

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА (НД)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВАКУУМНОГО ДИФфуЗИОННОГО ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА

Цель работы: изучение устройства и принципа работы высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса, исследование его рабочих характеристик, освоение методики работы с вакуумметрической аппаратурой.

ВВЕДЕНИЕ

Действие диффузионных вакуумных насосов основано на использовании в качестве откачивающего элемента высокоскоростной паровой струи. В качестве рабочих жидкостей в насосах обычно используют натуральные и синтетические вакуумные масла. Процессы, происходящие в диффузионном насосе, можно представить себе следующим образом (см. рис.1):

Пар масла из испарителя 1 по паропроводам 2 входит в сопла Лавала 3. Здесь он ускоряется, расширяется и образует паровые струи 4, разделяющие рабочий объем насоса на область высокого вакуума (а) и область низкого вакуума (б). Молекулы газа из откачиваемого объема 5 диффундируют в паровую струю и либо увлекаются ею, либо проходят сквозь нее.

Попавшая на охлажденные стенки насоса 6, пар конденсируется и масло стекает обратно в испаритель. Откачиваемые газы собираются в области низкого вакуума (б) и удаляются вспомогательным насосом через выходной фланец 7.

Высоковакуумные паромасляные насосы характеризуются предельным вакуумом $p_{\text{пред}}$, производительностью насоса $Q_{\text{нас}}$, быстротой откачки насоса $S_{\text{нас}}$, наибольшим выпускным давлением $p_{\text{вып.макс}}$.

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСА

Предельный вакуум $p_{\text{пред}}$

Предельным вакуумом насоса $p_{\text{пред}}$ называется самое низкое давление, которое может обеспечить насос при работе "на себя", т.е. с закрытым входным патрубком. Величина $p_{\text{пред}}$ определяется равновесием откачиваемого потока газа и обратного потока.

Обратный поток образуется противодиффузией откачиваемого газа из области (б) в область (а) паром рабочей жидкости, выносом откачиваемых газов со струей пара, и газовой выделением стенок насоса.

Противодиффузия газа через паровую струю зависит от перепада давлений над струей и под ней, плотности $\rho_{\text{п}}$ и скорости $V_{\text{п}}$ паровой струи, а также от молекулярной массы газа. Противодиффузия тем меньше, чем меньше перепад давлений и чем больше $\rho_{\text{п}}$, $V_{\text{п}}$ и молекулярная масса откачиваемого газа.

Давление насыщенного пара рабочей жидкости насоса обычно на несколько порядков ниже реально достигаемого $p_{\text{пред}}$. Однако вакуумные масла, используемые в качестве рабочей жидкости, при работе насоса могут подвергаться разделению на фракции с различной упругостью пара. Поэтому при оценке влияния на $p_{\text{пред}}$ следует рассматривать не упругость пара масла, заливаемого в насос, а упругость фракций масла.

Современные рабочие жидкости практически не содержат фракций, и современные диффузионные насосы делают с общим паропроводом.

Вынос газа со струей из испарителя возникает из-за того, что при конденсации паровой струи на стенках насоса происходит частичное растворение газа в конденсате. Попавший вместе с конденсатом в кипятильник, газ затем увлекается паром к соплу и выделяется из паровой струи в откачиваемый объем.

Величина $p_{\text{пред}}$ зависит также и от мощности подогрева W , так как от нее зависят параметры паровой струи, определяющие величину противодиффузии. Сначала с увеличением W растут плотность и скорость паровой струи и уменьшается противодиффузия, растет температура конденсата и уменьшается растворимость газа в нем и $p_{\text{пред}}$ в целом понижается. Затем с увеличением степени термического разложения масла возрастает количество легких фракций масла и $p_{\text{пред}}$ начинает повышаться. Поэтому зависимость $p_{\text{пред}}(W)$ имеет минимум, соответствующий оптимальной мощности подогрева $W_{\text{опт}}$ (см. рис. 2 а).

Производительность насоса.

