

**А.В. Ситников О.В. Стогней**

# **РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ОТКАЧКИ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**Учебно-методическое пособие**



**Воронеж 2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

А.В. Ситников О.В. Стогней

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ОТКАЧКИ  
ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК

Утверждено учебно-методическим советом  
университета в качестве учебно-методического пособия

Воронеж 2017

УДК 621. 52(075.8)

ББК 31.77Я7

С 142

Ситников А.В. Расчет процессов откачки вакуумных технологических установок: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (1,8 Мб) / А.В. Ситников, О.В. Стогней. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дискковод; мышь. – Загл. с экрана.

В работе приводятся краткие теоретические сведения, схемы, рисунки, графики, примеры выполнения вычислений, необходимые для расчета процесса откачки вакуумной установки.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлениям 16.03.01 «Техническая физика» (направленность «Физическая электроника»), 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» (направленность «Техника и физика низких температур»), 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (направленность «Компоненты микро- и наносистемной техники»), дисциплинам «Физические основы вакуумной техники», «Криовакуумная техника», «Вакуумная техника».

Табл. 24. Ил. 28. Библиогр. 7 назв.

Рецензенты: кафедра физики твердого тела и наноструктур Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Э.П. Домашевская); д-р физ.-мат. наук, проф. А.Т. Косилов

© Ситников А.В., Стогней О.В., 2017

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017

## **ВВЕДЕНИЕ**

Расчет процессов откачки различных вакуумных установок является комплексной задачей. Для этого необходимо определить функциональные требования к технологическому оборудованию, выбрать номенклатуру и характеристики средств откачки (вакуумных насосов), определить длину и диаметр вакуумопроводов, разработать технологический процесс откачки, сформировать базу данных для расчета, провести предварительный расчет без учета процессов газовыделения вакуумной камеры, скорректировать полученные результаты с учетом газовой десорбции и газовыделения стенками вакуумной камеры. Удобно рассмотреть все эти расчеты на конкретном примере.

## **1. ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА**

### **1.1. Описание установки**

Описание установки берем на сайте фирмы дистрибьютора. Например, на сайте <http://www.actan.ru/vacevprvsm100.html> предлагает установка напыления тонких пленок VSM-100. Данная вакуумная магнетронная напылительная установка позволяет решать большинство задач, которые стоят перед исследовательскими лабораториями, предлагая хороший функционал за небольшие деньги. Замена источника постоянного тока на ВЧ-генератор значительно расширяет количество напыляемых материалов, позволяя напылять не только металлы, но и оксиды металлов.

Вакуумная магнетронная напылительная установка VSM-100 (Vacuum Small Magnetron system) использует плазменный разряд постоянного тока для магнетронного напыле-

ния тонких плёнок металлов (в частности: Ti, Cr, Au, Mo) или



Рис. 1. Вакуумная магнетронная напылительная установка VSM-100

ВЧ плазму (для увеличения количества распыляемых материалов). В процессе напыления в системе работает один, два или три магнетрона, возможно переключение магнетронов в процессе напыления с целью последовательного напыления 3-х металлов.

Вакуумная магнетронная напылительная система обеспечивает неравномерность  $< 2\%$  для пластин 100 мм и  $< 3\%$  для пластин из разных партий при использовании планетарного механизма,  $< 5\%$  при использовании вращающегося подложкодержателя.

Вакуумная магнетронная напылительная система изготовлена для «врезки» в чистую комнату: фронтальная часть системы находится в чистой зоне, задняя часть системы – в «серой» зоне. Напылительная установка обеспечивает проведение цикла напыления одним магнетроном не более чем за 30 минут. Благодаря простоте

конструкции и использованию комплектующих ведущих мировых производителей система очень надежна и легко обслуживается. При этом одной из основных задач при проектировании и изготовлении данной напылительной системы была задача сделать напылительную систему недорогой и доступной для большинства лабораторий, занимающихся плазменным напылением

Система состоит из следующих узлов:

1. Вакуумная камера (вакуумная камера из нержавеющей стали с электрополировкой, размер камеры 30x30x40 см<sup>3</sup>, D-форма в сечении, дверь на петлях, 100 мм вакуумное окно на двери, Дополнительное количество портов (3-5) для подключения в дальнейшем приборов сенсоров, заслонок, аналитических инструментов и пр, по умолчанию – заглушенные фланцы стандарта KF25).

2. Вакуумная система (Безмасляный турбомолекулярный вакуумный насос пр-ва Varian со скоростью откачки 80 л/с подсоединен к задней стенке вакуумной камеры, что позволяет избежать случайного попадания в насос каких-либо упавших деталей, кусочков образцов и пр. К выходному порту ТМН подсоединен пластинчато-роторный форвакуумный насос. Вакуумная откачная система обеспечивает предельный вакуум в камере не хуже  $10^{-6}$  Торр. Вакуумметр Пирани на диапазон 1 атм –  $1 \times 10^{-4}$  Торр).

3. Система подачи газа состоит из одного цифрового регулятора расхода газа (аргон), блока питания, управления с дисплеем.

4. Магнетронная система распыления (3 магнетрона производства Angstrom Science с водяным охлаждением. Диаметр магнетронов 50 мм. Расположение магнетронов – нижнее или верхнее (по выбору заказчика). Магнетроны регулируются по высоте в ручном режиме. Легкая смена магнетронов, возможно использование очень тонких мишеней (толщиной до 0.254 мм, это особенность полезна, когда распыляются благородные металлы). Каждый магнетрон снабжен пневматической

заслонкой. Источник питания постоянного тока 600 Вт с цифровым дисплеем (отображение тока, напряжения), снабжен высоковакуумным выключателем).

5. Источник питания постоянного тока 600 Вт для процесса напыления.

6. Подложкодержатель (Подложкодержатель – вращающийся столик. Диаметр подложкодержателя: от 150 до 230 мм (согласуется с заказчиком). Кварцевая лампа с блоком управления позволяет нагревать подложкодержатель до 250 градусов. Температура измеряется с помощью термопары, подключенной к блоку управления регулировки температуры. Подложкодержатель на 1 пластину (150 - 230 мм) Вращение подложкодержателя со скоростью 3-20 об/мин)

7. Нагрев до 250°C

8. Измеритель толщины (Один водоохлаждаемый кварцевый датчик (кварцевый резонатор) расположен внутри камеры и подсоединен к монитору, располагаемому на передней панели напылительной системы. Монитор отображает скорость напыления и толщину плёнки. Система работает в полуавтоматическом режиме: процесс откачки включается одной кнопкой, процесс напыления включается нажатием на кнопку соответствующего магнетрона, окончание процесса напыления осуществляется автоматически - по выставленному значению толщины плёнки или по времени).

## 1.2. Выбор вакуумных насосов

Ограничим свой выбор тремя видами откачных агрегатов. В области низкого вакуума ( $760 - 5 \cdot 10^{-2}$  торр) будем использовать механические вакуумные насосы с масляным уплотнением, а в области высокого вакуума ( $5 \cdot 10^{-2} - 10^{-7}$  торр) рассмотрим три варианта: диффузионный насос, турбомолекулярный насос и криогенный насос.

## Механические вакуумные насосы

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением является обязательным устройством большинства вакуумных систем. С его помощью создается предварительное разрежение в вакуумной системе и форвакуумное давление на выходе высоковакуумных насосов, использующих принцип перемещения газа. Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением относятся к вакуумным насосам объемного действия. Наибольшее распространение получили три типа вращательных насосов с масляным уплотнением: пластинчато-статорные, пластинчато-роторные и плунжерные насосы.

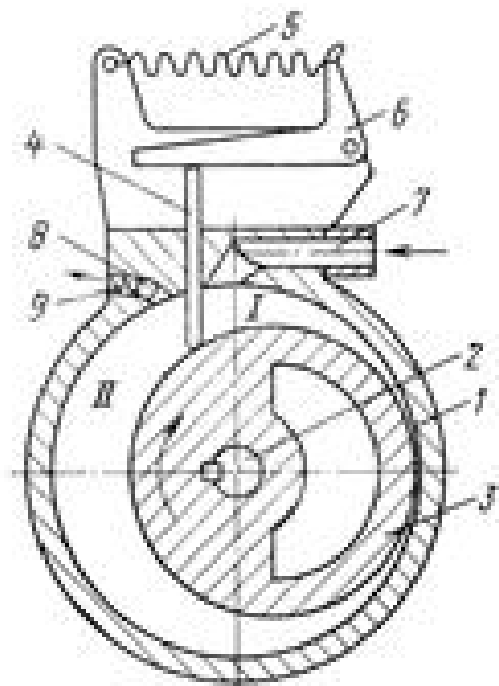


Рис. 2. Пластинчато-статорный вращательный вакуумный насос

Пластинчато-статорные насосы - обычно насосы малой производительности, пластинчато-роторные - средней производительности, плунжерные - средней и большой производительности.

На рис. 2 схематично изображен пластинчато-статорный вакуумный насос. В неподвижном корпусе 1 на валу 2 эксцентрично расположен ротор 3. Полезный

На рис. 2 схематично изображен пластинчато-статорный вакуумный насос. В неподвижном корпусе 1 на валу 2 эксцентрично расположен ротор 3. Полезный



объем рабочей камеры насоса, образованный внутренней поверхностью корпуса-статора 7 и наружной поверхностью ротора 3, пластиной 4 разделяется на полость всасывания I и полость сжатия II. Пластина 4, расположенная в прорези корпуса насоса, с помощью пружины 5 через рычаг 6 плотно прижимается к ротору 3. При вращении ротора 3 в направлении, указанном стрелкой, газ из откачиваемого сосуда, который не показан на рисунке, через впускной клапан 7 заполняет увеличивающуюся в объеме полость I. В это время газ в полости II сжимается. Когда давление газа на клапан 8 превысит величину атмосферного давления и усилия, создаваемого пружиной 9, клапан 8 откроется, и газ из полости II будет вытеснен в атмосферу. При дальнейшем вращении ротор 3, пройдя пластину 4 и выход впускного канала 7, отделяет в рабочей камере насоса следующую порцию газа от откачиваемого объема. Таким образом, за два оборота ротора порция газа отделяется от откачиваемого объема, перемещается от впускного канала 7 к выхлопному клапану 8, сжимается в полости II и вытесняется под клапаном 8 в атмосферу. При каждом следующем обороте следующая порция газа отделяется от откачиваемого объема, а предыдущая вытесняется из насоса в атмосферу. В пластинчато-роторном насосе за один оборот ротора происходит один цикл откачки, т. е. отделяется от откачиваемого объема и вытесняется только одна порция газа.

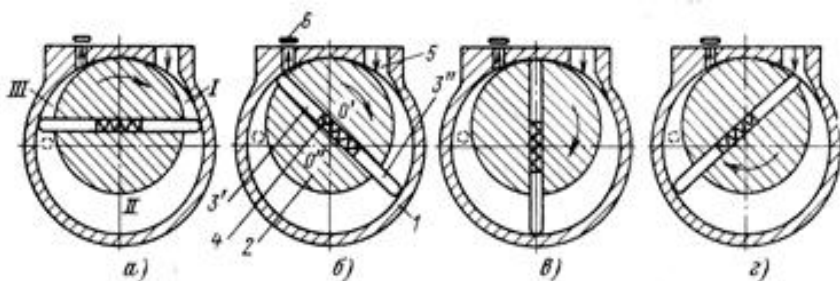


Рис. 3. Пластинчато-роторный вакуумный насос

На рис.3 схематично изображен пластинчато-роторный насос. В цилиндрической рабочей камере корпуса 1 симметрично на валу (не показан на рисунке) расположен ротор 2, ось которого  $O'$  смещена относительно оси рабочей камеры  $O''$ . В сквозной прорези ротора размещены пластины  $3'$  и  $3''$ . Пружинной 4 они прижимаются к корпусу насоса. В положении ротора, изображенном на рис. 3а, пластинами  $3'$  и  $3''$  и плоскостью касания ротора со статором полезный объем рабочей камеры разделен на три полости: I — полость всасывания, II — полость перемещения и частичного сжатия газа, III — полость вытеснения газа. При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, полость I увеличивается и дополнительное количество газа из откачиваемого сосуда по впускному каналу 5 поступает в рабочую камеру насоса. Полость II уменьшается в объеме, в ней происходит сжатие газа. Полость III уменьшается, и газ из нее через выпускной канал под клапаном 6 вытесняется из насоса. При положении ротора, изображенном на рис.3б, заканчивается вытеснение газа из полости III. При дальнейшем вращении ротора полость II переходит в полость III, т.е, наступает момент, когда становится возможным вытеснение следующей порции газа (рис.3в). В положении ротора, изображенном на рис. 3г, полости I и II сообщаются между собой. Лишь когда ротор повернется на  $180^\circ$  от начального положения и займет положение, тождественное исходному (рис.3а), происходит разделение полостей I и II, и от откачиваемого объема отделяется очередная порция газа. В этот момент

полость II имеет наибольший объем. В пластинчато-роторном насосе за один оборот ротора происходят два цикла откачки, т.е. отделяются от откачиваемого объема и вытесняются из насоса две порции газа.

На рис. 4 схематически изображен плунжерный насос. В корпусе насоса выполнена цилиндрическая рабочая камера, в которой вращается эксцентричный ротор 2 с надетым на него плунжером 1. Плунжер состоит из цилиндрической части, ох-

вдвигая эксцентрик 2, и полый прямоугольной части 1, свободно перемещающейся в пазу шарнира 7. При повороте плоской части плунжера шарнир 7 свободно поворачивается в гнезде корпуса насоса. В этом насосе плунжер имеет канал 3, через который газ из откачиваемой полости поступает в насосную камеру. Возможность попадания встречного потока газа на вход в насос здесь в значительной степени ограничена благодаря более раннему закрытию входа при движении золотника; вредное пространство может быть также уменьшено. Герметичность контакта ротора с цилиндром в насосах рассматриваемого типа лучше потому, что в клине между ротором и цилиндром образуется более толстый слой масла; кроме того, эти насосы создают меньше шума.

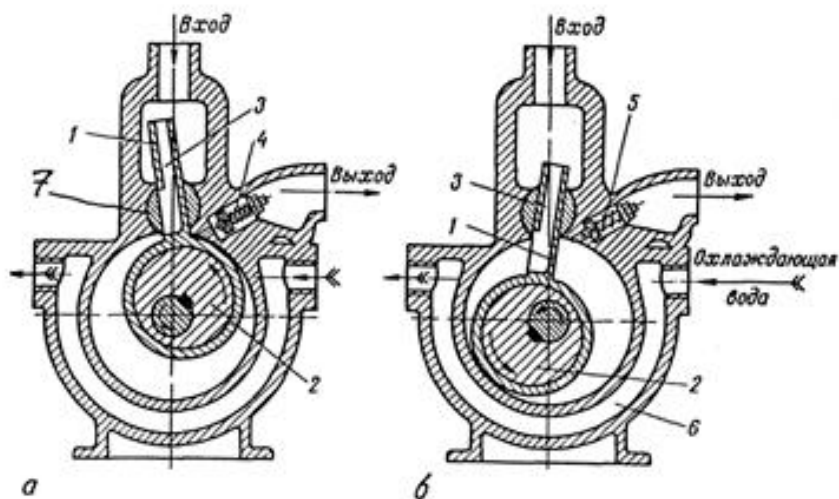


Рис. 4. Плунжерный вакуумный насос:

а — завершение периода удаления и начало периода наполнения б — промежуточное положение 1 — плунжер; 2 — ротор; 3 — канал в 0 золотнике; 4 — выходной обратный клапан открыт; 5 — выходной обратный клапан закрыт; 6 — вода, охлаждающая статор насоса; 7 — шарнир

Механические насосы производят откачку объема, начиная с атмосферного давления. Откачиваемый газ они вытесняют в атмосферу. Поэтому по отношению к механическим насосам не принято использовать такие характеристики, как наибольшее рабочее давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление.

