

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

Д. В. Балохонов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ

Пособие

для студентов специальности

1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов
электронной техники»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области информатики и радиоэлектроники*

Минск
БНТУ
2018

УДК 66.07(076)=161.1

ББК 35.114я73

Б20

Р е ц е н з е н т ы:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и электроники БГУ *В. Б. Оджаев*;
кандидат технических наук, начальник управления «Микромеханика» ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» *И. А. Таратын*

Балохонов, Д. В.

Б20 Технологические среды : пособие для студентов специальности 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники» / Д. В. Балохонов. – Минск : БНТУ, 2018. – 72 с.
ISBN 978-985-583-049-9.

Пособие содержит теоретические сведения и инструкции, необходимые для выполнения расчетно-практических работ по курсу «Технологические среды»; расчетно-практические работы, посвященные основным технологическим средам для производства интегральных микросхем и материалов для них; теоретические сведения о вакууме, способах его получения и оборудовании для этого; информацию о способах очистки воздуха при производстве полупроводниковых приборов.

Предназначено для студентов специальности 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники».

ISBN 978-985-583-049-9

© Балохонов Д. В., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

Задание № 1. Основные газообразные технологические среды для полупроводникового производства, их основные характеристики и защита от их вредного влияния

Цели работы: ознакомление с основными газообразными технологическими средами для производства полупроводниковых компонентов, их свойствами и особенностями; получение информации о классах опасности технологических сред и способах защиты от вредного воздействия технологических сред; расчет скруббера для очистки газообразных технологических сред.

1.1. Основные газообразные технологические среды

Газообразные технологические среды в производстве полупроводниковых изделий могут выполнять роль газов-предшественников (из них получают кристаллы и пленки полупроводников и диэлектриков), газов-травителей (с их помощью осуществляется газофазное и плазменное травление), газов-диффузантов (они являются источниками легирующих примесей для полупроводников, в том числе при их выращивании) и газов-носителей (они служат для разбавления остальных газов и создания парогазовых смесей с заданной концентрацией).

Основными *газами-предшественниками для кремния* являются следующие.

Силан (SiH_4) – бесцветный, самовоспламеняющийся, токсичный, огнеопасный газ с удушливым отталкивающим запахом. Этот газ тяжелее воздуха.

Трихлорсилан (HSiCl_3) – бесцветная, токсичная, огнеопасная, агрессивная жидкость с давлением 9,67 psia (6.7 kPa) при 21 °С. В газ превращается прямо перед процессом выращивания. Значительно тяжелее воздуха. Используется в основном для эпитаксии.

Дисилан (Si_2H_6) – бесцветный, ядовитый, самовоспламеняющийся, огнеопасный газ с отталкивающим, удушливым запахом. Значительно тяжелее воздуха. Используется в основном для эпитаксии и создания кремнийорганических соединений.

Тетрахлорид кремния (SiCl_4) – бесцветная, высокотоксичная, невоспламеняющаяся жидкость с резким удушливым запахом. В газ

превращается прямо перед процессом выращивания. Значительно тяжелее воздуха.

Основными *газами-травителями в производстве кремния* являются следующие.

Фтористый водород (водный раствор называется плавиковая кислота) – бесцветный газ (жидкость) с резким запахом, при температуре +19,5 °С сжижается, при температуре –83,4 °С затвердевает. По плотности близок к плотности воздуха. Крайне токсичен. На воздухе дымит вследствие образования с парами воды мелких капель раствора кислоты.

Хлористый водород (водный раствор называется соляная кислота) – бесцветный газ с резким запахом, тяжелее воздуха, при температуре –85,1 °С сжижается, при температуре –114,2 °С затвердевает. На воздухе дымит вследствие образования с парами воды капелек тумана. Негорюч, взрывоопасен при нагревании емкостей. Хорошо растворяется в воде, хуже – в органических жидкостях.

Хлор – желто-зеленый, высокотоксичный, ядовитый, коррозионный, окисляющий, сжиженный газ с резким раздражающим запахом.

Следует отметить, что любая реакция осаждения кремния при изменении условий сравнительно легко превращается в реакцию растворения. Кроме указанных соединений, в качестве газов-травителей при газофазном травлении могут использоваться другие галогены (фтор, бром, иод) и их соединения.

Основными *газами-диффузантами* в производстве кремния являются следующие.

Арсин (AsH_3) – при нормальных условиях бесцветный газ тяжелее воздуха. В чистом виде без запаха, при наличии примесей диэтил-арсина пахнет чесноком. Плохо растворяется в воде. Температура затвердевания –113,5 °С, при температуре –62,5 °С (газ сжижается) жидкость кипит. При взаимодействии с воздухом образует взрывоопасные смеси, самовозгорается на воздухе. При нагревании выше 500 °С разлагается на водород и мышьяк.

Фосфин (PH_3) – бесцветный, высоко токсичный, ядовитый, огнеопасный газ с неприятным чесночным запахом. Склонен к спонтанному возгоранию. При высокой температуре разлагается на водород и фосфор. Тяжелее воздуха.

Диборан (B_2H_6) – бесцветный, нестабильный, высоко токсичный, огнеопасный газ с тошнотворным сладким запахом. Легче воздуха. При высокой температуре разлагается на бор и водород.

Кроме того, применяются еще галогеновые соединения указанных элементов, которые при диффузии в среде водорода (или просто при сильном нагреве) разлагаются с выделением нужной примеси.

Основные газы-носители в производстве кремния – азот и водород. Азот хоть и не является огнеопасными и взрывоопасным газом, дыхание не поддерживает и может вызвать удушье. Водород образует с воздухом гремучие смеси, которые могут самопроизвольно воспламениться или сдетонировать.

1.2. Опасность технологических сред. Классы опасности технологических сред

Практически все технологические среды для производства полупроводниковых изделий являются вредными веществами.

В соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 вредное вещество – вещество, которое при контакте с организмом человека в случае нарушения требований безопасности может вызывать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами как в процессе работы, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Типичные повреждения при контакте с технологическими средами – отравления, ожоги внутренних и внешних покровов и слизистых, ослепления. Кроме того, технологические среды, как правило, являются взрывоопасными (иногда – самовоспламеняющимися), что должно учитываться при хранении и использовании.

Для быстрой упрощенной оценки опасности технологических сред пользуются понятием опасности. На территории СНГ применяется градация опасности вредных веществ (ГОСТ 12.1.007-76). Так, по степени воздействия на организм вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности:

- 1-й – вещества чрезвычайно опасные;
- 2-й – вещества высокоопасные;
- 3-й – вещества умеренно опасные;
- 4-й – вещества малоопасные.

Показатели каждого класса приведены в табл. 1.1.

Характеристика классов опасности вредных веществ

Наименование показателя	Норма для класса опасности			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	0,1–1,0	1,1–10,0	Более 10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15–150	151–5000	Более 5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	100–500	501–2500	Более 2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	500–5000	5001–50000	Более 50000

В странах ЕС и США для оценки опасности вредных веществ используется стандарт NFPA 704, по которому объекту присваивается так называемый пожарный ромб, который разделен на четыре области. Цифры и символы, находящиеся в этих областях, показывают опасность вещества. Строение обозначения показано на рис. 1.1.

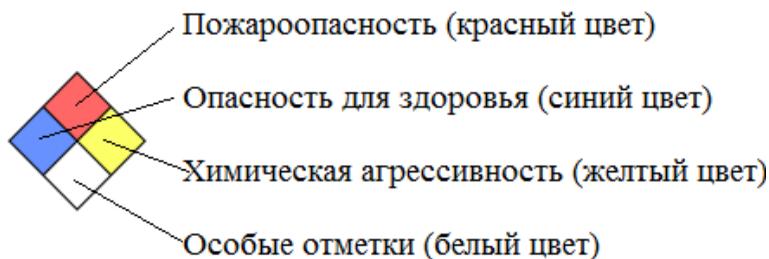


Рис. 1.1. Пожарный ромб в соответствии со стандартом NFPA 704

Пожароопасность обозначается цифрами:

0 – вещество не горит в воздухе при нагреве до 820 °С в течение 5 минут. Пример – песок.

1 – вещества, вспыхивающие при температуре более 93 °С.

2 – вещества, вспыхивающие при температуре от 38 до 93 °С.

3 – вещества, вспыхивающие при температуре от 23 до 38 °С.

Пример – ацетон.

4 – вещества, вспыхивающие при температуре ниже 23 °С.

Опасность для здоровья обозначается цифрами:

0 – неопасно. Пример – дерево.

1 – при контакте причиняет легкие повреждения и раздражение.

Пример – ацетон.

2 – продолжительный (не постоянный) контакт приведет к потере сознания или легким повреждениям.

3 – непродолжительный контакт приводит к повреждениям средней тяжести или тяжелым, но временным повреждениям. Пример – хлор.

4 – даже минимальный контакт приводит к тяжелым повреждениям или смерти. Пример – фторводородная кислота.

Химическая агрессивность обозначается цифрами:

0 – стабильное, неагрессивное в нормальных условиях вещество.

Пример – гелий.

1 – стабильное при нормальных условиях, но при повышении температуры разлагается. Пример – пропилен.

2 – реагирует с водой с выделением газов или формирует взрывоопасные смеси водой или воздухом. Пример – щелочные металлы.

3 – способно к детонации или взрывному разложению, но только при наличии сильного инициатора (удар, нагрев в закрытом объеме и т. п.). Пример – нитрат аммония.

4 – взрывается/детонирует при нормальных условиях после небольшого воздействия или самопроизвольно. Пример – нитроглицерин.

Особые отметки могут обозначать следующее:

OX – вещество – окислитель, способно поддержать горение без доступа воздуха.

W – реагирует с водой опасным способом (выделяет газ, взрывается).

SA – нетоксичный газ, неспособный поддерживать жизнь, газ-асфиксant (гелий, неон, аргон и т. п.).

COR – вещество вызывает сильную коррозию.

BIO – вещество биологически опасно (или вызывает инфекции). Иногда заменяется трилистником биологической угрозы.

POI – вещество ядовито.

RA (или RAD) – вещество радиоактивно.

CYL (или CRYO) – криогенное (сильно охлажденное) вещество (например, жидкий азот).

Для более точной оценки опасности в каждой отрасли промышленности существуют свои стандартные символы.

1.3. Защита от основных газообразных технологических сред и действия в случае их утечки

Силан – класс опасности 2.

При утечке образует горючие и взрывоопасные смеси с воздухом, способные к самовозгоранию. Повреждает дыхательную систему, является раздражителем. При вдыхании вызывает головную боль, головокружение, раздражение слизистых оболочек дыхательной системы.

Меры первой помощи при поражении силаном.

Немедленно вынести пострадавшего на свежий воздух, провести искусственное дыхание (если не дышит). Если дыхание затруднено, дать кислород. Немедленно доставить к врачу. При попадании в глаза обильно промыть водой, следить, чтобы был промыт весь глаз. После промывания доставить к врачу.

Действия персонала при утечке силана.

Использовать автономные индивидуальные дыхательные аппараты. Немедленно эвакуировать всех людей, перекрыть поступление силана. Обильно обработать пораженную территорию аэрозолями или парами воды для осаждения продуктов сгорания силана. Проветрить помещение, выпуская воздух через емкость с 10 %-м раствором гидроксида натрия.

Действия пожарного персонала при возгорании силана.

Использовать автономные индивидуальные дыхательные аппараты и защитную одежду. Эвакуировать людей с территории возгорания. Отключить электрическое оборудование и освещение во избежание самовозгорания. Не использовать галоген-углеродные огнетушители. Залить пораженную территорию водой и ждать, пока вытекший силан выгорит. Продукты сгорания осадить аэрозолями воды. При исчезновении огня до выгорания силана возможны повторные возгорания (силан – самовозгорающийся на воздухе газ).

Для защиты персонала от силана применяются средства защиты кожи (перчатки, боты, прорезиненный комбинезон), средства защиты глаз (защитные очки или маска), средства защиты дыхательной системы (автономное дыхательное оборудование с баллоном или как минимум противохимический противогаз с соответствующей коробкой).

Трихлорсилан – класс опасности 2.

Бесцветная горючая жидкость или пар с раздражающим удушающим запахом. Повреждает глаза, кожу и дыхательную систему.

С воздухом образует взрывоопасные смеси. При контакте с водой (в том числе влажным воздухом) происходит взрывообразная реакция с образованием газа-ирританта.

При вдыхании малая концентрация вызывает раздражение носа, глотки, трахеи, болезненный кашель, насморк и затруднения дыхания. Большая концентрация сильно повреждает дыхательную систему. При кратковременном контакте с кожей возникает зуд, покраснение и небольшой отек. Продолжительный контакт вызывает значительный отек, боль, появление язв и подкожных кровотечений в контактной области. При большой площади контакта возможна смерть. При проглатывании очень токсичен. Вызывает ожог слизистой пищеварительной системы с развитием боли и отека в обожженной области. Также вызывает головокружение, рвоту, сонливость, потерю сознания, кому. Попадание в глаза вызывает покраснение, боль и интенсивное слезоотделение. Может возникнуть ожог слизистой глаз при образовании соляной кислоты, отеки, поражение роговицы, которое приводит к постоянному нарушению зрения. При постоянном несмертельном контакте изменяет цвет зубов и повреждает эмаль, провоцирует кровоточивость десен и язвы слизистой оболочки носоглотки. Может привести к астме, пневмонии и фиброзу легких, а также к обострению дерматитов.

Меры первой помощи при поражении трихлорсиланом.

Немедленно вынести пострадавшего на свежий воздух, при необходимости сделать искусственное дыхание (но осторожно, так как спасатель может получить ожоги) и дать кислород. Немедленно доставить к врачу. При контакте с кожей удалить загрязненную одежду и промыть кожу водой с мылом. Одежду перед повторным использованием постирать. Загрязненную обувь утилизировать. Доставить пострадавшего к врачу. При попадании в пищеварительную систему дать пострадавшему два стакана воды или молока (если пострадавший в сознании), доставить пострадавшего к врачу. Не вызывать рвоту. При бессознательном состоянии немедленно доставить пострадавшего к врачу. При попадании в глаза немедленно и обильно промыть их теплой водой на протяжении как минимум 15 минут. Следить, чтобы промывался весь глаз. Сразу же доставить пострадавшего к врачу, лучше всего окулисту.

Действия персонала при утечке трихлорсилана.

Использовать автономные индивидуальные дыхательные аппараты и защитную одежду. Немедленно эвакуировать всех людей, перекрыть поступление трихлорсилана. Перед входом на зараженную территорию проверить концентрацию трихлорсилана в воздухе. Если это безопасно, убрать все источники возгорания. Осадить пары разбрызгиванием аэрозоля воды. Проветрить помещение, медленно выпуская воздух и не допуская образования ядовитых и взрывоопасных паров. Не использовать источники возгорания, пока не подтверждено отсутствие трихлорсилана в воздухе. Если утечка мала, использовать порошковые противокислотные химикаты.

Отработанный химикат гидролизуют в воде и дезактивируют полученный продукт. Во избежание нанесения вреда окружающей среде не сбрасывать зараженный воздух и отработанную воду без очистки (сначала реакции с водой, потом нейтрализации образовавшейся кислоты)

Действия пожарного персонала при возгорании трихлорсилана.

Использовать автономные дыхательные аппараты, защитную одежду и полный огнеупорный костюм. Сначала обработать поврежденную территорию аэрозолем воды с большого расстояния или применяя пожарные щиты, не допуская погасания огня (чтобы не возникло повторное взрывное возгорание). Удалить источники возгорания. Потушить огонь с помощью воды или пены, осажая агрессивные пары аэрозолем воды. Поддерживать высокую влажность во избежание повторного возгорания и для охлаждения территории. Перекрыть поток трихлорсилана. Проверить содержание трихлорсилана в воздухе.

Для защиты персонала используются полимерные или резиновые перчатки и защитная одежда (во избежание появления искры не допускается касания источников электричества). Для защиты глаз применяют герметичные защитные очки и маску для лица. Для защиты дыхательной системы применяют автономные дыхательные аппараты с баллоном или противохимические противогазы с соответствующей коробкой. Если концентрация трихлорсилана неизвестна, обязательно используют автономный дыхательный аппарат, а не противогаз.

Фтористый водород – класс опасности 1.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) фтористого водорода в воздухе населенных пунктов: среднесуточная $0,005 \text{ мг/м}^3$, максимальная разовая $0,02 \text{ мг/м}^3$, в воздухе рабочей зоны производст-

венных помещений $0,5 \text{ мг/м}^3$, что в 2 раза меньше (ПДК) хлора в воздухе. Порог восприятия запаха фтористого водорода $0,03 \text{ мг/м}^3$, порог раздражающего действия 8 мг/м^3 , при этом появляется кашель и приступы удушья. При концентрации 50 мг/м^3 возникает раздражение слизистых оболочек, слезо-слюнотечение, насморк, иногда рвота. Очень высокие концентрации в 1500 мг/м^3 приводят к спазмам дыхательных органов, и при воздействии в течение 5 минут наступает смерть. Максимально допустимая концентрация при применении промышленных и гражданских противогазов составляет 2000 мг/м^3 .

