



ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ



ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ

Под редакцией академика РАН А. С. Сигова

2-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом
высшего образования в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим
направлениям и специальностям*

*Допущено Министерством образования и науки РФ в качестве
учебного пособия для студентов машиностроительных
и приборостроительных специальностей и вузов*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2016

Авторы:

Ивашов Евгений Николаевич — доктор технических наук, академик РАЕН, заслуженный работник высшей школы РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор Департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;

Лучников Петр Александрович — заведующий лабораторией технологических исследований Национального исследовательского института информатики Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники;

Сигов Александр Сергеевич — доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой физики конденсированного состояния Института электроники Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники;

Степанчиков Сергей Валентинович — кандидат технических наук, доцент кафедры Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Рецензенты:

Васичев Б. Н. — доктор физико-математических наук, профессор Российской экономической академии имени Г. В. Плеханова;

Глазунов В. А. — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук.

Теория механизмов и машин. Проектирование элементов и устройств технологических систем электронной техники : учебник для бакалавриата и магистратуры / Е. Н. Ивашов [и др.] ; под ред. А. С. Сигова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 369 с. — Серия : Авторский учебник.

ISBN 978-5-9916-6414-1

В учебнике рассмотрены общие и специальные вопросы проектирования элементов и устройств технологических систем электронной техники — вакуумных систем оборудования тонкопленочной технологии, вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, магнитных и электромагнитных систем вакуумного технологического оборудования, *l*-координатных исполнительных устройств, устройств на основе волнового движения и вводов движения в вакуум, опорных узлов, различных передаточных механизмов, трибосопряжений с модифицирующими полимерными покрытиями, электростатических крепежных устройств, а также вопросы расчета функциональных систем вакуумного оборудования на привносимый уровень загрязнений, газовыделения и др.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Учебник рассчитан на широкий круг студенческой аудитории, занимающейся изучением оборудования электронной техники, может быть использован инженерно-техническими и научными работниками при конструировании оборудования и приборов для работы в условиях пониженного атмосферного давления и вакуума, а также дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства.

УДК 621.865.8(075.8)

ББК 32.85я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Коллектив авторов, 2011

© Коллектив авторов, 2015, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2016

ISBN 978-5-9916-6414-1

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем учебнике рассмотрены общие и специальные вопросы проектирования элементов и устройств технологических систем электронной техники — вакуумных систем оборудования тонкопленочной технологии, вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, магнитных и электромагнитных систем вакуумного технологического оборудования, l — координатных исполнительных устройств и узлов трения для работы в условиях вакуума, устройств на основе волнового движения и вводов движения в вакуум, опорных узлов, различных передаточных механизмов, трибосопряжений с модифицирующими полимерными покрытиями, электростатических крепежных устройств для захватов манипуляторов, вопросы расчета функциональных систем вакуумного оборудования на привносимый уровень загрязнений и газовыделение, а также вопросы расчета вероятности безотказной работы элементов механических систем, функциональных систем вакуумного оборудования на привносимый уровень загрязнения и газовыделения и др.

В работе приняли активное участие молодые ученые. Так, гл. 2, 4, 5 и 16 составлены совместно с П. С. Кузнецовым, а гл. 11 — совместно с А. А. Рогачевым.

Учебник предназначен для студентов академического бакалавриата и магистратуры, занимающихся изучением оборудования электронной техники, может быть использован инженерно-техническими и научными работниками при конструировании оборудования и приборов для работы в условиях пониженного атмосферного давления и вакуума, а также дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства.

В результате изучения материалов учебника студент должен:

- **знать** предмет, цели и задачи проектирования элементов и устройств технологических систем электронной техники; положения и теоретические основы динамики твердого тела с использованием аналитических и численных методов решения, основных положений молекулярно-механической теории трения, кинетики выделения газов из очагов трения в вакууме; особенности и отличительные признаки методик прямых и косвенных измерений методом тензометрии с последующей обработкой результатов методами теории вероятностей и математиче-

ской статистики; понятийный и категориальный аппарат для освоения новых методов исследования; профессиональные требования к поиску и синтезу новых конкурентоспособных технических решений устройств электронной техники и технологий их производства для достижения лидирующих позиций на рынке; взгляды и подходы к планированию и реализации технико-технологических новшеств в электронике на этапах инновационной деятельности; современные представления о методах математического и компьютерного моделирования; историю, логику и тенденции развития электронной техники;

