

## РАБОТА 1

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

*Цель* – получить представление о характерных особенностях работы вакуумной системы, включающей низко- и высоковакуумный насосы, оценить влияние на работу вакуумной системы процессов газовой выделенной и натекающей, прогрева вакуумной системы; освоить методику работы с моделирующей программой; научиться проводить анализ зависимостей изменения давления от времени и режимов откачки; уметь выбирать средства откачки, обеспечивающие получение требуемого вакуума в системе.

### ВВЕДЕНИЕ

#### Откачка вакуумной системы

*Вакуумной системой* называется совокупность взаимосвязанных устройств для получения и поддержания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых объемов (камер) и связывающих их вакуумных трубопроводов.

*Откачка* вакуумной системы заключается в уменьшении молекулярной концентрации или количества молекул (снижении давления газа) до уровня, обеспечивающего проведение физических исследований или вакуумных технологических процессов.

Уменьшение количества молекул газа в системе осуществляется с помощью устройств для получения и поддержания вакуума (средств откачки) – *вакуумных насосов*, удаляющих или поглощающих газ из вакуумной системы.

Течение газа в вакуумной системе характеризуется *потоком газа* – количеством газа, выраженным в единицах давления и объема, пересекающего поперечное сечение вакуумной системы в единицу времени:  $Q = p \cdot V$ , Па·м<sup>3</sup>.

Работа вакуумных насосов создает в вакуумной системе направленное движение молекул – поток откачки, определяемый скоростью, с которой уменьшается давление в вакуумной системе постоянного объема:

$$Q = -\frac{d(pV)}{dt} = -V \cdot \frac{dp}{dt}, \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – объем вакуумной системы,  $\text{м}^3$ ;  $p$  – давление в системе, Па;  $t$  – текущее время, с. Знак минус указывает на то, что давление уменьшается (минус может быть отнесен и к потоку откачки, в этом случае он указывает на направление потока откачки – из вакуумного объема).

Согласно выражению (1.1) в вакуумной системе можно получить сколь угодно низкое давление при постоянном потоке откачки. Однако реально **существует нижний предел по давлению**, ниже которого откачка системы невозможна. Это так называемое *предельное остаточное давление*  $p_{\text{ПРЕД}}$ , которое может быть достигнуто в определенных условиях при использовании конкретных средств откачки. Причина данного явления состоит в том, что скорость изменения количества газа в вакуумной системе зависит от соотношения потоков поступающего в систему газа  $Q_{\text{ВХ}}$  и собственно откачки  $Q_{\text{ОТК}}$ :  $Q = Q_{\text{ОТК}} - Q_{\text{ВХ}}$ .

Поступающий в систему газ определяется качеством изготовления вакуумной системы, то есть величинами *потоков натекания*  $Q_{\text{Т}} = \sum Q_{\text{Т}j}$  из атмосферы и *потоков газовыделения*  $Q_{\text{ГВ}} = \sum Q_{\text{ГВ}j}$  сорбированных газов с внутренних поверхностей, где  $j$  – индекс суммирования потоков натекания и газовыделения при наличии нескольких источников. *Натекание*, т.е. проникновение газа из атмосферы в вакуумную систему, происходит из-за наличия вакуумных неплотностей – течей, технологических погрешностей в изготовлении вакуумных оболочек. Другим источником газовых нагрузок является *газовыделение* – выделение газа из материала в объем вакуумной системы (самопроизвольное), величина которого зависит от используемых материалов и качества их очистки (обезгаживания).

При достижении предельного остаточного давления в вакуумной системе устанавливается **режим динамического квазиравновесия**. Насос продолжает работать, в системе существуют установившиеся потоки молекул, поток откачки определяется суммарным потоком газовой нагрузки:  $Q_{\text{ОТК}} = Q_{\text{ВХ}}$ . Количество молекул и давление в вакуумной системе практически не изменяются, так как  $Q = 0$  и  $dp/dt = 0$  (см. уравнение 1.1).

Мера эффективности откачки вакуумной системы – *быстрота откачки насоса*  $S$ , м<sup>3</sup>/с, определяемая как объем газа, проходящий через поперечное сечение элементов вакуумной системы в единицу времени при фиксированном давлении. При этом поток газа будет равен  $Q_{\text{отк}} = S p$ . Для стационарного газового потока такое соотношение будет выполняться для любого  $k$ -го сечения и соответствующим этому сечению величинам давления и быстроты откачки:  $Q_{\text{отк}} = S_k p_k = S p$ .

