

1.4. СОЗДАНИЕ ВАКУУМНОЙ СРЕДЫ

Цель лекции: показать основные способы создания вакуумной среды, необходимой для проведения технологических процессов и функционирования ЭВП.

1.4.1. ПОЛУЧЕНИЕ ВАКУУМА РАЗЛИЧНЫХ СТЕПЕНЕЙ

Для получения вакуумной среды используются вакуумные системы, примеры которых показаны на рис. 1.5. Основными элементами для получения вакуума в технологическом объеме являются вакуумные насосы. Для создания низкого и среднего вакуума ($p \approx 103 \dots 10^{-1}$ Па) применяются, как правило, механические насосы (рис. 1.5, а). Для получения высокого вакуума ($p \approx 10^{-3}$ Па) используются последовательно соединенные форвакуумный (механический) и высоковакуумный (например, диффузионный) насосы (рис. 1.5, б).

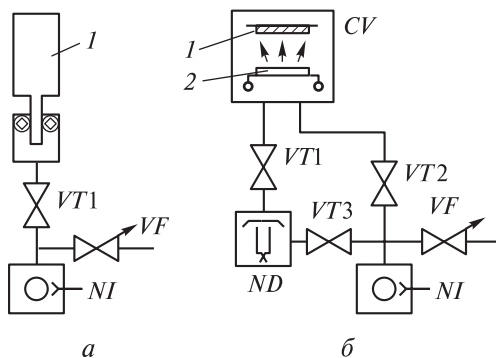


Рис. 1.5. Принципиальные схемы вакуумных систем:

a — низковакуумная откачка ($P \approx 10$ Па) установки для вакуумной упаковки продуктов ($P \approx 10^{-3}$ Па); *I* — ЭВП; *б* — высоковакуумная откачка установки для нанесения тонких пленок; 2 — подложка; 3 — испаритель; *VT1*, 2, 3 — вентили тарельчатые; *VF* — натекагель; *ND*, *NI* — соответственно насосы диффузионный и механический; *CV* — вакуумный колпак

Вакуумные насосы можно классифицировать следующим образом:

- *по назначению*: сверхвысоковакуумные, высоковакуумные и низковакуумные (форвакуумные);
- *по принципу действия*: механические, сорбционные (для низкого, среднего и высокого вакуума), диффузионные, магнитные электроразрядные, геттерно-ионные, крионасосы (для высокого и сверхвысокого вакуума).

Основные параметры вакуумной системы (рис. 1.6):

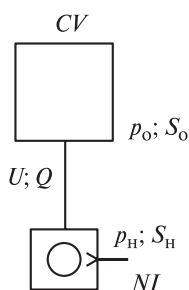


Рис. 1.6. Расчетная принципиальная схема вакуумной системы

- *быстрота откачки объекта*, S_o — объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта в трубопровод при давлении $p_o \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right]$;
- *быстрота действия насоса*, S_H — объем газа, откачиваемый насосом в единицу времени через впускной патрубок при давлении $p_H \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right]$;
- *производительность насоса* — поток газа, проходящий через его впускной патрубок, $Q \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right]$;
- *проводимость трубопровода* U — отношение потока газа, протекающего через трубопровод, к разности давлений на концах трубопровода,

$$U = \frac{Q}{p_o - p_H} \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right].$$

1.4.2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Для стационарного потока ($Q = \text{const}$) при откачке вакуумной камеры выполняется условие сплошности газовой среды:

$$Q = S_o p_o = p_H S_H = \text{const}$$

Установим взаимосвязь между основными параметрами вакуумной системы S_o , S_H , U :

$$S_H = \frac{Q}{p_H} = \frac{U(p_o - p_H)}{p_H};$$

$$S_o = \frac{Q}{p_o} = \frac{U(p_o - p_H)}{p_o};$$

$$\frac{1}{S_H} = \frac{p_H}{U(p_o - p_H)}; \quad \frac{1}{S_o} = \frac{p_o}{U(p_o - p_H)};$$

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_n} = \frac{p_o - p_n}{U(p_o - p_n)} = \frac{1}{U}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}.$$

Это уравнение называется основным уравнением вакуумной техники. Таким образом, при увеличении проводимости трубопровода до бесконечности быстрота откачки камеры стремится к быстроте действия насоса; при закрытом трубопроводе его проводимость стремится к нулю и быстрота откачки камеры также равна нулю.