- **уметь** обобщать и синтезировать, анализировать и верифицировать, оценивать полноту информации в ходе профессиональной деятельности; идентифицировать и классифицировать, восполнять и синтезировать недостающую информацию и работать в условиях неопределенности; анализировать и интерпретировать проектно-конструкторскую документацию на объекты электронной техники в соответствии с методологическими и нормативными требованиями; разрабатывать и осуществлять синтез новых конкурентоспособных технических решений устройств электронной техники и технологий их производства для достижения лидирующих позиций на рынке; разрабатывать и осуществлять применение современных компьютерных и информационных технологий при проектировании технологических систем электронной техники; решать задачи, связанные с организацией и управлением многосторонними коммуникациями; использовать полученные знания о системном подходе к проектированию и конструированию устройств электронной техники на стадиях технического предложения, эскизного, технического и рабочего проектов с учетом экономической целесообразности, соблюдения правил охраны здоровья и требований экологической безопасности;

- **владеть** методами проведения теоретических и экспериментальных исследований устройств электронной техники; современными технологиями производства и применения устройств электронной техники; спецификой микроэлектронного производства; навыками системного анализа современных требований к электронному производству; навыками поиска информации, необходимой для авторского сопровождения, диагностики и контроля материалов и устройств электронной техники на производственном и эксплуатационном этапах; навыками разрешения проблем, возникающих в ходе организации проектного коллектива.

Глава 1

ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

На современном этапе развития вакуумного оборудования тонкопленочной технологии важными факторами является:

- автоматизация процесса напыления тонкопленочных покрытий;
- совместимость различных технологических операций в одном рабочем вакуумном объеме (камере) либо в объемах, соединенных между собой шлюзами и транспортирующими устройствами;
- изолирование подложки с пленочным покрытием на всех стадиях ее обработки от воздействия окружающей среды.

Однако независимо от выбранного способа испарения (распыления) исходного материала и конкретного назначения изделия вакуумное оборудование для изготовления тонкопленочных структур имеет много общих систем.

В основу технологического процесса нанесения пленок в вакууме положен принцип испарения исходного вещества (материала) в камере и конденсации молекулярного потока (осаждения) на поверхности рабочей подложки. Это реализуется в вакуумных установках при использовании различных систем испарения исходного вещества под воздействием температуры или различных видов энергетических воздействий (электронов, плазмы, ионов, лазерного излучения и др.). Вместе с тем для обеспечения и поддержания необходимых требуемых условий конденсации паров испаряемого вещества на подложке, в виде тонкопленочного покрытия, в установке создается система нагрева, контроля и регулирования температуры подложки.

Для поддержания требуемого состава такой газовой среды в рабочем технологическом объеме установки создается система

напуска рабочего газа с предварительной его очистки или подготовки смеси газов заданной пропорции.

Для контроля качества пленочного покрытия на подложке, в процессе осаждения, установка оснащается системой измерения ряда его параметров таких, как толщина, электрическое сопротивление, оптическое пропускание и др.

1.1. Механические системы, управляющие молекулярным потоком

Отдельной группой стоят различные механические системы, обеспечивающие управление молекулярным потоком испаренного вещества, манипулирование подложками в процессе их технологической обработки, а также системы транспортирования готовых изделий и заготовок. Совокупность всех этих систем представлена на типичной схеме вакуумной установки для нанесения оптических покрытий на рис. 1.1.

Вакуумный технологический объем установки проектируется с учетом длины свободного пробега молекул в технологическом объеме при данном рабочем давлении. При давлениях $10^{-7} \dots 10^{-2} \text{ Па}$ газа разряженной воздушной среды длина свободного пробега молекул вещества находится в пределах $5 \dots 5 \cdot 10^5 \text{ см}$.

Известно, что степень неравномерности наносимого вакуумного покрытия по толщине на поверхности ряда подложек приемного свода тем меньше, чем больше расстояние между поверхностью испарения исходного вещества и подложками. Поэтому увеличение равномерности по толщине покрытия в технологической схеме одновременно обрабатываемых подложек достигается путем увеличения расстояния испаритель-подложка, что существенно уменьшает скорость осаждения покрытия. Такое очевидное противоречие вынуждает повышать мощность испарительных систем для сохранения производительности технологического процесса.