Таким образом, выражение (1.1) принимает вид

$$p \cdot S - Q_{\text{T}} - Q_{\text{ГВ}} = -V \cdot \frac{dp}{dt}. \quad (1.2)$$

Подобное уравнение, называемое также *уравнением откачки*, может быть записано и для парциальных давлений газов –  $p_i$ , составляющих остаточный газ в вакуумной системе. Сама же величина получаемого в вакуумной системе **предельного остаточного давления** будет зависеть от количественных характеристик выбранных вакуумных насосов и качества изготовления вакуумной системы:

$$p_{\text{пр}} = (Q_{\text{T}} + Q_{\text{ГВ}})/S. \quad (1.3)$$

Другим фактором, препятствующим получению в откачиваемой системе низкого давления, может стать ограничение, связанное с самим вакуумным насосом. Любой насос в силу конструктивных особенностей характеризуется минимальной величиной давления – *предельным давлением насоса*  $p_0$ , которое обеспечивается насосом без подключения откачиваемого объема. Этот параметр является одной из наиболее важных характеристик вакуумного насоса и указывается в его технических данных. Соответственно и при откачке вакуумной системы конкретным насосом **давление в системе не может быть получено ниже предельного давления данного насоса**.

### 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, изме-

няются относительное содержание газов и масс-спектр смеси газов, оставшихся в системе в результате ее откачки. Так, для высоковакуумного диффузионного насоса быстрота действия связана с молекулярной массой откачиваемых молекул  $M$  соотношением

$$S_1/S_2 = \sqrt{M_2/M_1} . \quad (1.4)$$

При высоком вакууме газ, выделяющийся из материалов вакуумной системы, становится основным в остаточном газе. Вследствие этого остаточный газ по составу может значительно отличаться от атмосферного воздуха.

**Массовый спектр остаточного газа** в системе, таким образом, определяется:

- начальным составом газовой смеси;
- составом входящих газовых потоков натекания и газовыделения;
- типом используемого насоса и режимом его работы.

Очевидно, что вид масс-спектра постоянно изменяется в процессе откачки. Кроме того, он зависит и от мощности нагревателя диффузионного насоса, которая определяет скорость, плотность струи пара и соответственно быстроту действия насоса по разным газам.

### **Потоки натекания и газовыделения**

Натекание обычно возникает в случае нарушения герметичности вакуумной системы. Чаще всего герметичность нарушается в местах разборных соединений. Для них величина возможного потока натекания принимается на уровне минимального потока, регистрируемого с помощью течеискателя (порядка  $1 \cdot 10^{-12}$  Вт). Поскольку атмосферное давление всегда много больше, чем давление внутри вакуумной системы, то **величина потока натекания постоянна**, 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:  $Q_{\text{Тдоп}} \leq k_3 \cdot p \cdot S$ , где  $k_3$  – коэффициент запаса по степени герметичности.

Иногда может наблюдаться так называемое **ложное натекание**, вызванное выходом газа из внутренних полостей и закрытых частей вакуумных элементов.

**Газовыделение с внутренних поверхностей вакуумной системы существует всегда**, однако величина потока обычно мала и поэтому принято учитывать потоки газовыделения только при рассмотрении условий в высоком вакууме.

Источниками газовыделения являются приповерхностные эффекты, связанные с присутствием сорбированных газов на поверхности материала и растворенных в самом материале. Выход этих газов с внутренней поверхности оболочки вакуумной системы и создает поток газовыделения. Величина такого потока определяется свойствами самого материала, его газонасыщенностью и состоянием поверхности. Чем чище поверхность и выше уровень ее обработки, тем меньше количество содержащегося на ней газа и ниже уровень газовыделения.

Процессы газовыделения можно интенсифицировать путем нагрева стенок вакуумной системы до температуры 250–650°C. Если при этом одновременно проводится откачка системы, то происходит процесс вакуумной температурной тренировки, приводящий к ускоренной очистке (обезгаживанию) поверхностей. Следовательно, наблюдается уменьшение общего числа молекул в системе, так как источники газовыделения имеют ограниченный ресурс по количеству молекул и потоки газовыделения уменьшаются со временем. Время очистки поверхности при ее прогреве до 450°C может составлять и минуты, но давление, достигаемое в системе, составит, к примеру, только  $10^{-4}$  Па. Чтобы снизить давление до  $10^{-6}$  Па, требуется несколько часов, а при желании получить в системе давление  $10^{-8}$  Па необходима вакуумная температурная тренировка в течение сотни часов.

