

Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

В.М. Неровный, В.И. Гирш

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

Рекомендовано редсоветом МГТУ им.Н.Э.Баумана в качестве
учебного пособия

Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана

2001

ББК 30.61:34.52

Н54

Рецензенты: *С.С.Волков, В.М.Ямпольский*

Н54

Неровный В.М., Гирш В.И. Проектирование вакуумных систем сварочных установок: Учеб.пособие. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001.–40 с., ил.

В учебном пособии изложены принципы построения вакуумных систем сварочных установок, в которых используется разрежение до $1 \cdot 10^{-3}$ Па, с учетом специфики технологических процессов (электронно-лучевая и диффузионная сварки, пайка и т.п.).

Даны характеристики вакуума как защитной среды, практические рекомендации по рациональному выбору вакуумной схемы, методики проектного и поверочного расчетов, приведены необходимые для расчета характеристики наиболее часто используемых насосов и вакуумных агрегатов, данные по газосодержанию обрабатываемых материалов и натеканию газа в рабочую камеру.

Для студентов 5 и 6 курсов "Оборудование и технология сварочного производства".

Ил. 5. Табл. 8, Библиогр. 11 назв.

ББК 30.61:34.52

Редакция заказной литературы

Вячеслав Михайлович Неровный

Валентин Иосифович Гирш

Заведующая редакцией *Н.Г. Ковалевская*

Редактор *Е.К. Кошелева*

Корректор

с МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2001

Подписано в печать

Формат 60х84/16. Бумага тип. № 2

Печ.л. Усл.печ.л. Уч.-изд.л.

Тираж 50 экз. Изд. № . Заказ № С

Издательство МГТУ, типография МГТУ.

107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

ВВЕДЕНИЕ

Для современного этапа развития машиностроения и приборостроения характерна тенденция расширения номенклатуры используемых конструкционных материалов. Все большее применение находят высоколегированные, тугоплавкие сплавы, керамики, композиционные, слоистые, спеченные и другие материалы как в однородном, так и в разнородном сочетаниях. В этой связи при выполнении сварочных операций и модификации рабочих поверхностей усложняются проблемы организации процессов термомеханического воздействия на материал, особенно в высокотемпературной области.

Одна из проблем – защита обрабатываемого материала от воздействия атмосферного воздуха. Эта задача особенно осложняется при работе с химически активными металлами и сплавами. Во многих случаях традиционные способы защиты (инертные и восстановительные газы, разнообразные флюсы) по тем или иным причинам не удовлетворяют условиям производства. К числу таких причин можно отнести недостаточную химическую чистоту среды (наличие окислителей), трудности с воспроизведением условий обработки из-за практической сложности постоянного контроля за составом среды в зоне обработки, высокую стоимость защитных газов, значительные затраты на доставку баллонов и т.д.

Во многих случаях оптимальным, а в ряде случаев и единственным альтернативным решением может явиться использование вакуума, обеспечивающего более высокую степень защиты материала в процессе обработки, легко поддающегося оперативному инструментальному контролю и автоматизации этой операции, способствующему активному рафинированию обрабатываемых поверхностей особенно в нагретой зоне. Все это, в конечном счете, положительно сказывается на качестве получаемых соединений и, что особенно важно, – на высокой стабильности результатов.

К числу сварочных процессов, ведение которых целесообразно, а в определенных случаях только и возможно в условиях вакуума, относятся диффузионная и электронно-лучевая сварка, наплавка, напыление, дуговая сварка с полым катодом, пайка и т.д. На сборочно-сварочных операциях находят применение вакуумные приспособления.

В экологическом аспекте и с позиций требований охраны труда использование вакуума также может принести значительные результаты.

Однако для технологической реализации этого способа защиты требуется оборудование, в конструкции которого должны учитываться как особенности обрабатываемого материала и самого изделия, так и специфика конкретного сварочного процесса. Последнее обстоятельство ставит инженеров-сварщиков перед необходимостью создавать специализированное оборудование или грамотно формулировать требования для конструкторов, проектируемых вакуумные системы и оборудование.

Подготовка в техническом университете инженеров-механиков в области механики твердого тела, жидкости и газа без изучения физики и техники получения разреженных газов (вакуума) является неполной. На устранение существующего пробела в программах подготовки инженеров-сварщиков в этой области и направлено настоящее пособие. Это тем более целесообразно, что уже на протяжении многих лет студенты выполняют многочисленные курсовые и дипломные проекты, в которых проектируются элементы вакуумных систем.

1. ВАКУУМ КАК ЭФФЕКТИВНАЯ ЗАЩИТНАЯ СРЕДА ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Вакуум – это состояние разреженного газа, при котором давление его значительно ниже атмосферного. Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление (p). Степень разрежения, достигаемая в откачиваемой камере, определяется равновесным давлением, устанавливающимся под действием двух противоположных процессов: откачки газа с помощью насосов и натекания его через неплотности, а также в результате газоотделения от стенок камеры, из материала технологических приспособлений и свариваемых изделий в рабочем объеме. В связи с этим в вакуумной технике используется понятие “динамический вакуум”.

Свойства динамического вакуума как химически инертной среды определяются главным образом малым содержанием таких вредных с позиции ведения сварочных процессов примесей, как кислород, азот, водород и пары воды, в единице объема вакуумной камеры. Представление о чистоте среды в вакуумной камере и ее защитных свойствах можно получить сопоставив количество этих примесей в единице объема вакуумного пространства с их количеством в инертных газах в единице объема при атмосферном давлении (табл.1).

Таблица 1. Аргон газообразный (ГОСТ 10157-79)

Показатель	Норма для сортов	
	Высший	Первый
Объемная доля, %		
аргона	99,992	99,987
кислорода (не более)	0,0007	0,002
азота (не более)	0,006	0,01
Массовая концентрация водяного пара при $T = 293 \text{ К}$ и $p = 0,1 \text{ МПа}$, г/м ³	0,007	0,01

Результаты расчета состава атмосферы и количества примесей в единице вакуумного пространства показывают (рис.1.), что даже при относительно “плохом” вакууме достигается малое содержание примесей в единице объема. Так, при давлении в камере, равном 1,3 Па, содержание примесей меньше, чем в аргоне высшего сорта (кислорода в 2,5 раза, азота в 6 раз меньше).

Состав остаточной газовой среды в вакуумной камере определяется многими факторами: составом воздуха, натеканием, десорбцией газов с обрабатываемых материалов, приспособлений и поверхностей камеры, способом откачки газов и т.п. В составе газов остаточной

атмосферы обычно присутствует кислород, пары воды, водород, углерод и углеродосодержащие газы.

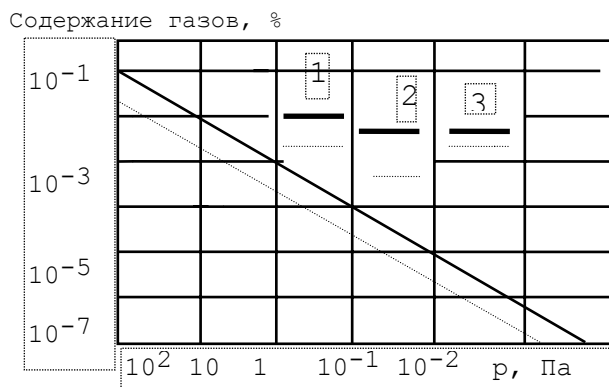


Рис.1. Содержание азота и кислорода в единице объема для различных защитных сред (— азот, --- кислород):
1 - аргон первого сорта; 2 - аргон высшего сорта;
3 - гелий марки Б

Кислород попадает в остаточную среду в результате десорбции с поверхностей, при диссоциации оксидов и кислородосодержащих веществ, при натекании воздуха через неплотности.

Пары воды попадают в вакуумную камеру в основном вследствие их десорбции с поверхностей конструктивных элементов камеры. Источником азота в составе остаточных газов может быть его десорбция с поверхностей конструктивных элементов камеры при контакте их с атмосферой и при натекании воздуха через неплотности.

Углекислый газ может образовываться при взаимодействии кислорода с углеродосодержащими материалами и парами масла в случае использования масляных насосов. При использовании паромасляных насосов (наиболее широко применяемых в промышленных сварочных установках) в камере суммарное парциальное давление углеводородов всего в 2-7 раз ниже, а парциальное давление кислорода на один-два порядка ниже остаточного давления [1].

Расплавленный или нагретый до высоких температур металл, как правило, активно взаимодействует с атмосферой остаточного газа и при давлении в камере менее $5 \cdot 10^{-2}$ Па возможно восстановление меди, никеля, кобальта, железа, вольфрама и молибдена из оксидов в результате диссоциации углеводородов, поскольку при их разложении образуются восстановители: оксид углерода и водород. В результате атмосфера остаточного газа в вакуумной камере не только является защитной (инертной) средой, предохраняющей металл от действия кислорода и азота воздушной атмосферы, но в некоторых случаях может проявлять восстановительные свойства. Наибольшей

восстанавливающей способностью обладает остаточная среда, полученная при откачке паромасляными диффузионными насосами по сравнению, например, с турбомолекулярными и электроразрядными.