При выборе размеров рабочего вакуумного объема установки следует учитывать техническое обстоятельство – большие размеры технологического объема требуют увеличения произ-

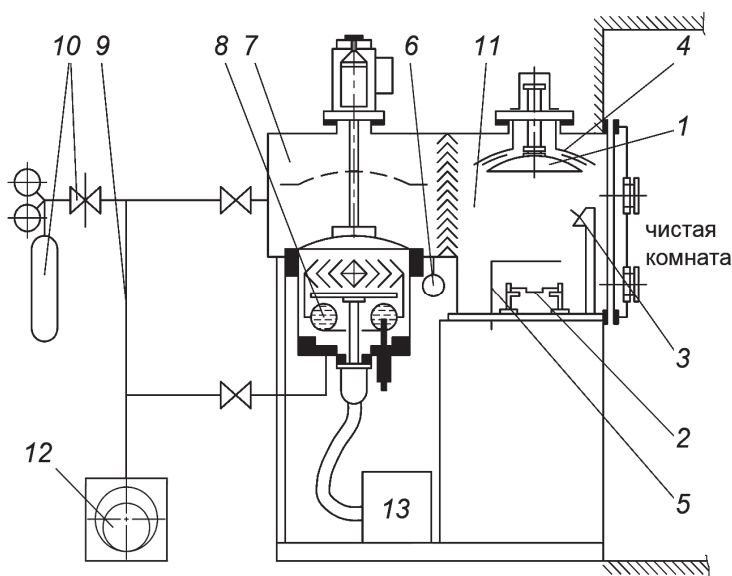


Рис. 1.1. Структурная схема типичной установки вакуумного нанесения оптических покрытий: 1 – приемный свод с подложками; 2 – испаритель; 3 – измеритель толщины покрытия в процессе нанесения; 4 – нагреватель подложек; 5 – заслонка; 6 – манометрический датчик; 7 – высоковакуумный затвор; 8 – сверхвысокововакуумный насос; 9 – линия форвакуумной откачки; 10 – система напуска и поддержания давления в технологическом объеме на заданном уровне; 11 – технологический объем (камера); 12, 13 – форвакуумные насосы.

водительности насосов вакуумной системы. Поэтому компактность технологического объема установки определяет компактность всей установки в целом.

Требуемая степень разрежения в рабочем объеме технологической установки определяется, прежде всего, допустимым

уровнем загрязнения наносимой пленки остаточными газами. При обычных вакуумных условиях на подложке за время нахождения ее в рабочем объеме могут образоваться десятки монослоев остаточного газа, которые затем "замуровываются" конденсатом вещества. Следовательно, в объеме должно быть предусмотрено устройство предварительной обработки поверхности подложек перед нанесением покрытия. В процессе осаждения пленочное покрытие насыщается молекулами остаточного газа в значительно меньшей степени. Это объясняется, во-первых, тем, что плотность молекулярного потока всегда больше плотности остаточной газовой среды в процессе осаждения, во-вторых, тем, что не все молекулы остаточной газовой среды, поступившие на поверхность подложки, остаются на ней, часть из них испаряется с поверхности, поступая обратно в объем, и, наконец, в-третьих, над поверхностью конденсации образуется облако распаренного материала тонкопленочной структуры, которое экранирует саму поверхность от попадания на нее молекул остаточной газовой среды. Именно поэтому увеличение скорости осаждения пленки снижает количество газовых включений в ней.

1.2. Элементы вакуумных систем промышленных установок

Вакуумные системы промышленных установок для тонкопленочной технологии выбираются в зависимости от величины и конструкции рабочего объема, газовых потоков в процессе осаждения тонкопленочной структуры и состава остаточной газовой среды. Конструктивное оформление вакуумной системы определяется особенностями всей технологической установки, наличием шлюзовых систем, транспортирующих устройств, отдельно выполненных испарительных камер и т. д. На практике в качестве высоковакуумных откачных средств широко используются четыре типа насосов: диффузионные паромасляные насосы, турбомолекулярные насосы, криогенные и геттерные насосы. Они способны создавать разрежение в вакуумной рабочей камере установок в пределах от $\sim 10^{-1} \dots 10^{-8}$ Па.