Основными вакуумными характеристиками механических вакуумных насосов с масляным уплотнением являются предельное остаточное давление и быстрота действия. Быстрота действия механических насосов с масляным уплотнением практически не зависит от рода откачиваемого газа. Остаточное давление насосов с масляным уплотнением определяется конструкцией насоса и свойствами рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости насосов с масляным уплотнением, как правило, используются масла, получаемые из промышленных минеральных масел. Кроме обычных требований (низкая кислотность, необходимая вязкость, хорошие смазывающие свойства и т. п.), к маслам для вакуумных насосов предъявляются дополнительные требования: низкое давление насыщенных паров в интервале рабочих температур насоса, малое поглощение газов и паров, стабильность вязкости при изменении температуры, высокая прочность тонкой (0,05–0,10 мм) масляной пленки, способной выдержать в зазоре перепад давлений, равный атмосферному давлению.

Остаточный газ (газ, оставшийся в вакуумной системе после откачки) механического вакуумного насоса с масляным уплотнением составляют воздух, газы откачиваемой среды, а также пары и продукты разложения рабочей жидкости насоса. В механическом вакуумном насосе, как и в любом газопереключающем насосе, наряду с основным потоком в направлении откачки существует обратный поток газа с выхода насоса в откачиваемый сосуд. Газы попадают во входное сечение насоса из циркулирующего в нем масла и в результате перетечки по зазорам в откачной механизм. Разложение масла в основном происходит в результате возникновения высоких местных тем-

ператур в областях непосредственных контактов трущихся металлических поверхностей. Образующиеся при этом растворимые в масле, легколетучие углеводороды в значительной степени обуславливают предельное остаточное давление насоса, так как они имеют существенно более высокие давления насыщенного пара, чем сама рабочая жидкость.

Стабильность характеристик насосов с масляным уплотнением определяется величиной зазоров между поверхностями, перемещающимися относительно друг друга, их количеством, а также качеством масла, поступающего в рабочую камеру для уплотнения зазоров и смазки трущихся поверхностей. Максимальная быстрота действия и минимальное остаточное давление достигаются при таком притоке масла в рабочую камеру, которое обеспечивает и надежное уплотнение зазоров, и выброс в масляный резервуар в момент выхлопа верхнего слоя масла с растворенным в нем откачиваемым газом.

### **Диффузионный вакуумный насос**

Многие высоковакуумные насосные системы включают в себя пароструйный, диффузионный пароструйный насос и механический насос. Диффузионный вакуумный насос начинает свою работу после того как при помощи механического насоса достигаются нужные для работы диффузионного насоса условия. Механические вакуумные насосы используются для откачки приблизительно 99,99% воздуха из камеры, уменьшая давление в вакуумной системе до нужного рабочего диапазона. Этот процесс широко известен под названием предварительное разрежение. После достижения соответствующих условий потока и давления газа (обычно от  $10^{-1}$  до  $10^{-3}$  торр) запускают пароструйный насос. Механический насос теперь используется для поддержания соответствующих условий выпускного давления для пароструйного насоса у соединения с форвакуумной линией. Этот процесс называется форвакуумированием.

Пароструйные насосы обычно используются, когда необходима высокая постоянная быстрота откачки для всех газов в

течение продолжительного времени без необходимости осуществления постоянного контроля.

### **Основные характеристики пароструйных насосов**

Типичный пароструйный насос состоит из вертикального, обычно цилиндрического корпуса, снабженного фланцевым впуском для подсоединения к вакуумной системе. Дно цилиндра закрыто, образуя кипятильник, снабженный нагревателем. Верхние две трети корпуса окружены охлаждающим змеевиком. Выпускной канал (или линия первичного разрежения) предусмотрен на стороне нижнего корпуса насоса для выпуска откачанных газов и паров в механический насос первичного разрежения. На рис. 5 показана схема одноступенчатого пароструйного насоса. Струеобразующая конструкция эжектора располагается внутри корпуса насоса. Она состоит из концентрического цилиндра, частично закрытого крышкой и снабженного расширяющимися соплами для образования струй, через которые пары рабочей жидкости могут выходить с высокой скоростью. Конструкция насоса не включает в себя движущихся механических деталей. Во время эксплуатации рабочая жидкость в кипятильнике насоса нагревается посредством электрического элемента, закрепленного на нижней части корпуса, выпуская поток пара. Этот пар поднимается к эжектору и выпускается через кольцевую форсунку в направлении вниз и наружу по водоохлаждаемой стенке корпуса насоса.

Молекулы газа, поступающие на впуск насоса, вовлекаются в поток пара рабочей жидкости и приобретают импульс, направленный вниз. Поток пара обычно выпускают со сверхзвуковыми скоростями. Смесь пара и газа движется вниз в направлении форвакуумной линии. Когда составляющие масляные компоненты такой струи ударяются о водоохлаждаемую стенку корпуса насоса, они конденсируются и возвращаются в

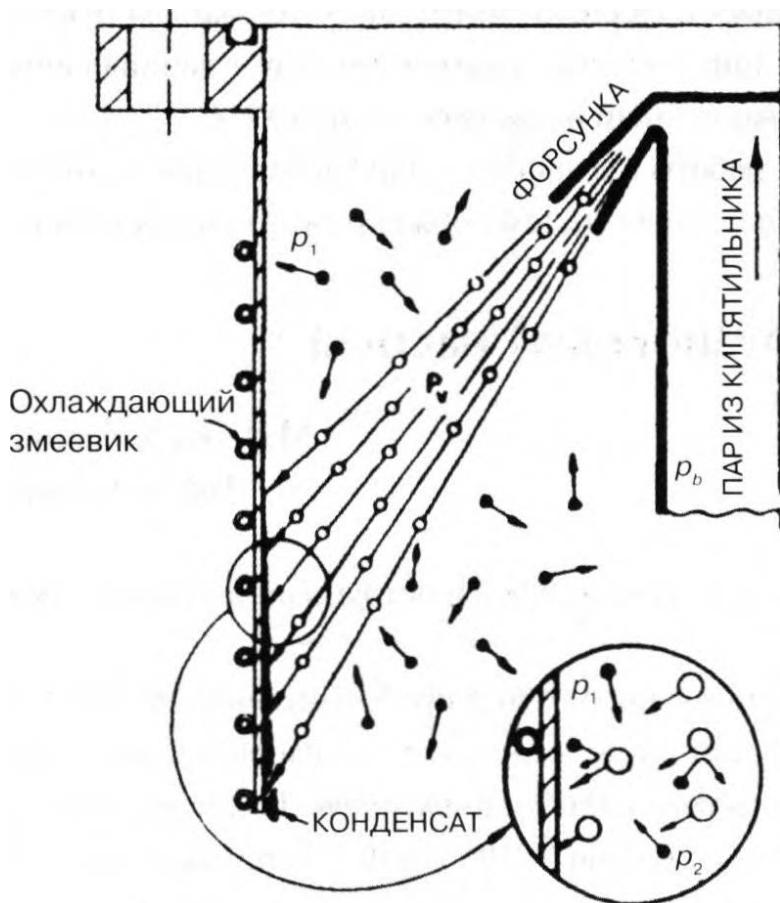


Рис. 5. Схема одноступенчатого пароструйного насоса. Белые кружки - молекулы струи пара; черные кружки - молекулы газа

кипятильник в жидком виде. Захваченные молекулы газа продолжают свой путь в направлении выхода, где они удаляются механическим насосом первичного разрежения.

Конденсированные пары масла возвращаются в кипятильник. Масло нагревается снова, происходит его повторное испарение для поддержания потока пара в эжекторе и непре-

рывности механизма откачки. Вид в разрезе типичного многоступенчатого пароструйного насоса показан на рис. 6.

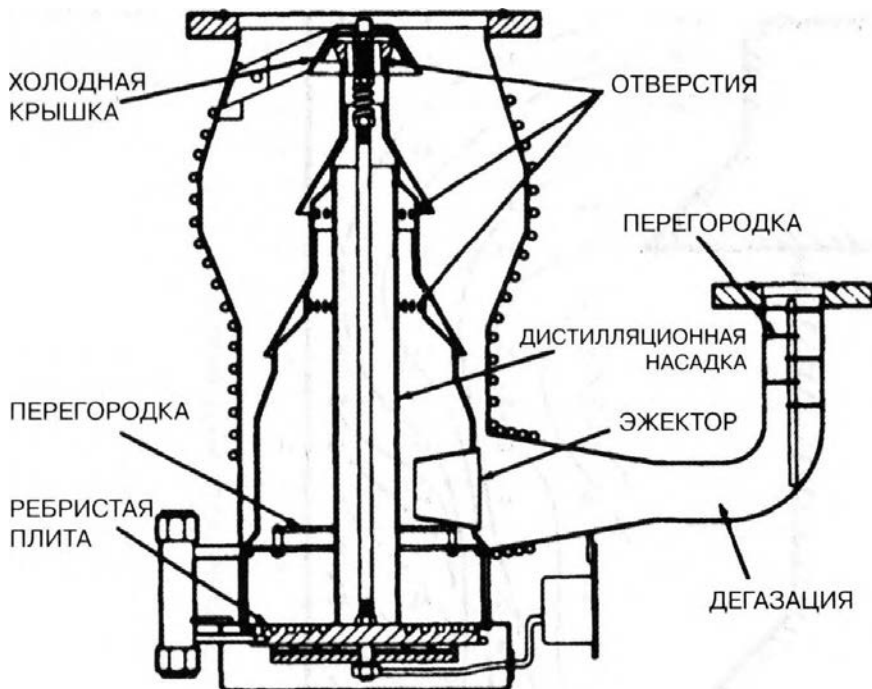


Рис. 6. Многоступенчатый пароструйный насос

Откачивающее действие в пароструйном насосе возникает в результате столкновений между молекулами пара и газа. Молекулам газа труднее пересекать поток пара в направлении против потока. Таким образом, в сечении струи пара создается перепад давлений (или молекулярной плотности).

### **Число ступеней**

Число насосных ступеней или паровых сопел зависит от конкретных технических условий. Одноступенчатый насос должен удовлетворять противоречивым требованиям: с одной стороны, необходима высокая быстрота действия, а с другой стороны, - высокая степень сжатия. Обычно первая ступень на впуске характеризуется высокой быстротой действия и низкой



степенью сжатия, а последняя ступень - наоборот. Небольшие насосы часто имеют три ступени, а большие - пять или даже шесть. Первоначальные ступени имеют кольцевые сопла; ступень выпуска иногда имеет круглое сопло и называется эжектором. Принципиальных отличий подобные варианты насосов не имеют, хотя выбор того или другого варианта позволяет получить некоторые преимущества. Иногда для удовлетворения определенных эксплуатационных требований могут использоваться два пароструйных насоса, соединенных последовательно. Следствием этого является увеличение количества ступеней сжатия, что позволяет использовать различные рабочие жидкости.

### **Взаимодействие пара и газа**

Как сказано выше, откачивающее действие пароструйных вакуумных насосов основано на работе масляных или паровых эжекторов. Потенциальная энергия повышенного давления внутри струйного узла (давление в кипятильнике) преобразуется в кинетическую энергию потока или струи пара высокой скорости, после того как поток или струя пройдут через сопло.

Газ откачивается струей посредством передачи импульса в направлении откачки. Поскольку рабочие жидкости, используемые в пароструйных насосах, легко конденсируются при комнатной температуре, в компактном пространстве можно установить многоступенчатую систему, состоящую из сопел и конденсаторов.

### **Основные технические характеристики**

Техническая характеристика пароструйного насоса обычно изображается в виде кривой зависимости быстроты действия от впускного давления, как показано на рис. 7. Кривая состоит из четырех характерных участков. Слева можно наблюдать уменьшение быстроты действия по мере приближения к предельному остаточному давлению. Участок постоянной быстроты действия насоса соответствует постоянной скорости газа в условиях молекулярного потока и постоянной диффузии

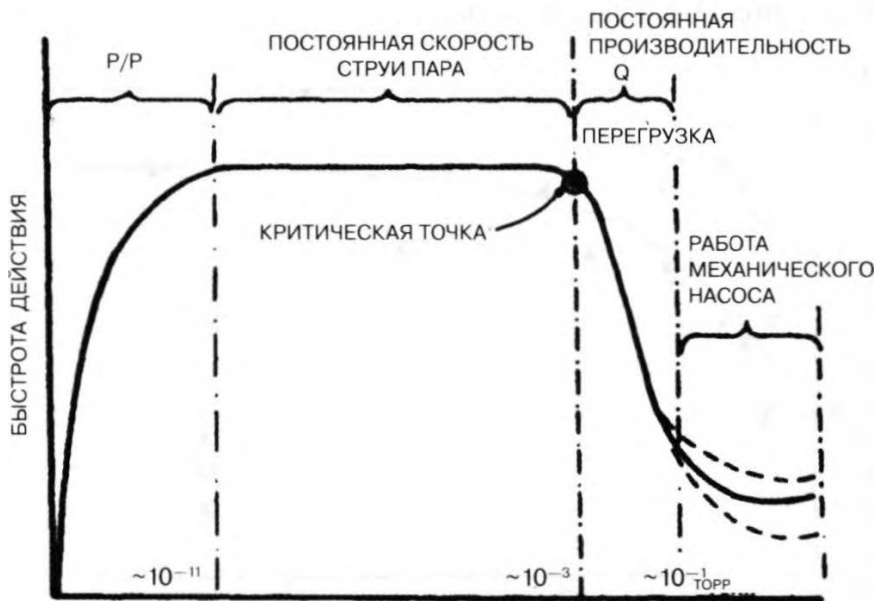


Рис. 7. Рабочая характеристика пароструйного насоса в виде кривой зависимости скорости действия от давления на впуске

газа в струе пара. Участок перегрузки показывает, что при постоянной производительности насоса достигнут максимальный массовый поток газа. На последнем участке справа видно, что на рабочие характеристики пароструйного насоса оказывает влияние размер форвакуумного насоса. Для режима работы в стабильном состоянии насос не должен эксплуатироваться в области перегрузки.

Рабочая характеристика пароструйного насоса в принципе аналогична любому другому насосу, компрессору, воздушодувке, эжектору и подобным устройствам. Существенные элементы взаимной зависимости потока и давления являются аналогичными.

