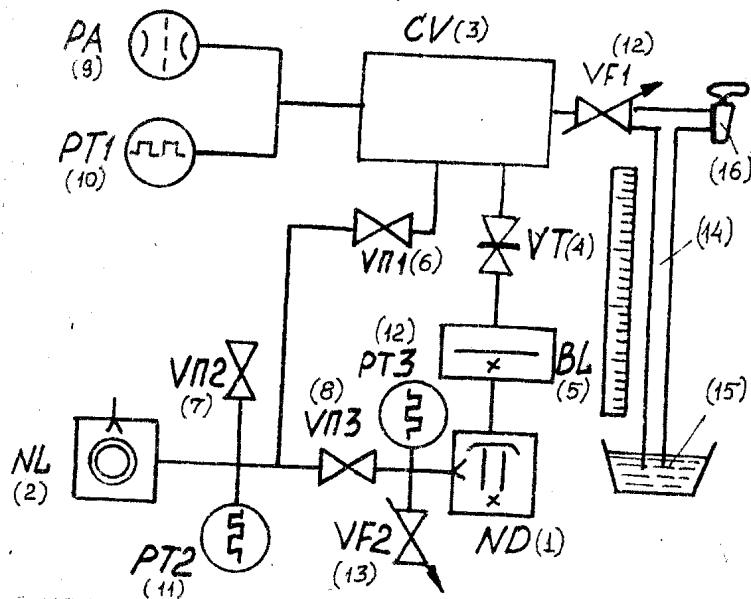


Рис.4. Схема высоковакуумного откачного поста

1-диффузионный насос; 2-механический вытеснительный насос; 3-рабочая камера; 4-затвор; 5-ловушка; 6,7,8-клапаны (вентили); 9,10,11-манометрические преобразователи; 12,13-нагреватели; 14-измерительная бюретка; 15-резервуар с жидкостью; 16-проходной стеклянный кран.

Лабораторный откачной пост представляет собой вакуумную систему, состоящую из рабочей камеры (3), высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса (1), снабженного аготной ловушкой (5), и механического вытеснительного насоса (2), последовательно соединенных между собой. Вакуумная система снабжена затвором (4) для отделения объема камеры

насосной группы и запорным вентилем (6) для периодического перекрытия коммуникации между диффузионным и механическим насосами. Вакуумпост и установленный на нем вентиль (7) образуют байпасную (вспомогательную) коммуникацию для откачки рабочей камеры (3) непосредственно насосом (2) в обход работающего высоковакуумного насоса (1). Измерение давления в вакуумной системе производится манометрическими преобразователями ПМТ-2 и ПМИ-2 (9,10,11). Измерительная часть установки состоит из бюретки (14), резервуара с жидкостью (15), проходного стеклянного крана (16) и нагревателя (12), с помощью которого устанавливают фиксированное значение давления в рабочей камере (3).

Быстродействие высоковакуумного диффузионного насоса S_H определяется из соотношения

$$S_H = Q_H / P_H. \quad (9)$$

Для определения потока газа Q_H применяется метод дозирования, то есть напуска малого (10^{-3} Па·м³/с) потока газа в рабочую камеру (или в насос), при котором устанавливается некоторое фиксированное давление (или вакуум) в рабочей камере установки. Из рис.4. видно, что бюретка (14) образует объем, замкнутый с одной стороны нагревателем (12), а другой - стеклянным краном (16), из которого через действующий нагреватель (12) в камеру начинает откачиваться газ. По скорости подъема жидкости в бюретке, которая определяется как отношение числа делений линейке ко времени подъема в секундах, рассчитывают количество вытесненного из объема бюретки газа $d(PV)$. Поток газа в этом случае равен

$$Q = \frac{dPV}{\tau} = \frac{1}{\tau} (V_0 dP + P_0 dV + dP dV), \quad (10)$$

где τ - время подъема столба жидкости, с;
 V_0 - начальный объем бюретки, м³;
 dP - изменение давления газа в объеме бюретки, Па;
 P_0 - барометрическое давление, Па;
 dV - изменение объема газа в бюретке, равное объему столба жидкости, поднявшегося за время τ , м³;

$$dV = V_{\text{г}} n / h,$$

где $V_{\text{г}}$ - объем градуированной части бюретки, м^3 ;
 n - полное число делений;
 h - высота подъема жидкости в бюретке за время τ .

$$dP = \rho g h$$

где ρ - плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 g - ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$;

Пренебрегая величиной $dP dV$ в уравнении (10) из-за ее малости в сравнении с двумя первыми членами, получим

$$Q_{\text{н}} = \frac{n}{\tau} \left(V_{\text{орг}} \rho g + P_{\text{г}} \frac{V_{\text{г}}}{h} \right) = K_{\text{г}} \frac{n}{\tau},$$

где $K_{\text{г}} = V_{\text{орг}} \rho g + P_{\text{г}} \frac{V_{\text{г}}}{h}$ - коэффициент бюретки.