Меры первой помощи при поражении фтористым водородом.

В зараженной зоне: обильное промывание водой глаз и лица, наделение противогаза, срочный вывод (вывоз) из очага.

После эвакуации из зараженной зоны: согревание, покой, обильное промывание глаз водой, обработка пораженных участков кожи водой, мыльным раствором, при затруднении дыхания тепло на область шеи, немедленная эвакуация в лечебное учреждение. Ингаляции кислорода не проводить.

Действия персонала при утечке фтористого водорода.

Изолировать опасную зону, удалить из нее людей, держаться с наветренной стороны. Применять средства защиты, приведенные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Средства защиты при утечке фтористого водорода

Средства защиты		Время защитного действия (час)			
		при концентрациях (мг/м^3)			
Наименование	Марка коробки	2,5	7,5	50	500
Промышленные противогазы большого габарита	А, В, БКФ	50	25	12	2,5
Промышленные противогазы малого габарита	А, В, МКФ	30	15	2,5	0,16
Гражданские противогазы: ГП-5, ГП-7, ПДФ-2Д (2Ш)	с ДПГ-3	20	10	1,6	0,16

Действия пожарного персонала при утечке фтористого водорода.

Непосредственно на месте аварии и в зонах заражения с высокими концентрациями на расстоянии до 500 м от места разлива работы проводят в изолирующих противогазах ИП-4М, ИП-5 (на хими-

чески связанном кислороде) или дыхательных аппаратах АСВ-2, ДАСВ (на сжатом воздухе), КИП-8, КИП-9 (на сжатом кислороде) и средствах защиты кожи (Л-1, ОЗК, КИХ-4, КИХ-5).

На расстоянии более 500 м от очага, где концентрация резко понижается, средства защиты кожи можно не использовать, а для защиты органов дыхания используют промышленные противогазы с коробками марок А, В, БКФ, МКФ, а также гражданские противогазы ГП-5, ГП-7, ПДФ-2Д, ПДФ-2Ш в комплекте с дополнительным патроном ДПП-3.

Нейтрализуют фтористый водород следующими растворами:

аммиачной водой – 10 %-м водным раствором аммиака (например, 100 литров жидкого аммиака + 900 литров воды);

10 %-м водным раствором гашеной извести (100 кг гашеной извести + 900 литров воды);

известковым молоком, для чего одну весовую часть гашеной извести заливают тремя частями воды, тщательно перемешивают, затем сверху сливают известковый раствор (например, 100 кг гашеной извести + 300 литров воды);

10 %-м водным раствором кальцинированной соды, для чего 1 весовую часть кальцинированной соды растворяют и перемешивают с 9 частями воды (например, 100 кг кальцинированной соды + 900 литров воды).

При утечке газообразного (при температуре выше +19,5 °С) фтористого водорода для погашения паров распыляют воду. При разливе жидкого фтористого водорода место разлива ограждают земляным валом (кроме песка), заливают известковым молоком, аммиачной водой, раствором гашеной извести, кальцинированной соды либо водой. Для обезвреживания 1 тонны жидкого фтористого водорода необходимо 35–40 тонн воды. Для нейтрализации 1 тонны жидкого фтористого водорода необходимо 20 тонн растворов. Для распыления воды или растворов применяют поливомоечные и пожарные машины, авторазливочные станции (АЦ, ПМ-130, АРС-14, АРС-15), а также имеющиеся на химически опасных объектах гидранты и спецсистемы.

Арсин – класс опасности 2.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны производственных помещений 0,1 мг/м³, в почве – 2 мг/м³. Оказывает общетоксическое действие на организм. Вызывает гемо-

лиз эритроцитов и образование метгемоглобина, поражение нервной системы и выделительных органов. При контакте с мышьяковистым водородом симптомы отсутствуют. Отравление развивается через 8–30 ч после вдыхания.

Признаки поражения: слабость, головокружение, головные боли, боль под ложечкой, стеснение дыхания, иногда синюха, тошнота, рвота, развитие желтухи.

При острых отравлениях: ясное сознание, зуд, носовые кровотечения, сухость во рту и горле, жажда, поражение печени, почек, селезенки, кровоизлияние в различных частях тела, учащение пульса и дыхания, понижение кровяного давления и температуры, отек легких, судороги; полная задержка мочеотделения со смертельным исходом.

Пороговая токсодоза 0,2 мг·мин/л. Максимально допустимая концентрация при использовании общевоисковых противогазов 10000 мг/м³.

Арсин перевозят в сжиженном состоянии в контейнерах, железнодорожных цистернах, баллонах, которые являются временным его хранилищем. Обычно арсин хранят в наземных горизонтальных цилиндрических (объемом 10–250 м³) резервуарах под давлением собственных паров 6–18 кгс/см² или в наземных вертикальных цилиндрических резервуарах (объемом 50–5000 м³) при атмосферном давлении и температуре окружающей среды.

Меры первой помощи при поражении арсином.

В зараженной зоне надеть на пострадавшего противогаз или ватно-марлевую повязку, смоченную водой, эвакуировать пострадавшего из зоны заражения. После эвакуации из зараженной зоны обеспечить покой, тепло; ввести подкожно или внутримышечно 1 мл 40 %-го масляного раствора меркаптида, 5 мл 5 %-го раствора унитиола и немедленно доставить в лечебное учреждение.

Действия персонала при утечке арсина.

Изолировать опасную зону в радиусе не менее 400 м, удалить из нее людей, держаться наветренной стороны, избегать низких мест, соблюдать меры пожарной безопасности, не курить. В опасную зону входить в изолирующих противогазах или дыхательных аппаратах (ИП-4М, ИП-5, ИП-6, КИП-8, АИР-324, АИР-317, АСВ-2) и средствах защиты кожи (костюм Л-1, ОЗК, КИХ-4, КИХ-5, «КАИС»). На удалении от источника химического заражения более 400 м средства защиты кожи можно не использовать, а для защиты органов

дыхания используют фильтрующие общевойсковые противогазы ПМГ, ПМК, промышленные противогазы большого габарита с коробками марки Е, БКФ, гражданские и детские противогазы ГП-5, ГП-7, ПДФ-2Д, ПДФ-2Ш с дополнительными патронами ДПГ-3, ДПГ-1.

Действия пожарного персонала при утечке арсина.

Использовать автономные дыхательные аппараты и защитную одежду. При разливе жидкого мышьяковистого водорода место разлива засыпают активным углем или углем-катализатором, обрабатывают дегазирующим раствором № 2-ащ (2-бщ) или 10 %-м водным раствором щелочи. Используют следующие нейтрализующие средства:

для нейтрализации жидкого арсина: 10 %-й водный раствор щелочи (например, 100 кг едкого натра и 900 л воды) с нормой расхода 15 тонн раствора на 1 тонну арсина;

для нейтрализации газообразного арсина: сжигание керосина с нормой расхода 1–2 тонны керосина на 1 тонну мышьяковистого водорода. При пожаре тушить распыленной водой, воздушно-механической пеной. Могут происходить спонтанные взрывные возгорания.

Для распыления воды и растворов применяют поливомоечные и пожарные машины, авторазливочные станции (ПМ-130, АЦ, АРС-14, АРС-15), мотопомпы (МП-800), а также имеющиеся на химически опасных объектах гидранты и спецсистемы.

Для утилизации загрязненного грунта на месте разлива срезают поверхностный слой грунта на глубину загрязнения, собирают и вывозят на утилизацию с помощью землеройно-транспортных машин (бульдозеров, скреперов, автогрейдеров, самосвалов). Места срезов засыпают свежим слоем грунта, промывают водой в контрольных целях.

Фосфин – класс опасности 1.

Ядовит, горюч, может быть в виде жидкости или газа. При нормальных условиях – газ без цвета с запахом гниющей рыбы. Может сформировать взрывоопасные смеси с воздухом. Вызывает смерть при вдыхании. Повреждает легкие, почки, печень, нервную систему. Симптомы отравления проявляются не сразу (срок до 48 ч).

При вдыхании вызывает раздражение дыхательной системы, боль в груди, трудность дыхания, утомление, боль в голове, боль в желудке, головокружение, рвоту, конвульсии и потерю сознания. При контакте с кожей в жидком виде вызывает обморожение. При проглатывании и попадании в глаза вызывает обморожение. При постоянном несмертельном контакте вызывает анемию, бронхиты и

болезни желудочно-кишечного тракта. Может вызывать аритмии, астму и фиброз легких.

Меры первой помощи при поражении фосфином.

При малейшем подозрении контакта вынести пострадавшего на свежий воздух, если необходимо – сделать искусственное дыхание. Дать пострадавшему кислород, поместить под врачебное наблюдение, даже если никаких симптомов нет. При контакте с кожей не вдыхать пар, промыть пораженное место водой комнатной температуры. Если задета одежда, то поместить пострадавшего под душ и снять с него одежду под душем. Доставить пострадавшего к врачу. При попадании в глаза промыть большим количеством воды и доставить пострадавшего к врачу.

Действия персонала при утечке фосфина.

Немедленно эвакуировать всех людей с пораженной территории. Использовать автономные дыхательные аппараты и защитную одежду. Постоянно контролировать содержание фосфина в воздухе. Ликвидировать все источники возгорания, так как фосфин формирует взрывоопасные смеси с воздухом. Проветрить предварительно территорию, покрыв разлив абсорбентом или залив водой и не допуская утечек.

Действия пожарного персонала при утечке фосфина.

Потушить пламя, используя углекислый газ, порошковые средства, пену или водяной аэрозоль. Обязательно использовать автономные дыхательные аппараты и защитную одежду – пожарный огнеупорный костюм. Охладить источники фосфина водяным аэрозолем или распыленной водой с большого расстояния. Ядовитые пары осадить водяным аэрозолем. Следить за возможными спонтанными возгораниями. Перекрыть поступление фосфина. Если он в баллонах, поддерживать их низкую температуру во избежание взрыва при повышении давления.

Для защиты кожи применяют перчатки и высокие боты. Для защиты глаз и лица используют герметичные защитные очки и маску, для защиты дыхательной системы – полностью автономный дыхательный аппарат с избыточным давлением, маска которого должна закрывать все лицо.

Диборан – класс опасности 1.

Ядовитый, горючий газ с отталкивающим сладким запахом. При вдыхании может вызвать смерть, особенно при недостатке кислоро-

да. Повреждает дыхательную систему, вызывает головную боль, головокружение, кашель, сжимающее ощущение в груди, озноб, лихорадку и слабость. Вызывает помутнение зрения, судороги и болезненные спазмы мышц. Может вызывать повреждение печени, почек и нервной системы. При попадании на кожу приводит к зуду, покраснению, отекам. При попадании в глаза вызывает покраснение и отек конъюнктивы. При постоянном несмертельном контакте появляются хронические респираторные заболевания и обостряются болезни кожи.

Меры первой помощи при поражении дибораном.

При малейшем подозрении контакта вынести пострадавшего на свежий воздух, если необходимо, сделать искусственное дыхание. Дать пострадавшему кислород, поместить под врачебное наблюдение, даже если никаких симптомов нет. При контакте с кожей снять одежду и промыть кожу большим количеством воды с мылом и доставить пострадавшего к врачу. Одежду можно использовать только после стирки. При попадании в глаза промывать большим количеством воды не менее 15 минут и доставить пострадавшего к врачу.

Действия персонала при утечке диборана.

Немедленно эвакуировать всех людей с пораженной территории. Использовать автономные дыхательные аппараты и защитную одежду. Постоянно контролировать содержание диборана в воздухе. Ликвидировать все источники возгорания, так как диборан формирует взрывоопасные смеси с воздухом. Распылить воду над пораженной территорией для удаления паров.

Действия пожарного персонала при утечке диборана.

Не использовать огнетушители на основе галогеновых соединений углерода, но использовать пену на основе белков или воду. Обязательно использовать автономные дыхательные аппараты и защитную одежду – пожарный огнеупорный костюм. Охладить источники диборана водяным аэрозолем или распыленной водой с большого расстояния. Ядовитые пары осадить водяным аэрозолем. Позволить диборану выгореть. Следить за возможными спонтанными возгораниями. Перекрыть поступление диборана. Если он в баллонах, поддерживать их низкую температуру во избежание взрыва при повышении давления.

Для защиты кожи применяют неопреновые перчатки и высокие боты (диборан повреждает резину). Для защиты глаз и лица исполь-

зуют защитные очки или маску. Для защиты дыхательной системы используют автономный дыхательный аппарат (во всех случаях) или противохимический противогаз с соответствующей коробкой (только для выполнения работ в штатной ситуации и отсутствии утечек диборана).

1.4. Метод расчета насадочного скруббера для очистки газообразных технологических сред от примесей

Скруббер – устройство, используемое для очистки газообразных технологических сред от примесей, пыли и опасных газов в различных химико-технологических процессах. Типичный скруббер позволяет очистить газ путем пропускания его через жидкость, причем поверхность контакта «жидкость-газ» стараются сделать как можно больше за счет распыления жидкости в форме капель или покрытия ею развитой внутренней поверхности скруббера.

Бывают следующие типы скрубберов:

башни с насадкой (насадочные скрубберы) представляют собой башню, внутренняя часть которой заполнена насадкой – пористым материалом для увеличения поверхности контакта между жидкостью и газом;

орошаемые циклоны (центробежные скрубберы) позволяют создать вращающийся поток газа, в котором капли промывной жидкости парят и поглощают из него примеси, после чего за счет центробежной силы относятся к стенкам скруббера и по ним стекают вниз, где собираются и удаляются;

пенные аппараты – скрубберы, в которых образуется пена на основе поверхностно-активных веществ, поверхность пузырьков которой способна задержать примеси проходящего газа;

скрубберы Вентури – поток очищаемого газа и поток жидкости в форме капель встречаются в скруббере, и капли поглощают примеси из газа. Лучше всего применяется на противотоке.

Для очистки неядовитых технологических сред от вредных веществ и утилизации ядовитых технологических сред перед сбросом их в атмосферу чаще всего применяются насадочные скрубберы (иногда называемые башенными скрубберами с насадкой). Схема такого скруббера приводится на рис. 1.2.

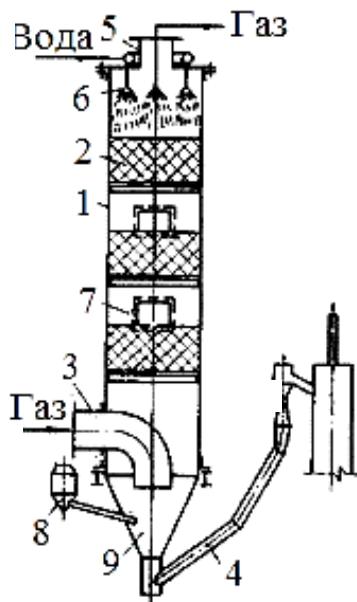


Рис. 1.2. Строение башенного скруббера с насадкой:
 1 – корпус; 2 – насадка; 3 – патрубок для входа газа; 4 – гидравлический затвор;
 5 – патрубок для выхода газа; 6 – брызгала (форсунки); 7 – лаз;
 8 – поплавковая камера; 9 – бункер

Основными элементами насадочного скруббера являются насадка 2, брызгала *б* для распыления промывочной жидкости, бункер 9 для сбора отработанной промывочной жидкости. Применяемые типы насадок представлены на рис. 1.3.

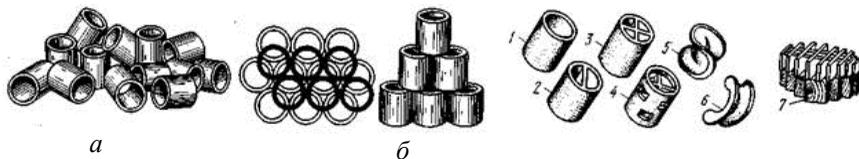


Рис. 1.3. Виды насадок и строение их элементов:
 а – засыпка колец навалом; б – укладки рядами; 1 – керамические кольца Рашига;
 2 – кольца с перегородкой; 3 – кольца с крестообразной перегородкой;
 4 – кольца Палля; 5, 6 – седла; 7 – хордовая насадка

Лучшие результаты по очистке получаются при применении колец Палля, однако обычно для неагрессивных технологических сред применяют хордовую насадку, а для агрессивных – кольца Рашига, уложенные рядами или засыпанные навалом ввиду простоты их конструкции и дешевизны производства.