Производительностью насоса $Q_{\text{нас}}$ называется количество газа, удаляемого насосом в единицу времени через входной патрубок при данном впускном давлении. Она измеряется в $\text{м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$. Эффективная производительность Q_0 равна разности откачиваемого насосом прямого потока газа и обратного потока молекул

$$Q_0 = Q_{\text{нас}} - Q_{\text{обр}} \quad (1)$$

При $Q_{\text{нас}} = Q_{\text{обр}}$ достигается $p_{\text{пред}}$ и Q_0 обращается в нуль. Зависимость $Q_{\text{нас}}(p_{\text{вп}})$ в области рабочих давлений имеет линейный характер.

Быстрота откачки

Быстротой откачки во входном сечении насоса или его быстротой действия $S_{\text{нас}}$ называется объем газа, удаляемый насосом в единицу времени через входной патрубок при данном впускном давлении $p_{\text{вп}}$. Быстрота откачки измеряется в $\text{м}^3/\text{с}$.

Откачиваемый насосом поток газа связан с $S_{\text{нас}}$ и $p_{\text{вп}}$ соотношением

$$Q_{\text{нас}} = S_{\text{нас}} p_{\text{вп}} \quad (2)$$

Эффективная быстрота откачки S_0 всегда меньше номинальной быстроты действия $S_{\text{нас}}$. Представив (1) с учетом (2) в виде

$$S_0 p_{\text{вп}} = S_{\text{нас}} p_{\text{вп}} - S_{\text{нас}} p_{\text{пред}} \quad (3)$$

получим:

$$S_0 = S_{\text{нас}}(1 - p_{\text{пред}}/p_{\text{вп}}) \quad (4)$$

Зависимость S_0 от $p_{\text{вп}}$

Зависимость $S_0(p_{\text{вп}})$ представлена на рис. 2 б). Величина S_0 мала в области низких давлений (участок а), затем возрастает и в широком диапазоне давлений остается постоянной (участок б) и при высоких давлениях снова уменьшается (участок в).

При низких $p_{\text{вп}}$ (участок а) величина S_0 мала из-за того, что поток газа, откачиваемый насосом из объема, сравним с обратным потоком.

По мере увеличения $p_{\text{вп}}$ количество газа, удаляемого насосом из откачиваемого объема, растет и начинает значительно превосходить количество газа, поступающего обратно. Когда их величины становятся несоизмеримыми, S_0 перестает зависеть от $p_{\text{вп}}$ (участок б). При больших $p_{\text{вп}}$ за верхней границей молекулярного режима течения газа снижается скорость диффузии молекул в струю газа, затем струя газа начинает отрываться от стенки насоса, что приводит к росту $Q_{\text{обр}}$ и уменьшению величины S_0 (участок в).

Зависимость S_0 от $p_{\text{вып}}$

При увеличении $p_{\text{вып}}$ до значения $p_{\text{вып.макс}}$ происходит срыв (заворачивание) струи пара со стенки насоса, сопровождающийся перетоком газа из области предварительного разрежения в область высокого вакуума. Величина S_0 при этом уменьшается, а величина впускного давления возрастает.

Наибольшим выпускным давлением $p_{\text{вып.макс}}$ называется наибольшее значение давления на стороне предварительного разрежения, превышение которого приводит к ухудшению характеристик насоса. Зависимость $p_{\text{вп}}$ от давления на стороне предварительного разрежения приведена на рисунке 2 в). Сначала, с ростом $p_{\text{вып}}$ значение $p_{\text{вп}}$ не претерпевает изменений, а затем, при достижении $p_{\text{вып.макс}}$ оно начинает увеличиваться до тех пор, пока оба этих давления (на входе и на выходе насоса) не сравняются. Так как рост $p_{\text{вп}}$ при $p_{\text{вып}}$ больших чем $p_{\text{вып.макс}}$ обусловлен срывом струи, то с увеличением мощности нагревателя величина $p_{\text{вып.макс}}$ увеличивается (рисунок 2 а).

Значение $p_{\text{вып.макс}}$ определяется либо при предельном давлении, если насос предназначен для откачки системы до возможно низкого давления, либо при давлении соответствующем максимальному потоку нагрузки, если насос предназначен для поддержания низкого давления в системе при удалении большого количества газа.

Строго говоря, для высоковакуумных насосов $p_{\text{вп}}$ на горизонтальном участке зависимости $p_{\text{вп}}$ ($p_{\text{вып}}$) должно возрастать с ростом $p_{\text{вып}}$ вследствие обратной диффузии. Но заметно это становится только для лёгких газов, где горизонтальный участок может вообще отсутствовать.

