

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

20.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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

Проектный расчет, в результате которого определяются принципиальная схема вакуумной системы, ти-

пы и размеры насосов, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры соединительных трубопроводов.

Поверочный 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 *конечное давление в рабочей камере, поток газов, геометрические размеры рабочей камеры, 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 продукции, позволяющие рассчитать поток газов.

Проектный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Исходя из заданных значений парциального и полного давлений, определяют типы насосов, обеспечивающие откачку рабочей камеры до заданного давления.

2. По заданному или найденному расчетом потоку газов выбирают конкретный типоразмер насоса, обеспечивающего откачку до заданного давления; на этом этапе расчета поток газов, откачиваемых насосом, принимают *постоянным* во времени.

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 рабочей камеры, выбирают насос предварительного разрежения.

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

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

Поверочный расчет выполняется в следующей последовательности:

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

2. Рассчитывают время достижения заданного давления в рабочей камере, при этом учитывают кинетику газовыделения и натеканий. При отсутствии этих данных в задании на проектирование выполняется их расчет.

3. Рассчитывают 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.

В случае, если полученное в результате расчета время достижения требуемого конечного давления или предварительного разрежения превышает заданное, увеличивают проводимость соответствующего участка вакуумной системы за счет увеличения сечений трубопроводов или выбирают насос с большей скоростью действия.

При необходимости применения нестандартных элементов производят их конструирование и расчет.

С целью облегчения усвоения методики расчетов вакуумных систем и их элементов поясним их на примерах.

20.3. РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ОТЖИГА ДЕТАЛЕЙ ЭВП

В печи отжигаются детали цилиндрической формы диаметром 35 мм и высотой 100 мм в количестве 12 шт., изготовленные из малоуглеродистой стали.

Длительность отжига при температуре 1273 К составляет не более 6 ч.

Давление в рабочей камере при отжиге должно быть не более $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Давление в конце процесса отжига — $6,6 \cdot 10^{-4}$ Па.

Длительность предварительной откачки рабочей камеры не более 5 мин.

Печь отжига камерная с поднимающимся колпаком, внутри которого смонтированы нагреватель и тепловые экраны.

Чертеж рабочей камеры вакуумной печи с необходимыми для расчета размерами изображен на рис. 20.2.

$V = 60 \cdot 10^{-3}$

Проектный расчет

1. Исходя из заданного давления $p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па, выбираем в качестве основного насоса пароструйный диффузионный насос, для нормальной работы которого необходимо предварительное разрежение порядка 1—10 Па.

Для создания указанного предварительного разрежения выбираем механический вакуумный насос с масляным уплотнением.

2. Так как в техническом задании отсутствует величина потока газов, рассчитаем ее.

Расчет суммарного потока газа в предположении, что он постоянен для рабочей камеры печи отжига, произведен нами в примере 20.2.

Общий поток газа, поступающий в вакуумную систему печи, равен:

$$Q'_\Sigma = 8,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с},$$

3. Определим необходимую эффективную быстроту откачки рабочей камеры печи:

$$S_0 = \frac{Q'_\Sigma}{p} = \frac{8,35 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,83 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Эффективная быстрота откачки для вакуумных систем, оснащенных диффузионным насосом, обычно в 2 раза меньше быстроты действия насоса (см. § 19.1). В связи с этим выбираем высоковакуумный паромасляный диффузионный насос Н-250/2500, имеющий быстроту действия 1800 л/с (см. приложение 15).

4. Для создания предварительного разрежения в высоковакуумном насосе выбираем механический вакуумный насос 2НВР-5Д, который имеет среднюю быстроту действия 5 л/с в диапазоне давлений 10^5 — 10^2 Па (см. приложение 12).

5. Определяем принципиальную схему вакуумной системы печи (рис. 20.6).

Рабочая камера 8 откачивается высоковакуумным диффузионным насосом 2 типа Н-250/2500 через затвор 1. Выпускной патрубок насоса 2 через форвакуумный баллон 3 и электромагнитный клапан 5 соединен с механическим вакуумным насосом 4 типа 2НВР-5Д.

Предварительная откачка рабочей камеры осуществляется тем же механическим насосом 4 через электромагнитный клапан 6. Для напуска воздуха в рабочую камеру перед подъемом колпака и в механический насос после его выключения предназначен электромагнитный клапан напуска 7. Для измерения давления в различных участках системы предусмотрены манометрические преобразователи 9 и 10.

