

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА (ЭВМ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: получить представление о характерных особенностях работы вакуумной системы, включающей форвакуумный и диффузионный насосы, при наличии газоотделения, натекания и прогрева вакуумной системы; освоить методику работы с моделирующей программой ЭВМ; научиться проводить анализ зависимостей изменения давления от времени и режимов откачки, уметь выбирать средства откачки, обеспечивающие получение требуемого вакуума в системе.

ВВЕДЕНИЕ

Откачка

Откачка вакуумной системы производится с целью снижения в ней давления (молекулярной концентрации или количества молекул) до уровня, обеспечивающего проведение физических исследований или вакуумных технологических процессов.

Уменьшение количества молекул в системе осуществляется с помощью средств откачки (вакуумных насосов или комбинации насосов), создающих в вакуумной системе направленное движение молекул - поток откачки Q_0 :

$$Q_0 = -V \cdot dp/dt, \quad (1)$$

где V - объем вакуумной системы; p - давление в ней; t - текущее время, знак минус указывает на то, что давление уменьшается (знак минус может быть отнесен к потоку откачки, в этом случае он указывает на направление потока откачки - из камеры).

Согласно выражению (1) в вакуумной системе можно получить сколь угодно низкое давление. Однако реально существует так называемое предельное давление $p_{пред}$, ниже которого откачка системы невозможна. Величина этого давления определяется, во-первых, количественными характеристиками выбранных насосов, такими как предельное давление на входе насоса и быстрота действия насоса и, во-вторых, качеством изготовления вакуумной системы, то есть величинами потоков натекания Q_{Tj} и потоков газовой выделенности $Q_{ГВj}$:

$$p_{пред} = \left[\sum Q_{Tj} + \sum Q_{ГВj} \right] / S(p_{пред}) \quad (2)$$

где: величина $S(p_{пред})$ определяется по рабочей характеристике вакуумного насоса (зависимость быстроты действия насоса от величины давления на его входе), обычно сообщаемой заводом изготовителем; j - индекс суммирования потоков натекания и газовой выделенности при наличии нескольких их источников. При достижении предельного давления поток откачки определяется суммарным потоком газовой нагрузки и в вакуумной системе устанавливается режим динамического квазиравновесия: насос работает, в системе существуют установившиеся потоки молекул (входящих и выходящих), давление и количество молекул в системе практически не изменяются.

Уравнение откачки вакуумной системы в общем случае может быть записано следующим образом:

$$p_i S(p_i) - \sum Q_{Tj} - \sum Q_{ГВj} = -V \cdot \frac{dp_i}{dt} \quad (3)$$

где: p_i - парциальное давление i -го газа, которое является функцией времени.

Подобное уравнение может быть записано и для полного давления.

Спектр масс остаточных газов в вакуумной системе

Любой вакуумный насос обладает селективностью откачки, то есть быстрота

действия насоса различна по разным газам. Это приводит к тому, что за одно и то же время работы насос удаляет из системы различное количество разных газов, следовательно, изменяется относительное содержание газов или изменяется масс-спектр смеси газов, оставшихся в системе после ее откачки. Так для низковакуумного механического масляного насоса в начальном спектре, соответствующем составу атмосферного воздуха, должно увеличиться процентное содержание паров воды и углеводородов - паров вакуумного масла, используемого в насосе. Для высоковакуумного диффузионного насоса быстрота действия связана с молекулярной массой откачиваемых молекул выражением:

$$S_1/S_2 = \sqrt{M_2/M_1} \quad (4)$$

Вид масс- спектра остаточного газа в системе, таким образом, определяется:

- начальным составом смеси;
- типом используемого насоса;
- режимом работы насоса.

Очевидно, что в процессе откачки вид масс-спектра постоянно изменяется, кроме того он изменится и при изменении мощности нагревателя для диффузионного насоса, которая определяет и скорость и плотность струи пара.

Потоки натекания и газовыделения

Натекание обычно возникает в случае нарушения герметичности вакуумной системы. Чаще всего герметичность нарушается в местах разборных соединений. Вероятность таких случаев принимается за 0,3 , а величина потока натекания принимается на уровне минимального потока, регистрируемого с помощью течеискателя (порядка $1 \cdot 10^{-11}$ Вт). Поскольку атмосферное давление всегда много больше, чем давление внутри вакуумной системы, то величина потока натекания постоянна и не зависит ни от давления в системе, ни от времени. Парциальный состав потока натекания соответствует парциальному составу атмосферного воздуха. Допустимым считается такой поток натекания, при котором возможно получение требуемого равновесного давления p в системе: $Q_{Тдоп} \leq k_3 p S(p)$, где k_3 – коэффициент запаса по степени герметичности.