Значение $p_{\text{вып.макс}}$ высоковакуумных насосов для большинства современных конструкций пароструйных насосов составляет 2-20 Па.

Для измерения $p_{\text{вып.макс}}$ к впускному фланцу присоединяется измерительная камера с установленным на ней манометром. За насосом, вблизи выпускного патрубка устанавливается вентиль-натекатель и манометр. Измерительная система откачивается до предельного давления и затем производятся измерения. Для этого вентилем-накателем повышается $p_{\text{вып}}$ до величины, при которой начинается возрастание $p_{\text{вп}}$. Значение $p_{\text{вып}}$, при котором $p_{\text{вп}}$ увеличится на 50%, определяется как $p_{\text{вып.макс}}$.

Зависимость S_0 от W

При увеличении мощности подогрева W от нуля до некоторого порогового значения $W_{\text{порог}}$ насос не работает, так как вся подводимая мощность затрачивается на компенсацию тепловых потерь, а не на парообразование. Выше $W_{\text{порог}}$ часть W идет на парообразование и насос начинает работать (см. рис. 2 а).

Механизм удаления молекул газа струей пара из откачиваемого объема обусловлен их диффузией и противодиффузией молекул в струю пара, уменьшающихся с ростом плотности струи $\rho_{\text{п}}$. При увеличении скорости струи $V_{\text{п}}$ диффузия растёт, а противодиффузия падает. Поэтому S_0 уменьшается с возрастанием $\rho_{\text{п}}$ и увеличивается с ростом $V_{\text{п}}$. С увеличением W выше $W_{\text{порог}}$ вначале $V_{\text{п}}$ растёт быстрее, чем $\rho_{\text{п}}$, а затем медленнее. Ввиду этого с увеличением W величина S_0 сначала возрастает, достигает максимума при $W_{\text{опт.с}}$ и затем уменьшается (см. рис. 2 а -кривая в).

С увеличением W выше $W_{\text{порог}}$, “срыв струи” будет происходить при больших значениях $p_{\text{вып}}$, поэтому при увеличении W ниспадающий участок (в) на рис. 2 б) будет начинаться при более высоких значениях $p_{\text{вп}}$. растёт, или, как говорят, “характеристика сдвигается вправо”.

Зависимость S_0 от рода газа в основном определяется коэффициентом диффузии газа D и структурой струи. На рис. 2 г), на котором изображены зависимости $S_0(W)$ для различных газов, видно, что значение $W_{\text{опт}}$ для легких газов смещается вправо. Это объясняется тем, что уменьшение диффузии в струю пара для легких газов начинается при больших значениях $\rho_{\text{п}}$, чем для тяжелых газов. Следовательно, для получения наибольших S_0 по газам различной молекулярной массы необходима установка оптимального режима подогрева насоса для каждого газа.

Так, например, W паромасляного насоса в гелиевом масс-спектрометрическом течеискателе ПТИ устанавливается такой, чтобы получить достаточно большую S_0 по гелию. Это дает возможность повысить чувствительность прибора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.

Паромасляный насос типа Н-5С (ND1) подключен к вакуумной камере (CV). Предварительная и вспомогательная откачка осуществляются с помощью ЦФС (центральной форвакуумной системы).

Линия байпасной откачки (вентиль VA2) позволяет ускорить получение предварительного разрежения в исследуемой системе.

Бюретка используется при измерении S насоса методом постоянного давления.

Натекатель VF1 позволяет менять давление на выходе диффузионного насоса.

Давление в системе контролируется с помощью двух вакуумметров ВТБ-1 (тепловые манометры РТ1, РТ2) и вакуумметра ВМБ-8 (магниторазрядный манометр РМ).

Натекатель VF2 позволяет изменять давление в вакуумной камере CV. Кран VII позволят переключать откачку либо на атмосферу, либо на бюретку.

Включение установки.

(проводится под наблюдением преподавателя)

Включить питание на стенде, включить водяное охлаждение насоса, включить два ВТБ-1 (РТ1 и РТ2 на рис. 2) на самой “грубой” шкале.