Диффузионные паромасляные насосы относятся к высоковакуумным средствам откачки. В системах вакуумного оборудования они получили широкое применение в технологических вакуумных системах благодаря их простоте конструкции и низкой стоимости. Откачиваемый газ захватывается струей паров рабочей жидкости, истекающей из сопел насоса, затем выбрасывается через выходной патрубок к форвакуумному насосу. Форвакуумный насос необходим в технологических вакуумных установках для обеспечения предварительной откачки вакуумной системы

Диффузионные паромасляные насосы обладают способностью откачивать все виды газов и газовые смеси с постоянной скоростью откачки в течение длительного времени без необходимости регенерации рабочей масляной среды. Существенным недостатком всех диффузионных насосов – наличие обратного потока паров рабочей жидкости. Применение в качестве рабочей среды кремнийорганических масел с низким давлением насыщенных паров снижает поток паров рабочей жидкости в вакуумный технологический объем установки.

Практика эксплуатации диффузионных паромасляных насосов показывает, что в откачиваемый объем по сечению выходного отверстия насоса в среднем поступает $(1...5) \cdot 10^{-3} \text{ мг/ч} \cdot \text{см}^2$, а в механических форвакуумных насосах составляет $(5...150) 10^{-3} \text{ мг/ч} \cdot \text{см}^2$, в зависимости от скорости откачки и давления.

Следует отметить, что масляные средства откачки практически полностью исключают проведение эпитаксиальных процессов в вакууме, приводят к увеличению удельных давлений и температур нагрева при диффузионной сварке в вакууме, значительно увеличивают величину минимальной толщины сплошного носимого покрытия и существенно ухудшают электрические характеристики этих покрытий.

Турбомолекулярные насосы широко используются в промышленных вакуумных системах установок тонкопленочной

технологии. Они относятся к категории высоковакуумных насосов, используются для безмасляной откачки. В зависимости от конструкции насосов смазка отсутствует или ее присутствие практически не влияет на состав остаточной атмосферы в вакуумной системе. Турбомолекулярный насос работает в паре с форвакуумным насосом, обеспечивающим предварительную откачку и разрежение на выпускном патрубке турбомолекулярного насоса в процессе его работы.

Принцип действия турбомолекулярного насоса основан на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в направлении их движения ротором (с системой пластин или дисков), вращающимся с очень высокой скоростью. Скорость вращения турбины для различных конструктивных исполнений может достигать $\sim 10^4 \dots 10^5$ об/мин. Предельное достижимое остаточное давление в вакуумной системе, которое может быть создано современным турбомолекулярным насосом, может достигать $\sim 10^{-6} \dots 10^{-8}$ Па ($10^{-8} \dots 10^{-10}$ мм рт. ст.) при высокой производительности (быстроты действия) откачки $\sim 100 \dots 10000$ л/с. Регулярные прогревы всей проточной части турбомолекулярного насоса позволяют сохранять в рабочем объеме вакуум, свободный от загрязнения углеводородами.

На рис. 1.2 показан график роста концентрации α углеводородных соединений (масса 41) в рабочем объеме вакуумной камеры в зависимости от времени концентрации работы вакуумной системы. Видно, что только турбомолекулярные насосы на газодинамических и магнитных опорах вращающихся частей турбины исключают накопление углеводородов в технологическом объеме.

Для всех современных конструкций турбомолекулярных насосов характерна различная величина скорости откачки легких и тяжелых газов, что определяется коэффициентом их компрессии.

Криогенные насосы наиболее просты в эксплуатации, обеспечивают наиболее быструю откачку и при этом абсолютно не загрязняют откачиваемый объем. Они так же как и турбомо-