### **Уравнение откачки**

В результате решения (интегрирования) уравнение (1.2) для полного давления будет получена зависимость вида

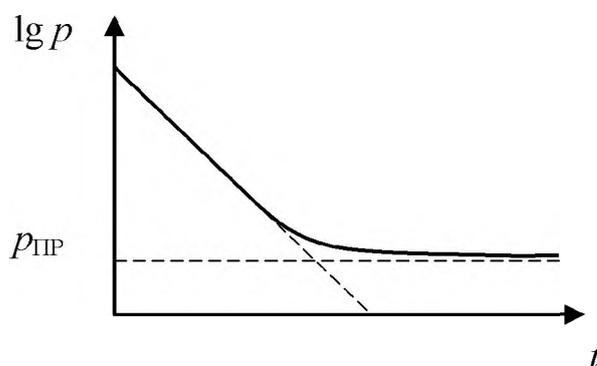
$$p(t) = \frac{Q_{\Sigma}}{S} + \left( p_{\text{нач}} - \frac{Q_{\Sigma}}{S} \right) \cdot e^{-t/\tau}, \quad (1.5)$$

где  $Q_{\Sigma} = Q_{\text{ГВ}} + Q_{\text{Т}}$ ;  $p_{\text{нач}}$  – начальное давление откачки;  $\tau = V/S$ . Аналогичные зависимости  $p_i(t)$  могут быть получены и для каждого компонента газовой смеси. Параметр  $\tau$  называется постоянной времени откачки и определяет скорость откачки из системы объемного газа ( $pV$ ). Время откачки до заданного давления  $p(t)$  будет равно

$$t = 2,3 \cdot \frac{V}{S} \cdot \lg \left( \frac{p_{\text{нач}} - Q_{\Sigma}/S}{p(t) - Q_{\Sigma}/S} \right). \quad (1.6)$$

Графики зависимостей  $p(t)$  в полулогарифмическом масштабе (рис. 1.1) на начальном участке имеют вид прямых с углом наклона, определяемым  $\tau$ . Чем меньше  $\tau$ , тем резче падает давление.

При приближении давления к предельному остаточному давлению  $p_{\text{ГР}}$  (1.3) скорость снижения давления уменьшается и, в пределе, давление остается практически постоянным (для конечного интервала времени).



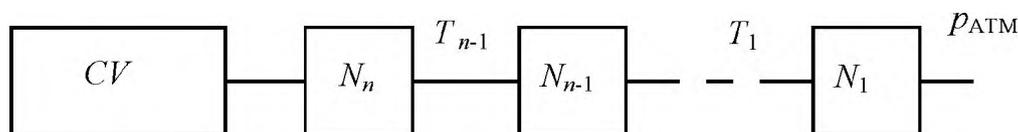
Р и с. 1.1. График откачки вакуумной системы в полулогарифмическом масштабе (при заданном значении скорости откачки  $S$ )

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

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На рис. 1.2 показана вакуумная система, состоящая из откачиваемого объема  $CV$ , последовательности вакуумных насосов  $N_1$ ,

$N_2, \dots, N_n$ , соединенных трубопроводами  $T_1, T_2, \dots, T_n$ . Самый первый, низковакуумный насос выбрасывает газ, откачиваемый из системы, в атмосферу. Атмосферное давление обозначено  $p_{\text{АТМ}}$ .