## Производительность пароструйного насоса

Зависимость между быстротой действия насоса и впускным давлением привела к возникновению некоторого непонимания относительно диапазона давлений, в пределах которого могут использоваться пароструйные насосы. Часто считают,

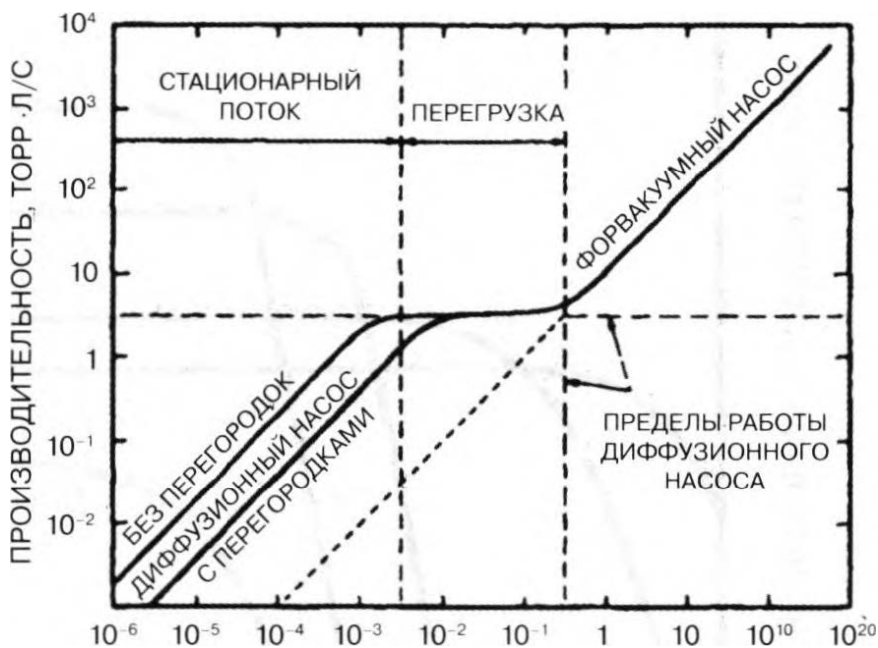


Рис. 8. График зависимости производительности насоса от впускного давления

что эти насосы являются нестабильными при значениях давления системы выше  $10^{-3}$  торр. Такие суждения не следует делать без учета размера насоса и газовой нагрузки системы.

Гораздо проще посмотреть на эту зависимость, обратившись к графику зависимости производительности от впускного давления (рис. 8). Любое сочетание производительности и давления, включенное в очерченную область, может быть выбрано для работы, при условии, что впуск откачиваемого газа ограничивается (дросселируется) при значениях впускного давле-

ния выше приблизительно  $10^{-3}$  торр. Область установившегося давления может быть расширена даже до  $10^{-1}$  торр (пунктирная диагональная линия на рис. 4), если уменьшить быстроту действия.

### Быстрота действия по различным газам

Быстрота действия должна рассматриваться в связи с парциальным давлением каждого вида газа. При измерении быстроты действия значения, получаемые при приближении к предельному остаточному давлению системы, не имеют смыс-

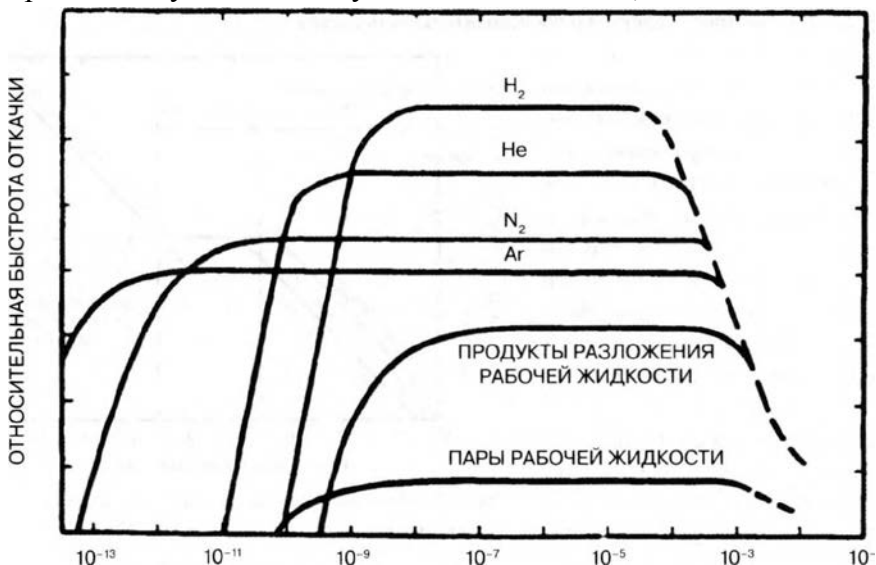


Рис. 9. Быстрота действия по различным газам, которые могут присутствовать в испытательной вакуумной камере

ла. Для определения быстроты действия нельзя использовать значения общего давления в силу неопределенностей, связанных с составом газа и состоянием вакуумметра. Общая картина процесса показана на рис. 9. Каждый газ имеет свою быстроту откачки и, что более важно, свое предельное остаточное давление. Обычно измеряемое «предельное остаточное давление» связано с паром рабочей жидкости насоса, газовыми фракциями и, возможно, с водяным паром, остающимся в системе.

## **Требования безопасности**

Наиболее важным правилом работы пароструйного насоса является следующее: **нельзя превышать допустимое выпускное давление!** Другими словами, в работающем насосе максимальное допустимое выпускное давление не должно превышать ни при каких обстоятельствах. Соблюдение этого основного требования исключит большинство тех трудностей, с которыми приходится сталкиваться при работе с пароструйными насосами, в особенности, проблемы, связанные с заметным обратным потоком пара откачки в вакуумную систему. Высоковакуумные системы должны проектироваться с блокировками, схемами клапанов, предусматривающими безопасность в случае отказов, или четкими инструкциями, препятствующими возможности превышения допустимого выпускного давления. Поэтому такие насосы всегда должны поддерживаться другим насосом, создающим давление, как правило, меньше 0,5 торр на выпуске пароструйного насоса.

## **Требования к форвакуумному насосу**

Для того чтобы подобрать соответствующий форвакуумный насос для данного пароструйного насоса, следует ответить на несколько вопросов. Во-первых, каков размер первоначального форвакуумного насоса и будет ли он использоваться как для предварительного разрежения, так и для форвакуумной линии? Во-вторых, ожидается ли, что форвакуумный насос будет работать при максимальной производительности пароструйного насоса? В-третьих, каково допустимое выпускное давление диффузионного насоса? Так же каков объем каналов линии предварительного разрежения (или специального резервуара или балластной камеры, которая могла бы использоваться в линии в качестве буфера во время предварительного разрежения)?

Номинальная быстрота действия требуемого форвакуумного насоса при режиме полной нагрузки получается из следующей формулы:

$$S=Q_{max}/(TFP),$$

где  $Q_{max}$  - максимальная производительность пароструйного насоса, TFP означает допустимое выпускное давление.

Не учитывая факторы безопасности и проводимости линий предварительного разрежения, следует отметить, что механические насосы часто имеют уменьшенную быстроту действия, когда их впускное давление равняется допустимому выпускному давлению пароструйного насоса. Может потребоваться коэффициент безопасности 2 для того, чтобы не превысить допустимое выпускное давление, если механический и пароструйный насосы работают в неблагоприятном режиме. Ниже приводится пример расчета давления. Предположим, что имеется насос с максимальной производительностью 4 торр л/с и допустимым выпускным давлением (максимальное допустимое выпускное давление) 0,5 торр при полной нагрузке (при максимальной производительности). Тогда необходима следующая быстрота действия форвакуумного насоса:

$$S = 8 \text{ л/с.}$$

Следовательно, в качестве форвакуумного насоса нужен насос с номинальной быстротой действия 14 л/с, при условии, что проводимость между двумя насосами не будет сильно ограничена.

### **Предельное остаточное давление пароструйного насоса**

В отношении предельного остаточного давления насоса можно сделать два конкретных замечания. Предельное давление можно считать пределом газовой нагрузки или пределом перепада давления. И то и другое имеет значение на практике, последнее обычно только в отношении легких газов. Откачивающее действие пароструйных насосов не прекращается при любом давлении, каким бы низким оно ни было. Предельное остаточное давление насоса зависит от отношения удаленных и вернувшихся (диффундировавших) молекул, а также от отношения газовой нагрузки к скорости откачки. Кроме этого, сам насос может внести свою газовую нагрузку через обратный по-

ток пара рабочей жидкости, ее распавшихся фракций и выделения газа из элементов насоса. Таким образом, на практике наблюдаемое полное предельное остаточное давление представляет собой сложную величину, состоящую из нескольких элементов. На практике широко наблюдаемый первый предел связан с рабочей жидкостью насоса, хотя при наличии жидкости с лучшими свойствами может потребоваться определенная дегазация (термическая обработка) системы.

### **Выбор рабочей жидкости диффузионного насоса**

В качестве рабочей жидкости в пароструйных насосах использовались самые разнообразные органические жидкости. Критериями для выбора жидкости являются низкое давление паров при комнатной температуре, тепловая стабильность, химическая инертность, нетоксичность, высокий коэффициент поверхностного натяжения, высокие температуры вспышки и возгорания, умеренная вязкость при температуре окружающей среды, низкая теплота парообразования и, конечно, низкая стоимость. Прорыв в выборе рабочих жидкостей был сделан благодаря использованию полифенил эфиров с пятичленным кольцом, состоящих из цепочек атомов углерода, соединенных промежуточными связями из кислорода.

### **Турбомолекулярные насосы**

Турбомолекулярный насос (ТМН), изобретенный Беккером в 1957 г., получил промышленное применение в 1958 г. С тех пор он стал очень популярен во всех областях получения высокого и сверхвысокого вакуума, благодаря созданию чистого, стабильного и прогнозируемого вакуума, простоте эксплуатации и высокой эксплуатационной надежности. Турбомолекулярный насос - это единственный механический вакуумный насос, который вместе с форвакуумным насосом может достигать значений предельного остаточного давления до  $10^{-10}$  торр.

## **Принцип работы турбомолекулярного насоса**

Турбомолекулярный насос - это лопастная турбина, сжимающая газы посредством передачи импульса от быстро вращающихся лопастей ротора молекулам газа. Импульс ротора передается частицам за счет наложения тепловой скорости сталкивающихся частиц на компонент скорости движущейся поверхности ротора. Не направленное перемещение частиц заменяется на направленное, обеспечивая процесс откачки. Когда средняя длина свободного пути частиц больше зазора между лопастями ротора и статора (режим молекулярного потока, как правило, при давлении ниже  $10^{-3}$  мм рт. ст.), частицы сталкиваются главным образом с ротором, обеспечивая в результате эффективный процесс откачки, поэтому взаимодействующее влияние различных газов отсутствует.

В режиме ламинарного потока (как правило, при давлениях выше  $10^{-3}$  мм рт. ст.) действие ротора уменьшается вследствие более частых столкновений между частицами. Поэтому ТМН не способен откачивать газы от атмосферного давления и должен поддерживаться соответствующим форвакуумным насосом.

## **Конструкция турбомолекулярных насосов**

### **Геометрические параметры ротора и статора**

Быстрота действия и степень сжатия ТМН в значительной степени зависят от геометрии ротора и частоты вращения. Геометрия этих дисков, вместе с увеличением значений частоты вращения ротора, позволяют использовать значительно меньшие и более легкие роторы для диапазона более высоких частот вращения.

Поскольку производительность (поток газа через насос) является постоянной (произведение давления на быстроту действия) на каждой ступени, лопасти, находящиеся ближе всего к впуску ТМН, предназначаются для высокой быстроты действия и низкой степени сжатия, в то время как лопасти,





Рис. 10. Ротор с дисками различной конструкции

Влияние наклона лопастей на скорость откачки и сжатие

Таблица 1

	Скорость откачки	Сжатие
Лопастей с резким наклоном на стороне высокого вакуума (40 - 45°)	Высокая	Низкое
Лопастей с меньшим наклоном в переходной области (35 - 22°)	Средняя	Среднее
Лопастей с малым наклоном на стороне выпуска (20 - 10°)	Низкая	Высокое

находящиеся ближе всего к форвакуумному порту, предназначены для высокой степени сжатия и низкой быстроты действия (рис. 10).

По экономическим соображениям было бы нецелесообразно делать каждую ступень отличающейся от соседней. Компромисс заключается в том, что предусматриваются группы от двух до четырех различных типов лопастей, в которых

каждая предназначена для конкретного соотношения скорости действия и степени сжатия.

Технология производства роторов и статоров оказывает влияние на величины скорости действия и степени сжатия. Роторы могут производиться из индивидуально обработанных дисков, термически насаживаемых с натягом на вал ротора, полные группы которых обрабатываются на станках из одного блока материала или при производстве роторов посредством электроэрозионной обработки. Индивидуально обработанные диски обеспечивают преимущество, заключающееся в их оптической непроницаемости, что делает их максимально подходящими для сжатия. При других технологиях производства роторов получают диски с меньшей непроницаемостью и более низкой степенью сжатия, что делает их максимально подходящими для большой скорости действия. Статоры производятся либо из индивидуально обработанных на станках дисков, либо из штамповок.

### **Подвеска ротора**

За это время произошло поразительное изменение размера ТМН. Это стало возможным благодаря увеличению окружной скорости со 150 м/с (1958 г.) до приблизительно 400-500 м/с в конструкциях наших дней, а также благодаря изменениям геометрии ротора. Эти значения окружной скорости относятся к высоким значениям частоты вращения роторов, которые создают высокие нагрузки на подвеску.

### **Механические подшипники**

Сегодня большинство роторов ТМН снабжают смазываемыми механическими подшипниками либо оснащают сочетанием магнитной подвески на высоковакуумной стороне со смазываемым механическим подшипником на форвакуумной стороне. В зависимости от диаметра диска частота вращения ротора повышается до 90 000 об/мин. Эти высокие значения частоты вращения стали возможными благодаря достижениям в

разработке подшипников и методов балансировки. Сегодня существуют высокопрецизионные шариковые подшипники, которые при условии специальной настройки на определенный ротор ТМН, при сравнимых радиальных и осевых нагрузках, имеют более продолжительный срок службы, даже при значительно более высоких значениях частоты вращения, чем подшипники более старой конструкции.

В настоящее время широко используются керамические подшипники (керамические шарики). Керамические шарики создают более низкие центробежные силы и напряжение на обоймах, чем металлические шарики и имеют стабильную сферическую форму и минимальный износ шариков и обойм. Их поверхность более гладкая, что ведет к созданию меньшего трения, и сочетание различных материалов (керамических шариков/стальных обойм) позволяет избежать точечного выкрашивания. Поэтому эти подшипники являются более надежными даже в условиях дефицита смазки.

#### **Сухие подшипники - магнитная подвеска**

После неудачных опытов с ТМН, имеющими «газовый подшипник», были разработаны ТМН с магнитной подвеской, в которых электронная система активно контролирует одну, две, три или все возможные пять степеней свободы ротора (рис. 11).