Расчету подлежат диаметр скруббера, его высота (или количество секций насадок, если он модульный) и расход промывочной жидкости.

Расчет выполняют на основе расхода очищаемого газа, его теплоемкости, поверхности насадки, параметров промывочной жидкости. Иногда, кроме очистки, скруббер выполняет охлаждение отработанной технологической среды, и в этом случае необходимо рассчитать тепловой баланс на основе теплоемкости охлаждаемого газа и жидкости-охлаждителя. Кроме того, часто камеру сгорания для утилизации горючих технологических сред встраивают прямо в скруббер и в расчет скруббера добавляется расчет сгорания утилизируемой технологической среды.

В качестве примера рассмотрим расчет скруббера с насадкой, выполняющего очистку проходящего неагрессивного газа от пыли и его охлаждение, используя в качестве промывочной жидкости воду.

Входные данные для расчета:

расход газа $Q_{\text{общ.г}} = 38\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$;

исходная температура $t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$;

температура после охлаждения $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

По своему составу газ близок к атмосферному воздуху (не имеет вредных газообразных примесей), удельный вес (плотность) газа составляет $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$. Давление в скруббере не отличается от атмосферного ($101,325 \text{ кПа}$). Содержание водяных паров в газе $50 \text{ г}/\text{м}^3$, пыли – $10 \text{ г}/\text{м}^3$. Для охлаждения выбрана схема с циркуляцией воды без промежуточного охлаждения (то есть сам скруббер не охлаждается).

Опытные данные показали: потери тепла в окружающую среду составляют 3 %; эффективность улавливания пыли в скруббере – 20 %; в цикле орошения необходимо поддерживать и отводить в отстойник пульпу, содержащую 20 г/л твердых частиц пыли.

Расход измеряется в нормальных метрах кубических в час ($\text{нм}^3/\text{ч}$), так как объем газа зависит от его температуры и давления.

Алгоритм расчета

1. *Определение рабочей температуры орошающей жидкости.*
Эта температура зависит от влажности охлаждаемого газа и определяется теплопереносом между газом и жидкостью, а также теплотой испарения жидкости; может быть определена с помощью таблицы.

Таблица 1.3

Значения рабочей температуры воды в зависимости от температуры и влажности газа

Исходная влажность газа, г/нм ³	Исходная температура газа, °C						
	100	200	300	400	500	750	1000
25	38,5	49,5	57	62	65,5	72,5	77,5
50	44	53,5	59,5	64	67,5	74	78,5
100	52,5	59	63,5	68	70,5	76,5	80,5
200	61	66,5	70	72,5	75,5	79,5	–
300	68	71,5	74	78,5	–	–	–

Используя интерполяцию, для исходной температуры газов $T = 250 \cdot 0,97 = 242$ °C (с учетом потерянных трех процентов теплоты) температура жидкости составит около 56,5 °C.

2. *Расчет количества теплоты, которое необходимо отнять у газа за счет нагрева и испарения промывающей жидкости.*

На испарение расходуется

$$Q_1 = E_{\Gamma} \Delta T Q_{\text{общ.г}} = 0,33 \cdot (242 - 60) \cdot 38\,000 = 2\,282\,280 \text{ ккал/час,}$$

где $E_{\Gamma} = 0,33$ – средняя теплоемкость газов, ккал/нм³·°C;

ΔT – разность температуры газа, °C;

$Q_{\text{общ.г}}$ – часовой расход газа.

При температуре 56,5 °C на испарение 1 кг воды расходуется $Q_2 = 565$ ккал (удельная теплота парообразования воды).

На нагрев 1 кг водяных паров расходуется

$$Q_3 = E_{\text{в}} \Delta T Q_{\text{в}} = 0,46 \cdot (60 - 56,5) \cdot 1 \approx 2 \text{ ккал/кг,}$$

где $E_{\text{в}}$ – средняя теплоемкость водяных паров, ккал/кг·°C;

ΔT – разность температуры воды, °C.

Всего на нагрев и испарение воды будет затрачено $565 + 2 = 567$ ккал. При этом в скруббере будет испаряться вода в количестве

$$Q'_{\text{общ.в}} = Q_1 / (Q_2 + Q_3) = 2\,282\,280 / 567 = 4025 \text{ кг/ч.}$$

3. *Выбор направления движения потоков газа и жидкости и расчет средней логарифмической разности температур.*

Для насадочных скрубберов практически всегда следует выбирать противоточную схему, где жидкость попадает в скруббер сверху, а газ движется снизу. При этом жидкость успевает забрать максимальное количество теплоты из охлаждаемого газа, а охлаждение идет постепенно за счет медленного испарения и конденсации жидкости в процессе. При этом у подножия скруббера разность температур газа и жидкости составит $\Delta t_1 = 242 - 56,5 = 185,5$ градусов, а на верхушке скруббера – $\Delta t_2 = 60 - 56,5 = 3,5$ градусов.

Средняя логарифмическая температура в этом случае будет

$$\Delta T = \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\left(2,3 \lg \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)\right)} = 46^\circ.$$

4. *Определение коэффициента теплопередачи.*

По формуле

$$K = 6,3 \cdot \omega, \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C},$$

где ω – средняя скорость газа в свободном сечении скруббера, м/с.

При значительных величинах ω происходит потеря воды за счет брызгоуноса, рекомендуемая величина ω находится в пределах 1–1,5 м/с. Принимаем для расчета $\omega = 1,5$ м/с, тогда $K = 6,3 \cdot 1,5 = 9,4$ ккал/м² · ч · °С.

5. *Определение требуемой поверхности насадки.*

Поверхность насадки определяется по формуле

$$F = Q_1 / (K \cdot \Delta T) = 5280 \text{ м}^2.$$

6. Выбор типа насадки и определение ее параметров.

Тип насадки и ее материал выбирают в зависимости от охлаждающей жидкости. Для расчета размеров насадки определяют, какие поверхности ее элементов омываются жидкостью, и, зная поверхность элемента, рассчитывают количество элементов.

Для данного примера применяется хордовая насадка из досок толщиной 18 мм, шириной 120 мм, расположенных на расстоянии 25 мм друг от друга и установленных на ребро. В одном погонном метре этих досок будет $1000/(18 + 25) = 23$. В 1 м^3 насадки будет $23 \cdot 2 = 46$ омываемых граней. Боковая площадь одной доски с двух сторон составит $2 \cdot 1 \cdot 0,12 = 0,24 \text{ м}^2$. В один метр по высоте насадки влезет 8 рядов досок по 23 доски в ряду, так что 1 м^3 насадки содержит $23 \cdot 8 = 184$ доски с общей поверхностью $184 \cdot 0,24 = 44,2 \text{ м}^2$. Таким образом, для скруббера необходима насадка объемом $5280/44,2 = 120 \text{ м}^3$. Живое сечение насадки (сечение, через которое проходит газ) составит 58 %, так как доски занимают $18/(18 + 25) = 42$ % всего сечения скруббера.

7. Расчет секундного объема газа (объем газа, проходящего через скруббер в секунду).

Секундный объем газа с учетом перепада температуры вычисляется в виде

$$Q'_{\text{сек}} = \frac{Q_{\text{общ.г}}(T_0 + T_p)}{3600T_0} = \frac{38000(273 + 250)}{3600 \cdot 273} = 20,22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Количество пара воды в выходном газе составляет $4025/0,804 = 5006 \text{ нм}^3$.

Секундный объем этого пара будет

$$Q''_{\text{сек}} = \frac{(38\ 000 + 5006)(273 + 60)}{3600 \cdot 273} = 14,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Весь секундный объем газа в скруббере будет равен

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q''_{\text{сек}} + Q'_{\text{сек}}}{2} = 17,41 \text{ м}^3/\text{с}.$$

8. Расчет необходимой площади живого сечения и геометрии скруббера.

Необходимая площадь живого сечения скруббера равна $17,41/\omega = 17,41/1,5 = 11,61 \text{ м}^2$.

Если учесть, что живое сечение занимает 58 % всего поперечного сечения скруббера, то горизонтальное поперечное сечение скруббера будет равно $S_{\text{скр}} = 11,61/0,58 = 20 \text{ м}^2$. Таким образом, диаметр скруббера составляет 5 м, а высота насадки $120/11,61 = 10,3 \text{ м}$.

9. Расчет расхода воды и количество образовавшейся пульпы с пылью.

Плотность орошения принимается равной $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

$$Q_{\text{воды}} = S_{\text{скр}} \cdot 10 = 200 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Поступление пыли в скруббер

$$V_{\text{п}} = \frac{38\,000 \cdot 10}{1000} = 380 \text{ кг/ч}.$$

Из этого улавливается 20 %, то есть 76 кг/ч.

Так как содержание твердой пыли в пульпе 20 г/л, то надо сливать пульпу в объеме

$$Q''_{\text{общ.в}} = \frac{76 \cdot 1000}{20} = 3800 \text{ л/ч}.$$

Количество воды, которое понадобится для компенсации испарения и создания пульпы, равно

$$Q_{\text{общ.в}} = Q'_{\text{общ.в}} + Q''_{\text{общ.в}} = 4025 + 3800 = 7825 \text{ л/ч}.$$

Конец алгоритма расчета.

Если в скруббере есть камера сгорания для утилизации вредных технологических сред (а не только пыли), то температура газов и количество теплоты для отвода определяются по объему прореагировавших газов и энтальпии их реакции.

Если реакция экзотермическая, необходимо рассчитать расход промывающей жидкости так, чтобы она уносила не только теплоту продуктов сгорания, но и охлаждала камеру сгорания. Параметры камеры сгорания рассчитываются так, чтобы процесс горения не выходил за ее пределы и не переходил во взрыв в случае, если сопротивление насадки току газа будет большое (так называемый случай захлебывания скруббера). Для этого предусматривают камеру сгорания достаточно большого объема, а ее линейные размеры рассчитывают исходя из расхода сжигаемого газа и условия турбулентности его потока.

Кроме того, в этом случае необходимо учесть, что при растворении продуктов реакции в промывной жидкости возможно образование агрессивных и/или ядовитых продуктов, поэтому в качестве насадки нужно применять изделия из керамики или стекла. Также может оказаться необходимым увеличить высоту насадки, чтобы избежать «проскока» утилизируемого газа и продуктов реакции при колебаниях скорости горения.

Примеры вариантов исходных данных для технологического расчета скруббера на практических занятиях содержатся в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Варианты исходных данных для расчета скруббера

Исходные данные	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q_{\text{обдлг}}, \text{нм}^3/\text{ч}$	26000	26000	26000	30000	30000	30000	34000	34000	34000	34000
$t_1, \text{°C}$	270	280	270	230	230	230	200	200	300	280
$t_2, \text{°C}$	60	70	65	60	70	60	55	70	70	70

Задание № 2. Испарительные источники газообразных технологических сред. Расчет дозатора барботажного типа

Цели работы: ознакомление с принципами работы испарительных источников технологических сред для операций диффузии и эпитаксии; расчет барботера.

2.1. Основные конструкции испарительных источников технологических сред

Дозаторами называются устройства, предназначенные для создания и поддержания параметров парогазовых смесей на заданном уровне. В промышленных установках для наращивания эпитаксиальных слоев кремния наибольшее распространение получили дозаторы барботажного типа (рис. 2.1, *a*).

Принцип работы дозаторов основан на насыщении газа-носителя парами жидкости при его прохождении через емкость дозатора. Температура жидкости в дозаторе может быть меньше температуры кипения, так как именно ею определяется концентрация дозируемого вещества в газе-носителе. Как правило, конструкция барботажного дозатора предусматривает разбиение потока газа-носителя на множество струй для увеличения поверхности контакта. Барботажные дозаторы отличаются высокой производительностью, простотой конструкции и надежностью в работе.

Среди существующих дозаторов для диффузионных процессов самыми распространенными являются дозаторы с зеркалом испарения (рис. 2.1, *б, в*), принцип работы которых основан на испарении диффузанта с поверхности в поток газа-носителя, движущегося вдоль этой поверхности по конвекционному или диффузионному (при малой скорости потока газа) механизму. Концентрация дозируемого вещества определяется потоком газа-носителя, площадью поверхности зеркала испарения и температурой. При сравнительно простой конструкции дозаторы указанных типов сложно использовать для автоматизированной диффузии из-за многофакторной зависимости концентрации дозируемого вещества.

Для автоматизированных диффузионных установок лучше подходят дозаторы с диффузионной трубкой (рис. 2.1, *г*). Их работа основана на законах диффузионного переноса массы (уравнения

Фика, Стефана, Дарси). Перекрывая трубку с помощью электромагнитного клапана, можно обеспечить контроль концентрации дозируемого вещества.

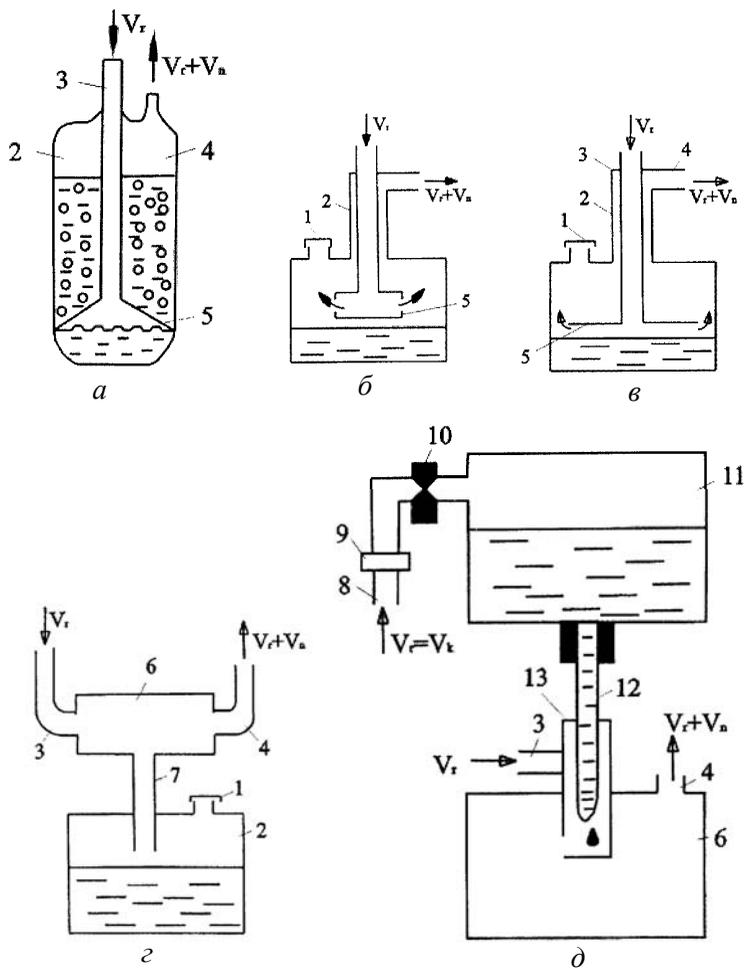


Рис. 2.1. Схемы дозаторов:

- a* – барботажного типа; *б, в* – с зеркалом испарения; *г* – с диффузионной трубкой;
- д* – капельного типа: 1 – крышка; 2 – корпус дозатора; 3 – подача газа-носителя V_r ;
- 4 – выход парогазовой смеси ($V_r + V_n$); 5 – распределитель; 6 – смеситель;
- 7 – калиброванная трубка; 8 – дозирующий газ; 9 – дозирующее устройство;
- 10 – диафрагма; 11 – балластный объем; 12 – бюретка; 13 – испаритель

Менее распространены дозаторы капельного типа (рис. 2.1, *д*). Дозируемое вещество из них подается в поток газа в виде капель, причем его концентрация зависит от размера и количества капель. Расход газа-носителя подбирается так, чтобы капли дозируемого вещества успевали испаряться в потоке газа-носителя.

Кроме того, имеется дозатор шприцевого типа, принцип действия которого схож с работой медицинского шприца: дозируемое вещество помещается в камеру, откуда принудительно выдавливается поршнем в поток газа-носителя. Это может происходить автоматически, так что этот дозатор можно применять в автоматизированных системах, однако в отсутствие контроля концентрации дозируемого вещества в потоке газа-носителя сравнительно легко достигается ее превышение. Кроме того, при коалесценции капель дозируемого вещества возможно образование пленок этого вещества на стенках газовой системы.

Для изготовления дозаторов применяются материалы, устойчивые к действию газов-носителей и дозируемых веществ: кварц, нержавеющая сталь, монель и другие коррозионно-стойкие материалы.

2.2. Расчет дозатора барботажного типа

Конструкция рассчитываемого дозатора барботажного типа (барботера) приведена на рис. 2.2.