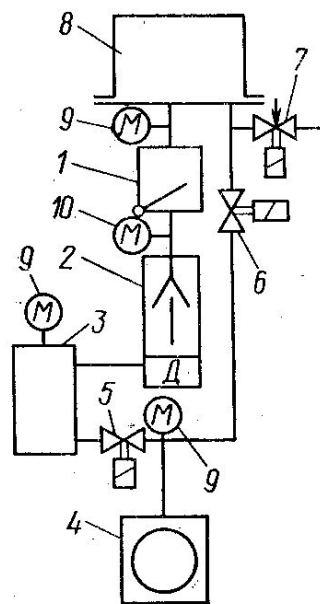


Рис. 20.6. Принципиальная схема вакуумной системы печи отжига.

6. Проверим возможность использования механического насоса 4 для предварительной откачки рабочей камеры, имеющей объем $V = 60$ л, за время $t = 5$ мин. Считаем, что предварительная откачка должна идти до давления 5,3 Па.

Так как заданное конечное давление в рабочей камере значительно больше предельного давления насоса 4, то в расчетах предельное давление учитывать не будем.

Рассчитаем по формуле (2.23) время предварительной откачки рабочей камеры. По формуле (19.1) с учетом того, что для механических насосов $\nu = 1,1 \div 1,25$, получим:

$$S_0 = \frac{1}{1,25} 5 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда

$$t = \frac{60 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{10^5}{5,3} = 148 \text{ с}.$$

Таким образом, полученное время предварительной откачки гораздо меньше заданного.

После определения принципиальной схемы и выбора типоразмеров насосов приступают к конструированию вакуумной системы и к поверочному расчету.

Поверочный расчет

1. Произведем уточненный расчет количества газов, поступающих в вакуумную систему, и построим кривую, характеризующую изменение потока газов во времени.

Основное количество газов поступает в вакуумную систему за счет диффузии из толщи материала изделий. Нагретые до температуры свыше 580—680 К элементы конструкции рабочей камеры вакуумной печи достаточно хорошо обезгаживаются во время нескольких первых тренировочных циклов отжига после изготовления установки и в дальнейшем служат источником выделения лишь физически адсорбированных на поверхностях газов в начале технологического цикла.

а) Рассчитаем поток газов, выделяющихся из изделий. Расчет ведем с учетом его изменения во времени по методике, изложенной в § 2.7.

Поток газов, выделяющихся из изделий, отжигаемых в рассчитываемой электрической печи, определен в примере 20.7 (см. табл. 20.4 и рис. 20.4). Заносим значения потока газов, выделяющихся из изделий, в графу 2 табл. 20.5.

б) Рассчитаем поток газов с поверхности элементов, расположенных в рабочей камере.

Так как скорость десорбции физически адсорбированных газов с поверхности экспоненциально зависит от температуры, то нагретые элементы выделяют эти газы практически полностью на начальном этапе технологического процесса отжига во время подъема температуры. Затем уровень газовой выделения нагретых элементов становится постоянным и соответствует газовой выделению отожженных в вакууме материалов.

Примем скорость удельного газовыделения с поверхностей нагретых элементов рабочей камеры (молибденовых и никелевых экранов, нагревателей и подставки) после высокотемпературного вакуумного отжига для всех материалов примерно одинаковой и равной

$$q'_{\text{газ}} = 6,66 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

лежащей в интервале скоростей удельных газовыделений для нержавеющей стали после отжига в вакууме при 673 К (см. приложение 7).

Площадь поверхностей нагретых элементов возьмем из примера 20.2:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{газ}} &= q'_{\text{газ}} (A_{\text{молиб.экр}} + A_{\text{ник.экр}} + A_{\text{нагр}} + A_{\text{подс}}) = \\ &= 6,66 \cdot 10^{-9} (1,496 + 2,0706 + 0,446 + 0,1269) = 2,76 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \end{aligned}$$

Газовыделение с поверхностей холодных элементов (медных электродов, колпака, крышки колпака, плиты, резиновых уплотнителей) переменено во времени.

Расчет газовыделения этих элементов проведен нами в примерах 20.3—20.5.

Для определения потока газов, поступающих в камеру печи с поверхностей холодных элементов, суммируем значения суммарного газовыделения из таблиц 20.1—20.3 и заносим полученные величины в графу 3 таблицы 20.5.

