

ДОПОЛНЕНИЕ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА (А7-06, А7-07)

Лекция по теме

Вакуумные технологии: ОБЕЗВОЖИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Вакуумная установка может быть эффективно применена для удаления воды из различных материалов, в том числе и солевых растворов (радиоактивных отходов). Начальная концентрация воды в растворе бывает достаточно высока, что предполагает выполнение первого этапа обезвоживания растворов по принципу выпаривания. По мере осушения объема вещества процесс выпаривания будет переходить к стадии сушки.

При сушке переход влаги из материала в окружающую среду совершается при поверхностном испарении влаги и диффузии ее из внутренних слоев к поверхности материала. Таким образом, сушка является диффузионно-десорбционным процессом. Выпаривание - концентрирование растворов (чаще твердых веществ в воде) испарением растворителя при кипении. При этом повышаются концентрация, плотность и вязкость раствора, а также температура его кипения. Применение вакуума, т.е. состояния среды с давлением ниже атмосферы, в данных процессах позволяет ускорять их проведение и осуществлять кипение при более низких температурах, выбирать требуемую рабочую точку процессов кипения и конденсации водяных паров по давлению насыщенного пара и температуре.

Сушка материалов

При вакуумной сушке скорость испарения влаги повышается, так как скорость удаления влаги пропорциональна разности давлений водяного пара у поверхности материала и в окружающем пространстве. Например, вакуумную сушку пищевых продуктов осуществляют при давлении от 2 до 20 кПа. Температура насыщения водяных паров при остаточных давлениях 2-3; 10-11; 18-19 кПа равна 17,51-24,09; 45,84-47,71; 57,83-58,98 С соответственно. При таких давлениях будет происходить достаточно

интенсивное испарение влаги из продуктов, так как выбираемая в этих технологиях рациональная температура сушки (60 ± 3 °C) больше температуры насыщения водяных паров при данных давлениях.

Вакуумная сушильная установка обычно состоит из сушильной камеры, конденсатора водяного пара и вакуумного насоса. В зависимости от конкретных условий применяют смешивающий или поверхностный конденсатор. Необходимую производительность насоса выбирают исходя из допустимой величины натекания атмосферного воздуха в сушильную камеру и возможного газовыделения продукта.

Во время сушки на поверхности вещества образуется высохший слой. Несмотря на его малую толщину, сопротивление этого слоя массопереносу влаги увеличивается по сравнению с сопротивлением внутренних слоев, так как в высохшем поверхностном слое количество пор уменьшается, в связи с этим выход влаги из высушиваемого объекта понизится. Если при этом сушку приостановить, то влага, которая осталась в высушиваемом изделии, равномерно распределяется по всему объему и увлажняет высохший поверхностный слой. В увлажненном поверхностном слое количество пор увеличится, и при последующем включении вакуумной сушильной установки влага будет более интенсивно уходить из высушиваемого объекта. Из пористого изделия в процессе сушки удаляться влага будет интенсивно до тех пор, пока поверхностный слой снова не высохнет.

Выпаривание свободной воды

Широко распространенными установками химической промышленности, в которых процесс может проводиться в условиях вакуума, являются выпарные и кристаллизационные. В случае полного удаления растворителей выпаривание сопровождается кристаллизацией. При выпаривании чаще всего происходит кипение раствора, находящегося в камере установки, и удаление образующегося пара.

В выпарных установках вакуум может создаваться в результате конденсации разогретого водяного пара в конденсаторах, охлаждаемых водой. Теоретически абсолютное давление в конденсаторе должно быть равно давлению насыщенного пара при температуре конденсации. Однако в конденсатор вместе с паром поступает некоторое количество воздуха, выделяющегося из выпариваемой жидкости. Кроме того, воздух проникает через неплотности в аппаратуре и трубопроводах; если конденсация производится в конденсаторах смешения (путем непосредственного соприкосновения с водой), воздух приносится с охлаждающей водой. В присутствии воздуха давление в

конденсаторе равно сумме парциальных давлений пара и воздуха, т. е. давлению насыщенного пара плюс парциальное давление воздуха. Таким образом, вакуум в конденсаторе от подсоса воздуха ухудшается, и воздух необходимо удалять при помощи вакуумных насосов. Обычно в конденсаторах выпарных установок поддерживают абсолютное давление, равное 0,1 – 0,2 ат, что соответствует температуре конденсации паров 45 – 60° С.

Промышленная вакуумная выпарная установка представляет собой герметически закрытый корпус (объем), который последовательно соединяется с конденсатором, где улавливаются пары, и с вакуумным насосом для откачки воздуха из системы. При проведении процесса выпаривания в однокорпусном аппарате в условиях вакуума расход тепла на выпаривание 1 кг растворителя несколько увеличивается по сравнению с процессом при атмосферном давлении (вследствие увеличения теплоты парообразования при низких давлениях), но благодаря пониженной температуре кипения значительно уменьшаются потери тепла в окружающую среду. Если количество выпариваемой воды велико, то обычно применяют многокорпусное выпаривание, при котором тепло на выпаривание используется многократно путем применения для обогрева вторичного пара.