Концентрация дозируемого вещества зависит от уровня реагента в емкости, расхода газа, диаметра пузырей газа, объема незаполненного пространства в емкости дозатора и других параметров.

Основные процессы, проходящие в дозаторе, – это испарение и конденсация дозируемого вещества, а также процесс диффузии паров дозируемого вещества в потоке газа-носителя. На поверхности реагента в дозаторе может существовать пена, размер пузырей в которой определяется поверхностным натяжением реагента. Контроль этих процессов в основном осуществляется путем регулирования температуры жидкости-реагента. Подогрев и охлаждение дозатора обеспечивается тепловой мощностью в пределах 3–5 Вт (в случае парогазовой смеси с тетрагидридом кремния), которую могут обеспечить серийные микрохолодильники, например, типа ТЛМ.

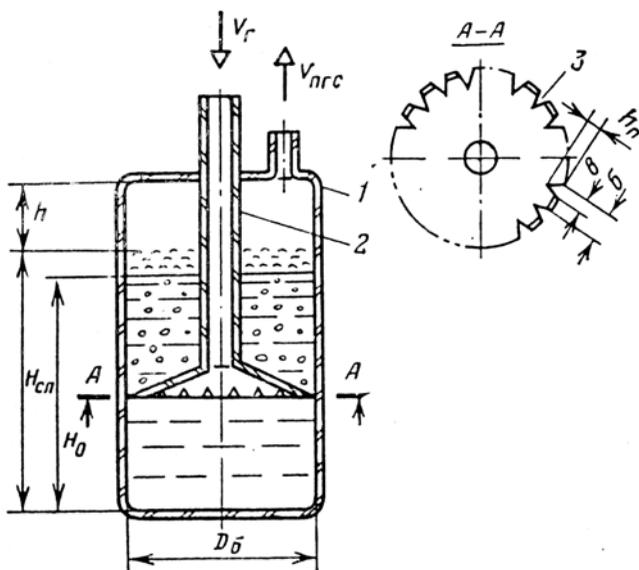


Рис. 2.2. Дозатор барботажного типа:
1 – сосуд; 2 – распределитель; 3 – прорези

Для расчета барботера необходимы следующие исходные данные:

- 1) объем парогазовой смеси: $V_{\text{ПГС}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ($5 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- 2) состав парогазовой смеси: тетрахлорид кремния (молярная концентрация $m = 0,002$ молярных долей), газ-носитель – водород;
- 3) расход газа-носителя через барботер: $V_r = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{ч}$ ($43 \text{ л}/\text{ч}$);
- 4) начальная температура вещества в барботере: $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 5) время непрерывного испарения: $\tau = 1 \text{ час}$;
- 6) температура вещества в барботере в конце испарения: $t_2 = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 7) плотность испаряемого вещества в жидком виде: $\rho = 1,47 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- 8) плотность испаряемого вещества в газообразном виде: $\rho_r = 0,082 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- 9) коэффициент поверхностного натяжения для испаряемого вещества: $\sigma = 19 \cdot 10^{-3} \text{ Н}/\text{м}$;
- 10) коэффициент динамической вязкости для испаряемого вещества: $\mu = 0,454 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- 11) давление испаряемого вещества на линии насыщения: $P = 25,4 \cdot 10^3 \text{ Па}$;

12) коэффициент диффузии пара испаряемого вещества в газ:
 $D_r = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Необходимо определить конструктивные размеры барботера (диаметр, высоту, форму и размер распределительных отверстий) и температуру тетрахлорида кремния.

1. *Определение расхода испаряемого вещества.*

Расход испаряемого вещества получают, используя формулу:

$$J = \frac{V_{\text{ПГС}} m M}{22,41} = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,002 \cdot 170}{22,41} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с},$$

где M – молярная масса испаряемого вещества, кг/кмоль;

22,41 – объем одного киломоля газа при нормальных условиях, м³/кмоль.

2. *Определение объема вещества, заливаемого в барботер.*

Указанный объем должен обеспечить постоянство температуры барботера в заданных пределах в ходе всего процесса при непрерывном испарении вещества. Для испарения заданной дозы вещества нужно затратить количество теплоты $Q_{\text{исп}} = rJ\tau$, где r – теплота испарения в Дж/кг.

В ходе испарения температура вещества в барботере уменьшится до температуры t_2 из-за испарения части вещества. Если параметр теплоподвода равен 1 (к барботеру подводится практически столько же теплоты, сколько необходимо для испарения заданной дозы вещества), то объем заливаемого в барботер вещества можно определить по формуле

$$V = \frac{J\tau}{t_1 - t_2} \frac{t_2}{\rho} = \frac{21,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{20 - 19,5} \frac{19,5}{1,47 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

3. *Определение диаметра барботера и уровня вещества в барботере.*

Диаметр барботера выбирается так, чтобы стенки барботера не оказывали влияния на газообмен (то есть были достаточно далеко друг от друга).

Минимальный диаметр, удовлетворяющий таким условиям, равен $D_6 = 0,1$ м. Тогда уровень вещества в барботере будет определяться по формуле

$$H_0 = \frac{4V}{\pi D_6^2} = \frac{4 \cdot 0,002}{3,14 \cdot 0,1^2} = 0,255 \text{ м.}$$

4. Определение живого сечения распределителя.

Живое сечение распределителя f_p для прохода газа-носителя через слой жидкости выбирается из условия равномерного распределения газа-носителя в объеме жидкости. Равномерность распределения задается параметром ω , который показывает максимальное отличие концентраций газа-носителя в объеме жидкости и должен находиться в пределах от 0,08 до 0,15. Рассчитать живое сечение распределителя при $\omega = 0,08$ можно по формуле

$$f_p = \omega \pi D_6^2 / 4 = 0,08 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 / 4 = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Для определения формы прорезей в распределителе учитывают расход газа. При небольшом его расходе (до $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$) используют треугольные прорези, причем при уменьшении ширины прорезей увеличивается поверхность контакта фаз (за счет измельчения пузырьков). Малый шаг между прорезями приводит к слипанию (коалесценции) пузырьков, большой – к уменьшению площади контакта фаз.

На основании этих рекомендаций стремятся выбирать прорези с шириной основания $b = (2 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ м, высотой $h_n = (15 \dots 20) \cdot 10^{-3}$ м и шагом δ , превышающим ширину прорези у основания в 3–5 раз. Таким образом, при $b = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $\delta = 10^{-2}$ м, и число прорезей n получают по формуле

$$n = \frac{\pi D_6}{\delta} = \frac{3,14 \cdot 0,1}{10^{-2}} = 31.$$

Высота прорезей l определяется по формуле

$$l = \frac{2f_p}{bn} = \frac{2 \cdot 6,28 \cdot 10^{-4}}{0,002 \cdot 31} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

5. Определение высоты установки распределителя.

Высота установки распределителя $H_{\text{сл}}$ (высота газожидкостного слоя) влияет на газосодержание барботируемого слоя φ , то есть определяет эффективность насыщения газа-носителя испаряемым веществом. Газосодержание зависит от скорости подъема пузырей ω_0 и приведенной скорости газа ω_{Γ} , которые определяют по формулам:

$$\omega_{\Gamma} = \frac{4V_{\Gamma}}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 1,53 \cdot 10^{-3} \text{ м/с,}$$

$$\omega_0 = \left(\frac{4\sigma^2 g}{12\pi\mu\rho} \right)^{1/5} = \left(\frac{4 \cdot (19 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 9,81}{12 \cdot 3,14 \cdot 0,454 \cdot 10^{-3} \cdot 1,47 \cdot 10^3} \right)^{1/5} = 0,224 \text{ м/с.}$$

Следует отметить, что ω_0 не зависит от размера прорезей в распределителе.

Газосодержание в этом случае определяют по формуле

$$\begin{aligned} \varphi &= \exp \left(-0,2 \frac{\omega_{\Gamma}}{\omega_0} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,2} \right) = \\ &= \exp \left(-0,2 \frac{0,00153}{0,224} \cdot \left(\frac{1,47 \cdot 10^3}{0,082} \right)^{0,2} \right) = 0,9933. \end{aligned}$$

С учетом газосодержания можно вычислить высоту установки распределителя $H_{\text{сл}}$ по формуле

$$H_{\text{сл}} = H_0 / \varphi = 0,255 / 0,9933 = 0,2565 \text{ м.}$$

6. Определение концентрации испаряемого вещества на выходе из барботера.

Для расчета концентрации $c_{\text{н}}$ сначала определяют равновесную концентрацию на границе раздела фаз по формуле

$$c_{\text{н}} = \frac{PM}{R(t_1 + 273)} = \frac{25,4 \cdot 10^3 \cdot 170}{8314 \cdot (20 + 273)} = 1,77 \text{ кг/м},$$

где $R = 8314$ Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная.

После этого рассчитывают число единиц переноса в газовой фазе $n_{\text{г}}$ по формуле

$$\begin{aligned} n_{\text{г}} &= 1770 \left(\frac{\omega_{\text{г}} H_{\text{сл}}}{D_{\text{г}}} \right)^{-0,5} H_{\text{сл}}^{1,2} = \\ &= 1770 \left(\frac{1,53 \cdot 10^3 \cdot 0,2565}{0,19 \cdot 10^{-4}} \right)^{-0,5} \cdot 0,2565^{1,2} = 91,41. \end{aligned}$$

С учетом этого концентрацию испаряемого вещества на выходе из барботера определяют по формуле

$$c_{\text{к}} = c_{\text{н}} \left(1 - \frac{1}{e^{n_{\text{г}}}} \right) = 1,77 \left(1 - \frac{1}{e^{91,41}} \right) = 1,77 \text{ кг/м}^3.$$

7. Определение расхода испаряемого вещества.

Для определения расхода испаряемого вещества используется формула

$$J_1 = V_{\text{г}} c_{\text{к}} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 1,77 = 21,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с.}$$

Различие между полученной величиной и заданным значением расхода J составляет $0,3 \cdot 10^{-6}$ кг/с, или 1,5 %.

8. *Определение степени насыщения парогазовой смеси на выходе из барботера.*

Степень насыщения ψ определяется по формуле

$$\psi = \frac{c_{\text{к}}}{c_{\text{н}}} = \frac{1,77}{1,77} = 1,00.$$

Таким образом, получаемая парогазовая смесь насыщена испаряемым веществом на 100 %. Если степень насыщения меньше 100 %, контролировать дозу испаряемого вещества труднее, так как возможно превышение заданных концентраций.

9. *Выбор высоты сепарационного объема от уровня барботируемой жидкости до верха барботера.*

Сепарационный объем нужен, чтобы предотвратить попадание брызг испаряемого вещества в газовую систему и неконтролируемое увеличение концентрации испаряемого вещества в газовой системе. Если высота сепарационного объема от уровня барботируемой жидкости до верха барботера $h = 0,05$ м, то величина брызгоуноса B определяется по формуле

$$B = 7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\omega_r}{h} \right)^{3,2} = 7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1,53 \cdot 10^{-3}}{0,05} \right)^{3,2} = 9,98 \cdot 10^{-10} \text{ кг тетра-хлорида кремния на } 1 \text{ м}^3 \text{ водорода.}$$

Брызгоунос быстро увеличивается с повышением скорости газа, так что при необходимости работы с большим диапазоном расходов испаряемой жидкости (и скоростей газа) следует предусмотреть возможно большую высоту сепарационного объема от уровня барботируемой жидкости до верха барботера.

Варианты практических заданий по технологическому расчету-расчету дозатора барботажного типа приводятся в табл. 2.1. Остальные данные для расчета берутся из приведенного выше примера.

Таблица 2.1

Варианты исходных данных для расчета дозатора барботажного типа

Исходные данные	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$V_{\text{ПГС}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
$V_r, \text{ м}^3/\text{ч}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
$\tau, \text{ ч}$	1,5	1,2	1,1	2	1,5	1,1	0,8	1,5	1	1

Задание № 3. Вакуумные системы и их расчет

Цели работы: ознакомление с вакуумными системами технологического оборудования: их строением, конструкцией, основными компонентами; расчет вакуумных систем

3.1. Вакуумные системы и их строение

Для создания и поддержания вакуума в технологическом оборудовании полупроводникового производства применяются вакуумные системы.

Вакуумная система – совокупность взаимосвязанных устройств для создания, повышения и поддержания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых сосудов и связывающих их вакуумных трубопроводов. Вакуумные системы входят в вакуумные установки, которые обеспечивают выполнение вакуумных технологических процессов. Вакуумные установки могут быть конструктивно выполнены как единое целое, тогда они называются вакуумными агрегатами.

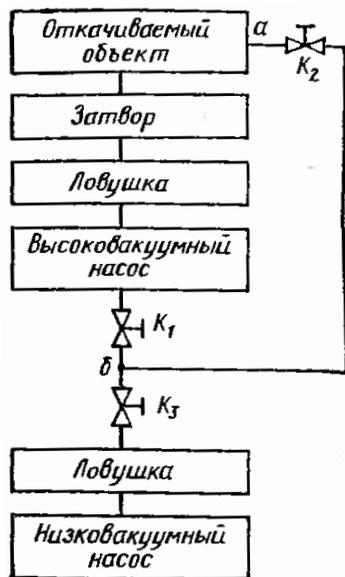


Рис. 3.1. Промышленная вакуумная система

Простейшая вакуумная система состоит из откачиваемого объема (камеры), вакуумного насоса и вакуумного трубопровода, соединяющего откачиваемый объем и вакуумный насос. Также в простейшую вакуумную систему входят манометры для контроля давления в откачиваемой камере и вакуумном трубопроводе. Промышленные вакуумные системы устроены более сложно.

Как показано на рис. 3.1, в их состав входят ловушки для улавливания молекул газа путем их охлаждения, а также высоко- и низковакуумные насосы, что позволяет получать не только низкий, но и высокий, и сверхвысокий вакуум. Следует отметить, что в промышленных системах обяза-

тельно существует байпасный трубопровод, позволяющий низковакуумному насосу работать, пока отключен высоковакуумный.

При расчете вакуумных систем могут возникать следующие типы задач:

расчет времени откачки системы – на основе известного откачиваемого объема, известных характеристик вакуумных насосов и откачиваемого газа требуется найти время, в течение которого в вакуумной системе будет достигнуто заданное давление;

расчет или подбор вакуумного насоса по заданному времени откачки и откачиваемому объему;

подбор рабочего сечения вакуумного трубопровода и его формы при известном откачиваемом объеме и параметрах насоса.

Для расчета вакуумной системы необходима информация о ее конструкции: длина вакуумных трубопроводов и габаритные размеры откачиваемой камеры для расчета ее объема. Принцип расчета заключается в определении газовых потоков, обусловленных десорбцией газов с внутренней поверхности откачиваемого объема, а также газовой выделением изделий, помещенных в откачиваемый объем. После этого, на основе проводимости системы и времени откачки, рассчитывают необходимую скорость откачки с помощью главного уравнения вакуумной техники.

3.2. Основные детали вакуумных систем

Вакуумные насосы

Вакуум получают с помощью насосов.

Главной характеристикой вакуумного насоса является его производительность Q (г/сек или мм рт. ст.·л/сек), представляющая собой количество газа, откачиваемого насосом в единицу времени. Производительность насоса связана с его быстротой действия S (объем газа, откачиваемый в единицу времени при определенном впускном давлении) и давлением газа p по формуле $Q = p \cdot S$.

Кроме того, вакуумные насосы характеризуются предельным давлением (самое низкое давление, которое может быть достигнуто насосом) и наибольшим выпускным давлением (максимальное давление, которое допустимо на его выходном патрубке при стабильном режиме работы насоса).

В зависимости от вакуума, который можно получить с помощью насосов, их разделяют на форвакуумные и высоковакуумные. Форвакуумные насосы нужны для откачки систем от атмосферного давления до низкого вакуума.

Высоковакуумные насосы предназначены для получения среднего, высокого и сверхвысокого вакуума. Так как их наибольшее выпускное давление существенно меньше атмосферного и соответствует низкому вакууму, высоковакуумные насосы работают в связке с форвакуумными: вакуумная система откачивается сначала форвакуумным насосом до низкого вакуума через байпас (обходной трубопровод) высоковакуумного насоса, после чего байпас перекрывают и запускают высоковакуумный насос, не останавливая форвакуумный.

Форвакуумные насосы. Насосы этого типа содержат объем, который изменяется под действием прилагаемой к нему силы и с помощью односторонних клапанов соединяется с системой и средой. При увеличении объема насоса в него попадает газ из системы, а при уменьшении – выбрасывается наружу. Режим течения газов в этих насосах преимущественно турбулентный, который потом становится вязкостным при достижении пониженного давления.

Существуют различные конструкции форвакуумных насосов.