Р и с. 1.2. Схема многоступенчатой вакуумной системы

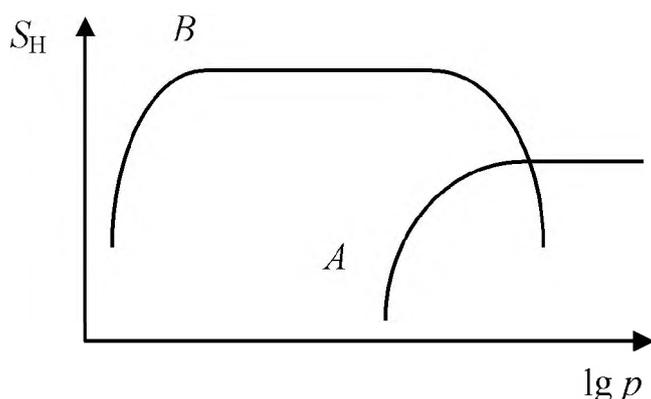
Число насосов в вакуумной системе определяет число ступеней откачки. Каждый из насосов предназначен для работы в определенном диапазоне давлений как на входе, так и на выходе насоса. Поэтому для обеспечения заданного перепада давлений между вакуумной камерой и атмосферой может потребоваться несколько насосов. Отметим, что некоторые типы насосов (механические, диффузионные, турбомолекулярные) 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 и (или) сорбционные насосы. В установках для получения сверхвысокого вакуума на верхних ступенях откачки применяются некоторые типы магниторазрядных насосов и криогенные агрегаты.

Одним из основных параметров, характеризующих возможности вакуумного насоса, является *быстрота действия насоса*  $S_H$ , определяемая как объем газа, удаляемый насосом во входном сечении в единицу времени при определенных давлении и температуре. Быстрота действия вакуумных насосов зависит от давления, для разных насосов эта зависимость различная. Будем считать, что  $S_H = S_0 \cdot F(p)$ , где  $S_0$  — максимальное значение быстроты действия насоса;  $F(p)$  — функция давления, наибольшее значение которой равно единице.

В лабораторной работе будут рассматриваться два типа насосов: механический вращательный и паромасляный диффузионный. Соответствующие им качественные зависимости  $S_H(p)$  приведены на рис. 1.3.

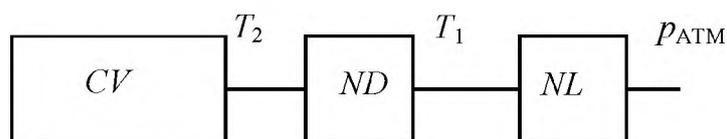
Рис. 1.3 иллюстрирует важную особенность высоковакуумных насосов: имея максимальную быстроту действия при давлениях порядка  $10^{-1}$ – $10^{-4}$  Па, с увеличением давления они становятся крайне неэффективными. Более того, физические принципы, лежащие в основе работы этого насоса, не позволяют ему 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.



Р и с. 1.3. Зависимости быстроты действия насосов от величины рабочего давления:  
*A* – вращательный;  
*B* – диффузионный

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

Таким образом, рассматриваемая в работе вакуумная система является двухступенчатой (рис. 1.4.).



Р и с. 1.4. Моделируемая схема откачки

Управление этой системой производится следующим образом. Сначала включается низковакуумный насос  $NL$ , который откачивает всю систему до давления запуска высоковакуумного насоса, после чего включается высоковакуумный насос  $ND$ . На первой стадии откачки осуществляется удаление основного количества газа с помощью низковакуумного насоса. На второй – посредством высоковакуумного насоса удаляется не только оставшийся газ, но и газ, сорбированный деталями установки. На первой стадии поток газовой выделенной по сравнению с потоком газа, откачиваемого из объема, является ничтожно малым.

В каждую из ступеней откачки вакуумной системы помимо соответствующего насоса входит трубопровод, соединяющий насос с откачиваемым объемом или с насосом более высоковакуумной ступени. Трубопровод, как и любой элемент вакуумной системы, характеризуется пропускной способностью или *проводимостью*  $U$ , зависящей от его геометрических размеров и являющейся коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давлений на концах элемента:

$$U = \frac{Q}{p_{\text{ВХ}} - p_{\text{ВЫХ}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1.7)$$

где  $Q$  – поток газа вдоль трубопровода;  $p_{\text{ВХ}}$  – давление на входе трубопровода;  $p_{\text{ВЫХ}}$  – давление на выходе трубопровода.

Для трубопровода пропускную способность в достаточно широком диапазоне давлений можно определять по следующей формуле (уравнение Кнудсена):  $U = U_{\text{В}} + U_{\text{М}} \cdot K$ , где  $U_{\text{В}}$  и  $U_{\text{М}}$  – проводимости в вязкостном и молекулярном режимах течения газа соответственно;  $K$  – коэффициент, зависящий от среднего давления в трубопроводе. Соответствующие выражения проводимостей для круглого трубопровода длиной  $L$  и диаметра  $d$  в азотном эквиваленте равны:

$$U_{\text{В}} = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{L} \cdot p_{\text{ср}}; \quad U_{\text{М}} = 121 \cdot \frac{d^3}{L}; \quad (1.8)$$

$$K = \left( \frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}}}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}}} \right);$$

здесь  $p_{\text{ср}} = (p_{\text{ВХ}} + p_{\text{ВЫХ}})/2$ .