Определение величины суммарного потока натекания может быть проведено при отключении насосов от вакуумной системы. При отключении насосов в системе наблюдается рост давления, анализ полученной зависимости $p(t)$ позволяет установить не только наличие газовой выгрузки и натекания (нелинейная и линейная части зависимости), но и оценить их величины. Суммарный поток газовой нагрузки определяется углом наклона касательной проведенной к зависимости давления от времени в момент отключения насосов от вакуумной системы. Поток натекания определяется углом наклона прямолинейного участка кривой к оси абсцисс. Для определения потока натекания необходимо: установить момент времени t , в который начинается близкое к линейному изменение давления в системе (при этом устанавливается равновесный поток газовой выгрузки и дальнейшее повышение давления в системе происходит только вследствие натекания); измерить давление p_1 , через интервал времени Δt измерить давление p_2 . Поток натекания Q_T в этом случае определяется по выражению:

$$Q_T = V \cdot \Delta p / \Delta t \quad (5)$$

где V -объем вакуумной системы (камеры), $\Delta p = p_2 - p_1$.

Газовыделение с поверхностей вакуумной системы существует всегда, однако величина потока обычно мала и поэтому принято учитывать потоки газовой выгрузки только при рассмотрении условий в высоком вакууме. Источники газовой выгрузки можно разделить на четыре группы:

- собственно газовой выделение - приповерхностные эффекты, определяемые выбором материалов;

- ложное натекание - выход газа из внутренних лабиринтовых полостей и закрытых частей вакуумных элементов.

Процессы газовой выделенной, обусловленные любой причиной, можно интенсифицировать путем нагрева стенок вакуумной системы (и следовательно молекул) до температуры (250-650)°С. Если при этом проводится и откачка системы, то происходит вакуумная температурная тренировка, приводящая к ускоренной очистке поверхностей и, следовательно, к уменьшению общего числа молекул в системе, так как источники газовой выделенной имеют ограниченный ресурс по количеству молекул и потоки газовой выделенной уменьшаются со временем. Время очистки поверхности при ее прогреве до 450°С может составлять минуты, но давление, достигаемое в системе составит только 10⁻⁴ Па, чтобы снизить давление до 10⁻⁶ Па требуется несколько часов, при желании получить в системе давление 10⁻⁸ Па необходима вакуумная температурная тренировка в течение 100 часов.

Кривые откачки

В результате решения уравнения откачки (3) могут быть получены зависимости вида **p(t)** для каждого компонента газовой смеси. Для полного давления:

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{Q_{\Sigma}}{S} + \left(P_{нач} - \frac{Q_{\Sigma}}{S} \right) * e^{-t/\tau} \quad (6)$$

Параметр $\tau = V/S$ называется постоянной времени откачки и определяет скорость откачки из камеры системы объемного газа (pV). Время откачки до заданного давления будет равно:

$$\Delta t = 2,3 * \frac{V}{S} * \lg \frac{p_{нач} - \frac{Q_{\Sigma}}{S}}{p(t) - \frac{Q_{\Sigma}}{S}} \quad (7)$$

Графики зависимостей в полулогарифмическом масштабе ln p(t) на начальном участке имеют вид прямых с углом наклона, определяемым τ . Чем меньше τ , тем резче падает давление. При приближении давления к предельному (2) значению скорость снижения давления уменьшается и в пределе давление остается практически постоянным (для конечного интервала времени).

На практике зависимости **p(t)** представляют собой экспериментальные кривые откачки как для полного давления, так и для парциальных давлений. Реально эти кривые получают записывая значения давлений в фиксированные моменты времени.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На рис. 1 показана вакуумная система, состоящая из откачиваемого объема CV, последовательности вакуумных насосов N1, N2, ... , соединенных трубопроводами, каждый из которых характеризуется пропускной способностью U1, U2, Самый первый, т. е. самый низковакуумный насос, выбрасывает газ, откачиваемый из системы, в атмосферу. Атмосферное давление обозначено Pa.