Водокольцевые насосы. Конструкция водокольцевого насоса приведена на рис. 3.2. Принцип действия водокольцевого насоса заключается в образовании лопатками эксцентричного ротора и слоем вращающейся жидкости камер переменного объема.

При этом наибольший объем приходится на камеру, находящуюся около впускного отверстия, а наименьший – на камеру около выпускного отверстия, так что захваченный камерой газ приобретает давление больше атмосферного. Если из системы откачивают не воздух, а другие газы, жидкость нужно подбирать так, чтобы эти газы в ней не растворялись и не реагировали с ней. Например, при откачке хлора вместо воды нужно применять концентрированную серную кислоту. Предельное давление определяется давлением паров рабочей жидкости и составляет 2–3 кПа. Быстрота действия жидкостных насосов составляет 25–500 л/с.

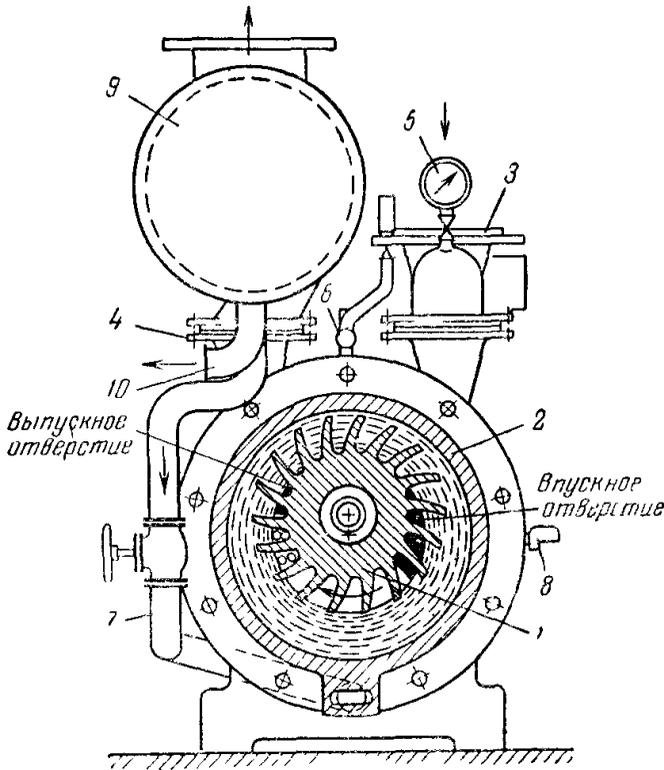


Рис. 3.2. Водокольцевой насос:

- 1 – ротор; 2 – корпус; 3 – впускная распределительная трубка; 4 – выпускной патрубков;
 5 – манометр; 6 – подводка свежей воды; 7 – подводка циркуляционной воды;
 8 – спускной вентиль; 9 – водоотстойник; 10 – сток охлаждающей воды

Главным недостатком жидкостных насосов является большой расход энергии (около 200 Вт/(л·с)), который необходим для вращения жидкости.

Многопластинчатые насосы. Конструкция насосов этого типа представлена на рис. 3.3. Принцип действия этих насосов заключается в изменении объема камер, образованных эксцентричным ротором, стенками насоса и подвижными пластинами в пазах ротора. При вращении ротора давление газа повышается и в конце рабочего цикла становится больше атмосферного.

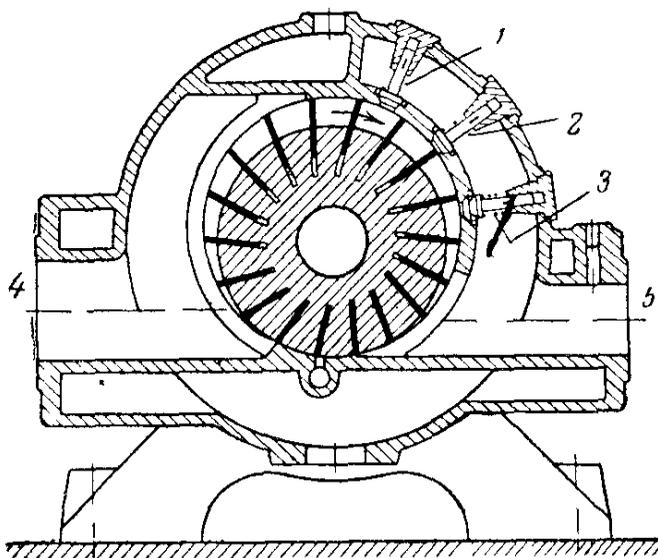


Рис. 3.3. Многопластинчатый насос:
 1–3 – предохранительные клапаны; 4 – впускной клапан;
 5 – выпускной патрубков

Достоинством данного насоса является малое время выхода на рабочий режим, недостатками – повышенное трение и перегрев насоса при длительной работе без охлаждения. Кроме того, существует риск загрязнения системы продуктами трения.

Вращательные (ротационные) масляные насосы. Существуют пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и золотниковые ротационные насосы. Устройство пластинчато-роторного насоса показано на рис. 3.4. Откачное пространство 4 переменного объема, образованное пластинами, при вращении ротора изменяет свой объем, из-за чего давление газа повышается и он выходит через обратный клапан в масло. Вращательные насосы могут работать при давлениях от атмосферного давления до давления 10^{-2} – 10^{-3} Па. Быстродействие вращательных насосов составляет от 0,2 до 150 л/сек.

Двухроторные насосы (насосы Рутса). Принцип работы данных насосов основан на том, что роторы обкатываемой формы образуют вместе с корпусом камеру, газ внутри которой перемещается от входного патрубка к выходному практически без изменения давления.

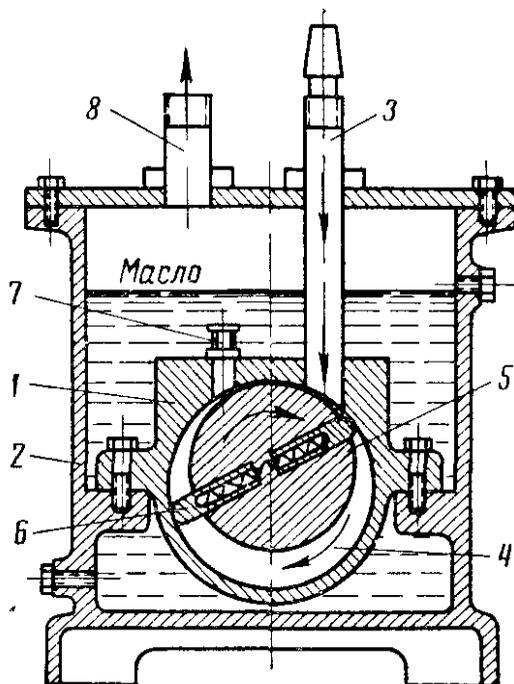


Рис. 3.4. Пластинчато-роторный насос:

- 1 – камера; 2 – бак с маслом; 3 – впускной патрубок; 4 – откачное пространство;
 5 – барабан; 6 – пластина; 7 – выпускной клапан (шарик с пружиной);
 8 – выпускной патрубок

Устройство двухроторного насоса показано на рис. 3.5. Роторы 1, вращаясь синхронно, перебрасывают газ от впускного патрубка 2 к выпускному пространству 6. При этом газ, перемещаемый замкнутым объемом 4, почти не изменяет своего давления, что позволяет достичь значительной скорости откачки, что является преимуществом данного типа насосов.

Недостаток данных насосов – в необходимости последовательного включения с ними форвакуумного насоса, так как без насоса предварительного разрежения двухроторные насосы работать не могут.

Современные насосы данного типа имеют быстроту действия до 5000 л/с при давлении 10^{-1} – 10^{-3} мм рт. ст.

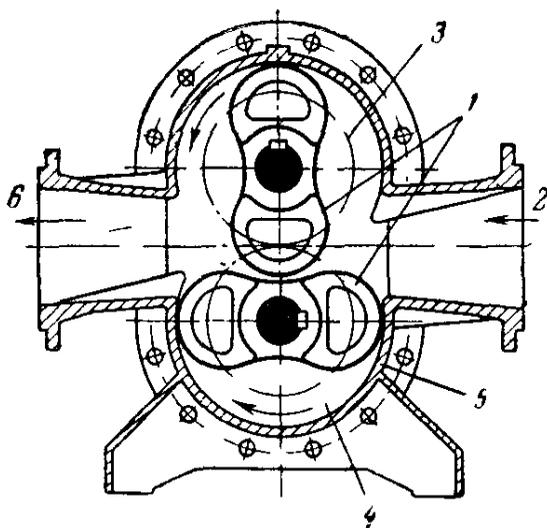


Рис. 3.5. Двухроторный насос:

1 – роторы; 2 – впускной патрубок; 3 – рабочий объем, сообщающийся с впускной стороны; 4 – изолированный объем; 5 – камера; 6 – выпускная сторона

Высоковакуумные насосы. Насосы этого типа, создающие средний, высокий и сверхвысокий вакуум, могут работать только при выпускном давлении ниже атмосферного, а режим течения газов через них, как правило, является молекулярным. Принцип работы высоковакуумных насосов состоит в изменении вектора скорости входящих в него молекул газа так, чтобы их средняя скорость была направлена к выходу из вакуумной системы. Это может достигаться созданием градиента температуры или изменением скорости молекул при их столкновениях с движущимися частями насоса.

Молекулярные насосы. Принцип действия молекулярных насосов заключается в изменении скорости молекул попадающего в них газа так, чтобы направление движения этих молекул было к выходу из вакуумной системы. Схема простейшего молекулярного насоса приведена на рис. 3.6. Цилиндр 2, вращаясь со скоростью, сравнимой с тепловыми скоростями молекул, придает молекулам в рабочем объеме 3 ускорение в направлении выпускного отверстия 5, когда они сталкиваются с ним. Зазор h очень узок и мешает молекулам попасть обратно к впускному отверстию. Быстрота откачки дан-

ным насосом зависит от скорости вращения цилиндра. Например, при 5000 оборотах в минуту можно достичь быстроты откачки 110 л/с. Выпускное давление составляет от 0,05 до 20 мм рт. ст. при предельном давлении от $3 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

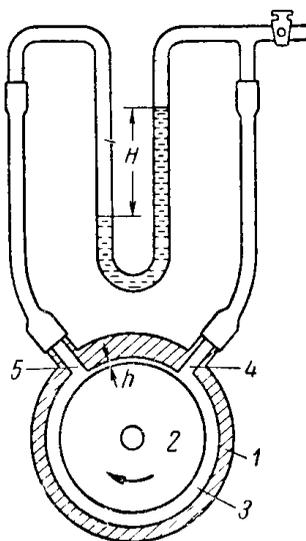


Рис. 3.6. Молекулярный насос:
 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – рабочий объем; 4 – впускное отверстие;
 5 – выпускное отверстие

Турбомолекулярные насосы. Конструкция турбомолекулярного насоса приводится на рис. 3.7. Главным элементом высоковакуумных насосов данного типа является вал 4 со множеством дисков с прорезями или лопаток 5, поддерживаемый подшипниками 3. На этом же валу расположены обмотки электродвигателя 6, приводящего вал в быстрое вращение (порядка нескольких тысяч оборотов в минуту). Вход газа осуществляется через патрубок 7 в центре насоса; выпускной патрубок 8 связан с противоположными концами насоса. Корпус насоса 1 имеет на внутренней стороне лопатки, причем зазор между ними и лопатками 5 составляет около 1 мм. При работе насоса вращающиеся лопатки придают молекулам газа ускорение в направлении выходного патрубка, а лопатки корпуса мешают

им двигаться обратно, так как наклон лопаток корпуса и лопаток диска позволяет сталкивающимся с ними молекулам «отскакивать» только в нужную сторону. Быстрота откачки по воздуху такими насосами может достигать 140 л/с при давлении 10^{-2} – 10^{-8} мм рт. ст. Предельное давление составляет около $5 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. При этом ротор вращается со скоростью 16 000 оборотов в минуту.

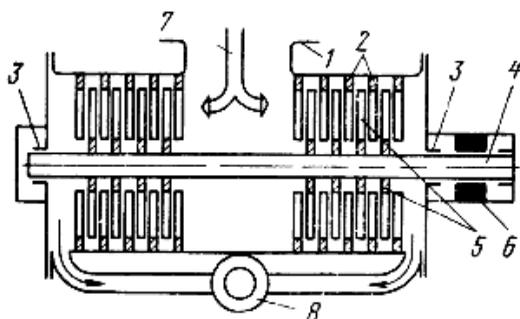


Рис. 3.7. Турбомолекулярный насос:

- 1 – корпус; 2 – лопатки корпуса; 3 – подшипники; 4 – рабочий вал;
 5 – лопатки вала; 6 – обмотки электродвигателя; 7 – впускной патрубок;
 8 – выходной патрубок

Пароструйные (диффузионные) насосы. Данные насосы позволяют откачивать системы с помощью потока пара рабочей жидкости, который захватывает молекулы откачиваемого газа и уносит их с собой.

После конденсации пара эти молекулы удаляются из насоса вместе с жидкостью. Строение пароструйного насоса приводится на рис. 3.8.

Через впускной патрубок 4 газ попадает в область потока пара рабочей жидкости, который движется с большой скоростью благодаря зонтичному соплу 3 и увлекается им к стенкам насоса, где пар конденсируется рубашкой водяного охлаждения 6. Конденсат стекает в кипятыльник 1, постоянно подогреваемый нагревателем 7, где снова испаряется, а газ удаляется из насоса через выпускное отверстие 5. Предельное давление насосов этого типа составляет $(2-5) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. и определяется в основном давлением насыщенного пара рабочей жидкости.

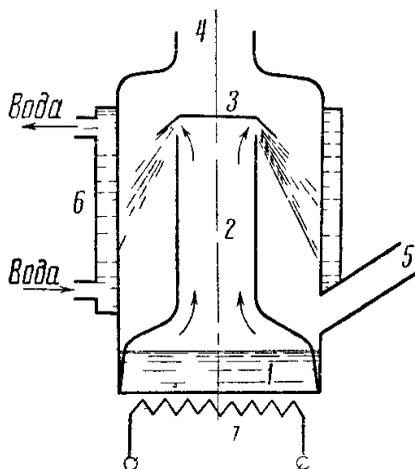


Рис. 3.8. Пароструйный насос:

- 1 – кипятильник; 2 – паропровод; 3 – зонтичное сопло; 4 – впускной патрубок;
 5 – выпускной патрубок; 6 – рубашка водяного охлаждения;
 7 – электронагреватель

Именно поэтому в качестве рабочей жидкости стараются применять вакуумное масло или ртуть (давление насыщенных паров ртути постоянно при заданной температуре, поэтому она предпочтительнее масла), а при охлаждении насоса жидким азотом его предельное давление может быть улучшено до $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Выпускное давление составляет порядка 300 мкм рт. ст. Быстрота откачки диффузионных насосов увеличивается с уменьшением впускного давления и может составлять 2000 л/с при впускном давлении 10^{-5} мм рт. ст.

Главный недостаток данного типа насосов – пары рабочей жидкости на выходе из насоса, которые могут затруднить откачку и загрязнить вакуумную систему.

Вакуумные ловушки. Для облегчения откачки и устранения из системы паров жидкостей (например, из диффузионного насоса) применяются вакуумные ловушки. Принцип работы любой вакуумной ловушки заключается в уменьшении кинетической энергии молекул газа, попадающих в нее, при столкновении со стенками ловушки. В результате этого молекула, попавшая в ловушку, не может ее покинуть. Практически все вакуумные ловушки для эффективной

работы требуют охлаждения, которое обеспечивается сжиженными газами (например, жидким азотом), твердыми газами (сухой лед), холодильниками на основе фреонов либо многоступенчатыми активными охладителями на эффекте Пельтье.

Конструкции вакуумных ловушек приводятся на рис. 3.9.