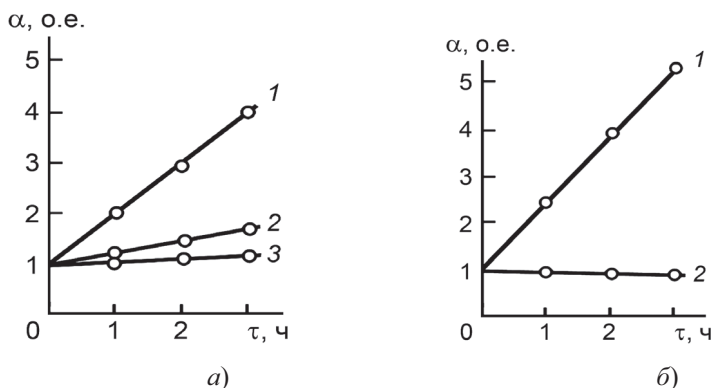


Рис. 1.2. График роста концентрации α углеводородных соединений в рабочем объеме камеры в зависимости от времени работы τ вакуумной системы: а) – диффузионный + форвакуумный насосы без ловушки (кривые 1 и 2), а также диффузионный + форвакуумный насосы с ловушкой (кривая 3); б) – турбомолекулярный насос с ротором на подшипниках качения + форвакуумный насос без ловушки (кривая 1) и турбомолекулярный насос с ротором на воздушной подушке (кривая 2). Время предварительной наработки τ_n : а) – 1, 2 и 3 составляет 400, 300 и 200 часов соответственно; б) – 1 и 2 составляет 200 часов.

лекулярные, обладают избирательностью по некоторым газам. Трудно конденсирующиеся газы, как, например, водород, гелий и аргон, определяют предельные давления и состав остаточной газовой среды в камере вакуумной установки. Проблема прямой зависимости давления паров от температуры при применении крионасосов решается очень просто и элегантно. Дело в том, что крионасосы не перемещают молекулы газа, а замораживают их. В связи с этим у крионасосов отсутствуют какие-либо подвижные части или жидкие среды, контактирующие непосредственно с вакуумом из откачиваемого объема. Это обстоятельство пол-

ностью исключает вероятность загрязнения рабочего объема в процессе откачки. Они могут откачивать, в том числе, и агрессивные газы, такие, например, как Cl_2 , HCl . Все части криогенных насосов, контактирующие с откачиваемым газом покрыты стойким медно-никелевым сплавом. Важным преимуществом криогенных откачных систем является более высокие по сравнению с другими типами насосов скорости откачки при гораздо меньших габаритах.

Эксплуатация криогенных насосов, как и диффузионных, требует снабжения жидким азотом цехов, в которых эксплуатируется это оборудование. Производительность современных криогенных насосов (например, насоса типа RPK 10000 фирмы "Leybold"), встраиваемых в технологические установки, достигает 10000 л/с по азоту.

Электрофизические насосы объединяют большую группу различных конструкций откачных средств, в основе действия которых лежит физико-химические процессы связывания активных газов пленкой или слоем геттера. В них инертные газы откачиваются путем ионизации, ускорения и имплантации их атомов газов в эту пленку с последующим «замуровыванием», наносимым геттером. Избирательность действия такого типа насосов по различным газам является одним из существенных их недостатков.

Магниторазрядный насос – высоковакуумный ионный насос, принцип действия которого основан на ионизации молекул газа в сильном электрическом поле, которые затем поглощаются материалом катода (титаном) разрядной системы, распыляемом в высоковольтном разряде в магнитном поле.

Существует серийный ряд отечественных магниторазрядных насосов типа НМД, НМДО, НМДИ и НМДОИ, которые широко используются для безмасляной откачки с предварительной низковакуумной (форвакуумной) безмасляной откачкой: – магниторазрядный диодный насос НМД и охлаждаемый НМДО не предназначены для откачки инертных газов и работы при вы-

соких давлениях, близких к стартовому; - магниторазрядный диодный испарительный насос НМДИ и охлаждаемый НМДОИ используются для откачки газов и газовых смесей, в том числе инертных газов в высоковакуумных и сверхвысоковакуумных системах в случаях повышенных давлений запуска.

Магниторазрядные насосы обеспечивают высокую скорость откачки, достигающую нескольких тысяч литров в секунду по азоту в диапазоне давлений $10^{-2} \dots 10^{-7}$ Па.

В промышленных установках для нанесения тонких пленок из-за больших нагрузок на вакуумную систему скорость откачки технологического объема следует выбирать с 1,5...3-х кратным запасом, который диктуется необходимостью стабилизации уровня разрежения в течение всего процесса испарения исходного вещества. Это достигается путем введения авторегулируемого напуска газа, например кислорода, при осаждении диссоциирующих оксидов. Запас прочности по скорости откачки позволяет системе справляться как с регулируемым напуском, так и со скачками давления, которые имеют место в течение

процесса осаждения. Постоянного давления в рабочем объеме добиваются путем использования дросселя для потока, поступающего через натекабель.

Конструкция вакуумной механической части технологических установок в сильной степени определяет экономичность технологического оборудования в целом (рис. 1.3).