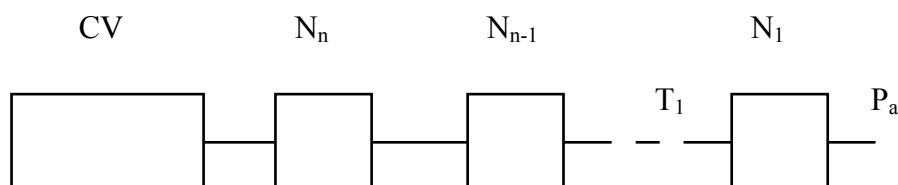


Рис. 1. Схема многоступенчатой вакуумной системы

Число насосов в вакуумной системе определяет число ступеней откачки. Отметим, что некоторые типы насосов (механические, эжекторные, диффузионные) сами по себе являются многоступенчатыми. Здесь, однако, мы это не учитываем.

Системы, предназначенные для получения низкого вакуума, как правило, состоят из одной ступени, которая обеспечивает выброс газа из откачиваемого объема непосредственно в атмосферу.

Высоковакуумные установки состоят из двух, а иногда и трех ступеней откачки. В таких установках используются диффузионные, молекулярные или сорбционные насосы.

Наконец в установках для получения сверхвысокого вакуума используются не менее трех ступеней откачки. В последней, сверхвысоковакуумной ступени применяются некоторые типы магнитоэлектрических насосов и криогенные агрегаты.

В каждую из ступеней откачки вакуумной системы помимо соответствующего насоса входит трубопровод, соединяющий насос с откачиваемым объемом или с насосом более высоковакуумной ступени. Этот трубопровод характеризуется пропускной способностью U , зависящей от его геометрических размеров.

По определению,

$$U = \frac{Q}{p_{\text{вп}} - p_{\text{вып}}}, \quad (8)$$

где Q — поток газа, проходящий по трубопроводу; $p_{\text{вп}}$ — давление на входе трубопровода; $p_{\text{вып}}$ — давление на выходе трубопровода.

Для круглого трубопровода пропускную способность в достаточно широком диапазоне давлений можно определять по следующей формуле:

$$U = 1,36 \times 10^3 \times \frac{d^4}{L} \times \frac{p_1 + p_2}{2} + 121 \times \frac{d^3}{L} \times \frac{1 + 1,9 \times 10^4 \times d \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 2,35 \times 10^4 \times d \frac{p_1 + p_2}{2}}, \quad (9)$$

где p_1 и p_2 — давления на входе и выходе трубопровода; d — его диаметр, L — длина.

Если в трубопровод включены какие-либо другие элементы вакуумной аппаратуры: вентили, ловушки, то суммарная пропускная способность определяется по формуле:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U^{(1)}} + \frac{1}{U^{(2)}} + \dots, \quad (10)$$

где $U^{(1)}$, $U^{(2)}$ — пропускные способности отдельных элементов вакуумного тракта.

Одним из основных параметров, характеризующих возможности вакуумного насоса, является его быстрота откачки, т.е. объем газа, удаляемый насосом в одну секунду при давлении $p_{\text{вх}}$. Быстрота откачки вакуумных насосов зависит от давления, для разных насосов эта зависимость различная. Мы будем считать, что $S(p) = S_0 S_{(p)}$, где S_0 — максимальное значение быстроты откачки насоса; $S_{(p)}$ — функция давления, наибольшее значение которой равно единице.

В лабораторной работе будут рассматриваться два типа насосов: механический вращательный и паромасляный диффузионный. Соответствующие им качественные зависимости $S(p)$ приведены на рис. 2 и 3.

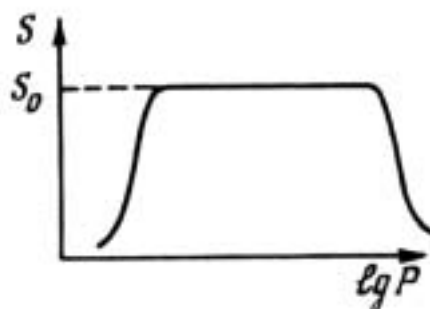


Рис. 2. Зависимость быстроты откачки диффузионного насоса от величины рабочего давления

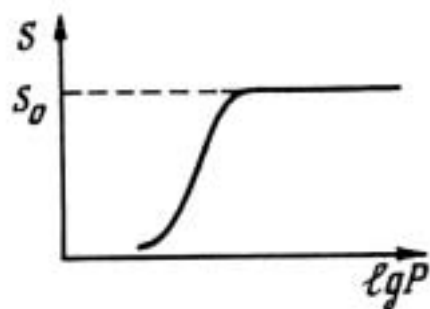


Рис. 3. Зависимость быстроты откачки механического насоса от величины рабочего давления

Рис.2 иллюстрирует важную особенность высоковакуумных насосов: имея максимальную быстроту откачки при давлениях порядка 10^{-1} – 10^{-3} Па, с увеличением давления они становятся крайне неэффективными. Более того, физические принципы, лежащие в основе работы этого насоса, не позволяют ему нормально функционировать при давлениях 10 Па и выше.