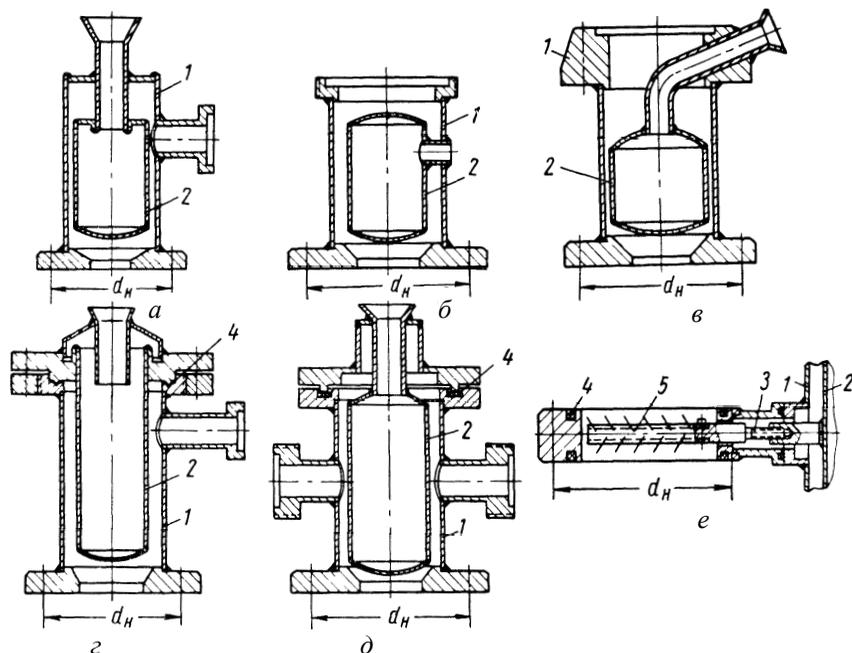


Рис. 3.9. Конструкции вакуумных ловушек:

а-в – неразборные ловушки; *г-е* – разборные ловушки; *1* – корпус ловушки; *2* – рабочий объем ловушки; *3* – хладопровод; *4* – уплотнение; *5* – жалюзи

Вакуумные ловушки, изготовленные из металла, способны поддерживать давление не ниже 10^{-6} , а с фторопластовыми уплотнителями – не ниже 10^{-8} мм рт. ст. Особенно удобны в эксплуатации разборные металлические вакуумные ловушки.

Вакуумные ловушки, изготовленные из стекла (например, молибденового стекла марки С-49-1) и охлаждаемые жидким азотом, способны поддерживать высокий и сверхвысокий вакуум, так как

стекло имеет чрезвычайно малое газовыделение и малое количество пор. Стекланные ловушки являются неразборными и отличаются тем, что представляют собой модификации сосуда Дьюара: во внутренний объем колбы наливают жидкий азот, а рабочий объем ловушки заключен между внутренней и внешней стенкой сосуда (где у обычного сосуда Дьюара вакуумный теплоизолятор).

Кроме указанных, имеются адсорбционные ловушки, представляющие собой наполненные адсорбентом (например, цеолитом 13X) резервуары, через которые пропускают газ. После насыщения адсорбент прогревается встроенным нагревателем и адсорбированные газы удаляются, позволяя снова использовать ловушку.

3.3. Практическая часть – метод расчета вакуумной системы

Проектный расчет

Проектный расчет выполняют в следующей последовательности.

1. *Выбор конструкции вакуумной схемы.* Вакуумную схему выбирают по аналогии с уже существующими установками такого же назначения. Простейшая конструкция вакуумной системы представлена на рис. 3.10.

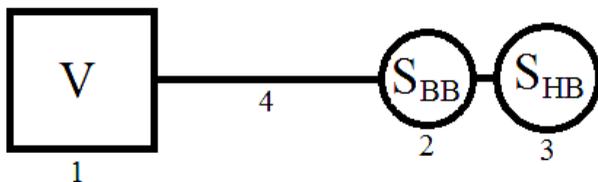


Рис. 3.10. Простейшая вакуумная система:

1 – откачиваемый объем (рабочая камера); 2 – высоковакуумный насос;
3 – низковакуумный насос; 4 – прямой трубопровод длиной l и диаметром d

2. *Выбор основного насоса.* Исходя из заданного рабочего давления p , в качестве основного насоса выбирается насос, способный откачать рабочий объем до необходимого давления. В вакуумной системе на рис. 3.10 таким насосом является высоковакуумный насос. Низковакуумный насос – вспомогательный, его быстрота работы зависит от быстроты работы основного.

Для нахождения конкретного типоразмера основного насоса необходимо рассчитать суммарный поток газа Q_{Σ} , поступающий в вакуумную систему.

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем Q_{Σ} , определяется следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{ПР}} + Q_{\text{НАТ}} + Q_{\text{ДИФ}} + Q_{\text{ПОВ}},$$

где $Q_{\text{НАТ}}$ – поток газов, натекающий из атмосферы через щели в вакуумной системе, $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$; находится в пределах $5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-5}$ $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$;

$Q_{\text{ДИФ}}$ – поток газов из-за диффузионного газовыделения из глыбины конструкционных материалов и изделий в камере; рассчитывается по формуле $Q_{\text{ДИФ}} = q_{\text{Г}}I$, где $q_{\text{Г}}$ – удельное газовыделение изделий в камере, $\text{м}^3\text{Па}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; I – масса изделий в камере, кг ;

$Q_{\text{ПР}}$ – поток от проницаемости стенок камеры (нуль, если достаточно толстые стенки), рассчитывается по формуле $Q_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}} \cdot F$, где $q_{\text{ПР}}$ – удельная проницаемость материала рабочей камеры, $\text{м}^3\text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; F – площадь поверхности камеры, м^2 .

$Q_{\text{ПОВ}}$ – поток с поверхности рабочей камеры и изделий в ней; рассчитывается по формуле $Q_{\text{ПОВ}} = q_{\text{н}}F$, где $q_{\text{н}}$ – газовыделение с поверхности изделий и камеры, $\text{м}^3\text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; F – площадь поверхности камеры, м^2 .

Далее определяется необходимая эффективная быстрота откачки рабочей камеры S_0 .

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{p_{\text{РАБ}}},$$

где Q_{Σ} – суммарный поток газа, поступающий в вакуумную систему, $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$; $p_{\text{РАБ}}$ – рабочее давление, Па .

Быстрота действия насоса $S_{\text{ВВ}}$ рассчитывается следующим образом:

$S_{\text{ВВ}} = v \cdot S_0$, где v – коэффициент, для струйных, турбомолекулярных, криогенных насосов, равный 2, для сорбционных – 4, для насосов объемного действия – 1,3–1,4. Выбираемый насос должен иметь быстроту действия, которая больше или равна $S_{\text{ВВ}}$.

3. *Выбор вспомогательного насоса.* Большинство насосов, такие как пароструйные, турбомолекулярные и др., для запуска и работы требуют создания и поддержания определенного разрежения во всей вакуумной системе, включая насос.

Так как вспомогательный насос обеспечивает предварительное разрежение в камере, чтобы выбрать тип вспомогательного насоса, необходимо по каталогу уточнить значения давления запуска p_3 основного насоса и подобрать насос предварительного разрежения, способный обеспечить указанное давление.

Во время работы основного насоса вспомогательный насос производит откачку из высоковакуумного насоса. Давление на входе во вспомогательный насос должно быть меньше выпускного давления на выходе из высоковакуумного насоса: вспомогательный насос должен быть способен не только удалять определенное количество газов, поступающих из основного насоса, но и поддерживать определенное выпускное давление на выходе основного насоса.

Рабочее давление вспомогательного насоса p_i при последовательном включении определяется как $p_i = \frac{P_{(i-1)}}{\eta}$, где $p_{(i-1)}$ – давление предыдущего насоса, Па; η – коэффициент запаса, равный 2–10, обычно принимается равным 2. Быстрота работы данного насоса принимается равной $S_{\text{НВ}}$ и рассчитывается по тем же формулам, что и быстрота работы высоковакуумного насоса. В качестве рабочего давления используют p_i , а коэффициент ν принимается равным 1,3–1,4 (практически все низковакуумные насосы – механические).

4. *Время предварительной откачки.* Проверяется возможность использования выбранного вспомогательного насоса для предварительной откачки рабочей камеры (то есть определяется способность выбранного насоса достичь предварительного разрежения за необходимое время). Для этого рассчитывается эффективная быстрота откачки конкретно для этого насоса $S_{\text{эНВ}} = \frac{S_{\text{НВ}}}{1,3 \dots 1,4}$, м³/с.

Тогда время предварительной откачки рабочей камеры без учета газовыделения (на этом этапе расчета не учитывается Q_{Σ}) определя-

ется как $t = \left(\frac{V}{S_{\text{эНВ}}} \right) \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$, с, где V – объем рабочей камеры, м³;

p_1 – давление до начала откачки, Па; p_2 – давление после откачки (рабочее для основного насоса), Па.

Если полученное время предварительной откачки меньше заданного, то считается, что насосы выбраны верно. Таким образом, проектный расчет завершен. После проведения проектного расчета конструируют вакуумную систему. В процессе конструирования уточняют все размеры вакуумных трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и т. д.

Расчет проводимости высоковакуумной системы

Для определения режимов течения газа используются критерий Кнудсена:

$$Kn = \lambda / d = \frac{k \cdot T}{\bar{p} \cdot d_m^2 \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{2}},$$

где k – постоянная Больцмана;

T – температура газа в трубе, К;

d_m – диаметр молекулы газа, м;

d – диаметр трубы, м;

\bar{p} – среднее давление, Па.

Для молекулярного течения критерий Кнудсена должен быть больше или равен 1/3, поэтому $\bar{p} \cdot d \leq \frac{3k \cdot T}{d_m^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}}$.

Учитывая, что для воздуха $d_m = 0,375 \cdot 10^{-9}$ м, при температуре 293 К можно получить, что $\bar{p} \cdot d \leq 0,02$ Па·м, аналогично для вязкостного режима выполняется $\bar{p} \cdot d \geq 1,33$ Па·м, а для молекулярно-вязкостного – $0,02 \leq \bar{p} \cdot d \leq 1,33$.

Зная режим течения, можно получить проводимость каждого элемента U_i вакуумной системы. Проводимость всей вакуумной системы U получается из выражения $\frac{1}{U} = \sum \frac{1}{U_i}$.

Если наблюдается молекулярно-вязкостный режим течения, то проводимость элемента системы в этом режиме равна сумме проводимостей этого элемента в вязкостном и в молекулярном режимах.

Формулы для расчета проводимости элементов вакуумной системы приводятся в табл. 3.1. Во всей таблице T – температура газа, M – его молярная масса, x – показатель адиабаты (как правило, 1).

Таблица 3.1

Формулы для расчета проводимости элементов вакуумных систем

Элемент системы	Проводимость для вязкостного режима течения	Проводимость для молекулярного режима течения
Отверстие площадью A , разделяющее объемы с давлением P и P_c	$U_v = \frac{A}{1 - P/P_c} \times \sqrt{\frac{RT}{M} \cdot \frac{2x}{x-1} \cdot \left(\frac{P}{P_c}\right)^{1/x} \left[1 - \left(\frac{P}{P_c}\right)^{\frac{x-1}{x}}\right]}$	$U_m = 36,4A \sqrt{T/M}$
Длинный прямой трубопровод диаметром d и длиной l , причем d больше l как минимум в 15 раз, а температура воздуха равна 293 К. Давление на входе в трубопровод P_1 , на выходе из трубопровода P_2	$U_v = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \frac{P_1}{P_2}$	$U_m = 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{T/M}$
Изогнутый под углом ϕ трубопровод диаметром d и длиной l (по оси), причем d больше l как минимум в 15 раз, а температура воздуха равна 293 К. Давление на входе в трубопровод P_1 , на выходе из трубопровода P_2	$U_v = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \frac{P_1}{P_2}$	$U_m = 38,1 \frac{d^3}{l_{\text{расч}}} \sqrt{T/M}$ $l_{\text{расч}} = l + 2,6d \frac{\phi}{180}$

Пример расчета простейшей вакуумной системы

Расчет проводится для вакуумной системы, конструкция которой представлена на рис. 3.10.

Исходные данные.

Откачиваемый объем $V = 0,027 \text{ м}^3$.

Натекание от негерметичности $Q_{\text{НАТ}} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$.

Газовыделение поверхности камеры $q_n = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Газовыделение из объема изделий $q_{\Gamma} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг} \cdot \text{с}$.

Масса изделий в камере $I = 1 \text{ кг}$.

Поверхность камеры $F = 0,53 \text{ м}^2$.

Проницаемость камеры $q_{\text{ПР}} = 7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (материал камеры – нержавеющая сталь).

Длина трубы $l = 1 \text{ м}$, труба прямая.

Диаметр трубы $d = 0,02 \text{ м}$.

Перепад давления в трубопроводе отсутствует.

Рабочее давление в камере $p_{\text{РАБ}} = 10^{-6} \text{ Па}$.

Основной насос. Коэффициент $\nu = 2$ – насос высокого вакуума – криогенный.

Вспомогательный насос: коэффициент $\nu = 1,4$, насос – объемного действия.

Температура $T = 293 \text{ К}$.

1. *Определение суммарного потока газов.*

Поток газов от газовыделения изделий в камере

$$Q_{\text{ДИФ}} = q_{\Gamma} \cdot I = 1 \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газов с поверхности камеры

$$Q_{\text{ПОВ}} = q_n \cdot F = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,53 = 2,12 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газа из-за пропускания материала стенок камеры

$$Q_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}} \cdot F = 7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,53 = 3,71 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Суммарный поток:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{ПР}} + Q_{\text{НАТ}} + Q_{\text{ДИФ}} + Q_{\text{ПОВ}} = 3,71 \cdot 10^{-11} + 4 \cdot 10^{-7} + \\ + 1 \cdot 10^{-7} + 2,12 \cdot 10^{-7} = 7,12 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}.$$

2. Выбор основного насоса.

Необходимая быстрота откачки

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{p_{\text{РАБ}}} = \frac{7,12 \cdot 10^{-7}}{10^{-6}} = 0,712 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выбор высоковакуумного насоса

$$S_{\text{ВВ}} = v \cdot S_0 = 2 \cdot 0,712 = 1,42 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По каталогу (табл. 3.2) выбираем насос ВВ-1 с $S_{\text{ВВ}} = 2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Его предельное давление равно $p_{\text{ПРВВ}} = 9 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$, а давление запуска $p_3 = 1 \text{ Па}$.

3. Выбор вспомогательного насоса.

Для работы насоса ВВ-1 необходимо поддерживать на его выходе разрежение $p_3 = 1 \text{ Па}$.

Рабочее давление вспомогательного насоса равно

$$p_i = \frac{p_3}{\eta} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ Па}.$$

Эффективная быстрота откачки вспомогательным насосом

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{p_i} = \frac{7,12 \cdot 10^{-7}}{0,5} = 1,424 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Требуемая быстрота действия вспомогательного низковакуумного насоса

$$S_{\text{НВ}} = v \cdot S_0 = 1,4 \cdot 1,424 \cdot 10^{-6} = 1,99 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

По рассчитанным значениям из табл. 3.2 выбирается насос НВ-11 с быстротой действия $S_{\text{НВ}} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$, что превышает требуемую быстроту действия.

4. Расчет времени предварительной откачки.

Эффективная быстрота откачки вспомогательным насосом из п. 3 позволяет получить время откачки по формуле

$$t = \left(\frac{V}{S_{\text{НВ}}} \right) \ln \left(\frac{p_{\text{АТМ}}}{p_i} \right) = \left(\frac{0,027}{0,001} \right) \ln \left(\frac{101333}{0,5} \right) = 329 \text{ с.}$$

5. Расчет времени основной откачки.

Используя эффективную быстроту откачки основным насосом из п. 2,

$$t = \left(\frac{V}{S_{\text{ВВ}}} \right) \ln \left(\frac{p_i}{p_{\text{РАБ}}} \right) = \left(\frac{0,027}{2} \right) \ln \left(\frac{0,5}{10^{-6}} \right) = 0,177 \text{ с.}$$

6. Расчет проводимости трубопроводов вакуумной системы.

Определение механизма течения газа.

Предварительная откачка

$$\frac{p_{\text{АТМ}} + p_i}{2} \cdot d = \frac{101333 + 0,5}{2} \cdot 0,02 = 1013,3 \text{ (режим течения – вяз-}$$

костный).

Проводимость трубопровода

$$U_{\text{в}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \frac{P_1}{P_2} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{0,02^4}{1} \cdot 1 = 0,0002176 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Основная откачка

$$\frac{p_i + p_{\text{РАБ}}}{2} \cdot d = \frac{0,5 + 10^{-6}}{2} \cdot 0,02 = 0,005 \text{ (режим течения – молеку-}$$

лярный)

Проводимость трубопровода

$$U_{\text{м}} = 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{T/M} = 38,1 \frac{0,02^3}{1} \sqrt{293/29} = 0,00096 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Варианты для расчета простейшей вакуумной системы, состоящей из откачиваемого объема, трубопровода и одного насоса, содержатся в табл. 3.3.