Рабочее задание

1. Откачка вакуумной системы, получение кривой откачки

1.1 Предварительная откачка:

- Провести предварительную откачку посредством ЦФС, постепенно переключая ВТБ-1 на более чувствительные шкалы, до давления 1-5 Па (15-20 делений на самой чувствительной шкале).

- После получения предельного давления (2-5 Па), открыть вентиль VA4 (под наблюдением персонала лаборатории). Зафиксировав начальное давление, снять кривую предварительной откачки $p(t)$ (давление измеряется манометром РТ2, правый вакуумметр ВТБ-1). Левый ВТБ-1 предварительно переключить на более грубую шкалу. В итоге показания обоих ВТБ-1 должны практически сравняться.

1.2 Высоковакуумная откачка:

- Включить питание диффузионного насоса ND1. Прогрев будет длиться 35÷40 мин. Отмечая зависимость давления от времени по ВТБ-1 и ВМБ-8 (ВМБ-8 включить только когда стрелка на ВТБ-1 приблизится к нулю). Время откачки составляет 10÷15 мин. Предельное давление соответствует 70-75 делений шкалы ВМБ-8.

- По полученным данным построить кривую высоковакуумной откачки объема $p(t)$

2. Измерение характеристики $S(p_{вп})$ методом постоянного давления

Для измерения данной характеристики необходимо, во-первых, изменять величину давления в системе $p_{вп}$ и, во-вторых, определять скорость откачки S .

Давление в вакуумной системе изменяется с помощью соответствующей регулировки потока натекания Q_i через натекатель VF2 [$p_i = Q_i / S_i$], измеряется вакуумметром ВМБ и откладывается по оси абсцисс.

Возможны два источника потока натекания:

- атмосферный воздух при открытом кране VII, этот источник используется при выборе давления p_i в системе;

- воздух, находящийся в бюретке при атмосферном давлении, при закрытом кране VII, этот источник используется при определении Q_i (**необходимо помнить, что количество газа в нем ограничено объемом бюретки и, следовательно, ограничено время его использования**).

В данной лабораторной работе для измерения характеристики достаточно проведение измерений в четырех точках ($i = 1..4$).

Скорость откачки S при известном давлении в системе ($p_{вп}$) может быть найдена из уравнения $S_i = Q_i / p_i$, где Q_i определяется как отношение количества газа $\Delta[(p_{атм} * V_0)]_i$, откаченного вакуумной системой из бюретки через натекаТЕЛЬ за время Δt_i .

При откачке газа из бюретки происходит подъем масла в ней, так как давление в ней уменьшается на величину $\Delta p = h * \rho_{масла} / \rho_{ртути}$, где h - высота подъема масла (здесь считается, что высота столбика масла h является мерой давления – мм масляного ст. * $\rho_{масла} =$ мм рт.ст. * $\rho_{ртути}$). Одновременно уменьшается объем газа в бюретке на величину $\Delta V = h \pi d^2 / 4$, где d - внутренний диаметр бюретки. Таким образом, откаченное за время Δt количество газа в случае подъема масла на высоту h составляет:

$$\Delta(p_{атм} * V_0) = V_0 * \Delta p + p_{атм} * \Delta V = h(V_0 * \rho_{масла} / \rho_{ртути} + p_{атм} \pi d^2 / 4) \quad (5)$$

Выражение в скобках представляет собой постоянную величину, называемую “постоянной бюретки” $K_б$, тогда скорость откачки равна:

$$S_i = K_б * h_i / p_i * \Delta t_i, \text{ где } K_б = 1,33 \text{ л} * \text{Па} / \text{мм} \quad (6)$$

Проведение измерений:

- Включить подсветку шкалы бюретки, **кран VII открыт**.
- Придерживая медную трубку натекаТеля, открывать вентиль-натекаТЕЛЬ VF2 (микрометрический винт) и установить давление в объеме в районе 90 делений по ВМБ-8.
- Закрывать кран VII, после чего зафиксировать время подъема масла в бюретке на высоту 100 мм. Открыть кран VII и опустить масло на искомый уровень. Повторить измерения несколько раз для получения наиболее достоверного среднего значения.
- Прodelать предыдущие два пункта для значений давления в объеме, соответствующих 85, 80 и 75 делениям на ВМБ-8, записать данные зависимости времени подъема масла в бюретке на высоту 100 мм, от величины давления в таблицу. Рассчитать скорости откачки по формуле (6). **После проведения измерений не забыть оставить открытым кран VII.**
- По полученным данным построить зависимость $S_0(p)$.