За положением шпинделя ротора ведут наблюдение датчики. Механическое трение, а отсюда и износ отсутствуют. Цена этих магнитных насосов по-прежнему значительно выше

цены ТМН со стандартными шарикоподшипниками, что ограничивает их широкое применение

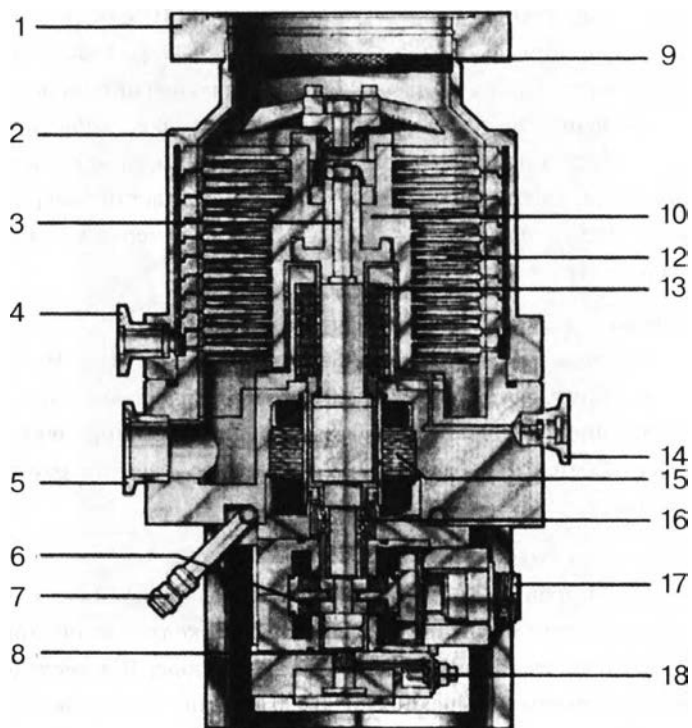


Рис. 11. Магнитная подвеска ротора

### **Системы привода**

Приводной ротор ТМН является неотъемлемой частью откачивающего ротора и вместе с его приводным статором располагается в форвакуумной зоне.

Сегодня используется три различные системы двигателей: двигатель постоянного тока, двигатель переменного тока и гистерезисный двигатель. Несколько более дорогой двигатель постоянного тока имеет более низкое потребление и потери энергии по сравнению с другими двигателями. Двигатели приводятся в движение полупроводниковыми преобразователями

частоты. Некоторые из этих преобразователей могут приводить в движение ТМН с переменными значениями скорости ротора.

### Технические характеристики турбомолекулярных насосов

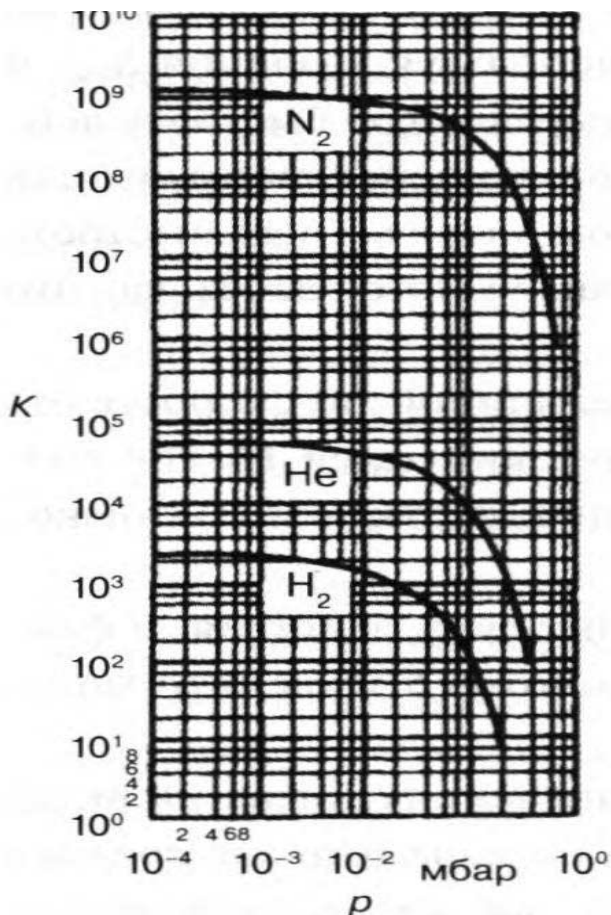


Рис. 12. Зависимости максимальной степени сжатия  $K_{max}$  от форвакуумного давления при откачке различных газов турбомолекулярными насосами:  $N_2$  - азот; He - гелий;  $H_2$  - водород

Различия параметров, предоставляемых разными производителями, зависят от фактической конструкции (например конструкции лопасти, ступени ротора) ТМН.

### Степень сжатия

На рис. 12 приведены кривые зависимости максимальной степени сжатия  $K_{\max}$  ТМН от давления для различных газов.

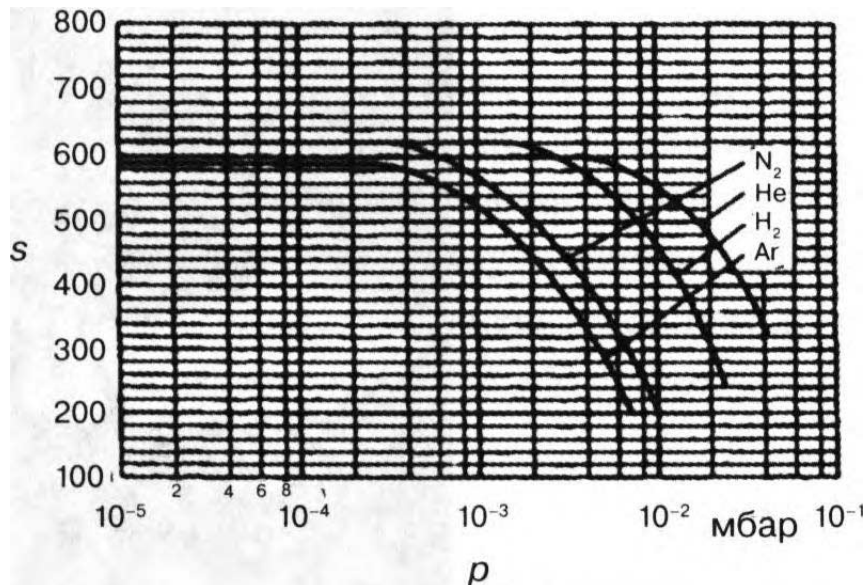


Рис. 13. Рабочие характеристики (зависимости скорости действия от впускного давления) турбомолекулярных насосов для различных газов: N<sub>2</sub> - азот; He - гелий; H<sub>2</sub> - водород; Ar - аргон

### Быстрота действия

На рис. 13 представлены рабочие характеристики ТМН (зависимости скорости действия от впускного давления) для различных газов. Маркировка модели ТМН часто включает в себя значение скорости откачки азота, которая используется в качестве 100% величины.

### **Предельное остаточное давление**

Предельное остаточное давление ТМН, как правило, находится в пределах от  $10^{-10}$  и  $10^{-9}$  торр благодаря использованию уплотнений металлических фланцев и двухступенчатого роторного форвакуумного насоса. Парциальное давление  $H_2$  в системе перед заполненным маслом двухступенчатым форвакуумным насосом составляет приблизительно  $5 \cdot 10^{-7}$  торр. Состояние термической обработки ТМН и вид используемого уплотнительного материала оказывают влияние на предельное остаточное давление и состав остаточного газа. Для достижения только что упомянутых типичных значений предельного остаточного давления ТМН должен быть подвергнут термической обработке, а металл должен использоваться в качестве уплотнительного материала на стороне высокого вакуума для уменьшения десорбции газа с внутренних поверхностей и уплотнительного материала.

### **Безопасность использования турбомолекулярных насосов**

При эксплуатации ТМН для максимального использования характеристик этих насосов следует тщательно соблюдать следующие правила, если это не противоречит указаниям руководства производителя.

#### **Попадание твердых частиц**

Входящие во впускное отверстие ТМН твердые частицы могут повредить ротор и подшипники. Следует пользоваться защитным экраном. Однако данные экраны уменьшают быстроту откачки приблизительно на 20-30%.

Большое количество пыли, поступающее в ТМН, может перекрывать зазоры между лопастями и корпусом насоса. Поэтому рекомендуется использовать пылевые фильтры на впуске ТМН. Здесь также будут происходить потери быстроты действия, вызванные низкой проводимостью потока этих фильтров.

### **Наклонное или горизонтальное положение насоса**

Если насос смонтирован в горизонтальном положении, то выходной фланец (форвакуумная сторона) должен быть направлен вниз во избежание скопления конденсатов (водного пара, масляного пара из форвакуумных трубопроводов) в зоне подшипника насоса (риск повреждения).

### **Термическая обработка насоса**

При термической обработке насоса для достижения низких значений давления следует соблюдать максимальные допустимые значения температуры. Перегрев может привести к отказу подшипника и ротора (материал ротора теряет свою прочность). Не производите термическую обработку насоса, когда система термически не обработана. Газы или пары, выпущенные из насоса во время термической обработки, будут конденсироваться на более холодных поверхностях системы.

### **Замена смазочных материалов**

Следует соблюдать периодичность замены смазочных материалов, указанную производителем для обеспечения полной эффективности и срока службы подшипников.

### **Форвакуумное давление**

В случае применения обычных ТМН форвакуумное давление, как правило, не должно превышать 0,5 мм рт. ст. При более высоких значениях давления форвакуумной линии насос нагревается (газовое трение), и могут повреждаться ротор и/или подшипники. Кроме того, если ротор не находится в диапазоне молекулярного потока, быстрота действия и степень сжатия уменьшаются.

Использование пластинчато-роторных насосов этого типа с открытым газовым балластом приведет к созданию риска того, что необходимый уровень вакуума в форвакуумной линии достигнут не будет.

### **Размеры впускных подсоединений**

Рекомендуется, чтобы высоковакуумное подсоединение имело по крайней мере такой же диаметр, что и впускной фланец насоса. Меньший диаметр приводит к значительным поте-



рям быстроты действия, вызванным низкими значениями проводимости. Например, для ТМН с номинальной быстротой действия, равной 500 л/с для  $N_2$ , и впускного фланца с внутренним диаметром 150 мм потери быстроты откачки  $N_2$  при использовании соединения длиной 300 мм с различным внутренним диаметром равны следующим величинам:

### **Криовакуумные насосы**

Криовакуумные насосы обеспечивают чистую высокоскоростную откачку всех газов из криогенных вакуумных камер и систем. Они функционируют благодаря сочетанию конденсации и адсорбции газов и паров на поверхностях, охлаждаемых до очень низких температур. В большинстве криогенных насосов используются наборы поверхностей (панелей), поддерживаемых при двух конкретных диапазонах температур посредством работающего обратно-поступательно механического охладителя, где используется гелий в качестве хладагента. Гелий подается под высоким давлением и комнатной температуре дистанционным компрессором и возвращается в компрессор при низком давлении, но при температуре несколько выше комнатной. Все холодные (но не движущиеся) детали охладителя находятся в пределах вакуумной среды насоса. В результате такого подхода создается надежный, экономичный вакуумный насос, подходящий для многих видов применения.

### **Конструкция криогенного насоса**

Корпус крионасосов, в частности таких, как на рис. 14, представляет собой вакуумный сосуд из коррозионностойкой стали или алюминия с высоковакуумным фланцем для установки высоковакуумного клапана.



Рис. 14. Криовысоковакуумные насосы

Двухступенчатый криоохладитель прикреплен болтами или соединен с сосудом посредством сварки. Поверхности охладителя, находящиеся под действием вакуума, выполнены из нержавеющей стали. Массивные медные нагревательные станции, иногда имеющие никелевое покрытие для антикоррозийной защиты и улучшения внешнего вида, припаяны к цилиндру охладителя для эффективной отдачи теплоты на конденсирующие криопанели. Медный тепловой излучающий экран, представляющий собой большую емкость с черной внутренней поверхностью, присоединен к станции нагревания первой ступени. Тепловой излучающий экран, покрытый черной краской, поддерживаемый посредством охладителя при температуре приблизительно 65 К, поглощает входящую из системы теплоту. Наружная сторона экрана имеет никелевое покрытие для уменьшения передачи теплового излучения от вакуумного резервуара, находящегося при комнатной температуре. Впускной массив медных криопанелей с никелевым покрытием прикрепляется к отверстию теплового излучающего экрана и также поддерживается при температуре, близкой 65 К. Впускной массив действует в качестве насоса для водяного пара (см. рис. 15).

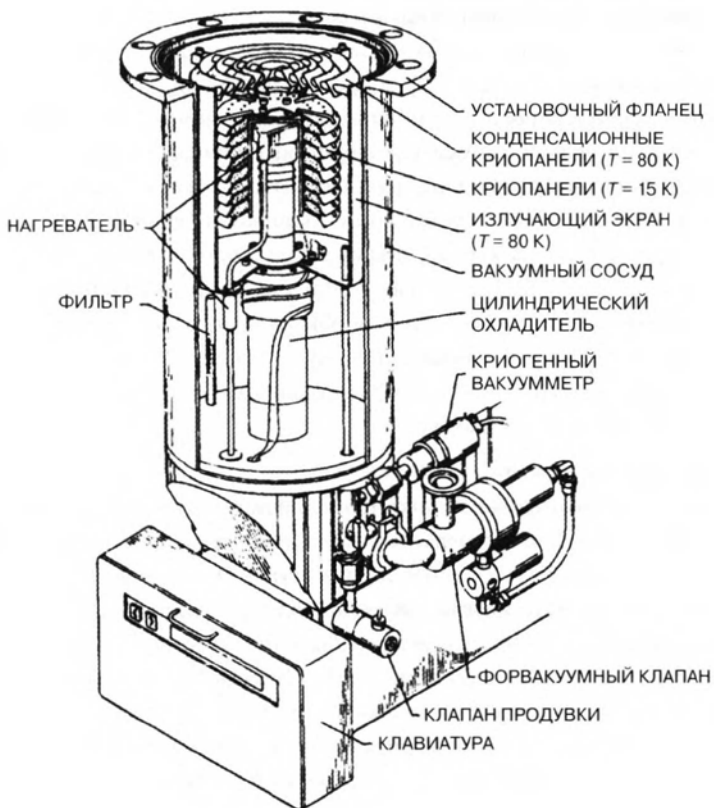


Рис. 15. Конструкция криогенного насоса

Внутри объема, заключенного между впускным и излучающим экраном, находятся криопанели второй ступени. При соединенные к станции нагревания более низкой температуры (10-20 K), медные криопанели в виде медных дисков, пластин или конусов используются в качестве второго насоса для аргона, кислорода, азота и других газов, которые откачиваются посредством конденсации. Эти криопанели также имеют никелевое покрытие. Над большей частью поверхности криопанелей второй ступени находится слой активированного или древесного угля. Он обеспечивает третий тип откачки внутри крионасоса: сорбционный насос для легких газов - водорода, гелия и

неона. Размер, форма и число этих поверхностей определяют быстроту откачки и емкость для всех газов, откачиваемых на второй ступени.