При поддержании неизменного давления в вакуумной камере с увеличением натекания воздуха состав остаточной среды в ней изменяется. Увеличивается парциальное давление кислорода, азота и, наоборот, уменьшается суммарное парциальное давление углеводородов. В таком случае, технологические свойства вакуумной среды ухудшаются и для ряда химически активных металлов (титан, цирконий, молибден, вольфрам и др.) среда начинает проявлять даже окислительную способность [2].

При высоких температурах наряду с восстановлением могут действовать и другие механизмы удаления оксидов с обрабатываемых поверхностей: диссоциация, возгонка, растворение в основном металле. Роль вакуума также состоит в ускорении и в более полном завершении термодинамических процессов, протекающих в расплавленном и нагретом металле.

С технико-экономической точки зрения целесообразность применения вакуумной защиты для сварочных процессов проявляется не только в улучшении условий ведения технологического процесса и, как следствие, в достижении высоких эксплуатационных показателей изделия, но также и в том, что эксплуатационные затраты на создание вакуумной защиты значительно меньше, чем на проведение сварочных процессов в инертных газах. К примеру, по эксплуатационным затратам сварка в вакууме оказывается почти в 2 раза дешевле сварки в атмосфере аргона [2].

Воспроизводимость условий обработки в вакуумной среде довольно высока и обеспечивается с помощью современного вакуумного оборудования при постоянном инструментальном контроле за давлением среды по показаниям вакуумметра. Причем создается эта совершенная защитная среда для сварочных процессов непосредственно на рабочем месте. В результате сварочное производство перестает зависеть от заводов, производящих защитные газы, сокращается потребность в баллонах, транспортных расходах и т.п.

2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РАБОЧУЮ СРЕДУ В ВАКУУМНЫХ УСТАНОВКАХ

Основным параметром, характеризующим разреженную среду, является абсолютное давление. Единицей давления в СИ является Паскаль (Па – Н/м²). Соотношения между различными единицами давления даны в табл.2.

Таблица 2. Соотношения между единицами давления

Единицы измерения	1 Па	1 мм рт.ст.	1 физ. атм	1 бар
1 Па	1	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
1 мм рт.ст.	133	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$
1 физ. атм	$1,01 \cdot 10^5$	760	1	1,01
1 бар	$1 \cdot 10^5$	750	0,987	1

Многие физические процессы в вакууме зависят не только от значения абсолютного давления, но и от соотношения между числом взаимных столкновений молекул и числом столкновений молекул со стенками вакуумной системы.

Известно, что частота столкновений между молекулами K_M определяется соотношением $K_M = v_{ap}/L$, где v_{ap} – среднеарифметическая скорость молекул; L – средняя длина их свободного пути.

Частота столкновений молекул со стенкой $K_C = v_{ap} \cdot F / (4V)$, где F – площадь поверхности стенок, соприкасающихся с разреженным газом; V – объем камеры; $4V/F$ – эффективный размер вакуумной камеры.

Отношение K_C/K_M называется критерием Кнудсена

$$Kn = K_C/K_M = L / (4V/F) \quad (2.1)$$

В зависимости от значения этого критерия различают вакуум низкий, средний, высокий (табл.3.).

Табл.3. Зависимость критерия Кнудсена
от степени вакуумирования

Критерий Кнудсена	Диапазон давлений, Па	Степень вакуума
$\ll 1$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^3$	Низкий вакуум
1	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^{-1}$	Средний вакуум
$\gg 1$	$9 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-5}$	Высокий вакуум

При низком вакууме по сравнению с высоким интенсифицируются окислительные процессы, увеличивается насыщение обрабатываемого материала нежелательными газами, уменьшается интенсивность дегазации и, как следствие, ухудшаются результаты обработки соединяемых поверхностей.

Использование высокого вакуума обеспечивает защиту металлов от насыщения их вредными газовыми примесями, но сопряжено со снижением производительности оборудования, приводит к его удорожанию и может быть оправдано в технологиях только с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик неразъемных соединений в изделиях ответственного назначения.

При проектировании вакуумных сварочных процессов целесообразно выбирать давление остаточных газов в камере и их состав с учетом следующих условий:

1. Химическая активность соединяемых материалов при высокотемпературной обработке и сохранение их служебных характеристик.
2. Особенности сварочного процесса (температура, длительность процесса, локальность нагрева и др.).
3. Уровень газовыделения из соединяемых материалов.
4. Предельно допустимое содержание вредных примесей в атмосфере камеры, влияющее на служебные свойства соединяемых материалов и ход технологического процесса и определяемое главным образом натеканием.

Натекание характеризуется потоком газов, попадающих в единицу времени в вакуумную камеру из-за несовершенств герметизирующих элементов камеры, и определяется так:

$$Q = V \cdot dp / dt, \quad (2.2)$$

где Q – натекание; dp – изменение давления в объеме V за время dt .

В вакуумной технике наиболее употребительными единицами измерения натекания являются $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ и $\text{дм}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ (табл.4).

Таблица 4. Соотношения между различными единицами потока газа при натекании

Единица	$\text{Вт} = \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	$\text{л} \cdot \text{мм рт.ст} / \text{с}$	$\text{л} \cdot \text{ммк} \text{ рт.ст} / \text{с}$	$\text{см}^3 \cdot \text{атм} / \text{с}$
$\text{Вт} = \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	1	7,6	$7,6 \cdot 10^3$	10
$\text{л} \cdot \text{мм рт.ст} / \text{с}$	0,133	1	$1 \cdot 10^3$	1,32
$\text{л} \cdot \text{ммк} \text{ рт.ст} / \text{с}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
$\text{см}^3 \cdot \text{атм} / \text{с}$	0,1	0,75	760	1

К основным параметрам, характеризующим рабочую среду в камере и условия ведения технологического процесса, относятся абсолютное давление и парциальный состав остаточных газов в камере. В свою очередь, парциальный состав остаточной атмосферы существенно зависит от натекания газа в камеру. Рекомендуемые параметры рабочей среды в вакуумных технологических камерах для сварочных процессов приведены в табл.5.

Таблица 5. Рекомендуемое рабочее давление и предельно допустимое натекание в вакуумной камере для отдельных групп обрабатываемых материалов

МАТЕРИАЛЫ	СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ			
	Пайка с общим нагревом и напыление	Пайка с локальным нагревом (ТВЧ, ДРПК, ЭЛС)	Сварка плавлением (ЭЛС, ДРПК)	Диффузионная сварка
Легированные стали	$\frac{(1-8) \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{(5-10) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{(5-10) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{(0,2-5) \cdot 10^{-1}}{1 \cdot 10^{-2}}$
Медь и ее сплавы	$\frac{(1-8) \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(2-8) \cdot 10^{-1}}{1 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{(4-10) \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{(0,2-5) \cdot 10^{-1}}{5 \cdot 10^{-3}}$
Алюминий и его сплавы	$\frac{(1-8) \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{(1-5) \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(1-6) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(1-8) \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}}$
Никель и его сплавы	$\frac{(1-5) \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(3-9) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(1-7) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(0,8-1) \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-3}}$
Титан и его сплавы	$\frac{(0,5-2) \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{(2-8) \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(1-8) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{(2-6) \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}}$
Тугоплавкие сплавы	$\frac{(1-2) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{(2-4) \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{(1-8) \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{(1-2) \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-4}}$

Примечание: Числитель – давление в Па; знаменатель – натекание в $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$; ЭЛ – электронный луч; ДРПК – дуговой разряд с полым катодом; ТВЧ – токи высокой частоты

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

Проектировочный расчет вакуумной системы выполняют при разработке новых установок для проведения сварочных операций в вакууме. Целью такого расчета является выбор откачного оборудования, арматуры и определение размеров соединительных трубопроводов из условия обеспечения заданного рабочего давления в вакуумной камере. Основные технологические процессы в вакуумной камере осуществляются в стационарном режиме работы вакуумной установки.

Поверочный расчет выполняют для определения распределения давления в известной вакуумной системе, а также характеристик существующих вакуумных систем или уточнения проектировочных расчетов. При замене вакуумных насосов на насосы другого типа или другой производительности требуется обязательное проведение поверочного расчета вакуумной установки.

3.1. Состав вакуумных установок

Сварочные вакуумные установки любого типа состоят из двух основных комплексов: энергетического и электромеханического. К энергетическому комплексу относится аппаратура, предназначенная для формирования источника энергии для сварочных процессов, управления его теплоэнергетическими параметрами.

Электромеханический комплекс установки предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема, выполнения всех сварочных, установочных и транспортных перемещений обрабатываемого изделия, присадочных материалов и источника энергии. Электромеханический комплекс установки состоит из следующих функциональных узлов:

- 1) вакуумная камера;
- 2) вакуумная откачная система;
- 3) манипулятор и технологическая оснастка;
- 4) система наблюдения за процессом;
- 5) Электропривод;
- 6) контрольно-измерительная система.

Вакуумные откачные системы в сварочных установках служат для создания и поддержания в рабочем объеме (вакуумной камере) необходимой степени разрежения (вакуума). Вакуумные системы (ВС) состоят из средств откачки (насосов), коммутационно-регулирующей аппаратуры (клапаны, затворы, натекатели, разъемные соединения, служащие для периодического сообщения и герметичного перекрытия коммуникаций и управления вакуумным режимом) и вакуумных трубопроводов.