1.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТКАЧКИ

Введем следующее определение: *количество газа* — произведение объема газа на давление, при котором этот газ находится:

$$G = pV [\text{Па} \cdot \text{м}^3].$$

Количество газа численно равно объему газа, прошедшему через сечение трубопровода за некоторое время dt , умноженное на давление p в этом сечении, или же произведению скорости откачки S_o за время t , умноженное на давление p :

$$G = S_o p t.$$

Пусть в начальный момент времени в камере объемом V давление p_o (см. рис. 1.6). Поскольку процесс откачки есть удаление газа из камеры, то давление в ней будет уменьшаться. Скорость этого уменьшения будет зависеть от параметров насоса (быстроты действия S_n и предельного давления p'_n) и от параметров трубопровода, т. е. от проводимости U .

За единицу времени dt через сечение трубопровода у выхода из камеры пройдет количество газа

$$dG = S_o p dt.$$

При этом, поскольку из камеры ушло указанное выше количество газа, давление в камере уменьшилось на величину dp . При неизменном объеме камеры ушедшее из нее количество газа

$$dG = -V dp,$$

следовательно,

$$S_o p dt = -V dp.$$

Разделим переменные и возьмем интегралы по времени, в результате получим решение дифференциального уравнения для определения времени откачки от давления p_1 до давления p_2 ($p_1 > p_2$) для простейшей идеальной вакуумной системы:

$$t = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{V}{S_0 p} dp = - \frac{V}{S_0} \ln p \Big|_{p_1}^{p_2} = - \frac{V}{S_0} (\ln p_2 - \ln p_1) = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

В реальном процессе откачки вакуумной системы существуют следующие условия, влияющие на время откачки:

- 1) давление в системе никогда не может быть меньше или рав предельному давлению насоса $p'_н$ вследствие наличия сопротивления трубопровода;
- 2) эффективная скорость откачки зависит от быстроты действия насоса и является функцией давления;
- 3) в системе всегда присутствуют дополнительные источники газов.

Следует отметить, что условие 1 на расчет реального времени откачки не влияет, однако при проектировании вакуумных систем для уменьшения времени откачки необходимо обращать внимание на предельное давление насоса $p'_н$, а трубопроводы проектировать с учетом их наименьшего сопротивления.

Быстрота откачки объекта связана с быстротой действия насоса основным уравнением вакуумной техники:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}.$$

В данном уравнении и проводимость, и быстрота действия насоса зависят от давления. В случае проводимости эта зависимость определяется режимом течения газа, поэтому время откачки следует рассчитывать отдельно для

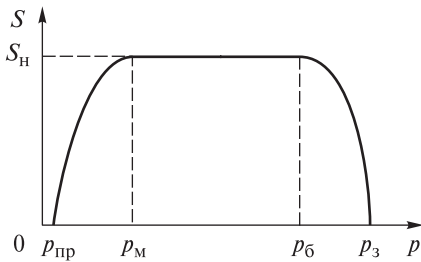


Рис. 1.7. Основная характеристика вакуумного насоса

каждого режима течения газа. Быстрота действия насоса, как правило, имеет нелинейный характер зависимости от входного давления вследствие конструктивных особенностей каждого типа насоса. Такая зависимость называется основной характеристикой вакуумного насоса (рис. 1.7). Параметры основной характеристики: S — быстрота действия насоса; p — входное давление насоса; S_n — номинальная быстрота действия насоса; $p_{пр}$ — предельное давление насоса; p_m — наименьшее рабочее давление вакуумного насоса, при котором насос сохраняет номинальную быстроту действия; $p_б$ — наибольшее рабочее давление вакуумного насоса, при котором насос сохраняет номинальную быстроту действия; $p_з$ — давление запуска вакуумного насоса, т. е. максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу.