### **Конфигурация и работа охладителя в криовакуумных насосах**

Цикл Джиффорда-Макмагона - это цикл термодинамического расширения «без совершения работы» с использованием регенеративных теплообменников. В криовакуумных насосах конфигурация охладителя обычно состоит из двух ступеней разных диаметров, одна над другой (см. рис. 16). Поршень-вытеснитель, состоящий из двух частей разного диаметра, вставляется в цилиндр охладителя. Часть, имеющая больший диаметр, уплотняется сотнями дисков, которые составляют металлический экран. Часть меньшего диаметра добавочного поршня уплотнена свинцовыми шариками или подобными материалами. Экраны и шарики являются матрицей теплообменника. Сам корпус поршня изготовлен из прочной пластмассы с низкой теплопроводностью. Несколько отверстий в поршне направляют через него поток газа. Экраны и шарики уплотнены таким образом, чтобы стимулировать относительно свободный поток газа через матрицу, открывая поверхности шариков и экранов действию газа для оптимального обмена теплотой.

Низкоскоростной двигатель или пневматический привод перемещает поршень вверх и вниз внутри расточного отверстия цилиндра с номинальной частотой 60—72 хода в минуту. Когда охладитель работает, торец большого цилиндра первой ступени рядом с приводным механизмом находится при комнатной температуре. Другой конец цилиндра первой ступени, к которому припаяна станция нагревания первой ступени, имеет температуру приблизительно 65 К. Цилиндр меньшего диаметра второй ступени приварен к торцу первой ступени. Противоположный торец цилиндра второй ступени имеет температуру приблизительно 10—15 К. Точные температуры ступеней

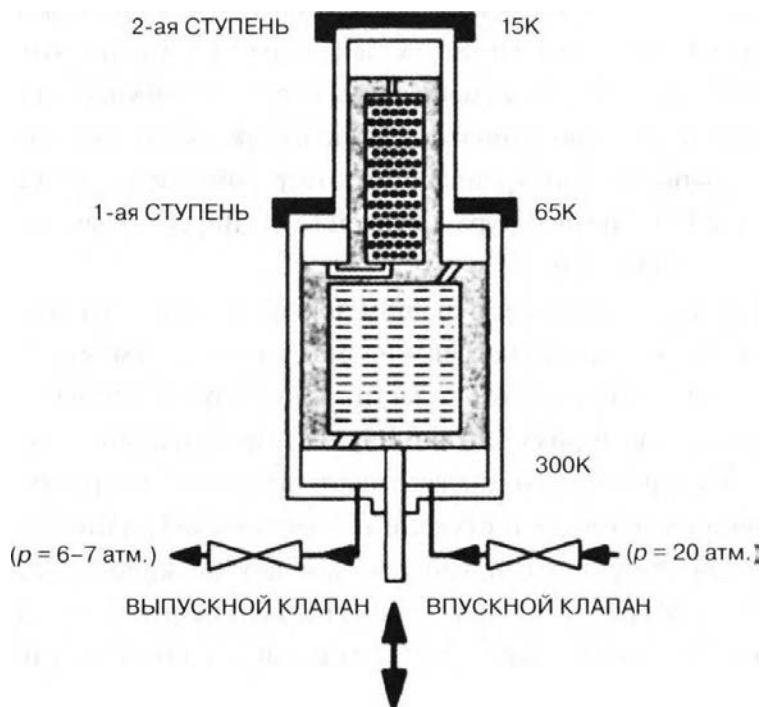


Рис. 16. Охладитель Джиффорда-Макмагона

определяются создаваемой на них термической нагрузкой, конструкцией поршней-вытеснителей в охладителе, значением

давления подачи и возврата гелия из компрессора и рядом других переменных.

Газ из компрессора под давлением приблизительно 20 атм. впускается в теплый торец цилиндра посредством механически синхронизированного впускного клапана. Гелий проходит через матрицы добавочного поршня и заполняет весь объем цилиндра до получения давления подачи. По мере того, как газ проходит через экраны и шарики, он охлаждается в процессе движения. В свою очередь, каждый экран или шарик

становится немного теплее. Перемещающийся поршень-вытеснитель проходит через газ, уменьшая в конечном итоге объем газа на теплом торце почти до нуля. В результате этого также создаются малые объемы газа при 65 К и 10 К на другом конце цилиндра по мере того, как поршень доходит до конца своего хода. В этой точке впускной клапан закрывается, а открывается выпускной клапан, который соединен с линией возврата, идущей в компрессор. Поскольку линия возврата имеет давление приблизительно 6—7 атмосфер, газ внутри цилиндров расширяется, охлаждается и движется обратно через поршни. При каждом ходе удаляется небольшое количество теплоты с каждой станции нагревания (и присоединенного массива криопанелей) для поддержания рабочих температур. Холодный газ, идущий обратно над шариками и экранами, охлаждает их снова до своей предыдущей температуры. По мере того, как поршень продолжает свое возвратнопоступательное движение, небольшие холодные объемы уменьшаются, принудительно заставляя оставшийся холодный газ перемещаться через матрицу поршня. Газ, выходящий из выпускного клапана охладителя, несколько теплее газа, вошедшего в цилиндр. Поскольку цилиндры охладителя — это сварная трубка, елий вообще не попадает в вакуумное пространство. Аналогичным образом ни один из газов, конденсирующихся в криогенном насосе, никогда не попадает в поток гелия.

### **Применение криогенных насосов**

Высоковакуумные испарители - это первый вид коммерческого применения крионасосов, когда они пришли на смену диффузионным насосам. Отсутствие обратного потока масляного пара и способность достигать значения давления около  $10^{-7}$  Торр и ниже делают крионасосы привлекательными для использования при нанесении разнообразных электронных и оптических тонких пленок путем испарения или металлизации напылением. Модели крионасосов сверхвысокого вакуума работают в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-11}$  Торр в системах, изучающих физику поверхности и молекулярно-пучковую эпитаксию.

## Характеристики крионасоса диаметром 200 мм

Быстрота откачки водяного пара	4000-4500 л/с
Быстрота откачки азота	1500 л/с
Быстрота откачки аргона	1200 л/с
Быстрота откачки водорода	2200-2500 л/с
Сорбционная емкость (по аргону)	1000 л
Сорбционная емкость (по водороду)	12—18 л
Производительность по аргону	700 см <sup>3</sup> /мин
Переходная характеристика	150 Торр-л
Время охлаждения	90—100 мин.
Время полной регенерации	2,5-3ч.

При производстве полупроводников крионасосы работают в установках вакуумного напыления металлов или системах для напыления металлизированных покрытий при  $5 \times 10^{-3}$  Торр и на конечных станциях установки ионной имплантации и линий пучка. Процессы ионного травления с помощью инертных газов, в частности таких, как аргон, а также реактивных газов, происходят в вакууме при откачке крионасосами. Промышленное оборудование, в частности электроннолучевые сварочные аппараты, вакуумная пайка, а также печи термообработки, основаны на свободной от масла среде камер с откачкой криогенными насосами для высококачественной обработки металла. НАСА и аэрокосмические компании пользуются большими крионасосами 90-120 см в диаметре для откачки имитационных камер космического пространства длиной 33 м до  $10^{-8}$  Торр, хотя при этом используются насосы гораздо большего размера с несколькими охладителями и  $LN_2$  для части охлаждения. Малые криогенные насосы диаметром 100 мм используются на загрузочном шлюзе вакуумных систем и в аналитических приборах, в частности таких, как системы вторичного ионного масс-спектрометра. Наиболее популярные криовакуумные насосы имеют диаметр 200 мм, и большинство из них

используются в коммерческих полупроводниковых производственных системах. Типичные характеристики крионасоса диаметром 200 мм приведены в таблице.

### **Преимущества крионасосов**

#### **Быстрота действия**

Крионасосы имеют наивысшую быстроту действия при любом диаметре впуска. При откачке водяного пара криогенные насосы имеют 100%-ную максимальную теоретическую быстроту действия. В случае аргона, кислорода, азота и других газов Типа II эффективность этих насосов составляет приблизительно 40%. Значение эффективности криогенных насосов по водороду составляет приблизительно 18—25% теоретического максимума. Они выгодно отличаются от турбомолекулярных насосов с эффективностью 8—13% для всех газов и диффузионных насосов с ловушкой LN<sub>2</sub> с эффективностью 20—25% для всех газов, кроме водяного пара (по водяному пару ловушка имеет ~ 100%-ную эффективность). Ионные насосы достигают эффективности приблизительно 20% для активных газов, но только 5% для аргона и других нейтральных газов.

#### **Стоимость**

Крионасосы характеризуются самыми низкими затратами в литрах/секунду, отнесенными к инвестированному доллару. Хотя базовый диффузионный насос является дешевым, добавление к нему ловушки и систем управления значительно повышает стоимость, при этом высокими являются такие эксплуатационные затраты, как электроэнергия и охлаждающая вода. Турбомолекулярные насосы стоят дороже при той же скорости действия и при большем требуемом диаметре впуска. Для того чтобы полностью освободиться от масла в турбомолекулярном насосе, требуется система магнитной левитации, из-за которой стоимость турбонасоса удваивается. Турбомолекулярный насос также требует форвакуумного насоса. Ионные насосы с высокой скоростью действия имеют непрактичные



габаритные размеры и стоимость, их нельзя использовать в системах с большой производительностью.

### **Чистота процесса**

При самых сложных и критических отключениях электроэнергии крионасосы могут только вернуть в вакуумную систему те газы, которые откачали. Крионасосы не вызывают обратного потока масла даже от форвакуумного насоса.

### **Надежность**

Крионасосы имеют высокую надежность. Относительно простые механические части насоса работают с очень малой скоростью, поэтому быстро не изнашиваются. Большинство насосов будут работать в течение двух—пяти лет без технического обслуживания. Затраты на капитальный ремонт составляют незначительную долю первоначальной стоимости покупки. В случае механической поломки ни одна из деталей не попадает в вакуумную систему.

### **Расположение**

Криогенные насосы могут работать при любой ориентации. Они работают одинаково как фланцевой стороной вверх, так и фланцевой стороной вниз или в сторону. Ориентация не имеет значения, как в турбомолекулярных насосах с масляной смазкой или магнитной левитацией или как в диффузионных насосах. Однако следует заранее обдумать вопрос с удалением жидкостей при регенерации крионасоса

## **Ограничения крионасосов**

### **Регенерация**

Крионасосы, безусловно, требуют регенерации. Сорбционная емкость по аргону и азоту достаточно высокая для того, чтобы насос мог работать в течение недели, пропуская большие нагрузки технологического газа, однако после этого следует провести регенерацию в течение 1-3 ч. То же самое относится и к установкам ионной имплантации. Некоторые виды применения характеризуются такими высокими газовыми нагрузками, что требуется ежедневная регенерация.

### **Теплоемкость**

Крионасосы характеризуются ограниченной теплоемкостью. Технологические процессы с повышенными значениями температуры в технологической камере могут привести к перегреву крионасоса. Тепловое экранирование может сократить общую быстроту действия и привести к тому, что целесообразно будет применить другой тип насоса.

### **Откачиваемые газы**

Крионасосы не могут обеспечить действия во всех технологических процессах. Системы, создающие высокие газовые нагрузки водорода или гелия, не подходят для применения в них крионасосов. Технологические процессы, предполагающие использование высокотоксичных, пожароопасных или других опасных газов в больших количествах, не должны предусматривать использование криогенных насосов в связи с недостаточной безопасностью оператора. Сюда, среди прочих, входят такие газы, как арсин, фосфин, силан и метан, а также озон. В вакуумных печах, в которые загружаются масляные детали, следует предусмотреть другой тип насоса.

### **Перспективные разработки**

За последние 5-10 лет крионасосы значительно усовершенствовались - повысились быстрота действия и сорбционная емкость, снизилось время регенерации. Для улучшения интеграции криогенного насоса с остальной частью вакуумной системы было добавлено автоматическое управление и функции связи. Можно ожидать, что движение вперед во всех этих областях будет продолжаться.

Управление скоростью приводной системы крионасоса обещает обеспечить ряд преимуществ. При более высоких скоростях хода поршня улучшится КПД охладителя. В результате удвоения или утроения скорости хода, если будет допустима некоторая вибрация, значительно сократится время охлаждения и замораживания. Поскольку это ускорение действует только в течение короткого периода, происходит незначительное сокращение общего срока службы. При значениях скоро-

сти ниже стандартной утилизация газа из компрессора улучшается, а уровни вибрации сокращаются.

Разработка устройств микропроцессорного управления, встроенных в крионасос, а также контроллеров, распределенных в сети крионасоса, уже позволяют насосам осуществлять процессы регенерации, являющиеся нетехнологичными при использовании ручных устройств управления. Дальнейшая интеграция этих функций может позволить эффективно использовать ресурсы системы, в частности такие, как форвакуумные насосы между форвакуумной откачкой с загрузочным шлюзом и регенерацией крионасоса. Способность регистрации и управления большим количеством параметров эксплуатации насоса позволяет заложить в насос аналитические и диагностические функции. Потребности в техническом обслуживании могут прогнозироваться и сообщаться оператору системы либо на месте, либо в дистанционном режиме.

Все больше и больше распространяется практика создания крионасосов для конкретных технологических процессов и даже конкретных вакуумных систем. В целях получения наилучших характеристик насоса для конкретного процесса можно пожертвовать различными другими рабочими параметрами. По этой причине конструкторам системы и заказчикам насосов необходимо поднимать эксплуатационные характеристики криогенных насосов в целях получения наилучшего уровня результатов при соответствующих затратах.

Исходя из описания установки возможны несколько вариантов действия. Если имеется ссылки на конкретную марку насоса находится характеристики данного вакуумного агрегата. Если есть только скорость откачки, то подбирается насос с соответствующей скоростью. **Пример.** Из характеристик установки мы имеем «**турбомолекулярный вакуумный насос пр-ва Varian со скоростью откачки 80 л/с**». На сайте <http://www.ccsservices.ru/vacuum/turbotab.html> найдем характеристики данного турбомолекулярного насоса (табл.1).



Рис. 17. 2-х камерный механический вакуумный насос DS-102

Наиболее подходящий вариант Turbo V 70 LP имеет скорость откачки 68 л/с, диаметр входного фланца 63 мм, диаметр выходного фланца 16 мм. Рекомендованным вакуумным форнасосом является 2-х камерный механический вакуумный насос DS-102 (рис. 17). 2-х камерный механический вакуумный насос DS-102 находим на сайте [http://atomproekt.ru/katalog/vakuumnoe\\_oborudovanie/varian/dvukamernye-plastinchato-rotornye-vakuumnye-nasosy-serii-ds/](http://atomproekt.ru/katalog/vakuumnoe_oborudovanie/varian/dvukamernye-plastinchato-rotornye-vakuumnye-nasosy-serii-ds/).