3.2. Схемы вакуумных систем

Типовыми устройствами для получения среднего и высокого вакуума являются вакуумные системы, в которых используются диффузионные и механические вращательные насосы. На рис.2. представлена схема вакуумной системы, наиболее часто применяемая в промышленных установках для сварочных процессов. Она состоит из

высоковакуумного агрегата типа АВП (паромасляный диффузионный насос 1, азотная ловушка 2 и вакуумный затвор 3), вакуумных вентилей и клапанов 4, предохранительного клапана 5, перекрывающего систему при внезапном отключении электроэнергии, клапана для напуска воздуха 6, форвакуумного насоса 7 типа ВН, АВЗ, НВЗ, манометрических датчиков для измерения давления в вакуумной камере 9.

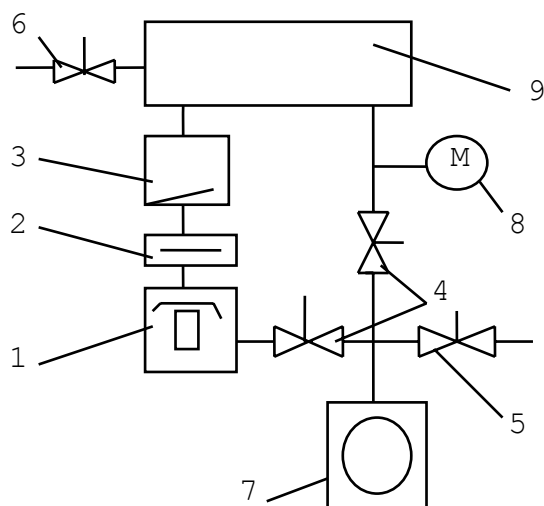


Рис.2. Схема откачной системы для сварочных процессов в высоком вакууме

Полный цикл работы сварочной установки состоит из следующих этапов:

1. Установка изделия в сварочное приспособление в камере.
2. Герметизация вакуумной камеры.
3. Предварительная откачка рабочей камеры форвакуумным насосом 7. При этом затвор 3 и клапан, соединяющий выходной патрубок диффузионного насоса 1 с форвакуумным насосом 7, закрыты.
4. Открытие клапана, соединяющего форвакуумный насос 7 с входным патрубком диффузионного насоса 1 при давлении в камере примерно $(1...10)$ Па и разогретом диффузионном насосе 1.
5. Перекрытие клапана вакуумпровода предварительной откачки и открытие затвора 3, отделяющего диффузионный насос 1 от камеры 9. В таком положении выполняется откачка системы до рабочего давления $6 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-2}$ Па.
6. Осуществление сварочной технологической операции (сварка, пайка, наплавка и др.).
7. Напуск воздуха в рабочую камеру с помощью клапана 6 после охлаждения технологического изделия (температура охлаждения определяется свойствами материала изделия).

8. Разгерметизация камеры при достижении в ней давления равного атмосферному, перекрытие клапана 6 и удаление изделия из камеры.

Для камер большого объема предпочтительны вакуумные системы, отличающиеся от представленной на рис.2 наличием параллельно подключенного агрегату типа АВП дополнительного вакуумного бустерного насоса типа НБН. Эти насосы имеют в диапазоне давлений от 1 до 0,1 Па намного более высокую быстроту откачки по сравнению с паромасляными агрегатами типа АВП. В некоторых случаях дополнительно устанавливают к насосу типа НБН второй форвакуумный насос.

При значительных газовыделениях в процессе сварки, наплавки или пайки необходимо применять схему, представленную на рис.3. В ней бустерный насос 10 соединен последовательно с вакуумным агрегатом типа АВП, что дает возможность откачивать большие объемы газа, а также получать более низкое рабочее давление в камере, чем по схеме на рис.2. Эти вакуумные системы с диффузионными насосами имеют существенный недостаток. В процессе откачки пары рабочих жидкостей насосов "загрязняют" откачиваемый объем. Для защиты от миграции паров масел откачные системы снабжаются конденсационными или сорбционными ловушками. Однако это лишь частично позволяет решить проблему.

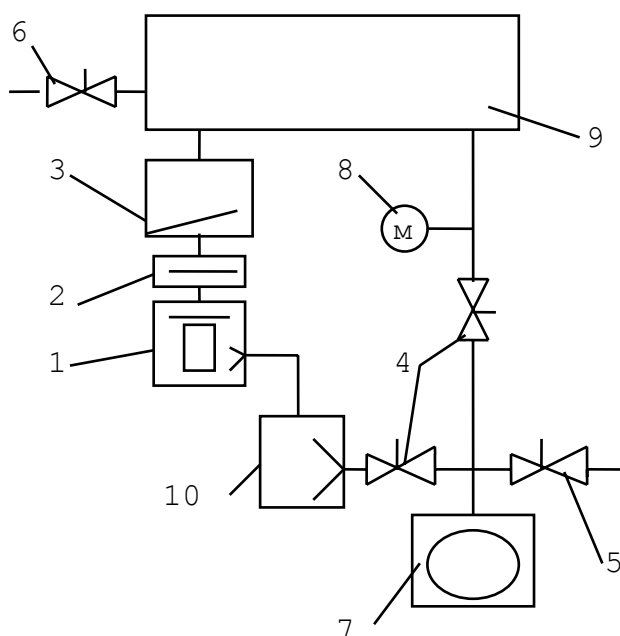


Рис.3. Схема откачной системы для сварочных процессов в высоком вакууме с интенсивным газовыделением

Необходимость в безмасляном вакууме возникает при работе с материалами очень высокой химической активности. В этих случаях

применяют специальные системы безмасляной откачки, где в качестве основных насосов используют электроразрядные, магниторазрядные, геттерные, турбомолекулярные насосы.

3.3. Этапы расчета и исходные данные для проектирования

Основной характеристикой вакуумной системы ВС является поток откачиваемого газа Q во времени, по которому рассчитывают эффективную быстроту откачки $S_{эф}$. Для оценки Q необходимо знать объем вакуумной камеры $V_{в.к}$, площадь ее поверхности $F_{в.к}$, обращенной в вакуум, материалы камеры и изделия, а также температуру его обработки.

Расчет вакуумных систем проводят в два этапа: сначала делают проектный расчет, затем поверочный [3].

Исходными данными для проектного расчета являются следующие:

- 1) давление остаточных газов в рабочей камере p ;
- 2) давление газов после предварительного разрежения $p_{п.р}$;
- 3) газокINETические особенности ВС:

а) поток газа, обусловленный особенностями газоотделения во время технологического процесса, и его характер (локальный напуск газа или распределенный – десорбция с поверхностей обрабатываемых изделий, камеры и приспособлений) ;

б) режим работы ВС (циклический, непрерывный, производительность установки) ;

4) размеры вакуумной камеры, ее материалы, а также материалы технологической оснастки;

5) материалы и размеры обрабатываемых деталей;

6) термический цикл технологического процесса;

7) время предварительного разрежения $t_{п.р}$;

8) время достижения заданного рабочего давления $t_{зад}$;

9) специфические условия откачки, которые определяются наличием в ВС газов с особыми свойствами (инертные, химически активные) ;

10) технико-экономические требования к средствам откачки (надежность, стоимость, масса, габаритные размеры, потребляемая мощность, эксплуатационные расходы) ;

11) требуемая степень автоматизации.

Проектный расчет выполняют в такой последовательности:

1. По заданным значениям давления газов выбирают типы вакуумных насосов, обеспечивающих необходимую откачку (см. приложение, табл. П1-П4).

2. Определяют суммарный газовый поток как до начала технологического процесса, так и во время его.

3. Рассчитывают необходимую быстроту откачки рабочей камеры, принимая максимальный газовый поток постоянным во времени, по формуле

$$S_{\text{эф}} = Q\Sigma/p \quad (3.1.)$$

4. Вычисляют необходимую номинальную быстроту действия основного насоса

$$S_{\text{н}} = S_{\text{эф}}/K_{\text{н}} , \quad (3.2.)$$

где $S_{\text{н}}$ и $S_{\text{эф}}$ – расчетные значения номинальной и эффективной скорости действия насосов, $K_{\text{н}}$ – коэффициент использования насоса.

5. По найденному значению скорости откачки выбирают марку основного насоса.

6. Выбирают или разрабатывают принципиальную схему вакуумной системы установки.

7. По паспортным данным выбирают вспомогательные насосы и насос предварительного разрежения. В зависимости от выбранной схемы ВС вспомогательный насос и насос предварительного разрежения могут быть самостоятельными. Или же один форвакуумный может поочередно выполнять функции как вспомогательного, так и насоса предварительного разрежения.

8. Предварительно назначают размеры вакуумных трубопроводов, выбирают коммуникационную аппаратуру и средства измерения давления.

9. Находят быстроту откачки вакуумной рабочей камеры насосом предварительного разрежения $S_{\text{эф.всп.}} = S_{\text{н.всп.}} \cdot K_{\text{н.всп.}}$, где $S_{\text{эф.всп.}}$ и $S_{\text{н.всп.}}$ – эффективная и номинальная скорость действия вспомогательного насоса.

10. Определяют свободный объем вакуумной камеры и объем части трубопроводов от камеры до вентилей.

11. Вычисляют время предварительного разрежения по формуле

$$t_{np} = \frac{V}{S_{эф.вс\ n}} \cdot \ln \frac{p_n}{p_{np}}, \quad (3.3.)$$

где p_n – начальное давление 0,1 Мпа; $p_{п.р}$ – давление предварительного разрежения.