Поэтому в качестве предварительной ступени откачки для диффузионного насоса используется механический вращательный насос, имеющий высокую производительность при давлениях, близких к атмосферному, и способный создать предварительное разрежение, достаточное для включения и работы диффузионного насоса.

При одновременной работе двух насосов давление на входе низковакуумного насоса не должно превышать допустимую величину выходного давления для высоковакуумного насоса (принцип согласования).

Таким образом, рассматриваемая система является двухступенчатой (рис. 4).

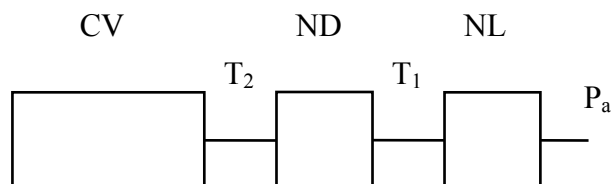


Рис. 4. Схема моделируемой двухступенчатой системы откачки

Включение этой системы производится следующим образом. Сначала включается низковакуумный насос NL, который откачивает всю систему до давления $P_{нач}$, после чего включается высоковакуумный насос ND.

Рассмотрим работу верхней ступени откачки. Зависимость полного давления от времени описывается дифференциальным уравнением:

$$V \frac{dp}{dt} = Q_{ГВ} + Q_T - S_{эфф} p, \quad (11)$$

где Q_T — поток газа, обусловленный натеканием в систему; $Q_{ГВ}$ — поток газовыделения, $S_{эфф}$ — эффективная быстрота откачки насоса

$$\frac{1}{S_{эфф}} = \frac{1}{U_T} + \frac{1}{S}, \quad (12)$$

где U_T суммарная пропускная способность трубопровода со всеми включенными в него элементами.

Соотношение между собственной и эффективной быстротой откачки определяет коэффициент использования насоса. Значительное снижение $S_{эфф}$ по сравнению с S свидетельствует о низкой эффективности использования насоса, т.е. об ошибке в проектировании системы. Допустимыми можно принять значения коэффициента, равные 1,5 - 2.

Поток, обусловленный натеканием, описывается соотношением:

$$Q_T = \sigma(p_{атм} - p). \quad (13)$$

Здесь σ — коэффициент, определяющий суммарную пропускную способность всех течей. Из формулы (13) видно, что при $p \ll p_{атм}$ поток натекания не зависит от давления.

При малых давлениях ($p < 1$ Па) необходимо учитывать составляющую газовой нагрузки, обусловленную потоком газовыделения материалов (на этапе предварительной низковакуумной откачки им допустимо пренебречь):

$$Q_{ГВ} = q_0 k e^{-kt}, \quad (14)$$

где

$$k = k_0 e^{a \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)}. \quad (15)$$

В приведенных выражениях q_0 — полное количество газа, адсорбированного стенками откачиваемого объема (начальный поток); k_0 — характеризует скорость газовыделения при нормальной температуре; T — температура откачиваемого объема; t - время; a — коэффициент, зависящий от ряда факторов: материала обработки поверхности вакуумного объема, рода газа и др. Этот коэффициент определяется экспериментально.

Из формулы (15) видно, что коэффициент k растет с повышением температуры вакуумной системы. Это приводит к увеличению потока газовыделения в k/k_0 раз и одновременно к более быстрому его затуханию во времени ($\sim e^{-kt}$). Поэтому при получении достаточно высокого вакуума, когда газовыделение может существенно затормозить процесс откачки, используется прогрев вакуумной системы. Отметим, что прогрев проводится достаточно осторожно, так как резкое увеличение газовыделения может привести к превышению предельно допустимого давления на входе высоковакуумного насоса.

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Принципиальная схема вакуумной системы, работа которой моделируется в данной лабораторной работе, построена в соответствии со схемой на рис.4. В схему внесены только те элементы, включение/выключение которых и их использование позволяет проследить (провести) процесс откачки в соответствии с целями лабораторной работы.

Заданные габариты и материал вакуумной камеры CV (медь, дюралюминий, мягкая сталь, нержавеющая сталь) определяют величину потоков газовыделения и время выхода

газовыделения на установившийся режим.