Порядок выполнения работы

1. Измерение предельного вакуума

Ввести в действие откачной пост в следующем порядке:

- включить механический вытеснительный насос (2) тумблером "мех. насос";

- через одну-две минуты открыть вентиль (7) и откачать объем паровой камеры (3) до давления, достаточного для запуска высоковакуумного пароструйного насоса (1);

- закрыть вентиль (7) и открыть вентиль (6) для откачки объема диффузионного насоса и охлаждающей ловушки (5) до давления запуска равного 3-5 Па, контролируя процесс откачки по манометрическому датчику (9), а затем открыть затвор (4);

- включить нагреватель диффузионного насоса (1) тумблером "дифф. насос", пустив проточную воду в рубашку охлаждения корпуса насоса;

С момента включения высоковакуумного диффузионного насоса до получения предельного разрежения в камере (3) через каждые пять мину

измерять давление манометрическими датчиками (10,11) и записывать показания в таблицу. Построить график зависимости давления газа в камере от времени откачки.

2. Измерение быстроты действия (скорости откачки):

- установить стеклянный кран (15) в положение "открыто";

- постепенно открывая натекатель (12) установить исходное давление газа в камере, отличное от предельного разрежения согласно показаниям манометрического датчика (11);

- закрыть стеклянный кран на бюретке;

- измерить по секундомеру время подъема жидкости из резервуара (15) на заранее выбранное число делений;

- "обросить" жидкость из бюретки, напустив атмосферный воздух в бюретку поворотом стеклянного крана в положение "открыто".

Провести шесть-восемь измерений, каждый раз устанавливая давление в камере примерно в два раза больше предыдущего значения. Записать значения $P_{\text{н}}$ и времени подъема жидкости в бюретке τ на высоту в n делений для каждого цикла в таблицу 2.

Таблица 2

$P, \text{Па}$	
$\tau, \text{с}$	
$n, \text{дел.}$	
$S_{\text{н}}, \text{м}^3/\text{с}$	
$Q_{\text{н}}, \text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$	

Пользуясь расчетной формулой

$$S_{\text{н}} = K_{\text{г}} \cdot \frac{n}{\tau P_{\text{н}}},$$

определить значения быстродействия $S_{\text{н}}$ и производительности $Q_{\text{н}}$ высоковакуумного диффузионного пароструйного насоса и внести в табл. 2. Построить графические зависимости $S_{\text{н}} = f(P_{\text{н}})$ и $Q_{\text{н}} = f(P_{\text{н}})$.

3. Измерение наибольшего выпускного давления $P_{\text{срыва}}$ (противодавления срыва):

- зафиксировать предельный вакуум в камере (3) согласно показани-

ям манометрического датчика (11);

- измерить давление в коммуникации, соединяющей диффузионный и механический насосы, с помощью манометрического датчика (9) при закрытом натекателе (13);

- постепенно увеличивать давление со стороны выходного патрубка диффузионного насоса, напуская газ с помощью натекателя (13);

- отметить скачкообразное увеличение давления в камере (8) согласно показаниям манометрического датчика (11) и зафиксировать значение давления по датчику (9), что и является искомым противодействием срыва.

Форма отчета

В отчете должны быть представлены:

- схема конструкции высоковакуумного диффузионного пароструйного насоса;

- схема откачного поста в условных обозначениях;

- табличные данные, расчетные формулы и графические зависимости, полученные при выполнении лабораторной работы.

Примечание: все графики рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге в полупологарифмическом масштабе.

Вопросы к зачету

1. Сформулируйте принцип действия диффузионного пароструйного насоса?

2. Что является основным рабочим органом диффузионного насоса?

3. Какую функцию выполняют конические сопла?

4. Почему паровая струя направлена под углом к внутренней поверхности корпуса насоса?

5. Каким образом диффузионный насос присоединяется к другим элементам вакуумной системы?

6. Что значит запустить высоковакуумный диффузионный насос?

7. Почему момент включения диффузионного насоса не совпадает с началом активной откачки?

8. Каково физическое содержание понятия "нулевая" скорость откачки вакуумного насоса?

9. Для чего к выхлопному патрубку диффузионного насоса присоединяется механический насос?

10. Почему в качестве рабочей жидкости в диффузионных насосах используется кремнийорганическое масло, а, например, не вода?

11. Какой процесс и в каком месте диффузионного насоса "уравновешивает" интенсивное испарение рабочей жидкости в кипятильнике насоса?