3. Измерение характеристики $p_{вп}(p_{вып})$

- Закрывать натекаТЕЛЬ VF2, получить $p_{пред}$
- Открывая вентиль-натекаТЕЛЬ VF1 на установке с обратной стороны стенда, увеличивать $p_{вып}$, контролируя его по левому ВТБ-1, до тех пор (ориентировочно 10 Па или 7÷8 делений по 2-ой шкале ВТБ-1) пока не начнет увеличиваться $p_{вп}$ (не более, чем на 50%), контролируемое по ВМБ-8. Значение $p_{вып.макс}$ зафиксировать.

Выключение установки

Закрывать вентиль-натекатель VF1, проверить закрыт ли вентиль-натекатель VF2, (кран VII должен быть открыт), выключить подсветку шкалы бюретки.

Выключить питание диффузионного насоса, через 30-40 мин после выключения диффузионного насоса закрыть VA4.

После получения разрешения от преподавателя выключить стенд ЛУ-1, выключить водяное охлаждение.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) принципиальную схему вакуумной системы, использованной в работе;
- 2) таблицы экспериментальных данных;
- 3) графики зависимостей $p(t)$;
- 4) график зависимости $S(p_{вп})$;
- 5) график зависимости $p_{вп}$ ($p_{вып}$);
- 6) значения: $p_{пред}$, $Q_{нас.мах}$, $S_{0.мах}$, $P_{вып.мах}$,
указанные с расчетными экспериментальными погрешностями.

Список рекомендуемой литературы

1. Шестак В.П. Средства откачки. Учебное пособие. М.: МИФИ, 1980.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. Для вузов. М.: Высш.шк., 1990.
3. Шестак В.П. Физические основы вакуумной техники: Учеб. пособие. М.: МИФИ, 1991.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

- На чем основано действие диффузионных вакуумных насосов ?
- Чем определяется величина предельного вакуума насоса ?
- Что такое оптимальная мощность подогрева ?
- Что называется быстротой откачки насоса ?
- Какими процессами в насосе объясняется ход зависимости $S(p_{вп})$?
- Как зависит быстрота откачки от рода газа ?
- Что называется наибольшим выпускным давлением насоса ?
- Какие факторы определяют величину наибольшего выпускного давления ?
- Как мощность подогрева влияет на основные рабочие характеристики насоса ?
- В чем заключается существо метода постоянного давления ?

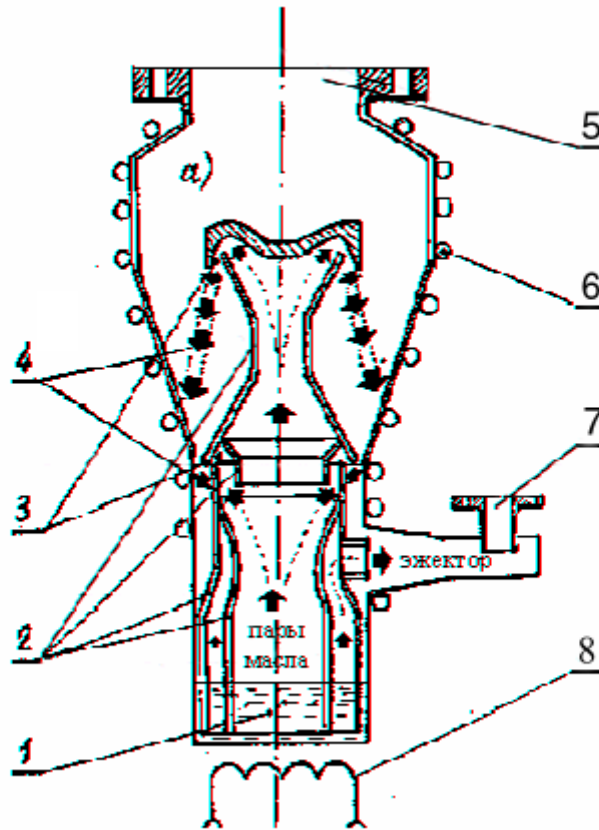


Рис. 1. Схема современного трехступенчатого диффузионного паромасляного насоса
(без фракционирования рабочей жидкости)