Система прогрева камеры позволяет проводить вакуумную температурную тренировку в диапазоне температур (293 - 673) К.

Предусмотрена имитация течи в системе заданием величины пропускной способности. Например, по аналогии, клапан типа НРП-1,6 с ручной регулировкой потока натекания позволяет практически линейно изменять величину потока в диапазоне (10^{-8} - 10^{-3}) Вт.

Выбор пары насосов ND и NL определяет не только время достижения требуемого рабочего давления, но и величину достигаемого предельного давления, которое может находиться для современных насосов в диапазоне (10^{-8} - 10^{-4}) Па.

Включение/отключение диффузионного насоса ND в данной работе подразумевает включение/отключение питания нагревателя без учета инерционности данного процесса. Регулировка мощности подогревателя позволяет изменять параметры паровой струи рабочей жидкости диффузионного пароструйного насоса.

Предварительная откачка системы осуществляется механическим масляным насосом NL через отключенный диффузионный насос. Достигаемое предельное давление зависит от выбора насоса и может находиться для современных насосов в диапазоне (10^{-2} - 10) Па.

Соединение насосов между собой и с вакуумной камерой осуществляется трубопроводами соответствующих диаметров и длин, определяемых в ходе моделирования системы.

Система измерения, включающая манометры а также масс-спектрометр, обеспечивает анализ кинетики процессов изменения как полных, так и парциальных давлений в вакуумной системе.

Главное окно интерфейса программы (рис. 5) содержит текстовые поля с параметрами, кнопки "Откачка", "Результаты" "Схема", "Дополнительные параметры", "Восстановить стандартные параметры" и окно расчетного графика $p_{\Sigma}(t)$.

Работа с программой осуществляется следующим образом:

Посредством текстовых полей в программу вводятся параметры вакуумной системы, после чего оператор нажимает на кнопку "Откачка". Через небольшой промежуток времени в области графика появляется рассчитанная кривая $p_{\Sigma}(t)$.

После окончания счета можно нажимать на кнопку "Результаты", которая открывает на экране окно вывода с увеличенными графиками зависимости суммарного (полного) давления в системе от времени $p_{\Sigma}(t)$, набором зависимостей парциальных давлений от времени $p_i(t)$ и таблицей $p_i(t)$.

Кнопка "Схема" открывает структурную схему моделируемой вакуумной системы.

В окне "Дополнительные параметры" устанавливаются данные по составу откачиваемого газа и параметрам отдельных компонентов, создающих нагрузку вакуумной системы. В обычном режиме работы эти параметры заданы «по умолчанию» и кнопка "Восстановить стандартные параметры" возвращает их в это исходное состояние.

Ниже описаны параметры, изменяемые в главном окне:

Параметры камеры:

- начальный поток газовой выделенной (рассчитывается исходя из характеристик выбранного материала и площади внутренней поверхности камеры; учет газовой выделенной начинается производиться с момента включения дифнасоса);
- суммарная пропускная способность щелей (течь);
- начальное давление в камере;
- объем камеры (форма камеры – цилиндр).

Параметры форвакуумного механического насоса:

- наименьшее достижимое (предельное) давление насоса;
- номинальную быстроту откачки;
- диаметр и длина тракта откачки.

Параметры диффузионного насоса

- наибольшее допустимое давление на входе дифнасоса (если в какой-то момент времени давление на входе дифнасоса превосходит эту величину, насосы отключаются).
- наименьшее достижимое (предельное) давление насоса;
- номинальную быстроту откачки;
- диаметр и длина тракта откачки.

Параметры управления

- время работы программы (с момента старта включается механический насос);
- время включения дифнасоса (находится по времени достижения давления запуска);
- мощность нагревателя диффузионного насоса;
- время включения/отключения прогрева камеры;
- максимальная температура камеры;
- время отключения насосов.

ЗАДАНИЯ

Выполнение лабораторной работы начинается с получения у преподавателя основных данных по моделируемой вакуумной системе (объем камеры, материал, протекание, величина рабочего давления). По этим параметрам определяются исходные значения моделируемой системы и заносятся в программу.

Затем, исходя из заданных требований к рабочей камере, подбираются основные средства откачки (см. Приложение). Параметры выбранных насосов вводятся в текстовые поля окна программы и задаются ориентировочные размеры соединительных трубопроводов. Диаметры трубопроводов подбираются соответственно диаметрам присоединительных фланцев насосов.

Задание 1.

