

при этом совершенно не обязательно соединять насосы параллельно трубопроводам. Насосы могут быть в принципе соединены и последовательно, но работать они при этом могут в параллель. Характерным примером такого включения насосов является совместная работа на один объем конденсационного водородного и пароструйного насосов. В этом случае пароструйный насос предназначен для откачки не конденсирующихся при температуре жидкого водорода газов (водород, неон, гелий) и создания предварительного разрежения в конденсационном насосе.

Совершенно так же в параллель к ионно-геттерным насосам могут подключаться пароструйные или турбомолекулярные насосы, которые обеспечивают откачку инертных газов и метана.

Расчет вспомогательного насоса при этом сводится к определению потока не откачиваемых основным насосом газов и подбору вспомогательного насоса по принципу и скорости действия.

При согласовании вспомогательного насоса с электрофизическим насосом, например с магнитным электроразрядным, следует учитывать собственную скорость действия основного насоса по рассматриваемому газу. Вспомогательный насос должен в сумме с основным насосом обеспечить удаление всего потока газа. При этом надо обязательно учитывать возможную нестабильность во времени характеристик электрофизических и, в частности, магнитных электроразрядных насосов. С учетом этого скорость действия вспомогательного насоса выбирается обычно на 50—80% больше расчетного значения.

Довольно часто при конструировании вакуумных систем предусматривается установка нескольких однотипных насосов, работающих параллельно на один вакуумный объем с целью получения необходимой эффективной скорости откачки. Такой прием закономерен и дает удовлетворительные результаты, если все насосы обеспечивают получение близких значений предельного остаточного давления. В противном случае возможны перетекание газов и существенное снижение суммарной эффективной скорости откачки.

В подобных вакуумных системах целесообразно предусматривать возможность отключения насосов порознь с целью определения их характеристик и, в частности, предельного остаточного давления.

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

### РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

#### 8-1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет вакуумной системы сложного технологического оборудования выполняется, как правило, в два этапа.

*Проектный расчет*, в результате которого определяются принципиальная схема вакуумной системы, типы и размеры насосов, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры соединительных трубопроводов.

*Проверочный расчет*, в результате которого уточняются характеристики насосов, размеры трубопроводов и

коммутирующих элементов, определяется время достижения заданного рабочего давления.

В качестве исходных величин для расчета обычно заданы предельное остаточное давление в рабочем объеме, поток газов, геометрические размеры рабочего объема, характер технологического процесса, для осуществления которого предназначена установка, время достижения заданного давления.

Часто при расчете вакуумной системы приходится определять поток газов, поступающих в нее. Для этого должны быть известны исходные характеристики продувки, позволяющие рассчитать поток газов.

Проектный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Исходя из заданных значений парциального и полного давлений, определяют типы насосов, обеспечивающих окончательную откачку рабочего объема.

2. По заданному или найденному расчетом потоку газов выбирают конкретный типоразмер насоса окончательной откачки; при этом поток газов, откачиваемых насосом, принимают постоянным.

3. Выбирают вспомогательные насосы и насосы предварительного разрежения. Обычно на этом этапе расчета вспомогательные насосы выбирают в соответствии с паспортными характеристиками основных насосов окончательной откачки.

4. Определяют принципиальную схему вакуумной системы, назначают ориентировочные размеры вакуумных трубопроводов, выбирают коммутирующие элементы, средства измерения давления и т. п.

5. Исходя из заданного времени предварительной откачки рабочего объема, выбирают насос предварительного разрежения; при этом обычно не учитывают предельное остаточное давление вакуумной системы.

После проведения проектного расчета конструируют вакуумную систему. В процессе конструирования уточняют все размеры вакуумных трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и т. п.

Проверочный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. В соответствии с окончательными размерами вакуумной системы рассчитывают значения эффективной скорости откачки системы.