в) Поток газов, связанный с натеканием в рабочую камеру, считаем постоянным и принимаем таким же, как и при проектном расчете (см. пример 20.2):

$$Q'_{\text{нат}} = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Как видно из сравнения $Q'_{\text{нат}}$ с другими источниками газовыделения, поток газов за счет натекания относительно невелик и практически не сказывается на общем потоке газов. Следует подчеркнуть, что получение такого весьма малого $Q'_{\text{нат}}$ можно достичь только тщательным изготовлением вакуумной системы установки.

Суммируем поток газов за счет натекания с потоком газов, выделяющихся с поверхностей нагретых элементов (см. п. «б»), и полученное значение заносим в графу 4 таблицы 20.5.

г) Рассчитаем поток газа за счет проницаемости материалов. Такой расчет необходимо производить в тех случаях, когда в конструкции вакуумной камеры имеются нагретые элементы, отделяющие вакуумную камеру от атмосферы.

В рассматриваемой конструкции печи таким нагретым элементом, через который диффундируют газы, является стакан термопары, изготовленный из нержавеющей стали (см. рис. 20.5).

Расчет потока газов, проникающих через стенки стакана термопары, выполнен нами в примере 20.8 и равен:

$$Q'_{\text{ст}} = 5,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Расчет потока газов, проникающих из атмосферы через материал резиновых уплотнителей, рассчитан в примере 20.9 и равен:

$$Q'_{\text{рез.упл}} = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

2. Определяем по формуле (2.28) поток газов $Q'_{\text{газ}}$, выделяющихся с поверхности элементов, обращенных в сторону вакуумной системы. Величины удельных газовыделений $q'_{\text{газ}}$ берем из приложения 7 после 1 или 2 ч откачки, а для резины по рис. 17.3:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{газ}} = & Q'_{\text{газ.эл}} + Q'_{\text{газ.кр}} + Q'_{\text{газ.колп}} + Q'_{\text{газ.экр.мол}} + \\ & + Q'_{\text{газ.экр.ник}} + Q'_{\text{газ.нагр}} + Q'_{\text{газ.изд}} + Q'_{\text{газ.подст}} + \\ & + Q'_{\text{газ.рез}} + Q'_{\text{газ.пл}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1320 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 1075 \cdot 10^{-4} + \\ & + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 6450 \cdot 10^{-4} + 8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20\,706 \cdot 10^{-4} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 14\,960 \cdot 10^{-4} + \\ & + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4460 \cdot 10^{-4} + 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1550 \cdot 10^{-4} + \\ & + 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1269 \cdot 10^{-4} + 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot 74 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 1130 \cdot 10^{-4} = \\ & = 2,252 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}. \end{aligned}$$

3. Рассчитаем газовый поток через неплотности в местах соединения узлов рабочей камеры установки. Полагая число возможных мест натеканий равным 15 и считая, что проверка осуществлялась масс-спектрометрическим теченскателем с чувствительностью $7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, получаем:

$$Q'_{\text{нат}} = 7 \cdot 10^{-13} \cdot 15 \approx 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

4. Суммарный газовый поток, поступающий в вакуумную систему электрической печи отжига,

$$Q'_{\Sigma} = 6,1 \cdot 10^{-4} + 2,25 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-11} \approx 8,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

Пример 20.3. Определить скорость газовой выделения с медных поверхностей вакуумной камеры, имеющих площадь 1320 см^2 и находящихся при комнатной температуре во время откачки в течение 6 ч.

1. Рассчитаем по формуле (2.32) скорости удельного газовой выделения медных поверхностей, принимая величины констант для протравленной и промытой в бензоле и ацетоне меди (см. приложение 7):

$$\lg q'_{\text{газ}} = -4,382 - 1,04 \cdot 10^{-4} t.$$

Затем по формуле (2.28) определяем суммарную скорость газовой выделения.

Результаты расчета сводим в табл. 20.1.

Пример 20.4. Рассчитать скорость газовой выделения при комнатной температуре с поверхностей вакуумной камеры, изготовленной из нержавеющей стали площадью 8655 см^2 , во время откачки, продолжающейся 6 ч.

Расчет произведем, используя данные приложения 7 для нержавеющей стали по формуле (2.32):

$$\lg q'_{\text{газ}} = -3,467 - 4,25 \cdot 10^{-5} t.$$

Суммарную скорость газовой выделения определяем по формуле (2.28) и результаты сводим в табл. 20.2.

Пример 20.9. Рассчитать поток газов, проникающих через уплотнитель, изготовленный из резины марки 7889 и имеющий площадь 74 см^2 и толщину 1 см при комнатной температуре (298 К).