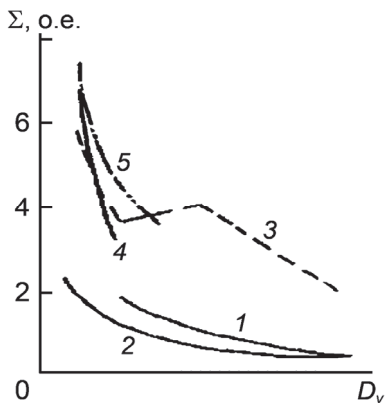


Рис. 1.3.

На рис. 1.3 представлены графики зависимости стоимости различных систем откачки в зависимости от их производительности условного проходного диаметра D_v : 1 — криогенный насос с объемом, охлаждае-

мым жидким азотом; 2 – диффузионный насос с ловушкой, охлаждаемой жидким азотом; 3 – турбомолекулярный насос; 4 – гетероионный насос; 5 – автономный криогенный насос.

1.3. Средства защиты технологического объема от продуктов распада рабочих веществ

Очевидно, что в системе вакуумных установок необходимо наличие эффективных средств защиты рабочего технологического объема от влияния продуктов распада и паров рабочих жидкостей масляных средств откачки и технологических веществ. Для предотвращения проникновения паров рабочей жидкости в вакуумной системе используются ловушки, обеспечивающие эффективную конденсацию паров рабочей жидкости на элементах её конструкции. Имеется ряд конструкций ловушек адсорбционного типа на основе водяного охлаждения или жидким азотом, термосорбционные и др.

Об эффективности перечисленных типов ловушек можно судить по данным, приведенным в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Диффузионный паромасляный насос с ловушкой производительностью 500 л/с	Молекулярный масляный поток в откачиваемый объем, $мг/см^2 \cdot ч$
1	Паромасляный насос с водяным маслоотражателем	$5,2 \cdot 10^{-6}$
2	Насос с одноярусной азотной ловушкой	$6,9 \cdot 10^{-6}$
3	Насос с двухъярусной азотной ловушкой	$4,6 \cdot 10^{-6}$
4	Насос с термосорбционной ловушкой	$4,9 \cdot 10^{-7}$

Масляная ловушка представляет собой жалюзи, которые охлаждаются жидким хладагентом, например водой или жидким азотом. Эффективность ловушек тем выше, чем больше её опти-

ческая плотность и чем ниже температура поверхности жалюзи. Большая оптическая плотность масляных ловушек уменьшает скорость откачки рабочего объема.

В вакуумном технологическом оборудовании используется ловушка *Мейснера*, которая представляет собой лист тонкого проката меди или нержавеющей стали, на поверхности которого напаяна медная трубка. Хладагент (вода или жидкий азот) протекая по медной трубке охлаждает лист, который является адсорбирующей рабочей поверхностью для молекулярного масляного потока в камере. Ловушка размещается вдоль стенки внутри рабочей камеры

Используемые механические форвакуумные масляные насосы также являются источниками генерации паров рабочих жидкостей (масел) в вакуумной системе. Для защиты форвакуумных линий и рабочего объема широко используются азотные ловушки вида рис. 1.4.

Такие азотные форвакуумные ловушки охлаждаются жидким азотом для получения высокого вакуума в промышленных вакуумных системах и, как правило, снабжаются системами подпитки внутреннего объема ловушки жидким азотом.

Наряду с азотной форвакуумной ловушкой используются сорбционные ловушки. В объеме этих ловушек размещается набор сорбентов (например, цеолит, силикагель, активированный уголь), которые либо при нормальной температуре, либо при температуре жидкого азота сорби-

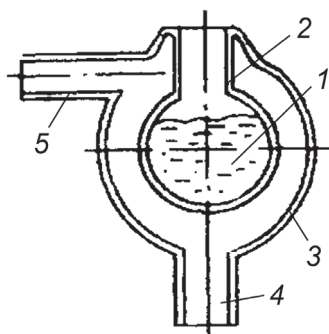


Рис. 1.4. Схема конструкции стеклянной азотной ловушки: 1 – жидкий азот; 2 – внутренний объем ловушки; 3 – наружный объем с откачными патрубками; 4 – патрубок, присоединяемый к насосу; 5 – патрубок, присоединяемый к объему.