2. Рассчитывают время достижения заданного давления в рабочем объеме; при этом учитывают натекания и кинетику газовыделения. При отсутствии этих данных в задании на проектирование выполняется их расчет.

3. Рассчитывают окончательное время предварительной откачки; при этом учитывают предельное остаточное давление насоса предварительного разрежения, газовыделение и натекание, а также изменение скорости действия насоса и проводимости трубопроводов в зависимости от давления.

При необходимости применения нестандартных элементов производят их конструирование и расчет. Однако эти расчеты, как правило, неспецифичны и выполняются по обычным методам, известным в общем машиностроении.

## **8-2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ВЫСОКОВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В этом случае должны быть заданы основные технические характеристики оборудования: давление в вакуумной системе и парциальный состав остаточной среды; газовой поток, в том числе по составляющим, или условия, позволяющие рассчитать газовый поток (обрабатываемые изделия — их материал и геометрия, температура и длительность обработки, конструкция рабочей камеры оборудования); производительность оборудования или длительность технологического процесса.

Проектный расчет выполняется поэтапно следующим образом:

1. Разрабатывается принципиальная схема вакуумной системы, для чего сначала определяются оптимальные для данного конкретного оборудования типы высоковакуумных насосов. При этом необходимо руководствоваться наряду с требованиями к предельному остаточному давлению и парциальному составу среды также экономическими и эксплуатационными характеристиками, а также учитывать возможности предприятия, которое будет эксплуатировать оборудование.

Так, при наличии разводки жидкого азота и жестких требований к парциальному давлению тяжелых углеводородов оптимальным будет использование титанового охлаждаемого испарительного насоса.

В случае, если в составе потока откачиваемых газов велико парциальное давление инертных газов и имеются

те же ограничения по парциальному составу остаточной среды, что и в предыдущем случае, целесообразно использовать турбомолекулярные насосы.

Наконец, при значительных газовых потоках и не слишком жестких требованиях к парциальному давлению тяжелых углеводородов в остаточной среде наиболее целесообразно использование пароструйных насосов, оснащенных защитными устройствами или работающих на сложных эфирах в качестве рабочих жидкостей.

После выбора типа основного высоковакуумного насоса выбирается вспомогательный насос, определяются схема соединений, типы коммутирующих элементов. Затем выбирается тип насоса предварительной откачки рабочего объема. Часто в качестве этого насоса используется вспомогательный насос, что должно быть учтено в схеме соединений вакуумной системы; при относительно длительной предварительной откачке целесообразно применение форвакуумного баллона (см. § 7-2).

Если оборудование подключается к централизованной форвакуумной системе, обязательно применение блокировочных коммутирующих устройств.

2. В соответствии с заданным потоком откачиваемых газов выбирается типоразмер высоковакуумного насоса. Расчет проводится по формуле (2-7), причем эффективная скорость откачки рабочего объема находится по уравнению (2-1). Выбирается насос с ближайшей большей величиной  $S_n$ .

В случае отсутствия данных по потоку газов производится его расчет, причем поток принимается постоянным во времени. Поток газов определяется по формуле (2-44). При определении количества газов, выделяющихся из обрабатываемых изделий, используют данные приложения 3 и формулу (4-1). Коэффициент неравномерности газовыделения  $\Omega$  будет тем больше, чем интенсивней ведется обработка и ажурнее геометрия изделия.

Поток газов, выделяющихся с поверхностей элементов рабочей камеры, обращенных в сторону вакуумной системы, находят по формуле (4-2). При этом порознь рассчитываются потоки газов от поверхностей с отличающейся температурой и изготовленных из разных материалов. Значения удельного газовыделения приведены в приложении 2. В зависимости от принципиальной схемы оборудования выбирают соответствующие удель-

ные газовыделения. Если оборудование периодического действия и рабочий объем во время загрузки и выгрузки изделий периодически контактируют с атмосферным воздухом, следует принимать удельное газовыделение после 1 ч откачки. При загрузке продукции через шлюз следует принимать удельное газовыделение равным минимальным значениям, приведенным в приложении 2 (после отжига в вакууме или длительной откачки).