Исходными данными для поверочного расчета являются следующие:

- 1) назначенные при выполнении проектного расчета типоразмеры насосов;
- 2) назначенные размеры вакуумных трубопроводов и коммуникационного оборудования.

Поверочный расчет выполняют в следующем порядке.

1. Уточняют величину потока газа с учетом изменения его во времени.

2. Согласно критерию Кнудсена определяют режим течения газа по элементам вакуумной системы [3, 4].

3. В зависимости от режимов течения газа находят проводимость отдельных элементов и общую проводимость участков вакуумной системы.

4. По основному уравнению вакуумной техники рассчитывают быстроту откачки газа из рабочей камеры.

5 Уточняют время предварительной откачки и проверяют его соответствие заданному значению.

6. Находят давление остаточных газов в камере по формуле $p = Q / S_{эф}$.

7. Проверяют возможность совместной работы основного и вспомогательного насосов.

3.4. Определение газоотделения и натекания

Газовый поток, который поступает в вакуумную камеру и должен откачиваться вакуумным насосом в стационарном режиме работы, складывается из нескольких составляющих

$$Q = Q_T + Q_{г} + Q_H, \quad (3.4)$$

где Q_T – поток газов, выделяющихся из соединяемых деталей, нагревателей, экранов и т.д. (технологическое газовыделение), м³·Па/с; $Q_{г}$ – поток газов, выделяющихся из конструкционных материалов вакуумной камеры; Q_H – поток газа, натекающего в камеру через разъемные соединения.

Поток газа $Q_{\text{нач}}$ существует в начальный период неустановившегося режима работы и определяет время предварительного разрежения. Технологическое газовыделение определяется материалами соединяемых деталей, их массой, а также температурой нагрева деталей или зоны соединения. Например, при диффузионной сварке, пайке с общим нагревом газовый поток определяют по формуле

$$Q_T = \frac{k}{t} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot q_i, \quad (3.5)$$

где k – коэффициент, учитывающий неравномерность процесса газовыделения во времени ($k=1.5 \dots 3.0$); t – общее время нахождения свариваемых или паяемых деталей в вакууме, с; m_i – масса i -го нагревательного элемента, кг; q_i – удельное газовыделение из i -го нагревательного элемента, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$; n – число нагревательных элементов (деталей, нагревателей, экранов и т.д.).

Пример. Определить поток газов, поступающий в вакуумную камеру при высокотемпературной пайке.

Исходные данные. Электрическая вакуумная печь с поднимающимся водоохлаждаемым колпаком из нержавеющей стали, внутри которого смонтированы молибденовый листовой нагреватель и тепловые экраны. Паяемые изделия в количестве 10 шт. представляют собой цилиндры из никеля ($\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$) диаметром $d=40 \text{ мм}$ и высотой $h=100 \text{ мм}$. Выдержка при температуре пайки 1370 К составляет $0,5 \text{ ч}$. Общее время пайки составляет $t=2,0 \text{ ч}$.

Расчет потока газов ведем без учета изменения газовыделения во времени.

1. Массу изделий находим по формуле

$$m = (\pi d^2 / 4) \cdot h \cdot \rho \cdot i = 11.8 \text{ кг}$$

Коэффициент неравномерности газовыделения берем равным 2 ввиду длительности процесса пайки.

2. Количество газовыделения $Q_{\text{изд}}$, выделяемых газов из 1 кг никеля находим по табл.6, суммируя соответствующие значения по температурам: $Q_{\text{изд}} = 0,214 + 0,244 + 0,0537 + 0,147 + 4 = 4,66 \text{ м}^3 / (\text{Па} \cdot \text{кг})$. В результате $Q_{\text{изд}} = 11,8 \cdot 4,66 / (3600 \cdot 2) = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$. Окончательно после приведения к комнатной температуре (293 К) получим $Q_{\text{изд}} = 1,45 \cdot 10^{-2} \cdot 293 / 27 \sim 1,55 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$.

При сварке плавлением в вакууме следует определять количество газов, выделяющихся из массы расплавленного металла в сварном шве. В зоне термического воздействия поток газовыделения можно не учитывать. В этом случае поток газов зависит от газосо-

держания, степени дегазации и скорости сварки. Значения газосодержания в различных металлах, приведенные к давлению 1 Па составляют : для стали 10...100, для титана 17...25, для циркония 16...17, для молибдена 20...25, для ниобия 25...75 м³·Па/кг [5].

Таблица.6. Удельное газовыделение $q_{\text{газ}}$ (м³·Па/кг),
металлов при различной температуре [4]

Металл	Температура, К	Общее количество	Водород	Азот	Оксид углерода
Медь	673	0,0422	0,0223	0,00107	0,0189
	873	0,0103	–	–	–
	1073	0,0304	–	–	–
	1123	0,0324	–	–	–
	1173	0,0369	0,00604	0,00135	0,0296
Нержавеющая сталь	673	0,037	–	–	–
	873	0,235	0,216	0,00388	0,0154
	1073	0,0856	0,055	0,00394	0,0267
	1273	0,449	0,181	0,00513	0,236
	1373	2,12	0,367	0,0196	1,74
Малоуглеродистая сталь	673	0,000887	–	–	–
	873	0,0127	–	–	–
	1073	0,178	0,0204	0,0636	0,094
	1173	0,115	0,0296	0,0134	0,072
	1273	0,216	0,037	0,0365	0,142
Никель	673	0,214	0,107	0,0859	0,0966
	873	0,244	–	–	–
	1073	0,0537	0,0032	0,0032	0,0473
	1273	0,147	0,0516	0,0537	0,0905
	1473	7,75	–	0,0538	7,7
Молибден	673	0,071	–	0,025	0,046
	873	0,0425	–	–	–
	1073	0,026	0,00877	0,0016	0,0156
	1373	0,20	0,0526	0,0163	0,133
	1573	0,44	0,151	0,0447	0,246
	1673	0,268	0,0888	0,038	0,142
	1773	0,305	0,157	0,014	0,134
<i>Примечание.</i> Удельное газовыделение указано для интервалов температур. Например, для меди при нагревании от 293 до 673 К выделится 0,0422 м ³ ·Па/кг, а при нагревании от 673 до 873 К выделится дополнительно 0,0103 м ³ ·Па/кг.					

Данные исследований показывают, что уменьшение содержания газов в металле шва по сравнению с исходным достигает примерно 50%. Поток газовыделения при сварке определяют по формуле

$$Q = n_0 \cdot \varpi \cdot \rho \cdot F \cdot v, \quad (3.6)$$

где n_0 – степень обезгаживания; ϖ – газосодержание перед сваркой в металле приведенное к 1 Па; F – площадь поперечного сечения сварного шва; v – скорость сварки.

Пример. Определить поток газов, поступающий в вакуумную камеру при сварке плавлением.

Исходные данные. Поперечное сечение сварного шва из никеля $F = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, скорость сварки $v = 36 \text{ м/ч}$, газосодержание никеля $\omega = 30 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

В результате получаем

$$Q = 0,5 \cdot 30 \cdot 8900 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 36 / (3600 \cdot 100) = 0,066 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

Поток газов Q_{Γ} , выделяющийся из стенок вакуумной системы определяются по формуле

$$Q_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot P, \quad (3.7)$$

где q_i - скорость удельного газовыделения i -го материала, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$; P - площадь поверхности i -го материала, м^2 ; n - число материалов, обращенных в вакуум.

При проектном расчете поток газа Q_{Γ} с поверхностей вакуумной системы принимают постоянным во времени. Для определения Q_{Γ} , выделяющегося из материала, используют значения $q_{\text{газ}}$ после 1 ч откачки (табл.7). При сварке и пайке с локальным нагревом время откачки, как правило, не превышает 5...15 мин. Поэтому в процессе проведения сварочной операции на действующих установках при существующих методах ручной чистки камеры значения потока газоразделения с внутренней поверхности примерно в 10-20 раз превышают расчетные. Так, если расчетные значения $q = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, то в действительности удельный поток газоразделения принимаем $q = (2,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$. При $P = 2 \text{ м}^2$, $Q_{\Gamma} = 2 \times 0,0025 = 0,005 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Натекающий в вакуумную камеру поток газа определяется по формуле [4, 6]

$$Q_n = k_B \cdot n \cdot Q_m, \quad (3.8)$$

где k_B - вероятность существования течи, которую нельзя определить с помощью течеискателя, $k_B = 0,1-0,3$; n - число соединений; Q_m - наименьший поток, регистрируемый течеискателем. Испытывается, как правило, вся вакуумная система установки. Для течеискателя типа ПТИ $Q_m = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Для сварочных установок $k_B = 0,3$. Число разъемных соединений в установке достигает 10...15, поэтому $Q_n \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. При эксплуатации установки

герметичность уплотнений со временем ухудшается, однако натека-
ние не должно превышать значений, рекомендуемых в табл.5.