Установить параметры вакуумной камеры, записав в соответствующие текстовые поля окна программы:

- заданный объем вакуумной камеры;
- начальное давление в камере (равное атмосферному, если специально не указано);
- пропускную способность течей (в начале работы можно установить $1 \cdot 10^{-6}$);
- начальный поток газовой выделенности (в этом поле задается начальный уровень потока со всей внутренней поверхности вакуумной камеры).

Для вычисления начального потока газовой выделенности сначала рассчитывается площадь внутренней поверхности вакуумной камеры A (диаметр и высоту цилиндрической камеры можно принять равными). Для заданного материала стенок камеры по таблице Приложения находится значение удельного потока с единицы поверхности q_0 . Тогда искомая величина равна $Q_{гв0} = q_0 \cdot A \cdot F$. Коэффициент шероховатости поверхности F учитывает превышение истинной площади поверхности над геометрической. Для грубо обработанных поверхностей металлов он может составлять 20 (и более), для полированных поверхностей 3 – 5.

Задание 2.

Произвести первый этап низковакуумной откачки с помощью механического форвакуумного насоса. Полученное давление должно обеспечивать нормальный запуск диффузионного насоса (не более $p_{раб} = 10$ Па). Максимальное время откачки до рабочего давления $t_{макс} = 20-30$ мин. Известно, что в камере есть течь. Поток газовой выделенности на данном этапе откачки пренебрегаем.

Последовательность выполнения задания:

Выбрать по таблице Приложения насос, соответствующие параметры задать в полях для форвакуумной откачки. Время работы системы установить равным 50 мин. Произвести откачку.

Проанализировать полученную зависимость. Чем ограничивается величина достигнутого давления?

Дать рекомендацию: необходимо уменьшать течь или нет? Определить величину допустимой течи.

Определить размеры трубопровода (допустимые), которые снижают эффективную быстроту откачки насоса приблизительно в 1,5 раза (при $p = p_{\text{раб}}$). Выбрать оптимальные размеры трубопровода (диаметр должен примерно совпадать с патрубком насоса, длина – разумным конструктивным соображениям).

По найденным параметрам рассчитать действительное время откачки. Это время должно быть меньше, чем $t_{\text{макс}}$. Если окажется, что $t_{\text{действ}} > t_{\text{макс}}$ приступить к выбору параметров насоса и трубопровода для следующего варианта комбинации насосов.

Задание 3.

Произвести высоковакуумную откачку с помощью диффузионного паромасляного насоса. Параметры откачки: $p_{\text{нач}}=10$ Па, $p_{\text{раб}}=10^{-4}$ Па, максимальное время откачки $t_{\text{макс}}=2-3$ час. Известно, что в камере происходит газовыделение со стенок и есть течь.

Последовательность выполнения задания:

Выбрать по таблице Приложения высоковакуумный насос, соответствующие параметры задать в полях для форвакуумной откачки. Время работы системы установить равным 200 мин. Произвести откачку.

Проанализировать полученную зависимость; достаточна ли скорость снижения давления, достигнут ли требуемый уровень вакуума.

Откачать систему до некоторого давления, отключить насос, положив $S=0$, и снять зависимость $p(t)$.

Исходя из величины течи и требуемого рабочего давления, дать рекомендации о последующих действиях в целях откачки заданной вакуумной системы:

а) оставить выбранную предварительно быстроту откачки насоса, размер трубопровода и течь;

б) изменить быстроту откачки насоса, сохранив течь;

в) принять меры к уменьшению течи, для того чтобы достичь рабочее давление при выбранной предварительно скорости откачки насоса.

Окончательно определить размер трубопровода так, чтобы эффективная быстрота откачки насоса при $p=p_{\text{раб}}$ снижалась не более, чем в 2 раза.

Если не удастся достичь рабочего давления, то необходимо увеличить быстроту откачки насоса.

Рассчитать и проверить согласование насосов по потоку откачиваемого газа и максимальной величине допустимого выпускного давления дифнасоса.

Задание 4.

Вакуумная система с найденными параметрами откачивается диффузионным насосом. Известно, что в системе есть течь и газоотделение. Необходимо получить разрежение порядка 10^{-5} Па после обезгаживания камеры прогревом. Максимальное допустимое давление в системе $p_{\text{доп}} = 10^{-1}$ Па. Определить также допустимую течь при заданном разрежении.

Последовательность выполнения задания:

Предварительно откачать систему в течение 1 часа и зарегистрировать давление в ней.

Включить прогрев камеры и продолжать откачку. Первоначальный режим: $T=373\text{K}$, время работы в заданном режиме 40 - 60 мин. При этом необходимо следить за тем, чтобы давление в системе не превысило максимально допустимое.