Составляющая потока газов, связанная с протеканием извне, принимается равной чувствительности течеискателя, с помощью которого предполагается проводить контроль вакуумной плотности рабочей камеры, умноженной на число возможных мест протекания (количество разъёмных и неразъёмных соединений, вводов движения и т. п.).

3. Вспомогательные насосы, работающие последовательно или параллельно с основными высоковакуумными насосами, выбираются обычно в соответствии с паспортными данными основных насосов. В отдельных случаях, когда условия эксплуатации основных насосов отличаются от паспортных, следует руководствоваться рекомендациями гл. 7.

Насосы предварительного разрежения рабочей камеры выбираются исходя из заданного времени предварительной откачки, причем эффективная скорость откачки находится по уравнению (2-32), а быстрота действия насоса предварительного разрежения — по уравнению (2-7). Быстрота действия насоса принимается равной большему значению  $S_n$ .

Проводится конструирование вакуумной системы, во время которого окончательно определяются размеры трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и защитных устройств, типы и места подключения датчиков вакуумметров, определяются методы обезгаживания элементов вакуумной системы. По окончании конструирования вакуумной системы проводится поверочный расчет, выполняемый также поэтапно.

5. В соответствии с окончательными размерами высоковакуумной системы рассчитывается окончательное значение проводимости участка между рабочей камерой и высоковакуумным насосом. Расчет выполняется по уравнениям (2-3) или (2-4). Значения проводимости отдельных участков вакуумной системы берутся по данным гл. 6.

6. По уравнению (2-6) определяют эффективную быстроту откачки рабочей камеры.

7. С учетом кинетики газовыделения рассчитывают время достижения заданного давления в рабочей камере. При отсутствии этих данных в задании на проектирование выполняют расчет кинетики газовыделения.

Поскольку в большинстве случаев изделия обрабатываются при температурах больше 700 К, газовыделение из них определяется процессами диффузии. Расчет выполняют в соответствии с рекомендациями гл. 4. Начальные газосодержания выбираются из приложений 3 и 4. При отсутствии сведений по начальному газосодержанию используют данные приложения 6 по растворимости газов с учетом технологии предшествующей обработки материала или данные приложения 3.

Скорости удельного газовыделения рассчитывают для всего технологического процесса обработки изделий. Количество точек отсчета по времени принимают обычно равным 10—20 в зависимости от длительности процесса и скорости изменения удельного газовыделения. Наибольшее время обезгаживания, для которого рассчитывается газовыделение, должно быть на 20—30% больше заданной длительности технологического процесса обработки изделий.

Затем с учетом суммарной поверхности изделий определяют газовыделение изделий  $Q'_{изд}$ .

Газовыделение с поверхностей рабочей камеры рассчитывают в соответствии с рекомендациями гл. 3.

Для холодных поверхностей можно воспользоваться данными приложения 2 или кривыми удельного газовыделения в зависимости от времени откачки, приведенными на рис. 13-1 и 13-2.

Количество точек отсчета и длительность обезгаживания принимаются такими же, какие были приняты при расчете газовыделения из изделий.

Суммарное газовыделение с поверхностей рабочей камеры и высоковакуумной системы рассчитывают с учетом общей поверхности отдельных элементов, отличающихся материалом или температурой.

При поверочном расчете учитывается также поток газов, связанный с проницаемостью отдельных элементов рабочей камеры. Расчет проницаемости выполняют в соответствии с рекомендациями гл. 4 с использованием данных приложения 10.

Суммарный поток газов за счет проницаемости также рассчитывают с учетом поверхностей соответствующих элементов. Затем в соответствии с уравнением (2-44) определяют суммарный поток газов и давление в рабочей камере для каждого отрезка времени. По графику  $p_1=f(t)$  определяют время достижения заданного давления.