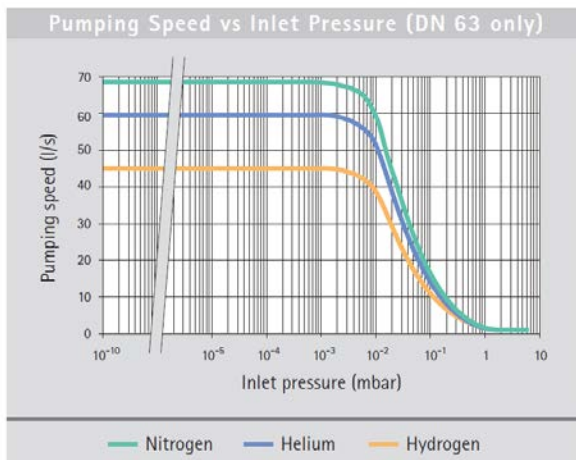
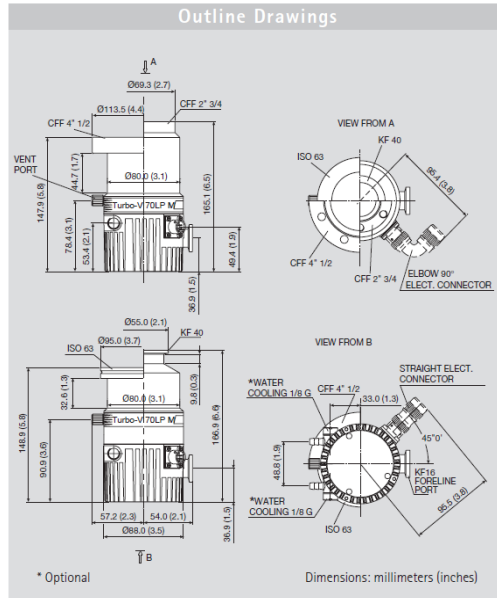


Рис. 18. Технические данные на 2-х камерный механический вакуумный насос DS-102

## **Двухкамерные пластинчато-роторные вакуумные насосы серии DS фирмы Varian Vacuum Technologies.**

Новая серия двухкамерных вакуумных пластинчато-роторных механических насосов серии DS фирмы Varian Vacuum Technologies, поставляемых фирмой CCS Services, разработана в ответ на возросшие требования предъявляемые промышленными предприятиями и научно-исследовательскими организациями к качеству и надежности оборудования для получения низкого вакуума.

Благодаря простой и надежной конструкции механические вакуумные насосы серии DS устойчивы в работе и обеспечивают превосходные рабочие характеристики по вакууму. Качество и высокие стандарты производства фирмы Varian гарантируют высокую стабильность откачки, в том числе и легких газов, низкий шум, минимальный обратный поток масляных паров и высокий эксплуатационный ресурс.

Конструктивные особенности и преимущества работы насосов серии DS Varian.

Двухкамерная конструкция вакуумного насоса позволяет обеспечить стабильную откачку до  $10^{-3}$  торр при низкой рабочей температуре насоса и минимально возможном для механических пластинчато – роторных насосов обратном потоке масляных паров

В вакуумный насос встроен клапан предупреждения обратного потока, препятствующий попаданию масла в рабочую камеру насоса при его простое. Тот же клапан предотвращает самопроизвольное вентилирование и попадание масла в вакуумную систему при отключении вакуумного насоса.

Принудительная циркуляция масла обеспечивается встроенным зубчатым насосом, гарантирующим эффективную и надежную смазку пластинчато-роторного насоса во всем диапазоне рабочих давлений.

Клапан газового балласта обеспечивает поступление воздуха во вторую ступень вакуумного насоса. В результате температура второй ступени возрастает, что приводит к дега-

зации и очищению масла от паров воды и других конденсирующихся газов

Охлаждающий вентилятор, встроенный между двигателем и откачной камерой вакуумного насоса, уменьшает температуру корпуса насоса и масла, что снижает парциальное давление паров масла, уменьшает обратный поток масляных паров и следовательно позволяет избежать загрязнения вакуумной системы.

Вакуумный насос состоит из модулей, которые собираются и центрируются с помощью направляющих штанг. Данная конструкция ускоряет и облегчает сборку вакуумного насоса после ремонта или техобслуживания.

На торцевой поверхности вакуумного насоса имеется окно для наблюдения за состоянием и уровнем масла в насосе. Вакуумные пластинчато-роторные насосы серии DS соответствуют требованиям CE, все двигатели вакуумных насосов данной серии одобрены UL и CSA (сертифицирующие по технике безопасности организации США и Канады), а также сертифицированы по стандарту ISO9001.

## Турбомолекулярные насосы. Характеристики

Таблица 2

Вакуумные турбомолекулярные насосы Varian Спецификация вакуумного насоса	Turbo V 70		Turbo V 70 D		Turbo V 70 LP		Turbo V 301 Navigator	
	DN 40	DN 63	DN 40	DN 63	DN 40	DN 63	DN 100	DN160
Скорость откачки, л/с								
Азот	46	68	40	60	46	68	250	280
Гелий	52	60	27	30	52	60	220	230
Водород	42	45	20	20	42	45	200	210
Максимальный вакуум, мбар								
Со штатным механическим вакуумным насосом	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-10}$
Со штатным безмасляным вакуумным насосом	нет	нет	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-9}$
Время пуска, мин.	1	1	1	1	1	1	2.5	2.5
Скорость вращения, об/мин.	75,000	75,000	75,000	75,000	75,000	75,000	56,000	56,000
Рекомендованный вакуумный насос								
2-х камерный механический вакуумный насос	DS 102	DS 102	DS 102	DS 102	DS 102	DS 102	DS 102	DS 102
Безмасляный вакуумный насос	нет	нет	MD 12	MD 12	MDP 12	MDP12	SH-100	SH-100
Входной фланец, номинальный диаметр								
Klapp фланец, мм	40		40		40			
ConFlat (CF), мм	35	63	35	63	35	63	100	160
ISO мм	-	63		63		63	100	160
Фланец вакуумного насоса, номинальный диаметр								
Wheeler, дюймы								
Klapp фланец	NW 16	NW 16	NW 16	NW 16	NW 16	NW 16	NW 16	NW 16



Технические характеристики насосов можно найти на сайте [http://www.lesker.com/newweb/Vacuum\\_Pumps/rotaryvanerump\\_varian.cfm](http://www.lesker.com/newweb/Vacuum_Pumps/rotaryvanerump_varian.cfm) см. табл.3. Для расчетов нам потребуется скорость откачки насоса  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$  и диаметр входного патрубка 25 мм.

### Технические характеристики

Таблица 3

Насос модели	DS42	DS102	DS202	DS302	DS402	DS602	HS452	HS652
Вакуумное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло	Standard Series Углеводородное масло
Скорость откачки $\text{м}^3/\text{ч}$	1,6	4	6,8	10	14,5	21,4	16,1	23,8
Предельный вакуум, Торр	$3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$
Мотор л.с. (кВт)	0.4	0.45	0.45	0.45	0.45	0.75	0.75	0.5
Объем масла (л)	0.6	0.5	0.6	0.6	1	1	1	1
Входной фланец	KF16	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25
Выхлопной фланец	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25	KF25

### 1.3. Разработка вакуумной системы

Наличие средств откачки определенного вида определяет стандартную схему откачки. Для нашего случая схема приведена на рис.19. Разработка данного чертежа необходима для описания процесса откачки.

Для приведенной схемы подключения можно иметь следующий технологический процесс откачки.

1. Включить электрическое питание на установку.
2. Открыть пневматическую магистраль.
3. Включить механический насос 1.
4. Включить вакуумметр термопарный (преобразователей 6, 9).

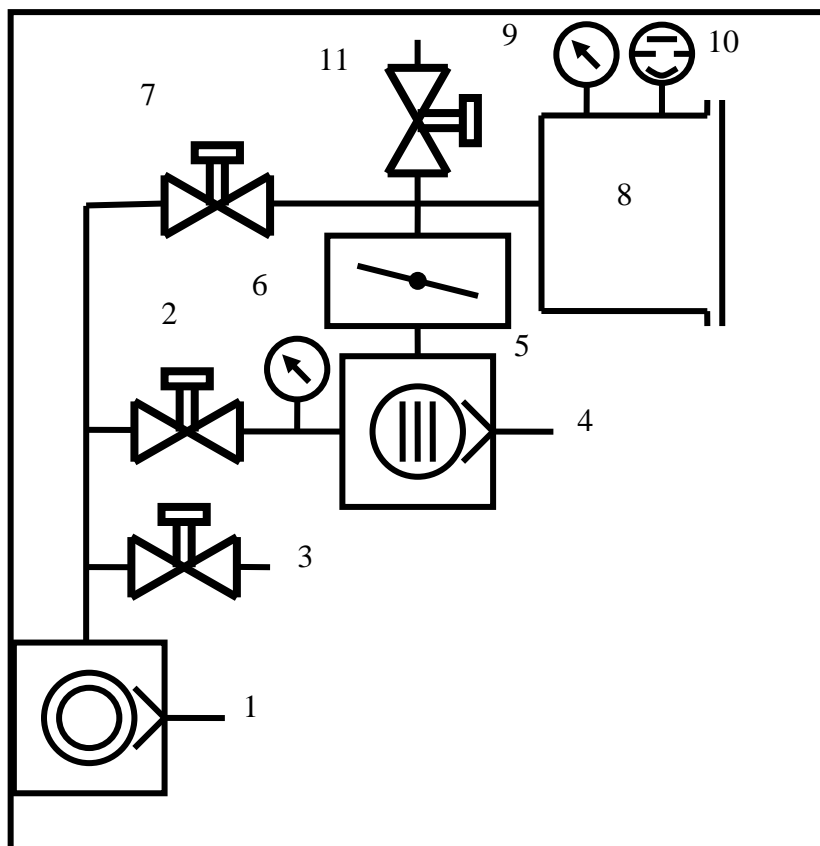


Рис. 19. Высоковакуумная система откачки:

1-механический насос, 2, 3, 7, 11 – электромагнитные вакуумные клапаны, 4 – турбомолекулярный насос, 5 – высоковакуумный клапан, 6, 9 – манометрические преобразователи Пирани, 10 – ионизационный преобразователь

5. Включить турбомалекулярный насос 4.
6. Открыть клапан 2 и произвести откачку турбомалекулярного насоса 4 до давления  $5 \cdot 10^{-2}$  торр.
7. Закрыть клапан 2, открыть клапан 7 и произвести откачку камеры 8 до давления  $5 \cdot 10^{-2}$  торр.

8. Закрыть клапан 7, открыть клапан 2.
9. Открыть высоковакуумный клапан 5 и произвести откачку  $1 \cdot 10^{-6}$  торр.

Исходя из разработанного процесса мы должны обратить внимание на два параметра: предварительный вакуум в камере  $5 \cdot 10^{-2}$  торр и предельное остаточное давление  $1 \cdot 10^{-6}$  торр. Данные параметры выбираются если на рассматриваемую установку производитель не объявляет свои параметры. Тогда предельный вакуум может быть скорректирован.

Для определения длин вакуумопроводов и их диаметров необходимо прорисовать схему установки в известном масштабе. Из рисунка 20 следует, что диаметр вакуумопровода механический насос камера 25 мм и его длина 800 мм. Диаметр вакуумопровода турбомолекулярный насос камера 63 мм, его длина 80+120 мм и имеется поворот трубы на  $90^{\circ}$ .

#### **1.4. Исходные данные**

Из выявленных выше разделов можно формировать исходные данные.

Скорость откачки механического насоса –  $4 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,1 \text{ л/с}$ .

Скорость откачки турбомолекулярным насосом – 68 л/с.

Длина магистрали механический насос-камера – 80 см.

Диаметр трубопровода механический насос-камера – 2,5 см.

Длина трубопровода турбомолекулярный насос – камера по оси магистрали –  $12+8-6,3=13,7$  см. (расчет по средней линии)

Диаметр трубопровода турбомолекулярный насос – камера – 6,3 см.

Трубопровод турбомолекулярный насос – камера имеет угол  $90^{\circ}$ .

Объем камеры – 36 л.

Площадь поверхности камеры –  $6600 \text{ см}^2$ .

Материал камеры – нержавеющая сталь.  
Величина предварительного разряжения в камере -  $5 \cdot 10^{-2}$   
Торр.  
Предельный вакуум в камере  $1 \cdot 10^{-6}$  Торр.  
**Найти время откачки - ?.**

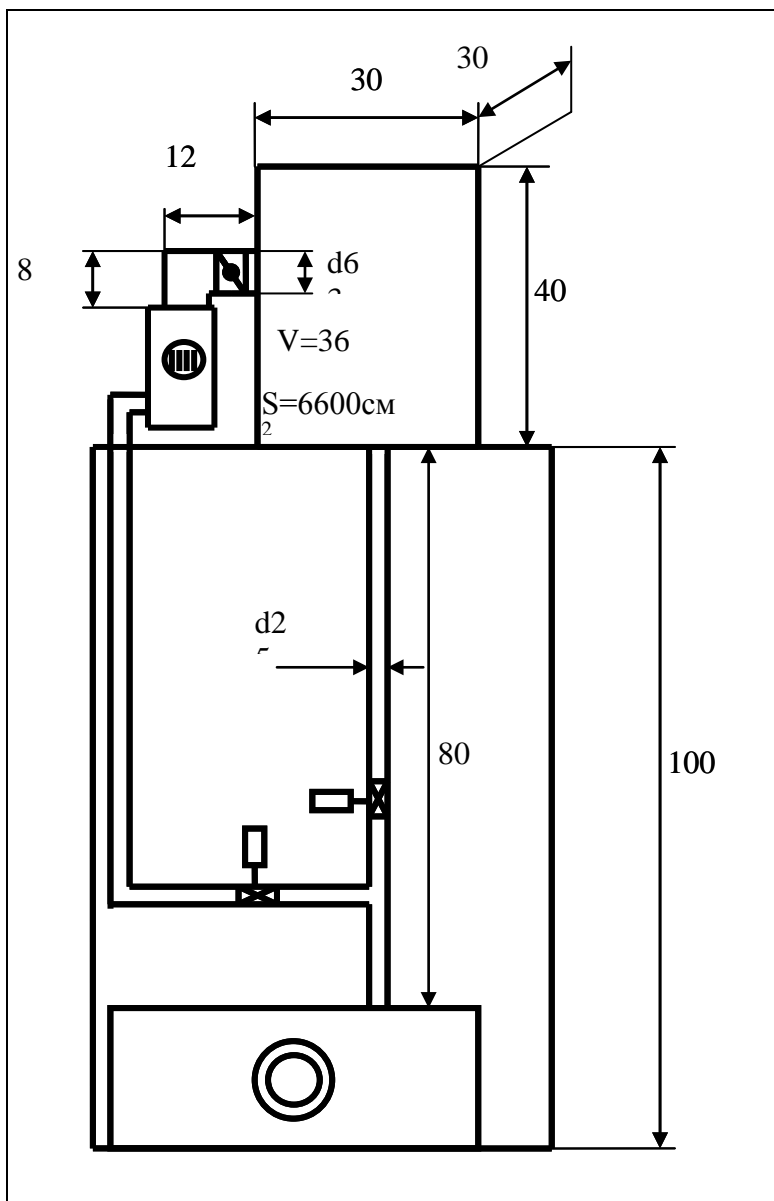


Рис. 20. Эскиз расположения вакуумной камеры, трубопроводов и вакуумных насосов

## 2. РАСЧЕТ

1. Найдем диапазоны давлений в трубопроводе механический насос-камера в котором осуществляется вязкостный режим течения газа.

Критерий вязкостного режима течения газа в магистрали механического насоса  $d=25$  мм,  $d/L > 100$ ,  $L=L_1/p$ .