Постепенно увеличивая температуру и время откачки, добиться обезгаживания системы.

Оценить, во сколько раз следует уменьшить течь для достижения заданного давления. Выполнить откачку с уменьшенной течью до получения требуемого

разрежения.

Исследовать динамику уменьшения парциальных давлений.

Изучить влияние изменения мощности подогревателя насоса на состав вакуумной среды и предельное давление.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.

Отчет по работе должен содержать:

1) функциональную схему моделируемой вакуумной системы в принятых условных графических изображениях;

2) основные формулы расчета кривых откачки;

3) таблицу заданных параметров/режимов моделируемой вакуумной системы;

4) таблицу выбранных параметров вакуумной системы для обеспечения заданных величин рабочего давления и времени откачки (в таблице следует привести величины быстроты действия насосов, размеры трубопровода, требуемой длительности и температуры прогрева, максимально допустимого потока натекания при откачке заданного объема до заданного давления за заданное время);

5) полученные кривые откачки по всем этапам моделирования процесса откачки;

6) процентное содержание отдельных газов в вакуумной системе, полученные на разных этапах откачки;

7) расчетные значения:

- проводимостей соединительных трубопроводов;

- предельных давлений, получаемых при различных режимах откачки, включая режим вакуумной температурной тренировки;

- режима согласования насосов.

Список рекомендуемой литературы

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. Для вузов. М.: Высш.шк.,1990.

2. Шестак В.П. Физические основы вакуумной техники: Учеб.пособие. М.: МИФИ, 1991.

3. Вакуумная техника: Справочник/Е.С.Фролов, В.Е.Минайчев и др.: Под общ.ред. Е.С.Фролова, В.Е.Минайчева. М. Машиностроение, 1992.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

Что называется потоком откачки ?

Чем определяется величина предельного давления, получаемого в вакуумной системе ?

Как объяснить изменение спектра масс остаточного газа в процессе откачки вакуумной системы ?

Как отличить повышение давления в вакуумной системе, связанное с натеканием, от процессов, связанных с газовыделением ?

В чем смысл вакуумной температурной тренировки ?

Что называется постоянной времени откачки ?

Чем определяется минимальное количество ступеней откачки в высоковакуумных системах ?

В чем смысл согласования насосов ?

Какая система откачки моделируется в лабораторной работе ?

От чего зависит эффективная быстрота откачки насоса ?

Какие исходные данные заносятся в программу моделирования откачки ?

Какие процессы в вакуумной системе учитываются на разных этапах моделирования откачки ?

Перечислите основные этапы моделирования откачки.



Рис.5 Интерфейс программы моделирования откачки вакуумной системы

ПРИЛОЖЕНИЕ

Скорость удельного газовыделения с поверхности вакуумных конструкционных материалов при 20°C

Материал	Предварительная обработка материала	Удельный поток газовыделения, Па·м ³ /(м ² ·с)	Длительность предварительной откачки, ч
Низкоуглеродистая сталь	—	4,12·10 ⁻⁴	1
		2,4·10 ⁻⁴	2
		1,08·10 ⁻⁴	4
		7,35·10 ⁻⁵	6
		5,36·10 ⁻⁵	8
		4,12·10 ⁻⁵	10
	Отжиг в вакууме при T = 693 К	4·10 ⁻¹⁰ 1,2·10 ⁻⁸	Любая
Коррозионно-стойкая сталь	—	2,4·10 ⁻⁴	1
		1,08·10 ⁻⁴	2
		5,94·10 ⁻⁵	4
		4,12·10 ⁻⁵	6
		3,09·10 ⁻⁵	8
		2,54·10 ⁻⁵	10
	1,07·10 ⁻⁴ 1,97·10 ⁻⁵	1 5	
Отжиг в вакууме при T = 673 К	4·10 ⁻¹⁰ 1,2·10 ⁻⁸	Любая	
Медь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	1,11·10 ⁻⁵ 8,35·10 ⁻⁷	1 5
	Промывка в бензоле и ацетоне	6,12·10 ⁻⁵ 1,03·10 ⁻⁵	1 5
	Отжиг в вакууме при T = 693 К	1,06·10 ⁻¹⁰ 9,3·10 ⁻⁹	Любая
Латунь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	1,95·10 ⁻⁵ 1,53·10 ⁻⁵	1 5
		2,22·10 ⁻⁴ 8,9·10 ⁻⁵	1 5
	—	3,34·10 ⁻⁴ 1,2·10 ⁻⁴	1 5
		Дюралюминий	Травление, промывка в бензоле и ацетоне
2,8·10 ⁻⁴ 1,4·10 ⁻⁴	1 5		
—	5,57·10 ⁻⁴ 1,9·10 ⁻⁴		1 5