Таблица 7. Удельное газовыделение с поверхности
металлов при $T=293\text{ К}$ /3,5/

Металл	Предварительная обработка металлов	Удельный поток газа, десорбиру- ющегося с поверх- ности, $\text{м}^3\cdot\text{Па}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$	Длительность откачки
Малоугле- родистая сталь	-	$4,12\cdot 10^{-4}$ $7,35\cdot 10^{-5}$	1 6
	После отжига в ва- кууме при $T=693\text{ К}$	$4\cdot 10^{-10}$ $1,2\cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени
Нержавею- щая сталь	Необработанная	$2\cdot 10^{-4}$ $1,97\cdot 10^{-5}$	1 6
	После отжига в ва- кууме при $T=693\text{ К}$	$4\cdot 10^{-10}$ $1,2\cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени
Медь	Необработанная	$1,95\cdot 10^{-4}$	1
	После отжига	$1\cdot 10^{-6} - 9\cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени
Никель	Необработанный	$(6,5-8)\cdot 10^{-6}$	2
Молибден	Необработанный	$(4,6-6)\cdot 10^{-6}$	2

3.5. Вакуумные рабочие камеры

В зависимости от особенностей сварочного процесса вакуумные камеры разделяются на низковакуумные ($p_{\text{раб}} = 1...100\text{ Па}$) и высоковакуумные ($p_{\text{раб}} = 1\cdot 10^{-3}...1\cdot 10^{-1}\text{ Па}$). По степени специализации различают два типа камер: универсальные (общего назначения) и специализированные. Камеры общего назначения предназначены для осуществления сварочных операций изделий разнообразной формы и габаритных размеров в пределах рабочего пространства камеры. Такие камеры используют, как правило, в единичном и мелкосерийном производстве. Специализированные камеры неразрывно связаны с конструкцией и габаритами конкретного изделия (или группы изделий).

Корпус камеры имеет загрузочные люки, смотровые иллюминаторы, патрубки и фланцы для размещения в них подвижных и неподвижных вакуумных вводов, датчиков для измерения давления, электрических вводов, натекателей и т.д. К камерам сварочных установок предъявляют ряд требований, часто противоречивых. Объем камеры должен быть достаточным для размещения изделия (или группы изделий) и механизмов для его технологического перемещения и,

вместе с тем, минимальным, чтобы сократить время откачки и повысить производительность оборудования.

Конструкция камеры должна обеспечивать удобный доступ в рабочую зону для загрузки, выгрузки и обслуживания и при этом должна иметь минимальное число разъемов с вакуумными уплотнителями и открывающихся крышек, так как они являются наиболее вероятными зонами натекаания атмосферного воздуха. Камеры должны иметь минимальную металлоемкость и быть технологичными в изготовлении. В то же время необходимо обеспечить механическую прочность и жесткость всех элементов во избежание разгерметизации уплотнений, перекоса направляющих и смещений механизмов, закрепленных на стенках камеры. Поэтому для уменьшения влияния даже небольших деформаций, возникающих в элементах камеры, на работу механизмов используют различные конструкторские приемы: механизмы размещают на общей базе, вводят в конструкции различные компенсаторы перекосов и зазоров в зацеплениях и др.[7].

В современных установках преимущественно применяют прямоугольные камеры. Это связано прежде всего с их универсальностью. В таких камерах наиболее эффективно используют подвижные сварочные инструменты, сменные манипуляторы и т.д. Камеры цилиндрической формы применяются реже, так как они менее универсальны и хуже приспособлены к работе с перемещающимися внутри камеры инструментами и манипуляторами [7]. Для получения безмасляного и сверхвысокого вакуума камеры необходимо нагревать, что усложняет их конструкцию. Различают два типа камер: непрогреваемые и прогреваемые. Вакуумные камеры для сварочных процессов, как правило, непрогреваемые. Для предотвращения перегрева камер от технологического источника энергии их делают водоохлаждаемыми.

К материалам, используемым для изготовления вакуумных камер сварочных установок, предъявляют следующие требования: высокая вакуумная плотность; низкое газовыделение с поверхности как при нормальной, так и при повышенной температуре; высокая технологичность, особенно свариваемость; коррозионная стойкость. Кроме того, при использовании индукционного, электроконтактного, дугового, электронно-лучевого источников нагрева корпус камеры целесообразно изготавливать из немагнитного металла.

Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют коррозионно-стойкие аустенитные стали типа 12Х18Н10Т. Из этих сталей изготавливают корпуса камер, загрузочные люки и водоохлаждаемые рубашки. Разъемные соединения уплотняют с помощью прокладок

из вакуумной резины [6]. Для подвода электрической энергии внутрь камеры и коммутации измерительных цепей используют электрические вводы. Они должны быть герметично присоединены к камере и электроизолированы от нее.

Электрические вводы подразделяют на три основные группы: низковольтные низкочастотные (напряжение до 250 В, частота до 1500 Гц); высоковольтные (напряжение свыше 250 В) низкочастотные; высоковольтные высокочастотные [6,8]. В свою очередь, низковольтные вводы делятся на слаботочные и силовоточные, последние предназначены для пропускания тока свыше 100 А.

Определение толщины стенок элементов камеры. Для большинства камер сварочных установок, за исключением установок для диффузионной сварки [9], основным видом механических нагрузок являются силы от воздействия атмосферного давления. Следовательно, корпус камеры можно рассчитывать на равномерно распределенную внешнюю нагрузку 0,1 МПа. Такие, казалось бы, незначительные нагрузки позволяют изготавливать камеру из сравнительно тонкостенных материалов. Однако высокие требования к жесткости конструкции камеры и специфические условия, например необходимость в должной биологической защите при электронно-лучевой сварке, обуславливают выбор толщины стенки в 2-3 раза больше, чем из условий механической прочности и устойчивости [2,7].

При расчете вакуумных камер на прочность определяют толщину стенок камер с использованием теории тонкостенных оболочек. К числу тонкостенных относят оболочки, для которых справедливо условие $\delta/D_B < 0,04$, где D_B – внутренний диаметр оболочки. Оболочковые конструкции следует обязательно проверять на устойчивость [10,11].

Расчет прямоугольных камер сводится к расчету плоской прямоугольной стенки с защемленными по периметру краями, нагруженной равномерным внешним давлением. Стенки считают закрепленными по краям при наличии на них фланцев и укрепляющих ребер, а также при сопряжении стенок под углом. Расчетную толщину плоской прямоугольной стенки δ с закрепленными краями определяют по эмпирической зависимости

$$\delta = 0,25 \cdot b / \sqrt{[\sigma]}, \quad (3.9)$$

где b – ширина прямоугольной стенки, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение при изгибе, МПа. Для стали типа 12X18H10T $[\sigma] =$

150...170 МПа. Крупногабаритные прямоугольные камеры снабжаются ребрами жесткости, располагающимися по наружной стороне стенки. Предпочтительны поперечные ребра, параллельные меньшей стороне. Если плоская прямоугольная стенка укреплена ребрами, то при определении ее толщины в зависимость (3.9) подставляют меньшее значение расстояния между осями укрепляющих ребер. Коробчатые камеры изготавливают, как правило, полностью сварными.

Расчет цилиндрических обечаек. Расчетную толщину цилиндрической обечайки δ определяется исходя из устойчивости обечайки по формуле:

$$\delta = 1,25D \left(\frac{P_H}{E} \cdot \frac{l}{D} \right)^{0,4}, \quad (3.10)$$

где D – диаметр обечайки (цилиндрической), м; P_H – наружное давление камеры (0,1 МПа); E – модуль упругости металла, МПа; l – длина обечайки, м.

Днища – составные конструктивные элементы вакуумных камер, которые ограничивают корпус снизу, сверху или сбоку и неразрывно соединены с обечайкой. Форма днища определяется формой сопрягаемой с ним обечайки и технологическими требованиями, предъявляемыми к камере. Днища могут быть эллиптическими, полушаровыми, сферическими, плоскими (круглыми или прямоугольными). Толщина днища должна быть не менее толщины стенки обечайки. Рекомендации по конструированию камер подробно изложены в [6,10].

3.6. Режимы течения газа и проводимость элементов вакуумной системы

Стационарный газовый поток, проникающий через элементы вакуумной системы, возникает вследствие существующей в них разности давлений и рассчитывается по формуле:

$$Q = U(p_1 - p_2), \quad (3.11)$$

где U – проводимость элемента вакуумной системы; p_1 и p_2 – давление в начале и в конце этого элемента соответственно. Проводимость элемента численно равна количеству газа, протекающего через элемент в единицу времени, при разности давлений на кон-

цах элемента, равной единице. Если поток измеряется в $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$, то проводимость выразится, соответственно, в $\text{м}^3 / \text{с}$.

Сопротивление элемента – это величина, обратная проводимости $R=1/U$. По аналогии с электрическими цепями в вакуумной технике при приближенном рассмотрении процессов течения газа считают, что проводимость элемента не зависит от его расположения среди других элементов. Тогда для ряда параллельно соединенных элементов с проводимостью U_i можно определить общую проводимость:

$$U_0 = \sum_{i=1}^N U_i, \quad (3.12)$$

где N – общее число элементов.

Для ряда последовательно соединенных элементов получим общую проводимость

$$U_0 = 1 / \left(\sum_{i=1}^N 1/U_i \right). \quad (3.13)$$

Проводимость элемента вакуумной системы при низком вакууме с повышением давления увеличивается, а при высоком вакууме остается практически неизменной. Обусловлено это тем, что в низком вакууме основную роль играет вязкостный режим течения газа. В этом случае характер распределения скорости в поперечном сечении определяется силами внутреннего трения [3, 8].

При высоком вакууме силы внутреннего трения в газах близки к нулевому значению и существует так называемый молекулярный режим течения газа, для которого характерно независимое перемещение отдельных молекул.