Таблица 3.2

**Каталог насосов для использования
при расчете вакуумных систем**

Наименование	Тип	Быстрота работы, м ³ /с	Давление запуска, Па	Предельное давление, Па	Выпускное давление, Па
1	2	3	4	5	6
ВВ-1	Высоковакуумный	2	1,00	$9,00 \cdot 10^{-7}$	1,00
ВВ-2	Высоковакуумный	4	1,00	$5,00 \cdot 10^{-7}$	2,00
ВВ-3	Высоковакуумный	6	0,50	$2,00 \cdot 10^{-5}$	1,00
ВВ-4	Высоковакуумный	8	0,30	$4,00 \cdot 10^{-7}$	3,00
ВВ-5	Высоковакуумный	10	1,00	$6,00 \cdot 10^{-6}$	2,00
ВВ-6	Высоковакуумный	12	0,20	$7,00 \cdot 10^{-5}$	2,00
ВВ-7	Высоковакуумный	14	0,30	$8,00 \cdot 10^{-6}$	3,00
ВВ-8	Высоковакуумный	16	0,50	$9,00 \cdot 10^{-7}$	3,00
ВВ-9	Высоковакуумный	17	0,30	$2,00 \cdot 10^{-6}$	3,00
ВВ-10	Высоковакуумный	15	0,50	$3,00 \cdot 10^{-6}$	5,00
ВВ-11	Высоковакуумный	18	0,30	$1,00 \cdot 10^{-6}$	3,00
НВ-1	Низковакуумный	0,02	Атмосферное	0,20	Атмосферное
НВ-2	Низковакуумный	0,004	Атмосферное	0,10	Атмосферное
НВ-3	Низковакуумный	0,02	Атмосферное	0,30	Атмосферное
НВ-4	Низковакуумный	0,005	Атмосферное	0,20	Атмосферное
НВ-5	Низковакуумный	0,006	Атмосферное	0,20	Атмосферное

НВ-6	Низковакуумный	0,004	Атмосферное	0,30	Атмосферное
НВ-7	Низковакуумный	0,003	Атмосферное	0,30	Атмосферное
НВ-8	Низковакуумный	0,004	Атмосферное	0,30	Атмосферное
НВ-9	Низковакуумный	0,015	Атмосферное	0,50	Атмосферное
НВ-10	Низковакуумный	0,03	Атмосферное	0,50	Атмосферное
НВ-11	Низковакуумный	0,001	Атмосферное	0,50	Атмосферное

Таблица 3.3

**Варианты для расчета вакуумной системы
по времени откачки**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Откачиваемый объем, м ³	0,016	0,062	0,098	0,141	0,113	0,107	0,154	0,028	0,051	0,019
Натекание от негерметичности, м ³ ·Па/с	10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	3·10 ⁻⁶	4,5·10 ⁻⁷	2,5·10 ⁻⁷	6·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁷	8·10 ⁻⁷	9·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁷
Газовыделение стенок камеры, м ³ ·Па / м ² ·с	10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	3·10 ⁻⁶	3,5·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁷	6·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁷	8·10 ⁻⁷	9·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁷
Газовыделение изделий в камере, м ³ ·Па/кг·с	5·10 ⁻⁵	9·10 ⁻⁶	7·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁷	2,7·10 ⁻⁷	4·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁷
Масса изделий в камере, кг	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1,5
Площадь поверхности камеры, м ²	0,377	0,879	1,178	1,508	1,319	1,253	1,649	0,518	0,754	0,412
Длина трубы, м	1	1,2	1	1,1	0,9	0,8	0,5	1	1,3	1,5
Диаметр трубы, м	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
Рабочее давление, Па	1·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶	1,5·10 ⁻⁶	1,5·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁵	8,5·10 ⁻⁶
Коэффициент ν основного насоса	2	2	2	4	4	4	1,3	1,4	2	4
Коэффициент ν вспомогательного насоса	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,4	1,3

Задание № 4. Современные системы фильтрации воздуха для чистых помещений

Цели работы: ознакомление с современными системами фильтрации воздуха для чистых помещений; расчет концентрации аэрозолей в чистых помещениях; подбор фильтров для обеспечения заданной чистоты воздуха в чистых помещениях.

4.1. Аэрозольные загрязнители в чистых помещениях

Одним из основных аэрозольных загрязнителей в чистых помещениях являются твердые частицы. К ним относятся не только обычные пылевые частицы, но и вирусы, бактерии, пыльца растений и т. п. Оседая на поверхности полупроводниковых пластин, эти частицы нарушают электрический контакт между элементами ИС (или создают его), а также способны нарушить правильный ход ряда технологических процессов (например, фотолитографии). При этом химический состав частиц имеет существенно меньшее значение, чем их размер: из-за химической инертности кремния при температуре, близкой к комнатной, дефекты и паразитные электрические контакты формируются при перекрытии частицей проводящих дорожек, а не при протекании химических реакций.

Все частицы в фильтруемом воздухе можно классифицировать по размеру.

Размер определяет физическое поведение частиц в воздухе, возможность их попадания в чистое помещение, а также определяет методы задержания этих частиц при очистке воздуха.

Частицы размером порядка 100 мкм и более имеют следующие отличительные характеристики:

- быстро падают оседают на пол и горизонтальные поверхности;
- эффективно задерживаются в дыхательных путях и бронхах человека, не проникая в легкие. Опасны в очень больших концентрациях, увеличивают нагрузку на дыхательные пути, могут вызывать рак, аллергические реакции;
- задерживаются фильтрами грубой очистки (например, тканевыми);
- понижают выход годных при любых полупроводниковых технологических процессах;
- видны невооруженным глазом.

Источниками частиц размером 100 мкм и более являются неочищенный (уличный) воздух, одежда и обувь, применявшаяся вне чистого помещения, процессы шлифования и полирования и т. п.

Частицы размером порядка 10 мкм имеют следующие особенности: медленно оседают на пол и горизонтальные поверхности;

падают в легкие, но не попадают в зону газообмена и не всасываются в кровь. Засоряют легкие, могут вызывать рак, астму, аллергические реакции;

задерживаются фильтрами тонкой очистки (например, масляными); визуально не обнаруживаются;

уменьшают выход годных любых интегральных процессов, но слабо влияют на дискретные процессы.

Источниками частиц размером порядка 10 мкм является любое механическое технологическое оборудование с трущимися частями, а также мебель, включая стулья и столы, и персонал чистого помещения. Именно эти частицы должны постоянно удаляться из воздуха чистого помещения, так как их генерация внутри помещения не прекращается.

Частицы размером менее 1 мкм имеют следующие особенности:

очень медленно оседают на пол и горизонтальные поверхности. В спокойной атмосфере процесс осаждения может занять от нескольких дней до нескольких лет. В возмущенной атмосфере они могут никогда не осесть;

проникают в зону легких, отвечающую за газообмен. Через альвеолы могут всасываться в кровь, вызывая засорение сердечно-сосудистой системы, аллергические реакции, интоксикацию адсорбированными на поверхности частиц химическими соединениями;

задерживаются фильтрами высокой эффективности HEPA и абсолютными фильтрами;

не влияют на дискретные процессы, понижение выхода годных интегральных процессов зависит от топологической нормы.

Частицами размером порядка 1 мкм являются вирусы, мелкие бактерии, сажа, пары масла и т.п. Фильтрация этих частиц необходима, если в чистом помещении выполняются процессы с малой (микрон и меньше) топологической нормой.

Таким образом, атмосфера чистого помещения должна быть свободна от указанных частиц и качество очистки воздуха должно

быть тем выше, чем меньше топологическая норма. Очистка воздуха производится фильтрованием.

4.2. Фильтрация воздуха в чистых помещениях. Типы фильтров для чистых помещений

Фильтрация – основной способ поддержания заданной чистоты воздуха внутри чистых помещений. Фильтрация проходит обычно в несколько ступеней. Любая фильтрующая установка включает в себя фильтр грубой очистки для удаления частиц пыли диаметром больше 10 мкм и фильтр тонкой очистки для удаления частиц диаметром от 1 до 10 мкм. Иногда добавляют так называемый абсолютный фильтр для удаления сверхмалых частиц (например, вирусов) с размером меньше 1 мкм. Каждый источник пыли выделяет ее с определенной скоростью, и поэтому фильтрация воздуха должна осуществляться постоянно, чтобы концентрация частиц не превысила максимально-допустимую.

При работе любой фильтр загрязняется частицами из очищаемой среды, и в конце концов сам становится источником загрязнения, поэтому фильтры необходимо периодически заменять или проводить их очистку. Срок, в течение которого фильтр очищает технологическую среду и не выделяет в нее загрязнений, называется ресурсом фильтра. Повторное использование фильтрованного воздуха (вместо забора нового воздуха «с улицы») в чистом помещении позволяет сэкономить ресурс фильтра. Бактерии, попавшие в фильтры, могут там размножаться и выделяться в чистое помещение, поэтому необходимо предусмотреть возможность дезинфекции фильтров.

Любой фильтр создает перепад давления, оказывая сопротивление воздуху, причем чем больше степень очистки, тем больше этот перепад.

Эффективность очистки воздуха определяют по минимальному размеру частиц, который еще способен улавливать фильтр, и по количеству частиц этого размера, которое он пропускает в стационарных условиях. Например, стандартом EN779:2012 предусмотрена следующая классификация фильтров по эффективности (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Классификация фильтров по стандарту EN779:2012

Группа	Класс	Конечный перепад давления, Па	Средняя удерживающая способность (Am) синтетической пыли, %	Средняя эффективность (Em) удерживания частиц размером 0,4 мкм, %	Минимальная эффективность удерживания частиц размером 0,4 мкм, %
Грубой очистки	G1	250	50–65		
	G2	250	65		
	G3	250	65–80		
	G4	250	65–90		
Средней очистки	M5	450		40–60	
	M6	450		60–80	
Тонкой очистки	F7	450		80–90	35
	F8	450		90–95	55
	F9	450		95–100	70

Следует отметить, что стандарты, классифицирующие фильтры по эффективности, различаются в зависимости от страны. Например, в России эффективность очистки установлена стандартом ГОСТ Р 51251-99. Соответствие между классификациями фильтров по различным стандартам приводится в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Соответствие степеней очистки фильтров по различным стандартам

Степень очистки	Класс очистки			
	DIN 24184 DIN 24185	ГОСТ Р 51251-99	EN 779	EN 1822
1	2	3	4	5
Грубая	EU1	G1	G1	J60
	EU2	G2	G2	6070
	EU3	G3	G3	7080
	EU4	G4	G4	8090

1	2	3	4	5
Тонкая	EU5	F5	F5	9095
	EU6	F6	F6	9597
	EU7	F7	F7	9798
	EU8	F8	F8	9899
	EU9	F9	F9	99,8
Высокоэффективная (HEPA)	H10	H10	85	
	H11	H11	95	
	H12	H12	99,5	
	H13	H13	99,95	
	H14	H14	99,995	
Сверхвысокая (ULPA)	U15	U15	99,9995	
	U16	U16	99,99995	
	U17	U17	99,999995	

В табл. 4.3 представлены области применения различных фильтров, а также типы фильтров соответствующего класса, применяемых на производстве.

Таблица 4.3

Области применения фильтров в зависимости от их степени очистки

Степень очистки	Тип фильтра	Применение
1	2	3
Грубая	ФВФ ФВП-I, ФВП-II ФВПМет-I, ФВПМет-II ФВК ФВКас-III	Фильтры грубой очистки в помещениях и процессах с низкими требованиями к чистоте воздуха. Предварительная очистка в системах вентиляции и центрального кондиционирования. Применяются при эксплуатации компрессоров, холодильных машин в условиях большой запыленности
Тонкая	ФВКас-S ФВК-Meltblows ФВК-Meltblows с предфильтром ФВК-Carb ФВКом ФВКом-W	Фильтры тонкой очистки воздуха в системах кондиционирования и вентиляции. Очистка циклового воздуха газотурбинных агрегатов. Применяются в качестве фильтров второй ступени очистки (доочистки). Используются в больничных палатах, административных зданиях, гостиницах, при производстве продуктов питания, лекарств, в электронной, мясомолочной промышленности и т. п.

1	2	3
Высоко-эффективная (HEPA)	ФВА-I ФВА-II ФВА-НС ФВА-ТМ-HOOD	Фильтры абсолютной очистки применяются для чистых зон, чистых помещений. В фармацевтической и электронной промышленности, в качестве «финишных» фильтров, для решения проблем санитарии, гигиены и микроклимата в лечебных учреждениях (операционные); на АЭС; при производстве продуктов питания (бродильные отделения), лекарств и т. п.
Сверх-высокая (ULPA)	ФВА-I ФВА-II	Фильтры окончательной очистки воздуха в помещениях с самыми высокими требованиями к чистоте воздуха

«Абсолютные» фильтры значительно более эффективны, чем любые другие, и способны очищать воздух от всех частиц размером 0,3 мкм и более, однако современные производственные фильтрующие системы являются многоступенчатыми и включают фильтры различных степеней очистки. Это происходит по следующей причине: если предусмотреть в системе только фильтры высокой очистки, то их ресурс будет в несколько раз меньше номинального (при наличии всех ступеней очистки), так как они будут засоряться частицами всех размеров (а не тех, для которых фильтр сконструирован). Таким образом, ступенчатая система очистки работает не только эффективнее (лучше задерживает частицы), но и дольше не требует вмешательства.

Рассмотрим различные типы фильтров.

Фильтры грубой и средней очистки применяются для захвата частиц размером от 10 мкм и больше. Устройство типичного фильтра грубой очистки представлено на рис. 4.1.

Различают несколько вариантов исполнения фильтров грубой очистки.

Механические фильтры обычно представляют собой мелкую сетку или волокнистую ткань и служат для предварительной очистки воздуха от довольно крупных загрязнений. Например, кассетный фильтр ФВКас (одноразовый) представляет собой рамку из оцинкованного профиля и фильтрующий материал, прикрепленный к гофрированной металлической сетке. Класс очистки, который обеспечивают эти устройства, – G3-G4.

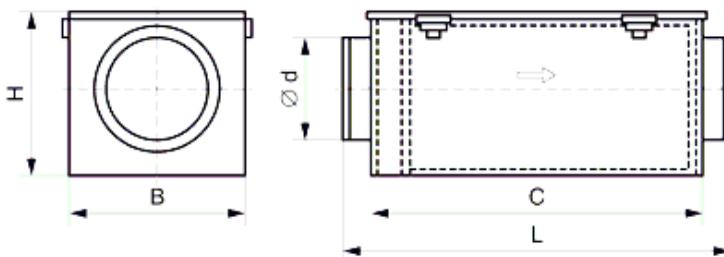


Рис. 4.1. Фильтр грубой очистки для круглых каналов типа ФВК производства фирмы «Лиссан-Юг» (фильтрующий элемент имеет вид карманов из плотной ткани)

Летучие и полуметучие органические соединения лучше других улавливают *угольные фильтры*. Эффективность их работы определяется количеством фильтрующего материала: чем больше микропор содержится в угле, тем больше газа и запахов можно устранить. Однако эти фильтры боятся высокой влажности и не очень эффективны для удаления формальдегида, сернистого ангидрида и диоксида азота. В таких случаях применяют хемосорбенты, такие как оксид и силикат алюминия, перманганат калия, которые химически разлагают опасные примеси на безвредные вещества.

В *масляных фильтрах* фильтрующий слой состоит из металлических сеток, перфорированных пластинок или колец, смоченных минеральным маслом. Пыль задерживается за счет взаимодействия с масляной пленкой. Достоинством этих фильтров является возможность легкой очистки путем промывки в чистом масле.

Фильтрующий слой *губчатых фильтров* состоит из губчатого пенополиуретана, резины или подобных материалов, подвергнутых обработке, способствующей раскрытию пор.

Фильтры тонкой очистки. Чаще всего для тонкой очистки используются карманные фильтры из полиэстера (класс F5 по ГОСТ Р 51251-99) или полипропиленовых волокон (класс F6, F8, F9), которые представляют собой рамку с фильтрующей тканью, причем ткань образует крупные складки (карманы), что увеличивает активную поверхность фильтра. Работать с максимальной эффективностью фильтрам класса F6, F8 позволяет использование нитевого сепаратора, который устанавливается перед фильтрующим элементом и отделяет крупные частицы. Компакт-фильтры тонкой очистки (ФВКом) отличаются малым весом, компактными размерами, простотой установки, более качественной фильтрацией и высокой производительностью – до 5000 м³/ч. Как правило, фильтры тонкой очистки (и другие фильтры) имеют кассетную конструкцию, которая позволяет быстро и без нарушения процесса фильтрации заменять загрязненный фильтровальный материал.

Фильтры абсолютной очистки. К фильтрам этого класса относятся устройства с маркировкой H10...H14, U15...U17. В качестве фильтрующего материала в них используется гофрированное стекловолокно. Принцип задержания частиц в HEPA фильтрах основан не на ограничении способности частиц проникать в промежутки между волокнами (когда размеры пор/ячеек фильтра меньше размеров фильтруемых частиц – «эффект сита»), а в изменении линий воздушного потока, когда эффекты инерции, зацепления и диффузии задерживают пыль в фильтре. Из-за того, что задержание частиц основывается на адгезии к фильтрующим волокнам, для бесперебойной работы фильтров этого типа чрезвычайно важно обеспечить постоянный по времени поток воздуха при жестко контролируемой влажности и турбулентности. Если указанные параметры будут колебаться, задержанные частицы будут выделяться из фильтра. Кроме того, за счет адгезии фильтры HEPA могут задерживать частицы размером порядка 0,05 мкм, так как они «слипаются» между собой после адгезии на фильтрующем материале фильтра.