1. Проницаемость резины 7889 для азота при 298 К в соответствии с данными приложения 6 при разности давлений 1 Па и толщине пластины 1 м равна $q' = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Учтя, что парциальное давление p_{N_2} азота в атмосфере равно $7,9 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (см. приложение 9) и толщина уплотнителя Z равна 1 см , получим:

$$Q'_{\text{N}_2} = q'_{\text{N}_2} p_{\text{N}_2}^{1/2} \frac{A}{Z} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 7,9 \cdot 10^4 \cdot \frac{7,4 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2}} = 5,85 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

2. Проницаемость резины 7889 для кислорода принимаем равной проницаемости для кислорода натуральной резины. С помощью приложения 6 определяем значение проницаемости по уравнению (4.13), воспользовавшись значениями $k_0 = 8,86 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{м} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $E_{\text{пр}} = 3,14 \cdot 10^7 \text{ Дж} / \text{кмоль}$ и значением парциального давления кислорода $p_{\text{O}_2} = 2,12 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (см. приложение 9):

$$q'_{\text{O}_2} = \frac{8,86 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-2}} 2,12 \cdot 10^4 e^{-\frac{3,14 \cdot 10^7}{8,314 \cdot 10^3 \cdot 298}} = 5,89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Так как в нашем случае площадь уплотнителя равна 74 см^2 , то получим:

$$Q'_{\text{O}_2} = 5,89 \cdot 10^{-5} \cdot 7,4 \cdot 10^{-2} = 4,36 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Проницаемость уплотнителя по водороду, гелию и другим газам не рассматриваем ввиду незначительных их содержаний в атмосферном воздухе.

3. Общий газовый поток через резиновый уплотнитель будет равен:

$$Q'_{\Sigma} = 5,85 \cdot 10^{-7} + 4,36 \cdot 10^{-7} \approx 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

д) Рассчитаем общий поток газа, просуммировав потоки газов, поступающих с нагретых и холодных элементов печи, за счет натекания и потока газа, обусловленного проницаемостью через нагретые стенки и резиновый уплотнитель. Результаты расчета общего потока газов, поступающих в вакуумную систему установки, представлены в графе 6 табл. 20.5.

Результат представим также в виде графика, изображенного на рис. 20.7.

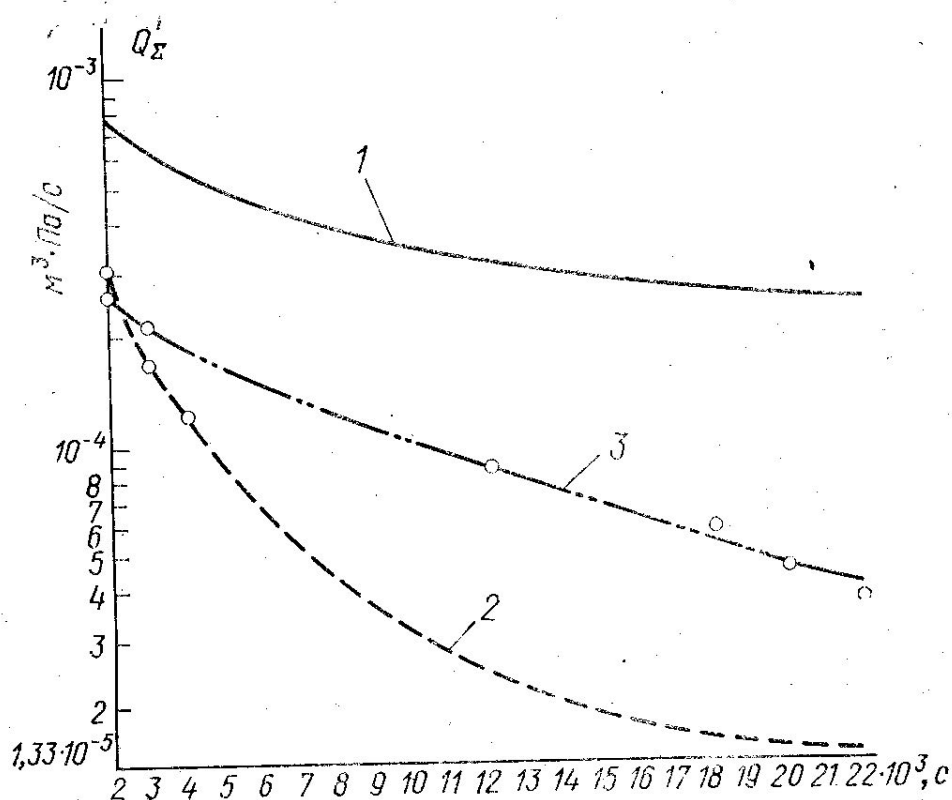


Рис. 20.7. Скорость изменения общего потока газов в зависимости от времени при температуре 1273 К .