В среднем вакууме на течении газа одновременно сказывается влияние внутреннего трения и молекулярного переноса. Существующий при этом переходной режим течения называют молекулярно-вязкостным.

В каждом режиме для любого из элементов вакуумных систем может получена своя зависимость проводимости от давления, температуры и характерных размеров элемента. В табл.8. приведены режимы течения газа по элементам в зависимости от критерия Кнудсена. Для воздуха при нормальной температуре длина свободного пути молекулы $L = 6,2 \cdot 10^{-3} / (p_B \cdot d_{эф})$, где p_B – давление воздуха.

Таблица 8. Режимы течения газа [3]

Режимы течения газа	Границы значений	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	атмосферное давление	$Kn < 5 \cdot 10^{-3}$
Молекулярно- вязкостный	$Kn > 5 \cdot 10^{-3}$	$Kn < 1,5$
Молекулярный	$Kn > 1,5$	$Kn \rightarrow \infty$

Проводимость отверстия. Под отверстием будем понимать трубопровод длиной значительно меньше диаметра ($l \leq 0,01d$), расположенный в стенке, разделяющей два объема.

При вязкостном режиме течения газа уменьшение отношения давлений с обеих сторон отверстия $r = p_2/p_1 \leq 1$ приводит к тому, что количество газа, протекающего через диафрагму, и скорость потока в области p_2 увеличивается до тех пор, пока отношение p_2/p_1 не достигнет критического значения, соответствующего скорости звука. Если процесс истечения адиабатический, то критическое отношение

$$r_k = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma / \gamma - 1} \quad (3.14)$$

для воздуха $\gamma = 1,4$, поэтому $r_k = 0,528$, для одноатомного газа, например аргона $\gamma = 1,67$, $r_k = 0,437$.

Дальнейшее уменьшение отношения давлений не изменяет количества протекающего газа. В области значений отношения p_2/p_1 выше критического проводимость определяется выражением

$$U_{omg} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \Psi \frac{A}{1 - r} \cdot \sqrt{R \cdot \frac{T_1}{M}}, \quad (3.15)$$

где M - молекулярная масса (для воздуха при $T = 293$ К - $M = 29$ кг/кмоль); A - площадь отверстия, m^2 . В результате для воздуха проводимость отверстия

$$U_{omg} = 766 \cdot r^{0,7} \cdot \sqrt{1 - r^{0,3}} \cdot \frac{A}{1 - r} \quad \text{при } 1 \geq r \geq 0,528 \quad (3.16)$$

$$U_{om\phi} = 200 \frac{A}{1-r} \quad \text{при } 0,528 > r \geq 0,1 \quad (3.17)$$

$$U_{OTB} = 200A \quad \text{при } 0,1 > r > 0 \quad (3.18)$$

Так как отношение давлений r заранее не известно, то расчет нужно вести методом последовательных приближений. При проектировочном расчете с большим запасом можно принять в первом приближении, что $U_{OTB} = 200A \text{ м}^3/\text{с}$ и не зависит от r . Тогда для круглых отверстий $U_{OTB} = 160d^2 \text{ м}^3/\text{с}$. В обычных вакуумных системах, работающих в стационарном режиме, чаще всего $r \geq 0,8$. Это соответствует проводимости $U_{OTB} = 830A \text{ м}^3/\text{с}$, что примерно в 4 раза выше, чем результат первого приближения.

Проводимость отверстия в молекулярном режиме рассчитывают по формуле

$$U_M = A \sqrt{R_0 \cdot \frac{T}{2M\pi}} = 36,4 \cdot A \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (3.19)$$

где R_0 - универсальная постоянная $R_0 = 8,314 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$; T - температура, К.

В результате расчета проводимости отверстия для воздуха при комнатной температуре $T = 293 \text{ К}$ из (3.19) получаем

$$U_{OTB} = 116A \quad (3.20)$$

Для круглого отверстия $U_{OTB} = 91d^2 \text{ м}^2/\text{с}$.

Для молекулярно-вязкостного режима течения можно пользоваться приближенной формулой

$$U_{OTB} = U_{O.M} \cdot b + U_{O.B} \quad (3.21)$$

$$\text{где } b = (1 + 2,5d/2\lambda) / (1 + 3,1d/2\lambda) \quad (3.22)$$

Для воздуха при комнатной температуре согласно (3.21) имеем

$$U_{O.MB} = 116A \cdot b + U_{O.B}, \quad (3.23)$$

для приближенных расчетов можно принять $b = 0,9$

Проводимость трубопровода с круглым поперечным сечением. Поток газа Q , протекающий через трубопровод, найдем как произведение объемного расхода dV/dt и среднего давления в трубопроводе:

$$Q = dV/dt \cdot ((p_2 + p_1)/2) \quad (3.24)$$

Проводимость круглого трубопровода при вязкостном режиме течения газа:

$$U_{т.в} = \frac{\pi \cdot d^4 (p_1 + p_2)}{32 (8\eta \cdot l)} \quad (3.25)$$

где η – динамическая вязкость газа, Па/с. Для воздуха при $T=293$ К; $\eta=1,82 \cdot 10^{-5}$ Па/с. Выражение (3.25) можно преобразовать к виду

$$U_{т.в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4 (p_1 + p_2)}{2l} \quad (3.26)$$

При молекулярном режиме течения проводимость для круглого трубопровода определяем:

$$U_{тм} = 38 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (3.27)$$

$$\text{Для воздуха при } T=293 \text{ К } U_{тм}=121d^3/l \quad (3.28)$$

В области среднего вакуума при молекулярно-вязкостном режиме течения газа проводимость можно рассчитывать по формуле (3.21) при $b=0,9$.

Проводимость короткого трубопровода ($l < 20d$). Для вязкостного режима проводимость может быть определена по формуле:

$$U_{к\text{ в}} = \frac{\pi \cdot d^4 (p_1 + p_2)}{256\eta \cdot l \cdot [1 + 0,143MQ / \pi \cdot \eta RTl]} \quad (3.29)$$

Для воздуха при $T=293$ К

$$U_{к\text{ в}} = 684 [d^4 (p_1 + p_2) / [l (1 + 2,88 \cdot 10^{-2} Q / l)]] \quad (3.30)$$

Проводимость короткого трубопровода для молекулярного режима может быть определена как:

$$U_{к\text{ тм}} = 36,4 \cdot k_l \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (3.31)$$

где k_l – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения l/d [4,6]. Для воздуха при $T=293$ К

$$U_{к\text{ тм}} = 116 k_l \cdot A \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.32)$$

Проводимость короткого трубопровода для молекулярно-вязкостного режима рассчитывают аналогично соответствующей проводимости длинного трубопровода. Для приближенного расчета про-

водимости для любого режима короткий трубопровод можно представить состоящим из двух последовательно соединенных элементов: отверстия (с диаметром, равным диаметру короткого трубопровода) и "длинного" трубопровода (длина и диаметр которого равны длине и диаметру короткого трубопровода). Тогда U_{KT} находят по выражению

$$1/U_{KT} = 1/U_O + 1/U_{дт} \quad (3.33)$$

где U_O и $U_{дт}$ определяется по формулам, соответствующим режимам течения.

Проводимость вентиля. Для вязкостного режима проводимость вентиля принимают равной проводимости трубопровода, имеющего такой же диаметр, как диаметр вентиля, но длину, превышающую длину вентиля в 2-3 раза (т.е. вентиль заменяют эквивалентным по сопротивлению коротким трубопроводом). Для молекулярного режима проводимость вентиля принимают равной 0,06...0,15 проводимости отверстия, имеющего такой же диаметр, как вентиль. Для промежуточного давления p_i - проводимость вентиля можно определить по выражению:

$$U_{м.вент.} = U_{м.вент.} + \frac{U_{в.вент.} - U_{м.вент.}}{(p_v - p_m)} \cdot (p_i + p_m) \quad (3.34)$$

где $U_{м.вент.}$ и $U_{в.вент.}$ - соответствующие проводимости вентиля, определенные для молекулярного и вязкостного режимов; p_v и p_m - верхняя и нижняя границы давления, соответствующего молекулярно-вязкостному режиму.

Учет сопротивления изгибов трубопровода. Для молекулярного режима при расчете проводимости трубопровода, имеющего изгибы, вводится понятие эффективной длины трубопровода:

$$l_{эф} = l_{геом} + 1,33d \cdot n \quad (3.35)$$

где $l_{геом}$ - геометрическая длина (по оси); n - число изгибов трубопроводов на 90°. Для вязкостного режима проводимость изгибов трубопровода в проектировочном расчете не учитывает.

Проводимость вакуумных затворов важна только для молекулярного режима и обычно указана в паспортных данных.

Проводимость элементов вакуумной системы зависит также от вида газа и его температуры. Зависимость проводимости системы от вида используемого газа приведена ниже (в числителе - значения U для вязкостного режима, в знаменателе - для молекулярного).

Газ	Воздух	H ₂	He	Ar	Водяной пар
U	1/1	2,1/3,78	0,98/2,67	0,82/0,85	1,9/1,26

Для учета температуры газа необходимо ввести поправку

$$U_m = U_{293} \cdot \sqrt{T / 293}, \quad (3.36)$$

где U_{293} – проводимость элемента системы при $T=293$ К.