Фильтры HEPA (TrueHEPA) (аббревиатура от англ. High Efficiency Particulate Arresting – высокоэффективная задержка частиц) изначально разрабатывались для систем вентиляции в медицинских учреждениях и помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха. Согласно международной классификации существует

5 классов HEPA фильтров: H10, H11, H12, H13 и H14. Чем выше класс, тем лучше качество фильтрации.

HEPA-фильтр задерживает более 99 % всех частиц величиной более 0,3 мкм. Еще более совершенными являются фильтры ULPA (Ultra Low Penetrating Air), способные улавливать до 99,999 % частиц диаметром более 0,1 мкм. Принцип их действия тот же, что и у моделей HEPA.

Электростатические фильтры хорошо очищают воздух от пыли и копоти, но не освобождают от летучих органических соединений. Работают они так: в результате столкновений с воздушными ионами, образованными проволочными коронирующими электродами, пылинки получают заряд и затем, под действием кулоновских сил, осаждаются на специальной пластинке.

Фотокаталитические фильтры появились на рынке относительно недавно. Очистка воздуха в них происходит путем разложения и окисления примесей под действием ультрафиолетового излучения. Фильтр одинаково хорошо избавляет воздух от токсинов, вирусов, бактерий и неприятных запахов.

4.3. Расчет концентрации аэрозолей в чистом помещении

Для того, чтобы правильно подобрать фильтры для чистого помещения, необходимо рассчитать концентрацию аэрозоля (твердых пылинок, капель жидкости и т. п.) в этом помещении. Для получения значения концентрации пыли в чистом помещении применяются следующие допущения.

1. Количество образующихся в помещении аэрозолей постоянно.
2. Расход вентиляционного воздуха постоянен.
3. Коэффициент фильтрации очистных фильтров не меняется со временем.

Основные физические величины, используемые для расчета:

V – объем помещения, м³;

t – время, ч;

C – концентрация аэрозоля в помещении, мг/м³;

$C_{t=0}$ – начальная концентрация аэрозоля в помещении, мг/м³;

$C_{t \rightarrow \infty}$ – концентрация аэрозоля в стационарных условиях, мг/м³;

C_0 – концентрация аэрозоля во внешней среде, мг/м³;

C_s – концентрация аэрозоля в помещении после фильтрации, мг/м³;

η – коэффициент фильтрации очистных фильтров;

Q_0 – общий объем подаваемого в помещение воздуха (объем циркуляции), м³/ч;

Q_s – объем фильтруемого воздуха, м³/ч;

M – количество выделяющейся в помещении пыли, мг/ч;

X – общее количество пыли в помещении, мг;

N – кратность воздухообмена;

t – постоянная, характеризующая условия перемешивания.

Концентрация аэрозолей в помещении составляет

$$C = X / V.$$

Если за бесконечно малый промежуток времени dt концентрация изменится на dC , то

$$dX = V \cdot dC.$$

Количество аэрозолей, выделившееся за это время, равно $M \cdot dt$, а изменение количества аэрозолей вследствие притока внешнего воздуха равно $-(C - C_0)Q_0 \cdot dt$. При этом уменьшение количества аэрозолей из-за фильтрации составляет $-(C - C_s)Q_s \cdot dt$. Так как $\eta = (C - C_s) / C$, то уменьшение количества аэрозолей за счет фильтрации составляет $-C\eta Q_s \cdot dt$. Поэтому общее изменение количества аэрозолей в помещении равно

$$dX = V \cdot dC = M \cdot dt - (C - C_0)Q_0 \cdot dt - C\eta Q_s \cdot dt.$$

Интегрируя это выражение, получим

$$\int_{C_{t=0}}^C \frac{-V \cdot dC}{C(Q_0 + \eta Q_s) - (C_0 Q_0) + M} = \int_0^t dt.$$

Тогда

$$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right) + \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + \eta Q_s} \left(1 - \exp\left(-\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right)\right).$$

При стационарном состоянии ($t \rightarrow \infty$) получим

$$C_{t \rightarrow \infty} = \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + \eta Q_s}.$$

В зависимости от различных условий вентиляции по этим двум формулам можно получить концентрацию аэрозолей практически во всех случаях. Основные случаи приводятся в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Расчет концентрации аэрозолей для различных условий

Условие	Текущее значение концентрации в момент времени t	Стационарная концентрация $C_{t \rightarrow \infty}$
$C_0 = 0$	$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right) + \frac{M}{Q_0 + \eta Q_s} \left(1 - \exp\left(\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right)\right)$	$C_{t \rightarrow \infty} = \frac{M}{Q_0 + \eta Q_s}$
$M = 0$	$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right) + \frac{C_0 Q_0}{Q_0 + \eta Q_s} \left(1 - \exp\left(\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right)\right)$	$C_{t \rightarrow \infty} = \frac{C_0 Q_0}{Q_0 + \eta Q_s}$
$\eta = 1, C_0 = 0$	$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{Q_0 + Q_s}{V} t\right) + \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + \eta Q_s} \left(1 - \exp\left(\frac{Q_0 + Q_s}{V} t\right)\right)$	$C_{t \rightarrow \infty} = \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + Q_s}$
$C_{t=0} = 0$	$C = C \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + \eta Q_s} \left(1 - \exp\left(\frac{Q_0 + \eta Q_s}{V} t\right)\right)$	$C_{t \rightarrow \infty} = \frac{C_0 Q_0 + M}{Q_0 + \eta Q_s}$
$M = 0, Q_s = 0$	$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{Q_0}{V} t\right)$	$C_{t \rightarrow \infty} = 0$
$C = 0, M = 0, C_s = 0, \eta = 1$	$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{Q_0 + Q_s}{V} t\right)$	$C_{t \rightarrow \infty} = 0$

4.4. Подбор фильтров для систем очистки воздуха в чистом помещении

Для подбора фильтров в чистом помещении необходимо определить кратность воздухообмена (сколько раз в единицу времени весь воздух в чистом помещении меняется целиком).

Кратность воздухообмена рассчитывают по формуле

$$N = Q_0 t / V.$$

Если воздух перемешивается равномерно, то, приняв во внимание, что коэффициент перемешивания $m = 1/3 \dots 1/10$, будет истинно выражение

$$C = C_{t=0} \exp\left(-\frac{\eta Q_s m}{V} t\right).$$

Основа расчета – баланс притока и уноса микрочастиц внутри помещения. Для выполнения расчетов реальных систем фильтрации и определения производительности фильтров используются следующие допущения.

1. Концентрация аэрозолей во внешнем воздухе, мощность источников пыли в помещении и другие параметры, характеризующие приток и унос микрочастиц, постоянны.

2. Аэрозоли распределены равномерно по всему объему помещения, и частицы, поступающие в систему, диффундируют с бесконечно большой скоростью.

3. Распределение частиц по размерам и их плотность внутри и вне помещения одинаковы.

4. Самоочистка воздуха (например, при осаждении частиц) пренебрежимо мала.

5. Осаждение микрочастиц в трубопроводах и диффузия их от стенок трубопроводов в воздух пренебрежимо малы.

Рассмотрим расчет системы очистки воздуха, схема которой приводится на рис. 4.2.

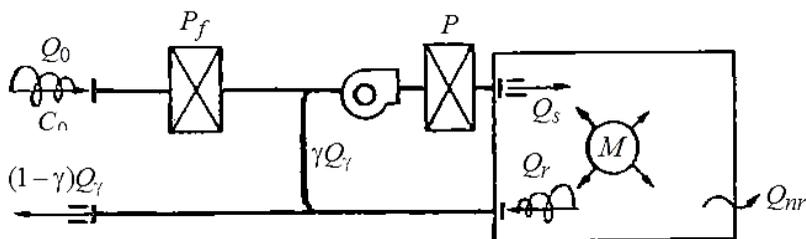


Рис. 4.2. Схема системы очистки воздуха
(значения параметров приводятся в тексте)

Основные параметры систем очистки воздуха:

Q_0 – приток атмосферного воздуха, м³/ч;

Q_r – объем циркулирующего воздуха, м³/ч;

Q_{ns} – естественный приток, м³/ч;

γ – коэффициент рециркуляции;

C_n – концентрация аэрозолей в приточном воздухе, мг/м³;

M – количество аэрозолей, выделяющихся внутри помещения, мг/ч;

P_f – коэффициент фильтрации фильтра предварительной очистки;

P_m – коэффициент уноса промежуточного фильтра;

P_c – коэффициент уноса фильтров чистого помещения;

Q_s – объем приточного воздуха, м³/ч;

Q_{nr} – объем воздуха, удаляемого естественной конвекцией, м³/ч;

Q_y – производительность фильтрующего оборудования внутри помещения, м³/ч,

C_0 – концентрация аэрозоля во внешнем воздухе, мг/м³;

C – концентрация аэрозолей внутри помещения, мг/м³;

P – коэффициент уноса основного фильтра, $(1-\eta)$;

V – объем помещения, м³;

Q'_y – производительность фильтров внутри помещения, м³/ч.

Приток частиц в помещение складывается из частиц, прошедших через фильтры $(P(P_f C_0 Q_0 + C \gamma Q_r))$; поступающих с внешним воздухом, самопроизвольно проникающим в помещение $(C_0 Q_{ns})$; выделяющихся внутри помещения (M) .

**Параметры систем очистки воздуха
(в соответствии с рис. 4.3)**

№	Концентрация аэрозолей внутри помещения	Коэффициент фильтрации фильтра
1	$C = \frac{(PQ_0 + Q_{ns})C_0 + M}{(1 - P\gamma)Q_r + Q_{nr}}$	$P = \frac{C(Q_r + Q_{nr}) - C_0Q_{ns} - M}{C_0Q_0 + C\gamma Q_r}$
2	$C = \frac{(PP_fQ_0 + Q_{ns})C_0 + M}{(1 - P\gamma)Q_r + Q_{nr}}$	$P = \frac{C(Q_r + Q_{nr}) - C_0Q_{ns} - M}{P_f C_0 Q_0 + C\gamma Q_r}$
3	$C = \frac{(P_f Q_0 + Q_{ns})C_0 + M}{(1 - P\gamma)Q_r + Q_{nr}}$	$P = \frac{C(Q_r + Q_{nr}) - C_0(P_f Q_0 + Q_{ns}) - M}{C\gamma Q_r}$
4	$C = \frac{(PQ_0 + Q_{ns})C_0 + M}{(1 - P\gamma)Q_r + Q_{nr} - P_c Q'_r + Q'_r}$	$P = \frac{C(Q_r + Q_{nr} + Q'_r + P_c Q'_r) - C_0Q_{ns} - M}{C_0Q_0 + C\gamma Q_r}$ $P_c = \frac{C(Q_r + Q_{nr} + Q'_r - P\gamma Q_r) - C_0(PQ_0 + Q_{ns}) - M}{CQ'_r}$

Однако даже хорошо спроектированная система очистки воздуха будет неэффективно работать, если не предусмотреть средства очистки воздуха внутри помещения, а также средства локализации выбросов пыли (например, боксы и локальные вытяжки для «пылящего» оборудования). Эффективно работающая система вентиляции сама по себе способна «выдувать» загрязнения из чистой зоны за счет разницы давлений (в чистой зоне – больше, в «грязной» – меньше), увеличивая таким образом ресурс фильтров в чистой зоне. Естественная циркуляция воздуха может как улучшить, так и ухудшить работу системы очистки.

Работа облегчается благодаря правильному проектированию чистых помещений (установка перегородок и создание воздушных завес); применению специальных материалов с малым выделением пыли (например, металлы вместо дерева, фторопласт и др.); а также неукоснительному соблюдению производственной дисциплины (например, использование спецодежды и разработка алгоритмов работы, при которых персонал совершает как можно меньше движений).

Варианты для расчета систем очистки см. в табл. 4.6.

Таблица 4.6

**Варианты для расчета коэффициента фильтрации фильтров
в системах очистки**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_0 , м ³ /ч	100	150	110	170	150	180	200	90	180	70
Q_r , м ³ /ч	200	200	200	200	200	200	210	100	200	100
Q_{ns} , м ³ /ч	2	3	2	4	5	1	1	1	1	1
γ	0,5	0,6	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,8	0,9	0,95
M , мг/ч	0,1	0,5	0,8	1	2	1	3	4	0,5	0,8
P_f	–	0,95	0,95	–	–	0,99	0,99	–	–	0,99
Q_{nr} , м ³ /ч	1	2	3	1	2	4	1	1	1	1
C_0 , мг/м ³	100	150	200	120	100	180	70	80	90	150
C , мг/м ³	0,01	0,02	0,03	0,05	0,2	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1
V , м ³	300	400	500	450	300	350	450	350	300	380
Q'_r , м ³ /ч	–	–	–	50	–	–	–	60	–	–
Номер схемы по рис. 4.3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2

Список рекомендуемых источников

1. Альперт, Л. З. Основы проектирования химических установок / Л. З. Альперт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. школа, 1989. – 304 с.
2. Блинов, И. Г., Кожитов, Л. В. Оборудование полупроводникового производства : учеб. пособие для студентов вузов / И. Г. Блинов, Л. В. Кожитов. – Москва : Машиностроение, 1986. – 264 с.
3. Вредные вещества в промышленности : справочник для химиков, инженеров и врачей / под ред. Н. В. Лазарева, Э. Н. Левиной. – 7-е изд., перераб. и доп. – В 3-х т. – Ленинград : Химия, 1976. – Т. 3. – 608 с.
4. Вредные вещества в промышленности : справочник для химиков, инженеров и врачей / под ред. Н. В. Лазарева, Э. Н. Левиной. – 7-е изд., перераб. и доп. – В 3-х т. – Ленинград : Химия, 1976. – Т. 1. – 592 с.
5. Вредные вещества в промышленности : справочник для химиков, инженеров и врачей / под ред. Н. В. Лазарева, Э. Н. Левиной. – 7-е изд., перераб. и доп. – В 3-х т. – Ленинград, Химия, 1976. – Т. 2. – 624 с.
6. Коростовенко, В. В. Процессы и аппараты защиты атмосферы / В. В. Коростовенко, В. А. Стрекалова, Т. А. Стрекалова. – Красноярск : Сибир. федер. ун-т, 2008. – 89 с.
7. Пипко, А. И. Конструирование и расчет вакуумных систем / А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Е. А. Пенчко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1970. – 504 с.
8. Плисковский, В. Я. Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем / В. Я. Плисковский. – Москва : Машиностроение, 1976. – 64 с.
9. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника : учебник для вузов по специальности «Вакуумная техника» / Л. Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. школа, 1990. – 320 с.
10. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А. С. Тимонин. – 2-е изд. – В 2-х т. – Калуга : Изд-во Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – 1017 с.

Оглавление

Задание № 1. Основные газообразные технологические среды для полупроводникового производства, их основные характеристики и защита от их вредного влияния	3
1.1. Основные газообразные технологические среды.....	3
1.2. Опасность технологических сред.	
Классы опасности технологических сред	5
1.3. Защита от основных газообразных технологических сред и действия в случае их утечки	8
1.4. Метод расчета насадочного скруббера для очистки газообразных технологических сред от примесей	17
Задание № 2. Испарительные источники газообразных технологических сред. Расчет дозатора барботажного типа	25
2.1. Основные конструкции испарительных источников технологических сред	25
2.2. Расчет дозатора барботажного типа	27
Задание № 3. Вакуумные системы и их расчет	34
3.1. Вакуумные системы и их строение.....	34
3.2. Основные детали вакуумных систем.....	35
3.3. Практическая часть – метод расчета вакуумной системы.....	45
Задание № 4. Современные системы фильтрации воздуха для чистых помещений	55
4.1. Аэрозольные загрязнители в чистых помещениях	55
4.2. Фильтрование воздуха в чистых помещениях.	
Типы фильтров для чистых помещений	57
4.3. Расчет концентрации аэрозолей в чистом помещении	63
4.4. Подбор фильтров для систем очистки воздуха в чистом помещении.....	66
Список рекомендуемых источников	71

Учебное издание

БАЛОХОНОВ Дмитрий Валентинович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ

Пособие

для студентов специальности

1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов
электронной техники»

Редактор *Т. В. Мейкуане*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 21.11.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 4,19. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 100. Заказ 472.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.