$L_1$  - средняя длина свободного пробега молекулы воздуха при давлении 1 Торр в воздухе при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

$$L_1 = 0,472 \text{ мм}$$

$$p_{\text{вяз min}} = 100 \cdot L_1 / d = 47.2 / 25 = 1.888 \text{ Торр.}$$

От 760 до 1,9 Торр режим откачки вязкостный.

2. Найдем диапазоны давлений в трубопроводе механический насос-камера в котором осуществляется молекулярно-вязкостный режим течения газа.

Критерий молекулярно-вязкостного режима течения газа в магистрали механического насоса от  $d/L=1$  до  $d/L > 100$ ,  $L=L_1/p$ ,  $d=25$  мм:

$$p_{\text{мол-вяз min}} = 1 \cdot L_1 / d = 0,472 / 25 = 1.888 \cdot 10^{-2} \text{ Торр.}$$

От  $1,9 \cdot 10^{-2}$  до 1,9 Торр режим откачки молекулярно-вязкостный.

3. Проводимость трубопровода в вязкостном режиме течения газа:

$$U_{\text{ТВ}} = 181 \frac{d^4}{L} p_0 = 181 \frac{2,5^4}{80} p_0 = 88,4 p_0,$$

где  $p_0 = (p_1 + p_2) / 2$  среднее давление между давлением в камере и на входе механического насоса,  $d$ -диаметр,  $L$ -длина трубопровода (л/с, Торр, см<sup>4</sup>, см).

4. Проводимость трубопровода в молекулярно-вязкостном режиме течения газа (л/с, Торр, см<sup>4</sup>, см):

$$U_{\text{TM-B}} = U_{\text{ТВ}} + 0,9U_{\text{TM}} = 181 \frac{d^4}{L} p_0 + 12 \frac{d^3}{L} = 88,4p_0 + 2,3,$$

\* если трубопровод имеет повороты, то поправка на длину трубопровода  $\Delta L$  суммируется к общей длине.

$$\Delta L = 2.6d \frac{\varphi}{180^\circ}.$$

5. Длительность откачки вакуумной камеры механическим насосом.

Теория

Обозначим объем откачиваемого объекта через  $V$ , давление в нем в данный момент времени — через  $p_1$  и быстроту откачки объекта — через  $S_0$ . Будем предполагать, что ни натекания, ни внутреннего газовыделения в вакуумной системе нет.

Положим, что за промежуток времени  $dt$  давление в откачиваемом объекте снижается на  $dp_1$ . Тогда количество газа, поступающее в трубку за промежуток времени  $dt$ , равно  $S_0 p_1 dt$ , а убыль газа в объекте за этот промежуток времени равна  $V dp_1$ .

Эти количества газа, очевидно, равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку, следовательно,

$$S_0 p_1 dt = -V dp_1.$$

Отсюда

$$dt = -\frac{V}{S_0} \frac{dp_1}{p_1}.$$

Так как

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U}.$$

То

$$dt = -V \left( \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U} \right) \frac{dp_1}{p_1}. \quad (1)$$

При вычислении длительности откачки, достаточной для снижения давления в откачиваемом объекте до заданного значения, приходится пользоваться различными вариантами формулы (1) в зависимости от соотношения между быстротой действия насоса  $S_H$  и пропускной способностью вакуумпровода  $U$ .

#### **Вакуумпровод с большой пропускной способностью**

$$S_H \ll U.$$

В случае короткого вакуумпровода с большим диаметром слагаемым  $1/U$  можно пренебречь и уравнение (1) написать в виде:

$$dt = -\frac{V}{S_H} \frac{dp_1}{p_1}.$$

В нашем уравнении среднее значение быстроты действия насоса, которое мы обозначим через  $S_H$ , известно; требуется же определить промежуток времени (обозначим его через  $t$ ), за который давление в откачиваемом объекте снизится с  $p_1$  до  $p_2$ .

Следовательно, в этом случае решение можно написать в виде

$$t = 2,3 \frac{V}{S_H} \lg \frac{p_1}{p_2}.$$



## Вакуумпровод с малой пропускной способностью

$$S_H \gg U.$$

При условии, когда трубопровод имеет относительно малую пропускную способность, в уравнении (1) можно отбросить величину  $1/S_H$  и представить его в виде:

$$dt = -\frac{V}{U} \frac{dp_1}{p_1}.$$

Интегрирование этого уравнения приведем в общем виде:

$$t = V \int_{p_H}^{p_K} \frac{dp_1}{U p_1}. \quad (2)$$

Формулой (2) можно пользоваться для вычисления длительности откачки электровакуумных приборов, для которых, как мы знаем, условие ( $U \ll S_H$ ) всегда соблюдается.

Длительность откачки при молекулярном режиме

При молекулярном режиме пропускная способность  $U_M$  вакуумпровода не зависит от давления; поэтому величину  $U = U_M$  можно вынести за знак интеграла. Следовательно,

$$t = \frac{V}{U_M} \int_{p_K}^{p_H} \frac{dp_1}{p_1} = 2,3 \frac{V}{U_M} \lg \frac{p_H}{p_K}.$$

Если давление  $p_K < 10 p_0$ , т. е. близко к предельному давлению  $p_0$ , достигаемому насосом, то необходимо, как мы уже знаем, вместо  $p_K$  брать разность  $p_K - p_0$ . Мы видим, что если  $U = S_H$ , то длительность откачки при молекулярном режиме обратно пропорциональна пропускной способности вакуумпровода.

### **Длительность откачки при молекулярно-вязкостном режиме**

При молекулярно-вязкостном режиме пропускная способность вакуумпровода зависит от среднего давления в нем, поэтому за знак интеграла величину  $U$  формуле (3) выносить нельзя. Среднее давление в вакуумпроводе  $(p_1+p_2)/2$  можно считать равным  $p_1/2$ , давление  $p_2$  (у входа в насос), ввиду того что  $S_H > U$ , можно считать равным нулю. После этого, обозначив величину  $U$  для молекулярно-вязкостного режима через  $U_{М-В}$ , можем написать:

$$U_{МВ} = U_M \left( b + 7,4 \cdot 10^{-2} \frac{d}{\lambda_1} \frac{p_1}{2} \right)$$

Подставим это выражение в формулу (2), введя обозначения

$$7,4 \cdot 10^{-2} \frac{d}{\lambda_1} \frac{p_1}{2} = a$$

и приняв  $b = 0,9$ ; после подстановки

$$t = \frac{V}{U_M} \int_{p_K}^{p_H} \frac{dp_1}{p_1} = 2,3 \frac{V}{0,9 U_M} \lg \left( \frac{p_H}{p_K} - \lg \frac{0,9 + a p_H}{0,9 + a p_K} \right). \quad (3)$$

Для воздуха при  $20^\circ\text{C}$ , если давления выразить в миллиметрах рт. ст., величина  $a = 7,8 \cdot 10^2 d$ . Поправку на предельное давление следует делать, если  $p_K < 10 p_0$ .

### **Длительность откачки при вязкостном режиме**

Так как пропускная способность при вязкостном режиме зависит от среднего давления, то величину  $U$  за знак интеграла в формуле (2) выносить нельзя. Среднее давление в вакуумпроводе  $(p_1+p_2)/2$  можно считать равным  $p_1/2$  и обозначив  $U$

через  $U_B$ , мы можем формулу для пропускной способности трубопровода при вязкостном режиме записать в виде:

$$U_B = 181 \frac{d^4}{L} \frac{p_1}{2} = C p_1,$$

где

$$C = 181 \frac{d^4}{2L}.$$

На основании формулы (2) можем написать выражение для длительности откачки при вязкостном режиме:

$$t = V \int_{p_H}^{p_K} \frac{dp_1}{C p_1^2} = \frac{V}{C} \left( \frac{1}{p_K} - \frac{1}{p_H} \right). \quad (4)$$

**5.2** Исходя из описанной теории оценим диапазон изменения проводимости вакуумпровода.

Рассчитаем минимальную проводимость вакуумпровода в молекулярно-вязкостном режиме (л/с, Торр, см<sup>4</sup>, см):

$$\begin{aligned} p_0 &= 5 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}; \\ U_{TM-B \min} &= U_{TB} + 0,9U_{TM} = 181 \frac{d^4}{L} p_0 + 12 \frac{d^3}{L} = \\ &= 88,4 \cdot 5 \cdot 10^{-2} + 2,3 = 6,72 \text{ л/с}. \end{aligned}$$

Рассчитаем максимальную проводимость вакуумпровода в вязкостном режиме (л/с, Торр, см<sup>4</sup>, см):

$$\begin{aligned} p_0 &= 760 \text{ Торр}; \\ U_{TB \max} &= 181 \frac{d^4}{L} p_0 = 181 \frac{2,5^4}{80} p_0 = 88,4 p_0 = 88,4 \cdot 760 = 67184 \text{ л/с}. \end{aligned}$$

Проводимость магистрали механический насос-вакуумная камера меняется от 67184 до 6,72 л/с, что гораздо выше  $S_H=4 \text{ м}^3/\text{ч}=1,1 \text{ л/с}$ .

5.3. Для расчета времени откачки вакуумной камеры механическим насосом воспользуемся уравнением

$$t = 2,3 \frac{V}{S_H} \lg \frac{p_1}{p_2} = 2,3 \frac{36}{1,1} \lg \frac{760}{p} = 75,271 \lg \frac{760}{p} .$$

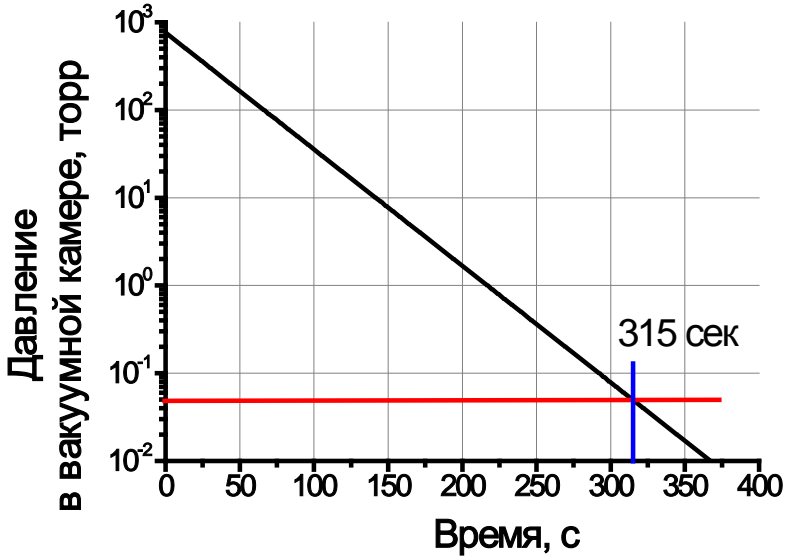


Рис. 21. Временная зависимость давления в вакуумной камере при откачки механическим насосом

6. При решении мы пренебрегали процессом натекания воздуха в камеру за счет десорбции газов с поверхности необезгаженных вакуумных материалов при процессах дегазации, диффузионным газовыделением конструкционных материалов при комнатной температуре и дегазации паров воды.

6.1. В табл. 4 приведены значения удельных газовыделений при десорбции с поверхности распространенных материалов через 1 ч после начала десорбции и коэффициентов  $A_1$  и  $B_1$  В выражении

$$\lg q = A_1 - B_1 t,$$

где  $t$  - время сек, а  $q$  в л Торр см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

Таблица 4

Десорбция с поверхности необезгаженных вакуумных материалов

Материал	Удельное газовыделение через 1 ч, л·торр см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	$A_1$	$B_1$
Малоуглеродистая сталь	$3,1 \cdot 10^{-7}$	-6,4	$3,06 \cdot 10^{-5}$
Нержавеющая сталь	$1,3 \cdot 10^{-7}$	-7,13	$6,39 \cdot 10^{-5}$
Медь	$1,5 \cdot 10^{-7}$	-6,78	$1,39 \cdot 10^{-5}$
Сварной шов на медной трубе	$2,1 \cdot 10^{-7}$	-4,53	$4,7 \cdot 10^{-5}$
Дюралюминий	$4,2 \cdot 10^{-7}$	-6,25	$3,33 \cdot 10^{-5}$

$$Q_{ДЕС} = S_{кам} 10^{A_1 - B_1 t} = 6600 \cdot 10^{-7,13 - 6,39 \cdot 10^{-5} t}.$$

$$\begin{aligned} Q_{ДЕС \max} &= S_{кам} 10^{A_1} = 6600 \cdot 10^{-7,13} = 6600 \cdot 7,41 \cdot 10^{-8} = \\ &= 4,89 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{торр} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

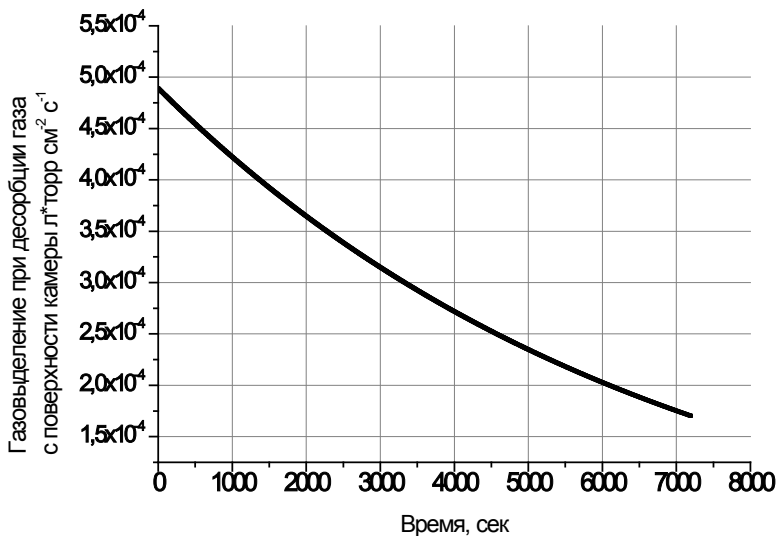


Рис. 22. Временная зависимость газовыделения с поверхности камеры

**6.2.** В табл. 5 приведены значения удельного диффузионного газовыделения с поверхности распространенных материалов через 1 ч после начала десорбции и коэффициентов  $A_1$  и  $B_1$  В выражении

$$\lg q_{\text{ДИФ}} = A - Bt,$$

где  $t$  - время сек, а  $q_{\text{ДИФ}}$  в  $\text{м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$ .

$$\begin{aligned} Q_{\text{ДИФ}} &= S_{\text{кам}} \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{A-Bt} = \\ &= 6600 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{A-Bt} = 4,95 \cdot 10^{A-Bt} = \\ &= 4,95 \cdot 10^{-4,1-8,3 \cdot 10^{-5}t} (\text{л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}). \end{aligned}$$

$$Q_{диф\max} = 4,95 \cdot 10^{-4.1} = 3.93 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}.$$

Таблица 5

Удельное диффузионное газовыделение конструкционных материалов при комнатной температуре

Материалы	Обработка	Удельное газовыделение через час после откачки, $q_{ср}, \text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	коэффициенты	
			А	В
Сталь нержавеющая	Без обработки	$4 \cdot 10^{-5}$	-4,1	$8,3 \cdot 10^{-5}$
Сталь нержавеющая	Вакуум, 450 <sup>0</sup> С, 15 ч	$10^{-8} \dots 10^{-10}$		
Сталь конструкционная	Без обработки	$4 \cdot 10^{-4}$	-3,2	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Сталь конструкционная	Хромирование	$1,3 \cdot 10^{-7}$		
Сталь конструкционная	Вакуум, 450 <sup>0</sup> С, 15 ч	$10^{-8} \dots 10^{-10}$		
Медь	Без обработки	$2 \cdot 10^{-4}$	-3,5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Медь	Вакуум, 450 <sup>0</sup> С, 15 ч	$10^{-8} \dots 10^{-10}$		
Латунь	Без обработки	$2 \cdot 10^{-4}$	-3,4	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	Без обработки	$6 \cdot 10^{-6}$		
Никель	Без обработки	$7 \cdot 10^{-6}$		
Резина вакуумная	Без обработки	$10^{-2}$		
Полиэтилен	Без обработки	$10^{-4}$		
Фторопласт	Без обработки	$3 \cdot 10^{-4}$		

Примечание:  $1) \text{ м}^3 \text{ Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ л Торр} / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$ .