3.7. Выбор насосов и определение их основных параметров

Выбор вакуумных насосов для систем, требующих создания давлений в сварочной камере в диапазоне ниже 1 Па всегда связан с компромиссом и требует учета многих факторов. Так, из-за ограниченности технических средств, позволяющих одинаково эффективно откачивать газ из вакуумной камеры в диапазоне давлений от атмосферного до рабочего $10^5 \dots 1 \cdot 10^{-5}$ Па, системы вакуумирования обычно разделяют на подсистемы, обеспечивающие различную степень вакуума и вступающие в работу последовательно: форвакуумную и высоковакуумную. Каждая из этих систем может включать в себя несколько типов насосов. В форвакуумной системе обычно используют механические масляные насосы (объемно-ротационные), в высоковакуумной системе используют обычно эжекторные, диффузионные и турбомолекулярные насосы [6].

Практически все насосы при проектировании рассчитывают главным образом на скорость откачки воздуха (азота). Часто решающим фактором является откачка паров воды. Особенно важно это при сварочных процессах, требующих частой откачки до давлений ниже $1 \cdot 10^{-2}$ Па после контакта с воздухом стенок камеры, технологической оснастки и изделий, потому что именно пары воды преимущественно выделяются при дегазации с их поверхностей. Для повышения откачивающей способности паров воды к диффузионным или турбомолекулярным насосам подключают ловушку с жидким азотом или криогенный насос [6, 8].

Основными характеристиками вакуумного насоса являются следующие.

1. Быстрота действия S_H – ($\text{м}^3/\text{с}$), т.е. объем газа V_1 , удаляемого насосом в единицу времени t через входной патрубок при давлении p_1 :

$$S_H = dV_1 / dt \quad (3.37)$$

2. Эффективная быстрота откачки $S_{\text{эф}}$, т.е. объем газа V_2 , поступающего из откачиваемого через выходной патрубок в единицу времени при давлении p_2 :

$$S_{\text{эф}} = dV_2/dt \quad (3.38)$$

3. Коэффициент использования $K_{\text{и}} = S_{\text{эф}}/S_{\text{н}}$. Обычно $K_{\text{и}} = 2$.

4. Поток газа Q ($\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$), проходящий через входное сечение насоса: $Q = p_1 \cdot S_{\text{н}}$.

5. Предельное давление $p_{\text{пр}}$ (Па) – минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта, т.е. “сам на себя”. Быстрота действия насоса при приближении к $p_{\text{пр}}$ стремится к нулю.

6. Наименьшее рабочее давление $p_{\text{нм}}$ (Па) – минимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. Наименьшее рабочее давление в вакуумных сварочных установках должно быть в 50-100 раз выше предельного.

7. Наибольшее рабочее давление $p_{\text{нб}}$ (Па) – максимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

8. Давление запуска $p_{\text{з}}$ (Па) – максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу.

9. Наибольшее выпускное давление $p_{\text{в}}$ (Па) – максимальное давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять откачку.

Параметры вакуумных насосов показаны на (рис.4).

Сопоставление требований к рабочему вакууму в сварочной камере, обеспечиваемому насосами различных типов, дают возможность выбрать наиболее подходящий тип основного насоса

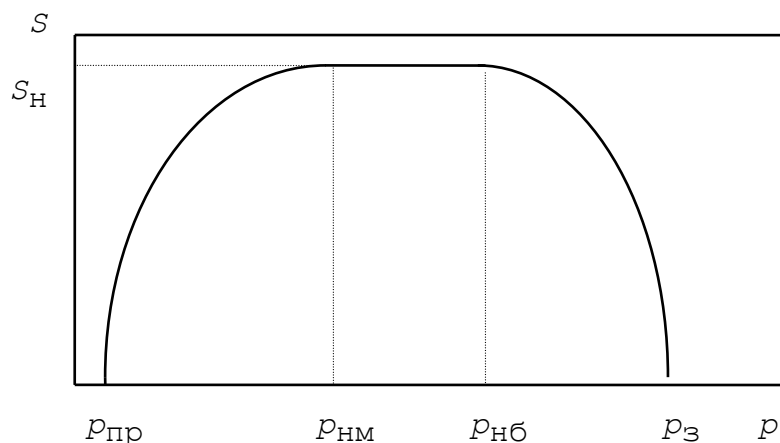


Рис.4. Основная характеристика вакуумного насоса

Если сварочные операции позволяют использовать масляные системы откачки, то в качестве высоковакуумной системы применяют паромасляные агрегаты (табл.П4). Для получения форвакуума используют механические масляные насосы (табл.П1). Наименьшее загрязнение маслом откачиваемого объема обеспечивается при использовании молекулярных и турбомолекулярных насосов. Масло из них может попадать в откачиваемый объем только из полостей подшипниковых узлов.

4. ПРИМЕР ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА ВАКУУМНОЙ СТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Исходные данные для расчета. Универсальная установка для электронно-лучевой сварки предназначена для сварки деталей цилиндрической формы следующих типоразмеров: диаметром от 30 до 300 мм и длиной от 100 до 800 мм. Установка оснащена электронно-лучевой пушкой УП119 с ускоряющим напряжением $U = 30$ кВ и мощностью $P = 15$ кВт, которая расположена в верхней части сварочной камеры. Пушка при сварке перемещается. Материал вакуумной камеры сталь 12Х18Н10Т. Вакуумная камера выполнена в виде куба (рис.5) с габаритными размерами внутри камеры $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м³.

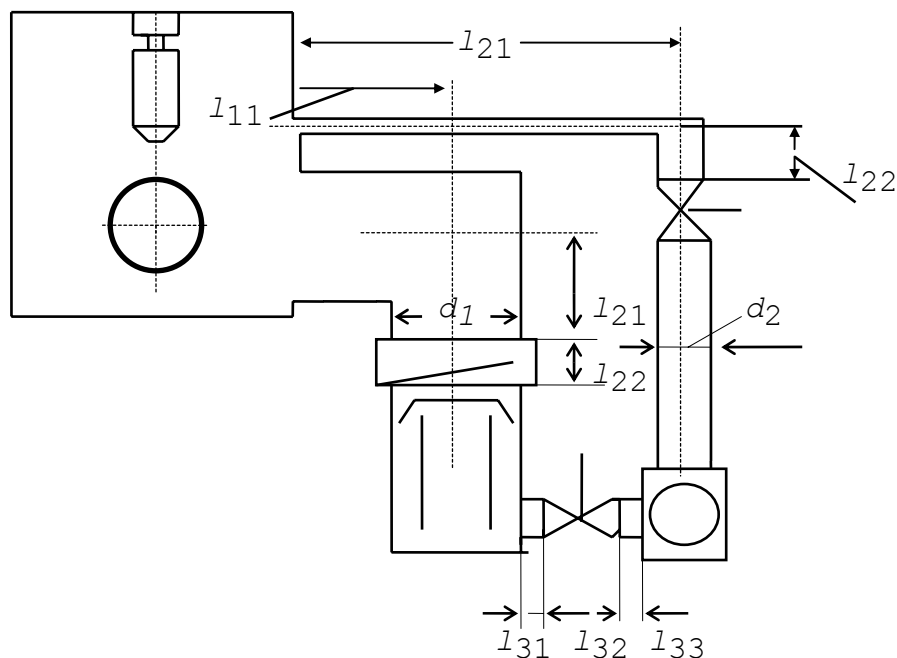


Рис.5. Схема вакуумной системы

Режим сварки: полное рабочее давление остаточных газов во время сварки $p \leq 1 \cdot 10^{-2}$ Па, время достижения заданного давления

$t \leq 10$ мин. Время $t_{\text{пр}}$ предварительного разрежения в камере до давления 12 Па не должно превышать 5 мин.

Размеры (в метрах) трубопроводов и коммутационной аппаратуры следующие, м: $l_{11}=0,3$; $l_{12}=0,3$; $l_{13}=0,05$; $l_{14}=0,1$; $l_{21}=1,0$; $l_{22}=0,2$; $l_{23}=0,12$; $l_{31}=l_{33}=0,1$; $l_{32}=0,12$.

Проектный расчет.

1. Исходя из указанного выше давления остаточных газов в вакуумной рабочей камере, по данным в табл.П4 выбираем в качестве основного насоса диффузионный паромасляный агрегат, в качестве вспомогательного – механический насос (табл.П1,П2).