1 — общий поток газов, поступающих в вакуумную систему; 2 — поток газов, поступающих из обрабатываемых (обезгаживаемых нагревом в вакууме) деталей; 3 — поток газов, поступающих с поверхностей холодных элементов; потоки газов, поступающих за счет натекания, проницаемости и с поверхности горячих элементов, приняты постоянными во времени.

2. Определяем проводимость высоковакуумной системы, состоящей из высоковакуумного насоса Н-250/2500 с затвором, соединительного патрубка с внутренним диаметром 260 мм и длиной 200 мм и диафрагмы, имеющей форму двух сегментов (см. рис. 18.4). Расчет проводимости высоковакуумной системы электрической печи отжига приведен нами в примере 18.2.

Проводимость высоковакуумной системы

$$U_{\text{общ}} = 1,677 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Рассчитаем по уравнению (2.9) эффективную быстроту откачки рабочей камеры:

$$S_o = \frac{1,8 \cdot 1,677}{1,8 + 1,677} = 0,868 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $S_n = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ — быстрота действия насоса Н-250/2500.

4. Рассчитаем по формуле (2.3) давление в рабочей камере в процессе отжига и в конце его. Результаты расчета сведем в табл. 20.5.

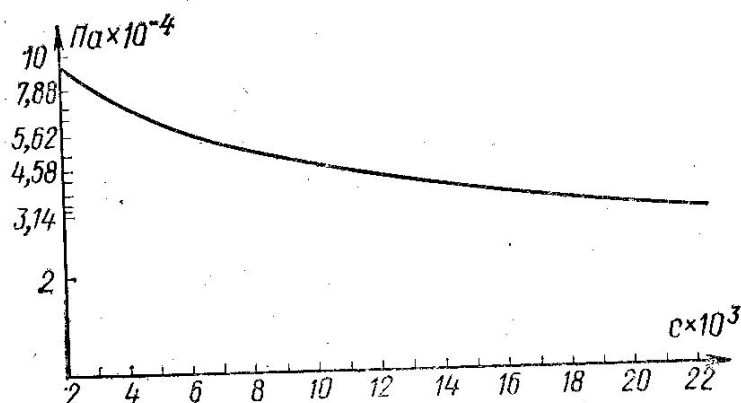


Рис. 20.8. Изменение давления в рабочей камере при температуре 1273 К в зависимости от времени откачки.

Как видно из табл. 20.5 и рис. 20.8, по истечении 2 ч с начала отжига давление становится около $3 \cdot 10^{-4}$ Па, а в конце отжига достигает $1,24 \cdot 10^{-4}$ Па. Таким образом, рассчитанная и сконструированная высоковакуумная система установки удовлетворяет требованиям технического задания.

5. Произведем проверочный расчет вакуумной системы предварительного разрежения.

а) В диапазоне давлений от 41,6 до 20 Па (I участок), т. е. при среднем по времени давлении

$$\bar{p} = \frac{41,6 + 20}{2} = 30,8 \text{ Па},$$

проводимость трубопровода рассчитывается по формуле (18.33) с учетом того, что эффективная длина трубопровода равна:

$$l_{\text{расч}} = 104 + 1,33 \cdot 2 \cdot 3,2 = 112,5 \text{ см} = 1,125 \text{ м};$$

$$U_{\text{м-в.тр}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{1,125} 30,8 +$$

$$+ \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 30,8}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 30,8} \right) 1,21 \cdot 10^2 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{1,125} =$$

$$= 4,19 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость электромагнитного клапана ДУ-32 длиной $l = 120$ мм при давлении 30,8 Па рассчитывается по формуле (18.12), в которую входят значения проводимости этого же клапана при молекулярном и вязкостном режимах, подсчитанные в примере 18.1 ($U_{\text{м.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и $U_{\text{в.кл}} = 9,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$):

$$U_{\text{м-в.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} + \frac{9,7 \cdot 10^{-2} - 9,2 \cdot 10^{-3}}{41,6 - 0,624} (30,8 - 0,624) =$$

$$= 73,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость всей магистрали при давлении 30,8 Па определяется по формуле (2.6):