Вакуумный насос

Механические насосы применяют не только для откачки газов, но и для откачки паров воды в процессе сушки, дистилляции и других процессов. Однако механические насосы обычной конструкции непригодны для откачки паров воды, так как в период сжатия откачиваемые пары полностью или частично конденсируются в камере сжатия. Конденсация паров происходит в результате того, что при температуре работающего насоса (примерно 60 °С) не могут быть достигнуты давления паровоздушной смеси, достаточные для открытия выпускного клапана до образования насыщенных паров. Вода, попавшая в масло, помимо образования трудноразделимой эмульсии масло - вода, вызывает целый ряд химических взаимодействий, ведущих к ухудшению смазывания, перегреву и осмолению насоса, не говоря уже о повышении предельного остаточного давления и коррозии отдельных деталей насоса.

Для предотвращения конденсации паров в насосе применяется напуск балластного газа. Для этой цели обычно используется атмосферный воздух, подаваемый в камеру сжатия насоса совместно с откачиваемым газом (паром). Практически все механические насосы выпускаются сейчас со встроенным газобалластным устройством.

Процесс откачки установки

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

$$Q = -\frac{d(pV)}{dt} = -V \cdot \frac{dp}{dt}, \text{ Па}\cdot\text{м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где V – объем вакуумной системы, 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).

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

Таким образом, выражение (1.1) принимает вид

$$p \cdot S - Q_{\text{T}} - Q_{\text{ГВ}} = -V \cdot \frac{dp}{dt}. \quad (2)$$

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:

$$p_{\text{пр}} = (Q_{\text{T}} + Q_{\text{ГВ}}) / S. \quad (3)$$

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.

В результате решения (интегрирования) уравнение (2) для полного давления будет получена зависимость вида

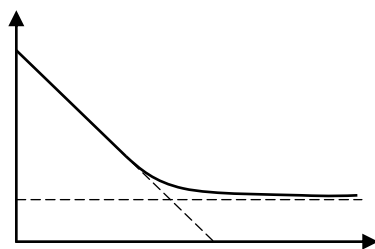
$$p(t) = \frac{Q_{\Sigma}}{S} + \left(p_{\text{нач}} - \frac{Q_{\Sigma}}{S} \right) \cdot e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

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 τ называется постоянной времени откачки и определяет скорость откачки из системы объемного газа (pV). Время откачки до заданного давления $p(t)$ будет равно

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

Графики зависимостей $p(t)$ в полулогарифмическом масштабе (рис. 1) на начальном участке имеют вид прямых с углом наклона, определяемым τ . Чем меньше τ , тем резче падает давление.

При приближении давления к предельному остаточному давлению $p_{\text{ПР}}$ (3) скорость снижения давления уменьшается и, в пределе, давление остается практически постоянным (для конечного интервала времени).

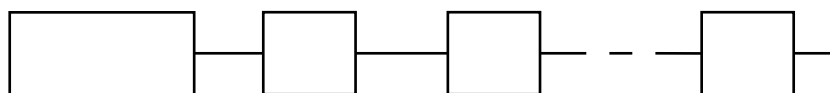


Р и с. 1. График откачки вакуумной системы в полулогарифмическом масштабе

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.

Модель установки

На рис. 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. 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 сами по себе являются многоступенчатыми.

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 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:

$$U = \frac{Q}{p_{\text{ВХ}} - p_{\text{ВЫХ}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

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:

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

$$K = \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}}}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}}} \right); \quad (7)$$

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:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots, \quad (8)$$

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

$$Q = S_{\text{Н}} \cdot p_{\text{Н}} = S_{\text{ЭФ}} \cdot p, \quad (9)$$

где $S_{\text{Н}}$ и $p_{\text{Н}}$ – быстрота действия насоса и давление на входе в насос; p – давление в откачиваемой камере; $S_{\text{ЭФ}}$ – *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: $p - p_{\text{Н}} = Q/U$. Таким образом, **откачка вакуумной камеры будет осуществляться с некоторой $S_{\text{ЭФ}}$** , заведомо меньшей быстроты действия насоса $S_{\text{Н}}$ с учетом ограничивающего действия проводимости U соединительного трубопровода:

$$\frac{1}{S_{\text{ЭФ}}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_{\text{Н}}}. \quad (10)$$

Соотношение между собственной быстротой действия насоса $S_{\text{Н}}$ и эффективной быстротой откачки определяет коэффициент использования насоса. Значительное снижение $S_{\text{ЭФ}}$ по сравнению с $S_{\text{Н}}$ свидетельствует о низкой эффективности использования насоса, т.е. об ошибке в проектировании вакуумной системы в целом. Допустимыми можно принять отношения $S_{\text{Н}}/S_{\text{ЭФ}}$, равные 1,5–2. Уравнение (10) часто называют «основным уравнением вакуумной техники».