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

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots, \quad (1.9)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$ , и т.д. – пропускные способности отдельных последовательных элементов вакуумного тракта.

В условиях непрерывного газового потока из камеры в насос будет выполняться равенство

$$Q = S_H p_H = S_{ЭФ} p, \quad (1.10)$$

где  $S_H$  и  $p_H$  – быстрота действия насоса и давление на входе в насос;  $p$  – давление в откачиваемой камере;  $S_{ЭФ}$  – *эффективная быстрота откачки насоса*, равная объему газа, выходящему в единицу времени из вакуумной камеры при фиксированном давлении. Наличие соединительных трубопроводов приводит к тому, что между вакуумным насосом и откачиваемым объемом вакуумной камеры возникает перепад давлений:  $p - p_H = Q/U$ . Таким образом, **откачка вакуумной камеры будет осуществляться с некоторой  $S_{ЭФ}$ , заведомо меньшей быстроты действия насоса  $S_H$  с учетом ограничивающего действия проводимости  $U$  соединительного трубопровода:**

$$\frac{1}{S_{ЭФ}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_H}. \quad (1.11)$$

Соотношение между собственной быстротой действия насоса  $S_H$  и эффективной быстротой откачки определяет коэффициент использования насоса. Значительное снижение  $S_{ЭФ}$  по сравнению с  $S_H$  свидетельствует о низкой эффективности использования насоса, т.е. об ошибке в проектировании вакуумной системы в целом. Допустимыми можно принять отношения  $S_H/S_{ЭФ}$ , равные 1,5–2. Уравнение (1.11) часто называют «основным уравнением вакуумной техники».

В результате зависимость полного давления от времени в откачиваемом объеме вакуумной системы  $V$  будет описываться дифференциальным уравнением

$$V \cdot \frac{dp}{dt} = Q_{ГВ} + Q_{Г} - p \cdot S_{ЭФ}. \quad (1.12)$$

Поток, обусловленный натеканием, находится из выражения

$$Q_T = \sigma \cdot (p_{\text{ATM}} - p). \quad (1.13)$$

Здесь  $\sigma$  – коэффициент, определяющий суммарную пропускную способность всех течей (проводимость). Из формулы (1.13) видно, что при давлении в камере  $p \ll p_{\text{ATM}}$  поток натекания не зависит от величины  $p$  и будет постоянен во времени.

При малых давлениях ( $p < 1$  Па) необходимо учитывать составляющую газовой нагрузки, обусловленную потоком газовой выделенной материалов. Поток газовой выделенной с внутренних поверхностей вакуумной камеры определяется уровнем начального удельного газовой выделенной  $q_0$ , отнесенного к единице поверхности материала камеры, и общей площадью внутренних поверхностей  $A$ :

$$Q_{\text{ГВ}} = A \cdot q_0 \cdot k \cdot e^{-kt}, \quad (1.14)$$

где

$$k = k_0 \cdot \exp \left\{ a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \right\}. \quad (1.15)$$

В приведенных выражениях  $k_0$  – коэффициент, характеризующий скорость газовой выделенной при нормальной температуре;  $T$  – температура откачиваемого объема;  $t$  – время;  $a$  – коэффициент, зависящий от ряда факторов: материала, степени обработки поверхности вакуумного объема, рода газа и др. Этот коэффициент находится экспериментально. Уровень начального газовой выделенной  $q_0$  зависит от материала вакуумной камеры и степени предварительной обработки (очистки) поверхности, его величина во многом определяет и процесс откачки вакуумной системы и уровень достигаемого вакуума.

Из формулы (1.15) видно, что коэффициент  $k$  растет с повышением температуры вакуумной системы. Это приводит к увеличению потока газовой выделенной в  $k/k_0$  раз и одновременно к более быстрому его затуханию во времени ( $\sim e^{-tk}$ ). Поэтому при получении достаточно высокого вакуума, когда газовой выделенной может существенно затормозить процесс откачки, используется прогрев вакуумной системы.