- 1 - испаритель масла;
- 2 - паропроводы;
- 3 - сопла Лавалья;
- 4 - сверхзвуковые струи пара масла;
- 5 - входной фланец (патрубок), подключение к откачиваемому объему;
- 6 - охлажденные (водой) стенки насоса;
- 7 - выходной фланец, подключение вспомогательного насоса;
- 8 - нагреватель

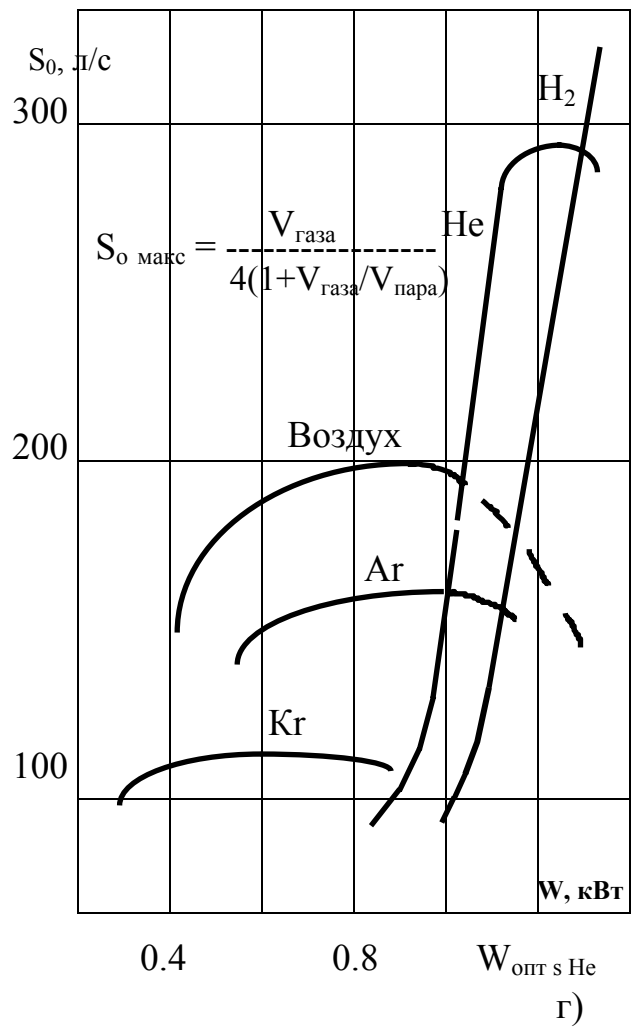
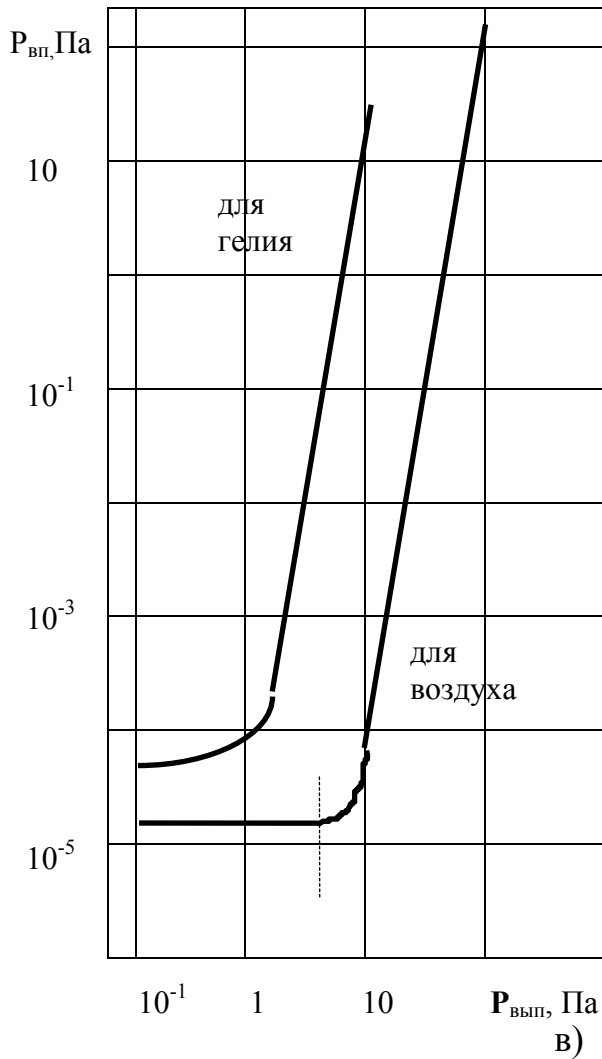
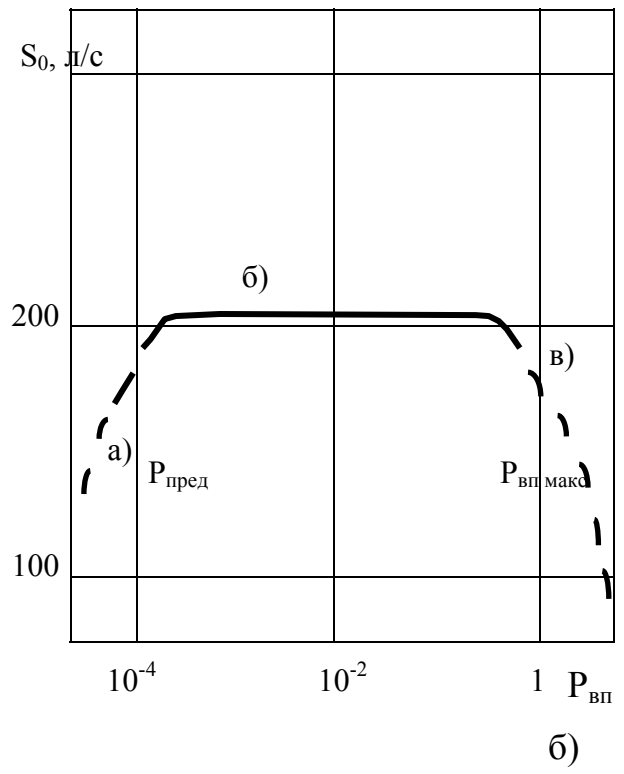