Рабочие характеристики и конструкционные параметры вакуумных насосов

Характеристики высоковакуумных паромасляных насосов

Основные характеристики	Типы насосов									
	Н-0,025-2	НВО-40М	НВД-0,15	НВД-0,25	НВДС-100	Н-100/350	Н-160/700	Н-250/2500	Н-400/7000	Н-630/18000
Диапазон рабочих давлений, Па	$10^{-4} \dots 10$	$10^{-3} \dots 5$	$10^{-3} \dots 7$	$10^{-3} \dots 7$	$10^{-4} \dots 4$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,01	0,04	0,08	0,12	0,24	0,31	0,64	2,15	5,60	15,5
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее выпускное давление, Па	92	40	66	66	40	27	33	27	27	27
Мощность нагревателя, кВт	0,23	0,45	0,45	0,5	0,6	0,5	0,8	2	4	9
Расход воды на охлаждение насоса, дм ³ /с	—	—	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,06	0,2
Количество рабочей жидкости, дм ³	0,02	0,1	0,1	0,13	0,1	0,07	0,30	0,55	1,10	5,00
Диаметр впускного патрубка, мм	40	62	85	100	100	100	160	250	400	630
Диаметр выпускного патрубка, мм	14	10	20	20	25	25	32	63	63	100
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	—	283	295	320	275	275	425	705	859	1345
	40	200	200	210	180	170	260	330	526	1015
	40	302	350	421	360	310	370	588	762	1300
Масса, кг	—	8	9	14	8	6,5	16	31,5	80	280

Характеристики механических объемных насосов

Основные характеристики	Поршневые			Пластинчато роторные			Многопластинчатые		
	ВНК-0,5М	ЗВНП-3	2ДВНП-6	ВН-01	ЗВНР-1Д	2ВНР-5ДМ	РВН-6И	РВН-25	РВН-50
Диапазон рабочих давлений, Па	$1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^0 \dots 1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,0080	0,0630	0,1050	0,0001	0,0010	0,0050	0,1000	0,4000	0,8000
Предельное давление: общее с газобалластом	—	—	—	—	$7 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^0$	—	—	—
общее без газобалласта	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	10^4
парциальное (по воздуху)	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^4$	10^4	10^4
Частота вращения ротора, об/мин	1500	750	1500	1400	2800	1430	1450	600	500
Количество масла, заливаемого в насос, дм ³	—	—	—	—	0,5	1,2	—	—	—
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	2,75	0,04	0,05	—	—	—	0,08	0,18	0,36
Мощность электродвигателя, кВт	3	5,5	11	0,12	0,25	0,55	15	55	75
Диаметр впускного патрубка, мм	80	100	100	8	10	16	110	150	250
Габариты (длина×ширина×высота), мм	862	1430	1770	306	320	540	1500	2250	3000
	640	795	795	135	130	160	700	1000	1200
	1725	925	925	170	200	280	740	1100	1500
Масса, кг	540	750	1500	8,3	9,5	30	310	2250	4500

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ:

Лабораторная работа
Моделирование откачки вакуумной системы

1. Параметры вакуумной камеры:

объем камеры - ; площадь поверхности - ; материал - ;
поток газовыделения: удельный - ; полный - .

2. Предварительная откачка:

Низковакуумный насос: тип насоса - ; быстрота откачки насоса - ;
диапазон рабочих давлений - ; входной диаметр - .

Время													
p, Па													

Форвакуумный трубопровод (допустимый): диаметр - ; длина - .
Предельное давление: ; величина допустимой течи: .

3. Высоковакуумная откачка:

Высоковакуумный насос: тип насоса - ; быстрота откачки насоса - ;
диапазон рабочих давлений - ; входной диаметр - ;
предельное остаточное давление - ; наибольшее выпускное давление - .

Время													
p, Па													

Высоковакуумный трубопровод (допустимый): диаметр - ; длина - .
Предельное давление: ; величина допустимой течи: .

4. Обезгаживание вакуумной камеры:

Температура: ; начало прогрева: ; окончание: .

Время													
p, Па													

Предельное давление : ; величина допустимой течи: .

Выполнили: _____
студенты _____
группы _____

Проверил:
преподаватель