В случае, если это время равно или меньше заданного, переходят к расчету времени предварительной откачки рабочей камеры.

Возможны случаи, когда существенное влияние на суммарный поток газов в конце технологического процесса оказывает газовыделение конструктивных элементов рабочей камеры или их проницаемость. Тогда целесообразно с целью улучшения технических характеристик оборудования изменить конструкцию рабочей камеры таким образом, чтобы фоновые потоки газов были минимальными.

8. Рассчитывают окончательное время предварительной откачки по формулам (2-32), (2-35) или (2-42). Проводимости элементов системы предварительной откачки рассчитывают по уравнениям соответствующих параграфов гл. 6. Суммарное значение проводимости определяют по формулам (2-3) или (2-4).

9. В соответствии с рекомендациями гл. 7 выбирают вспомогательные насосы и рассчитывают их быстроту действия. При наличии форвакуумного баллона проводят его расчет по методике, изложенной в § 7-2.

10. При использовании для предварительной откачки централизованной форвакуумной системы (ЦФС) время достижения предварительного разрежения может быть ориентировочно рассчитано в соответствии с рекомендациями § 8-5. При использовании ЦФС для создания предварительного разрежения на выходе из основных насосов или для постоянной откачки рабочих объемов оборудования следует рассчитать перепад давлений на соответствующих соединительных трубопроводах по уравнению (2-2). Сумма полученного перепада давлений и наибольшего рабочего давления в магистрали ЦФС должна быть равна или меньше давления предварительного разрежения на выходе основного насоса или заданного давления в рабочем объеме.

### 8-3. РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ НАСОСАМИ

Рассмотрим последовательность расчета вакуумной системы оборудования с параллельно работающими насосами. Схема вакуумной системы с параллельно работающими насосами показана на рис. 8-1.

Последовательность расчета подобных вакуумных систем следующая:

1. Выполняют расчет рабочей камеры К. Порядок расчета практически не отличается от изложенного в § 8-2. В результате выполнения этого этапа расчета выбирают средства откачки рабочей камеры.

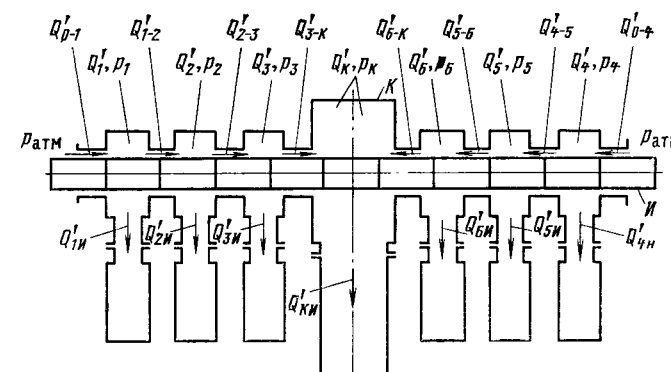


Рис. 8-1. Принципиальная схема установки с открытой шлюзовой системой и параллельно работающими насосами.  
К — рабочая камера; И — изделия или кассеты с изделиями.

Поток газа  $Q'_{3-к} + Q'_{6-к}$ , попадающий в рабочую камеру из шлюзовых каналов, повышает давление и создает дополнительную нагрузку на насос рабочей камеры. При этом давление в рабочей камере не должно превышать допустимого значения. Поэтому если при расчете удастся подобрать средства откачки, обеспечивающие давление, меньшее заданного, то разница между заданным давлением и полученным при расчете может быть использована в качестве резерва, позволяющего соответственно повысить  $p_k$  за счет потока газов  $Q'_{3-к} + Q'_{6-к}$ . Допустимая величина потока газов будет равна:

$$Q'_{3-к} + Q'_{6-к} = S_{0.к} \Delta p_k, \quad (8-1)$$