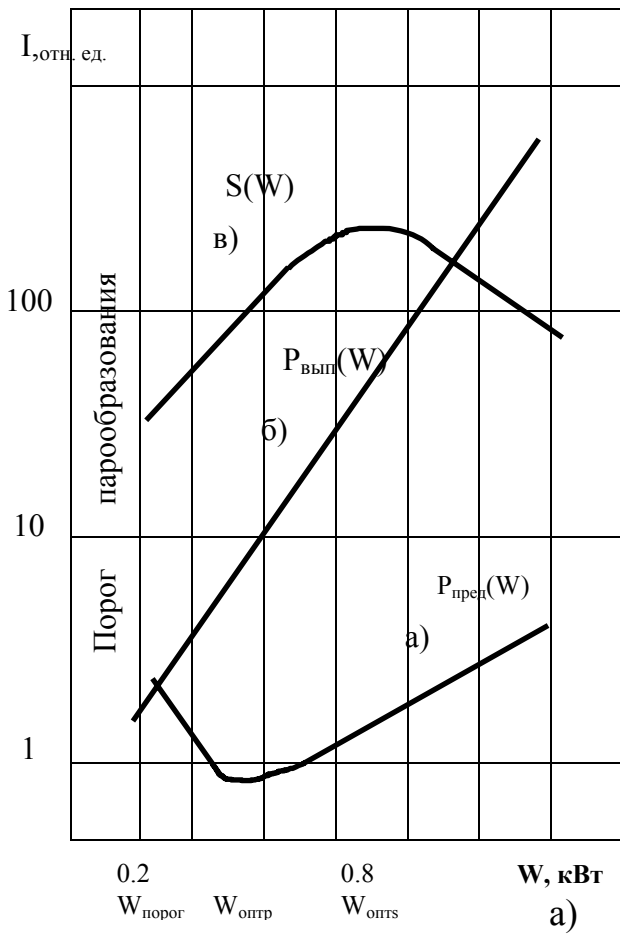


Рис. 2. Рабочие характеристики диффузионного насоса

- а) зависимость быстроты действия насоса от величины впускного давления;
- б) зависимость основных параметров насоса от мощности кипятильника;
- в) зависимость быстроты действия насоса при откачке разных газов от мощности кипятильника;
- г) зависимость величины впускного давления от величины выпускного.