2. Определяем суммарный газовый поток, поступающий в вакуумную камеру до начала проведения сварки. На этой стадии условно принимаем, что газовый поток не изменяется во времени. Предварительно принимаем, что диаметры трубопроводов $d_1=0,3$ м, $d_2=0,1$ м. Площадь поверхности свариваемых элементов детали из титанового сплава BT22, обращенная в вакуум, составляет примерно $\Pi_{\text{И}}=1,5$ м². Площадь технологической оснастки и электронно-лучевой пушки принимаем равной $\Pi_{\text{П}}=0,6$ м². Площадь внутренней поверхности вакуумной камеры $\Pi_{\text{К}}=6 \times 1 \times 1 = 6$ м². Площадь поверхности трубопровода от камеры до затвора:

$$\Pi_{\text{Тр.1}} = \pi \cdot d_1 (l_{11} + l_{12}) = 3,14 \cdot 0,3 (0,3 + 0,3) \approx 0,56 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности трубопровода от клапана

$$\Pi_{\text{Тр.2}} = \pi \cdot d_2 \cdot (l_{21} + l_{22}) = 3,14 \cdot 0,1 (1,0 + 0,2) \approx 0,37 \text{ м}^2.$$

Определяем величину газового потока по формуле (3.4):

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} &= \Pi_{\text{И}} \cdot q_{\text{Т}} + (\Pi_{\text{К}} + \Pi_{\text{П}}) \cdot q_{\text{КС}} + (\Pi_{\text{Тр.1}} + \Pi_{\text{Тр.2}}) \cdot q_{\text{С}} + Q_{\text{Н}} = \\ &= 1,5 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + (6 + 0,6) \cdot 1 \cdot 10^{-4} + (0,56 + 0,37) \cdot 7 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-3} = \\ &= 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}, \end{aligned}$$

где $q_{\text{Т}}$, $q_{\text{КС}}$, $q_{\text{С}}$ – скорости удельных газовыделений титанового сплава, коррозионно-стойкой стали и конструкционной стали, соответственно. $Q_{\text{Н}}$ – натекание воздуха из-за нарушения герметичности различных вводов и резиновых уплотнений в крышке камеры, иллюминаторах и т.д. При числе разъемов 15

$$Q_{\text{min}} = 0,3 \cdot 15 \cdot 6,7 \cdot 10^{-11} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

На основании исследований и промышленного опыта натекание при сварке титановых сплавов не должно превышать (табл.5) $Q_{\text{Н.мах}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Принимаем $Q_{\text{Н}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Определяем дополнительный газовый поток, возникающий в процессе сварки, по формуле (3.6). При толщине детали 20 мм площадь поперечного сечения стыкового шва $F_{шв} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, скорость сварки $v = 30 \text{ м/ч}$, газосодержание титанового сплава - $0,2 \cdot 10^2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/кг}$. $Q_{шв} = (0,1 \cdot 0,2 \cdot 10^2 \cdot 4,5 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot 30) / 3600 = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Максимальный газовый поток при сварке может достигать

$$Q_{\max} = Q_{\Sigma} + Q_{шв} = 3,3 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 10^{-2} = 0,93 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

Находим эффективную быстроту откачки вакуумной рабочей камеры:

$$S''_{\text{эф}} = Q_{\Sigma \max} / p = 0,93 \cdot 10^{-2} / 1 \cdot 10^{-2} = 0,93 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Определяем номинальную быстроту действия основного насоса

$$S_{\text{н}} = S_{\text{эф}} / k_{\text{и}} = 0,93 / 0,5 = 1,87 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5. В качестве основного насоса выбираем диффузионный паромасляный агрегат модификации АВП-400-1600, имеющий номинальную быстроту действия в диапазоне давлений $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ Па}$, $S_{\text{н}} = 2,15 \text{ м}^3/\text{с}$ (диаметр впускного патрубка $d_{\text{вп}} = 0,25 \text{ м}$, выпускного $d_{\text{вып}} = 0,063 \text{ м}$). Давление запуска $p_{\text{з}} \leq 27 \text{ Па}$. Необходимая быстрота действия вспомогательного насоса $S_{\text{н.всп.}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

6. Выбираем типовую схему вакуумной системы, в которой форвакуумный насос выполняет функции вспомогательного насоса и насоса предварительного разрежения сварочной камеры.

7. Выбираем форвакуумный механический насос золотникового типа НВЗ-75, имеющий номинальную быстроту действия $S_{\text{н.всп.}} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$, обеспечивающий остаточное давление $p_{\text{пр}} = 6,7 \text{ Па}$.

8. Назначаем диаметры вакуумных трубопроводов: $d_1 = 0,25 \text{ м}$, $d_2 = 0,1 \text{ м}$. Выбираем вакуумный затвор, отсекающий камеру от основного насоса, с условным проходным отверстием диаметром $0,25 \text{ м}$ (тип ЗЭПл-250), вакуумные краны с условным отверстием диаметром $0,064 \text{ м}$.

9. Находим предварительно быстроту откачки вакуумной рабочей камеры вспомогательным насосом:

$$S_{\text{эф.всп.}} = S_{\text{н.всп.}} \cdot K_{\text{и.всп.}} = 7,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,7 = 5,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

10. Определим свободный объем вакуумной камеры и трубопроводов, при этом $d_{\text{д}} = 0,1 \text{ м}$, $l_{\text{д}} = 0,3 \text{ м}$, объем приспособления $V_{\text{пр}} = 0,005 \text{ м}^3$, объем пушки - $V_{\text{п}} = 0,002 \text{ м}^3$.

$$\begin{aligned} V &= V_{\text{к}} + V_{\text{тр}} - V_{\text{д}} - V_{\text{пр}} - V_{\text{п}} = 1 + \pi \cdot d^2 (l_{11} + l_{12}) / 4 + \\ &+ \pi \cdot d^2 (l_{21} + l_{22}) / 4 - \pi \cdot d_{\text{д}} \cdot l_{\text{д}} / 4 - V_{\text{пр}} - V_{\text{п}} = \\ &= 1 + 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 0,25 \cdot (0,3 + 0,3 + 0,05 + 0,1) + \\ &+ 3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 0,25 \cdot (1,0 + 0,2) - 3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 0,25 \cdot 0,3 - 0,005 - 0,002 = \end{aligned}$$

$$= 1,0389 \text{ м}^3.$$

11. Находим время предварительного разрежения:

$$t_{\text{пр}} = V \cdot (\ln(p_{\text{нач}}/p_{\text{пр}})) / S_{\text{эф.всп}} =$$

$$= 1,0389 (\ln(1,01 \cdot 10^5 / 12)) / 5,25 \cdot 10^{-2} = 178,8 \text{ с} \approx 3,0 \text{ мин.}$$

Время предварительного разрежения меньше 5 мин. Следовательно, форвакуумный насос выбран достаточной производительности.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Таблица П1. Технические данные золотниковых насосов и агрегатов [6]

ПАРАМЕТР	Т И П				
	НВЗ-75	НВЗ-150	АВЗ-20Д	АВЗ-63Д	АВЗ-90
Быстрота действия в интервале давлений 10^{-5} - $2 \cdot 10^2$ Па, л/с	75	150	20	63	90
Предельное остаточное давление, Па	6,7	6,7	1,1	$6,7 \cdot 10^{-1}$	6,7
Мощность, кВт			2,2	7,5	11
Масса, кг			185	620	600

Таблица П2. Технические данные вакуумных агрегатов на базе двухроторных насосов [6]

Параметр	ТИП	
	АВР-50	АВР-150
Быстрота действия при рабочем давлении 26,6 Па, л/с	50	150
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Мощность, кВт	1,65	3,3
Габаритные размеры, мм	695x450x785	888x540x970
Масса, кг	105	285

Таблица П3. Технические данные бустерных паромасляных насосов [6]

Параметр	ТИП	
	НВБМ-0,5	НВБМ-2,5
Быстрота действия при давлении 1,3 Па, л/с	800	2600
Предельное остаточное		

давление, Па	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Наибольшее выпускное давление, Па	93	200
Мощность, кВт	2	6
Габаритные размеры, мм	515x465x1065	740x590x1710
Масса, кг	67	230

Таблица П4. Технические данные высоковакуумных паромасляных агрегатов [6]

Параметр	Тип		
	АВП-160-250	АВП-250-630	АВП-400-1000
Быстрота действия в интервале давлений $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ Па, л/с	250	700	1800
Предельное остаточное давление, Па с охлаждаемой ловушкой без ловушки	$0,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$
Наибольшее выпускное давление, Па	33	27	27
Мощность, кВт	0,8	2,1	4,2
Габаритные размеры, мм	620x540x750	767x740x1150	1110x930x1440
Масса, кг	65	140	294

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусин Р.А., Анциферов В.Н., Квасницкий В.Ф. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 208
2. Сварка в машиностроении: Справ. В 4-х т./ Редкол.: Николаев Г.А. и др. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.1/ Под ред. Н.А. Ольшевского. 1978.- 504 с.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. для Вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 320 с.
4. Пипко А.И., Плисковский В.Я. Основы вакуумной техники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 336 с.
5. Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
6. Вакуумная техника: Справ./ Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
7. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
8. Конструирование и расчет вакуумных систем/ Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.
9. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: учеб.для вузов / В.А. Бачин, В.Ф. Квасницкий, Д.И. Котельников и др.; Под ред. В.А. Бачина. – М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.
10. Расчет на прочность деталей машин: Справ./ И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Носилович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993 – 640 с.
11. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Технология изготовления. Автоматизация производства и проектирование сварных конструкций: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1983. – 344 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ.....	
1. Вакуум как эффективная защитная среда для сварочных процессов.....	5
2. Параметры, характеризующие рабочую среду в вакуумных установках.....	8
3. Проектирование вакуумных систем сварочных установок.....	10
3.1. Состав вакуумных установок.....	11
3.2. Схемы вакуумных систем.....	11
3.3. Этапы расчета и исходные данные для проектирования.....	14
3.4. Определение газоотделения и натекания.....	16
3.5. Вакуумные рабочие камеры.....	20
3.6. Режимы течения газа и проводимость элементов вакуумной системы.....	23
3.7. Выбор насосов и определение их основных параметров.....	29
4. Пример проектного расчета вакуумной установки для электронно-лучевой сварки.....	31
Приложение.....	34
Список литературы.....	36