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

$$V \cdot \frac{dp}{dt} = Q_{\text{ГВ}} + Q_{\text{Т}} - p \cdot S_{\text{ЭФ}}. \quad (11)$$

Поток, обусловленный натеканием, находится из выражения

$$Q_{\text{Т}} = \sigma \cdot (p_{\text{АТМ}} - p). \quad (12)$$

Здесь σ – коэффициент, определяющий суммарную пропускную способность всех течей (проводимость). Из формулы (12) видно, что при давлении в камере $p \ll p_{\text{АТМ}}$ поток натекания не зависит от величины p и будет постоянен во времени.

Предлагаемый вариант схемы вакуумной установки для реализации указанных процессов может быть выполнен по традиционной схеме для процессов сушки и выпаривания (рис. 3), содержащей осушаемый объем 1, конденсатор паров 2 и вакуумный насос 3 для откачки воздуха и остатков паров. Кроме того схема установки содержит коммутирующую и регулирующую арматуру 5–7, а также устройство контроля вакуума 4.

Чтобы обеспечить необходимую скорость откачки паров воды и ограничить в допустимых пределах количество паров, поступающих в вакуумный насос, между сушильным аппаратом и насосом устанавливают конденсатор влаги. В ряде вакуумных установок пары жидкостей удаляются с помощью конденсаторов. В любом случае желательно конденсировать пары до попадания их в вакуумный насос.

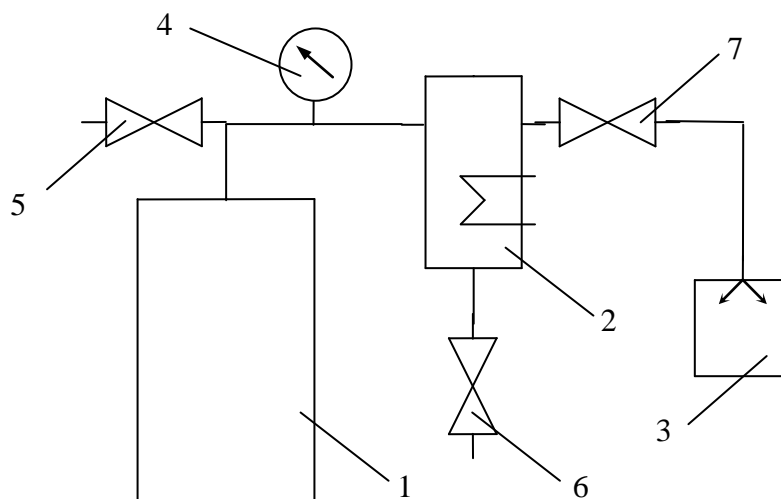


Рис. 3. Схема вакуумной установки для откачки паров воды:
1 – нагреваемая камера; 2 – охлаждаемый конденсатор пара;
3 – вакуумный насос; 4 – вакуумметр; 5 – затвор впускной;
6 – затвор сливной; 7 – затвор регулировочный

В системах выпаривания и сушки обычно используют водокольцевые вакуумные насосы. Для установок с объемом камер до 500 л применяются насосы быстрой действия по откачке газов и паров 50-100 л/с. В водокольцевых насосах происходит контакт откачиваемого газа (пара) с рабочей жидкостью насоса. Для большинства установок выпаривания и сушки различных продуктов это вполне допустимо, однако в случае проектируемой установки такой эффект нежелателен. В данном случае

потребуется применение системы замкнутой циркуляции с охлаждением для рабочей жидкости насоса, чтобы исключить ее слив в канализацию.

Применяемый вакуумный насос должен обеспечивать высокую производительность, работать в области давлений вблизи атмосферы. Для работы с большой быстротой действия при малых степенях сжатия могут быть также использованы двухроторные вакуумные насосы. Для конструкций таких насосов типа несимметричных валов с кулачками и впадинами можно получить большие коэффициенты компрессии. В этом случае многоступенчатые варианты насосов обеспечивают выхлоп непосредственно в атмосферу, чего нет у классической конструкции насосов данного типа (Рутса). Также для работы при высоких давлениях используются винтовые механические насосы. Оба вида насосов имеют современные разработки и представлены широким диапазоном показателей быстродействия. Однако данные насосы в основном используются в системах чистого безмасляного вакуума и имеют ограничения по откачке конденсирующихся паров, а кроме того имеют высокую стоимость.