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{4,19 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{73,8 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{2,67 \cdot 10^{-2}} \text{ с/м}^3,$$

и $U_{\text{общ}} = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$

б) Быстроту действия насоса $S_{\text{н}}$ берем по кривой $S_{\text{н}} = f(p)$ (см. рис. 19.2) при давлении 30,8 Па:

$$S_{\text{н}} \approx 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Эффективная быстрота откачки S_0 в соответствии с (2.9) равна:

$$S_0 = \frac{5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 3,26 \cdot 10^{-2}}{5,0 \cdot 10^{-3} + 3,26 \cdot 10^{-2}} \approx 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

в) Рассчитываем время откачки на I участке по формуле (2.23), причем газовыделением по-прежнему пренебрегаем:

$$t_{41,6 \rightarrow 20} = \frac{9,6 \cdot 10^{-2}}{4,3 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{41,6}{20} = 16,3 \text{ с}.$$

г) В диапазоне давлений от 20 до 10 Па (II участок), т. е. при среднем давлении $\bar{p} = \frac{20 + 10}{2} = 15$ Па, проводимость трубопровода рассчитывается по формуле (18.33) с учетом, что эффективная длина трубопровода, рассчитываемая по формуле (18.36), равна:

$$l_{\text{расч}} = 104 + 1,33 \cdot 2 \cdot 3,2 = 112,5 \text{ см} = 1,125 \text{ м};$$

$$U_{\text{м-в.тр}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{1,125} 15 + \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 15}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 15} \right) \times \\ \times 1,21 \cdot 10^2 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{1,125} = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость электромагнитного клапана ДУ-32 при давлении 15 Па рассчитывается так же, как в примере 18.1, и равна $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$.

Проводимость всей магистрали при давлении 15 Па определяется по формуле (2.6):

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{2,13 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{4,0 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{1,39 \cdot 10^{-2}} \text{ с/м}^3$$

$$\text{и } U_{\text{общ}} = 1,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

д) Быстроту действия насоса S_n при 15 Па берем по кривой $S_n = f(p)$ (см. рис. 19.2), равной $S_n \approx 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Эффективная быстрота откачки S_o в соответствии с (2.9) равна:

$$S_o = \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,39 \cdot 10^{-2}}{4,5 \cdot 10^{-3} + 1,39 \cdot 10^{-2}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

е) Рассчитаем время откачки на II участке по формуле (2.23), пренебрегая газовыделением:

$$t_{20 \rightarrow 10} = \frac{96 \cdot 10^{-3}}{3,4 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{20}{10} = 19,6 \text{ с}.$$

ж) Для III участка давлений аналогично предыдущему получим:

$$\bar{p} = \frac{10 + 5,32}{2} = 7,66 \text{ Па};$$

$$U_{\text{м-в.тр}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{1,125} 7,66 +$$

$$+ \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,66}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,66} \right) 1,21 \cdot 10^2 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{1,125} =$$

$$= 12,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{\text{м-в.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} + \frac{9,7 \cdot 10^{-2} - 9,2 \cdot 10^{-3}}{41,6 - 0,624} (7,66 - 0,624) =$$

$$= 2,43 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{12,56 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2,43 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{8,28 \cdot 10^{-3}} \text{ с/м}^3;$$

$$U_{\text{общ}} = 8,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$S_n \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$S_o = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,28 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-3} + 8,28 \cdot 10^{-3}} = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

При расчете времени откачки на этом участке учтем предельное остаточное давление, достигаемое в вакуумной системе, которое в нашем случае равно:

$$p_{\text{ост}} = Q'_{\text{газ}}/S_0 + p_{\text{пред}},$$

где $Q'_{\text{газ}}$ — газовыделение со стенок вакуумной системы, равное по условию $2,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$;

S_0 — эффективная быстрота откачки;

$p_{\text{пред}}$ — предельное остаточное давление механического вакуумного насоса, равное 3,06 Па (приводится в его паспорте).

В результате время откачки сосуда на участке III в соответствии с формулой (2.23) будет равно:

$$t_{10 \rightarrow 5,32} = \frac{96 \cdot 10^{-3}}{1,34 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{10 - 3,24}{5,32 - 3,24} = 82,6 \text{ с.}$$

5. Суммарная длительность откачки рабочей камеры технологической установки от атмосферного давления до 5,32 Па равна:

$$t_{\Sigma} = 107,5 + 16,3 + 19,6 + 82,6 = 226 \text{ с.}$$