Если изменением зависимости быстроты действия насоса от давления на входе нельзя пренебречь, т. е. насос работает некоторое время в области

Если изменением зависимости быстроты действия насоса от давления на входе нельзя пренебречь, т. е. насос работает некоторое время в области

давлений, где его быстрота действия уменьшается, то в этом случае следует разделить кривую зависимости на участки, где быстроту действия можно считать постоянной или линейной (в этом случае требуется аналитическое описание линейной зависимости). Для каждого участка необходимо рассчитать время откачки и затем просуммировать (учитывая режимы течения газа).

1.4.4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ГАЗА В ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЕ

В реальной вакуумной системе всегда присутствуют два независимых дополнительных источника газов:

- *газовыделение* — выделение газов со стенок камеры;
- *натекание* — проникновение газов через неплотности вакуумной системы (в местах стыков, трещин), а также через материал, из которого изготовлены трубопроводы и камера (газопроницаемость).

В вакуумной технике при расчетах оперируют понятиями *потока газовыделения* $Q_{гв}$ и *потока натекания* $Q_{нт}$. Суммарно их объединяют в общий *поток газонатекания* $Q_{гн}$.

При давлении p поток газонатекания $dQ_{гн}$ соответствует объему газа $dQ_{гн}/p$, поступающему в объем камеры за единицу времени.

С учетом этих дополнительных потоков уравнение баланса количества газа в объеме камеры при ее откачке будет иметь следующий вид:

$$S_0 p dt = -V dp + Q_{гн} dt,$$

время откачки будет составит:

$$t = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{V}{S_0 p - Q_{гн}} dp = - \frac{V}{S_0} \ln(p - Q_{гн}) \Big|_{p_1}^{p_2} = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - \frac{Q_{гн}}{S_0}}{p_2 - \frac{Q_{гн}}{S_0}}.$$

При длительной откачке устанавливается некоторое равновесие между потоком газонатекания $Q_{гн}$ в объем камеры и потоком газа, откачиваемого насосом, т. е. изменения давления не происходит. Давление в камере при таком режиме называется предельным давлением системы p' и может быть определено следующим образом:

$$p' = \frac{Q_{гн}}{S_0}.$$

Тогда выражение для времени откачки можно записать в виде:

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - \frac{Q_{гн}}{S_0}}{p_2 - \frac{Q_{гн}}{S_0}} = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - p'}{p_2 - p'}.$$

Как правило, давление $p_1 \gg p'$, поэтому в формуле для определения времени откачки им можно пренебречь, т. е.

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1}{p_2 - p'}$$

Зависимость давления от времени откачки удобно строить в полулогарифмических координатах, откладывая по оси ординат $\lg p$. Поэтому окончательно выражение для времени откачки имеет следующий вид:

$$t = 2,3 \frac{V}{S_0} \lg \frac{p_1}{p_2 - p'}$$

Тесты к лекции 4

1. Для получения высокого вакуума используется:

- а) комбинация высоковакуумного и форвакуумного насосов;
- б) высоковакуумный насос
- в) вакуумная принципиальная схема.

2. Поток газонатекания состоит из:

- а) суммы потоков газовыделения и газонатекания;
- б) газов, находящихся в откачиваемом объеме;
- в) газов, подаваемых в рабочую камеру для реализации технологического процесса.

3. Какие параметры связывает основное уравнение вакуумной техники?

- а) скорость откачки объекта, быстроту действия насоса и проводимость;
- б) время откачки, скорость откачки объекта, быстроту действия насоса и проводимость;
- в) поток газовыделения, время откачки, скорость откачки объекта, быстроту действия насоса и проводимость.