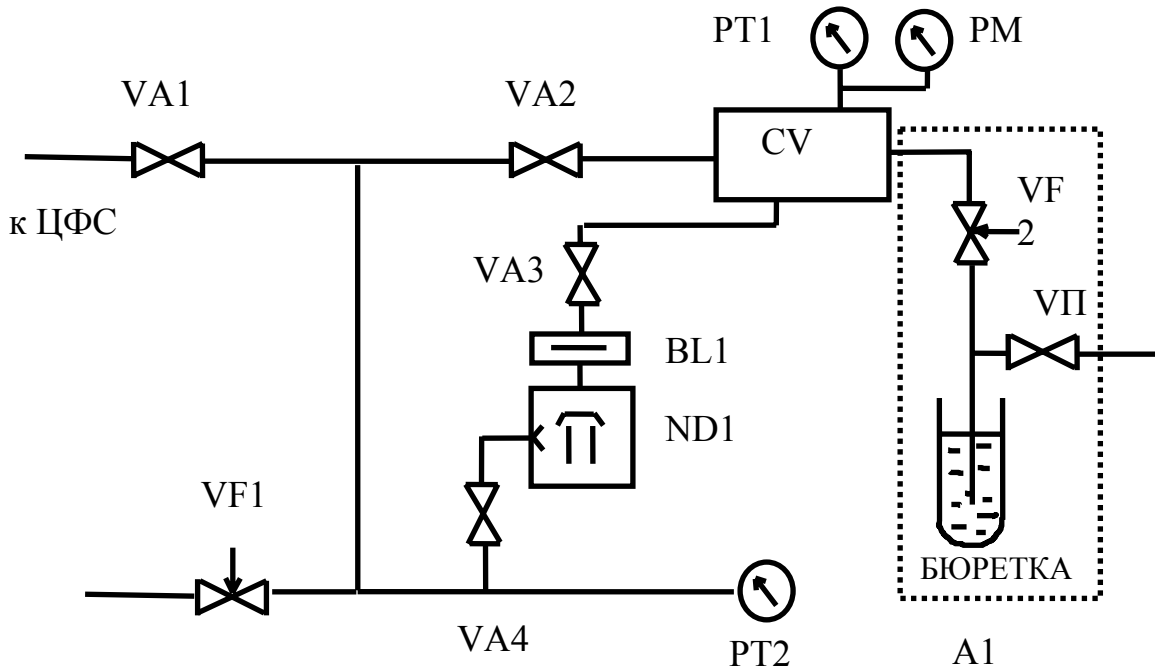


Рис. 3 Принципиальная схема установки для исследования характеристик диффузионных паромасляных насосов

- A1 - устройство для измерения быстроты действия насосов методом постоянного давления
- ND1 - диффузионный насос
- BL1 - ловушка
- VF1, VF2 - вентили-натекатели
- VA1, VA2, VA3, VA4 – вентили электромеханические
- VП – вентиль ручной
- CV- вакуумная камера
- PT1, PT2 – манометры тепловые
- PM – манометр магнитный электроразрядный
- ЦФС – центральная форвакуумная система

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ:

Лабораторная работа

Исследование характеристик высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса

1. Откачка вакуумной системы:

предварительная

Время													
PT1, дел													
Па													
PT2, дел													
Па													

высоковакуумная

Время													
PT1, дел													
Па													
PM, дел													
Па													

2. Измерение зависимости S(p_{вп}):

PM	1			2			3			4			
H, мм													
T, с													
S м ³ /с													

3. Измерение характеристики p_{вп}(p_{вып}):

PT2, дел													
Па													
PM, дел													
Па													

Выполнили: _____
студенты _____
группы _____

Проверил:
преподаватель