Диффузионное газовыделение имеет нестационарную природу, но для большинства газов и материалов постоянная времени этих процессов настолько велика, что они могут рассматриваться как стационарные. Упрощенный метод опреде-

ления диффузионного газовыделения основан на применении экспериментально определенных значений коэффициентов удельного диффузионного газовыделения (таблица 2), зависящих от рода газа, материала и его предварительной обработки, а также рабочей температуры.

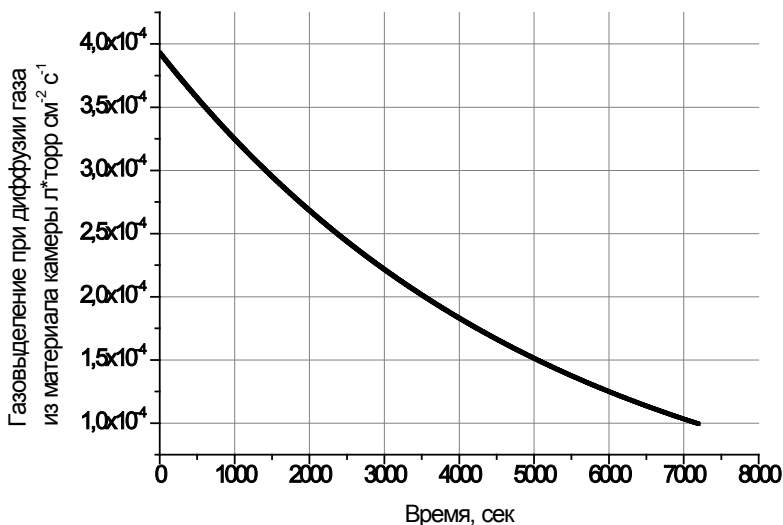


Рис. 23. Временная зависимость диффузионного газовыделения из материала камеры

**6.3.** Для расчета времени откачки вакуумной системы, содержащей двухкомпонентную смесь сухого воздуха и паров воды, запишем два уравнения изотермического процесса откачки:

$$p_1 V_K = \text{const};$$

$$p_2 \cdot V_K + a \cdot S_K = \text{const},$$



где  $p_1$  - давление воздуха без учета давления паров воды, Па;  $p_2$  - давление паров воды в воздухе, Па;  $a$  - количество паров воды, адсорбированное на единице геометрической поверхности камеры,  $\text{м}^3$ , Па/ $\text{м}^2$ ;  $S_K$  - геометрическая площадь поверхности камеры,  $\text{м}^2$ ;  $V_K$  - объем камеры,  $\text{м}^3$ .

Продифференцировав уравнения системы и разделив на  $dt$ , считая, что адсорбционное равновесие устанавливается мгновенно, получим

$$\frac{dp_1}{dt} V_K + S_0 p_1 = 0;$$

$$\frac{dp_2}{dt} V_K + S_0 p_2 + S_K \frac{da}{dt} = 0,$$

где  $S_0$  - эффективная быстрота откачки насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Подставляя в уравнение выражение для  $a$ , в соответствии с уравнением Фрейндлиха

$$\lg a = \lg K + \frac{1}{n} \lg p_2,$$

где  $K = 0,0185$  и  $n=2,9$  константы, зависящие от природы адсорбента, адсорбируемого газа и температуры поверхности вакуумной камеры;  $p_2$  - давление паров воды в камере, Па.

После интегрирования при условии  $S_0 = \text{const}$  получим

$$t = 2,3 \frac{V_K}{S_0} \lg \left( \frac{p_{2H}}{p_{2K}} \right) + \frac{S_K K}{S_0 (1-n)} \left[ p_{2H}^{\frac{1}{1-n}} - p_{2K}^{\frac{1}{1-n}} \right],$$

где  $p_{2H}$  и  $p_{2K}$  - начальное и конечное давления паров воды при откачке. Пользуясь уравнением, можно найти время откачки  $t$ , необходимое для снижения давления паров воды в камере от начального давления  $p_{2H}$  до конечного  $p_{2K}$ .

После интегрирования уравнения при  $S_0 = \text{const}$  получим, аналогично

$$t = 2,3 \frac{V_k}{S_0} \lg \left( \frac{p_{1H}}{p_{1K}} \right),$$

где  $p_{1H}$  и  $p_{1K}$  начальное и конечное давления воздуха без учета давления паров воды, уравнения позволяют по известному времени откачки  $t$  определить конечное давление двухкомпонентной смеси, равное сумме давлений сухого воздуха и паров воды. Согласно проведенным исследованиям, время откачки влажного и сухого воздуха при давлениях  $10^5 - 10^0$  Па практически совпадает, заметное влияние адсорбированных паров воды на время откачки вакуумных систем после напуска атмосферного воздуха проявляется при давлении ниже 10 Па, а при давлении меньше  $10^{-3}$  Па время откачки двухкомпонентной смеси полностью определяется десорбционным газовыделением паров воды с внутренних стенок вакуумной камеры.

Пренебрегая наличием паров воды в составе остаточных газов, можно допустить большую ошибку при определении времени откачки.

Проанализируем это выражение для случая механического насоса:

- объем камеры 36 л =  $0,036 \text{ м}^3$ ,
- площадь поверхности камеры  $6600 \text{ см}^2 = 0,66 \text{ м}^2$ ,
- начальное давление пара ( $p_H$ ) при 30% влажности при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 1 ат. (давление насыщенного пара при  $20^\circ\text{C}$  17,54 торр) равно  $17,54 \cdot 133 \cdot 30 / 100 = 699,8 \text{ Па}$ ,
- $S_0 \approx S_H = 1,1 \text{ л/с} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $p_K = 5 \cdot 10^{-2} \text{ торр} = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 133 = 6,65 \text{ Па}$ .

$$\begin{aligned}
 t &= 2,3 \frac{V_K}{S_0} \lg \left( \frac{p_{2H}}{p_{2K}} \right) + \frac{S_K K}{S_0 (1-n)} \left[ p_{2H}^{\frac{1}{1-n}} - p_{2K}^{\frac{1}{1-n}} \right] = \\
 &= 2,3 \frac{0,036}{0,0011} \lg \frac{699,8}{p_{2K}} + \frac{0,66 \cdot 0,0185}{0,0011 \cdot (1-2,9)} \left[ 699,8^{\frac{1}{1-2,9}} - p_{2K}^{\frac{1}{1-2,9}} \right] = \\
 &= 75,27 \cdot \lg \left( \frac{699,8}{p_{2K}} \right) - 5,84 \left[ 0,032 - \frac{1}{p_{2K}^{0,526}} \right] = \\
 &= 75,27 \cdot \lg \left( \frac{699,8}{p_{2K}} \right) - 0,187 + \frac{5,84}{p_{2K}^{0,526}}.
 \end{aligned}$$

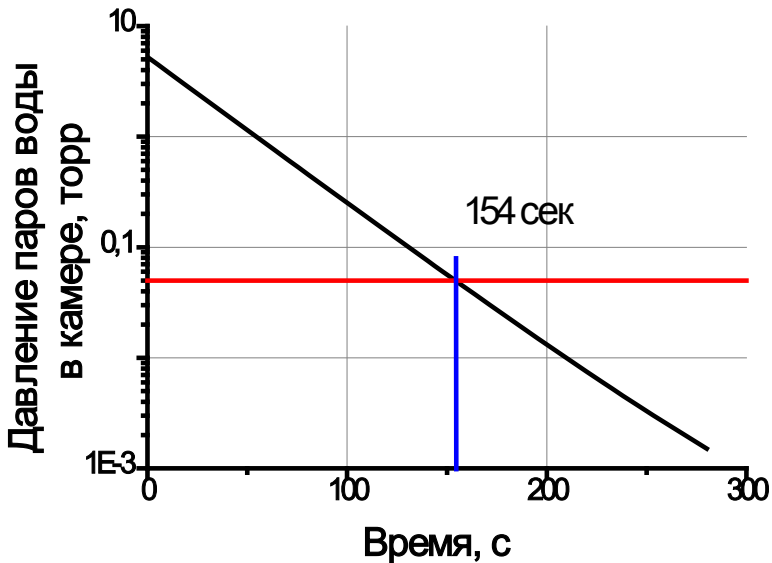


Рис. 24. Зависимость давления паров воды в камере от времени откачки механическим насосом

Сравнивая рис. 1 и 4 мы можем видеть, что время откачки паров воды более чем в 2 раза меньше, чем время откачки воздушной атмосферы. Следовательно, существенного влияния на

процесс откачки механическим насосом десорбция паров воды оказывать не будет и этот процесс можно не учитывать.

**6.4.** Газовыделение адсорбированного газа с поверхности камеры и диффузионное газовыделение из материала камеры также не вносит существенного значения.

$Q_{\text{МЕХ min}} = S_0 p_{\text{min}} = 1,1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ л} \cdot \text{торр} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ,  
что гораздо больше  $Q_{\text{ДИФ max}} = 3,93 \cdot 10^{-4} \text{ л торр}/(\text{см}^2 \text{ с})$  и  $Q_{\text{ДЕС max}} = 4,89 \cdot 10^{-4} \text{ л торр}/(\text{см}^2 \text{ с})$ .

**Таким образом, согласно графику рис. 21 механический насос откачает камеру за 315 с = 5 мин. 15 с.**

**7.** Рассчитаем проводимость вакумпровода высоковакуумный насос – камера. Так как режим течения газа молекулярный то воспользуемся выражением для круглого трубопровода и учтем удлинение трубопровода за счет поворота магистрали на  $90^\circ$ .

**7.1** Поправка на длину при повороте трубопровода

$$\Delta L = 2,6d \frac{\varphi}{180^\circ} = 2,6 \cdot 6,3 \cdot \frac{90}{180} = 8,2 \text{ см},$$

**7.2.** Проводимость трубопровода с молекулярным течением газа (магистраль турбомолекулярного насоса):

$$U_{\text{ТМ}} = 12,1 \frac{d^3}{L} = 12,1 \cdot [(80 - 3,15) + (120 - 3,15) + 8,2] = 861,5 \text{ л/с},$$

где d-диаметр, L-длина трубопровода (л/с,  $\text{см}^3$ , см),

**7.3)** Высоковакуумный затвор уменьшает проводимость в 0,9-0,8 раз

$$U_{\text{ТМ}} = 861,5 \cdot 0,9 = 775,4 \text{ л/с.}$$

**8.** Рассчитаем время откачки турбомолекулярным насосом без учета натекания.

**8.1** Рассчитаем скорость откачки вакуумной камеры с учетом проводимости вакуумпровода.

Основное уравнение вакуумной техники:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U_\Sigma},$$

где  $S_H$  – скорость откачки насоса;  $S_0$  – скорость откачки вакуумной камеры;  $U_\Sigma$  – суммарная проводимость трубопровода

Для турбомолекулярного насоса найдем скорость откачки вакуумной камеры

$$S_0 = \left( \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U_\Sigma} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{68} + \frac{1}{775.4} \right)^{-1} = 62,5 \text{ л/с}.$$

**8.2** Зависимость давления в вакуумной камере без учета натекания в случае откачки турбомолекулярным вакуумным насосом:

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S_0}{V_K} t\right),$$

где  $p_0$  – начальное давление в вакуумной камере  $5 \cdot 10^{-2}$  Торр;  $p(t)$  – рабочее давление в вакуумной камере, торр;  $V$  – объем вакуумной камеры, л;  $t$  – время откачки, с;  $V$  – скорость откачки вакуумной камеры, л; объем вакуумной камеры, л.

$$p(t) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{S_0}{V_K} t\right) = 5 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{62.5}{36} t\right) =$$

$$= 5 \cdot 10^{-2} \exp(-1.74 \cdot t), \text{Торр.}$$

Предельное давление  $10^{-6}$  Торр

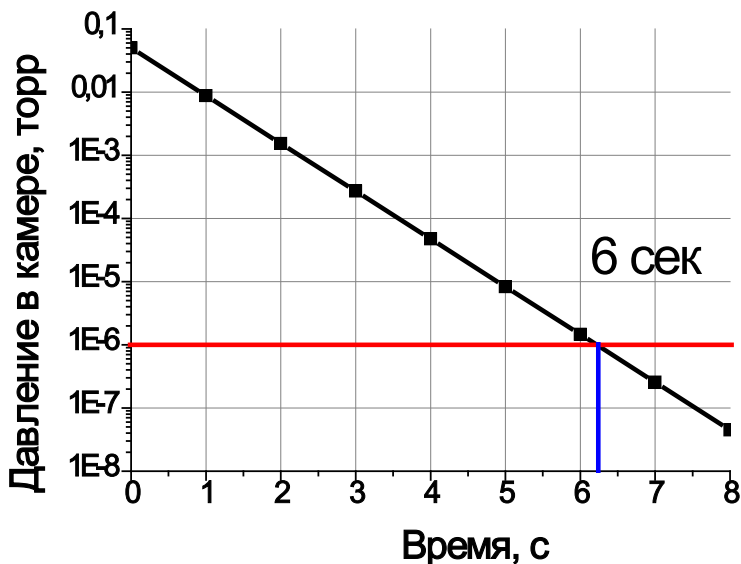


Рис. 25. Временная зависимость давления в вакуумной камере без учета натекания

Видим, что время откачки очень маленькое порядка 6 сек, что не достижимо на практики.

**9.** Учетом газовыделение адсорбированного газа с поверхности камеры и диффузионное газовыделение из материала камеры

Давление в камере с учетом натекания меняется со временем откачки:

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{S_0}{V_K} t\right) + \frac{Q(t)}{S_k},$$

где  $Q(t)$  – зависимость натекания в вакуумной камере от времени (газовыделение). В выражении надо учесть, что откачка начинается через 315 сек после откачки механическим насосом (в этот промежуток времени газовыделение происходило). Тогда

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{S_0}{V_K} t\right) + \frac{Q(t)}{S_0} = 5 \cdot 10^{-2} \exp(-1.74 \cdot t) + \frac{(6600 \cdot 10^{-7,13-6,39 \cdot 10^{-5}(t+315)} + 4,95 \cdot 10^{-4,1-8,3 \cdot 10^{-5}(t+315)})}{62.5}.$$

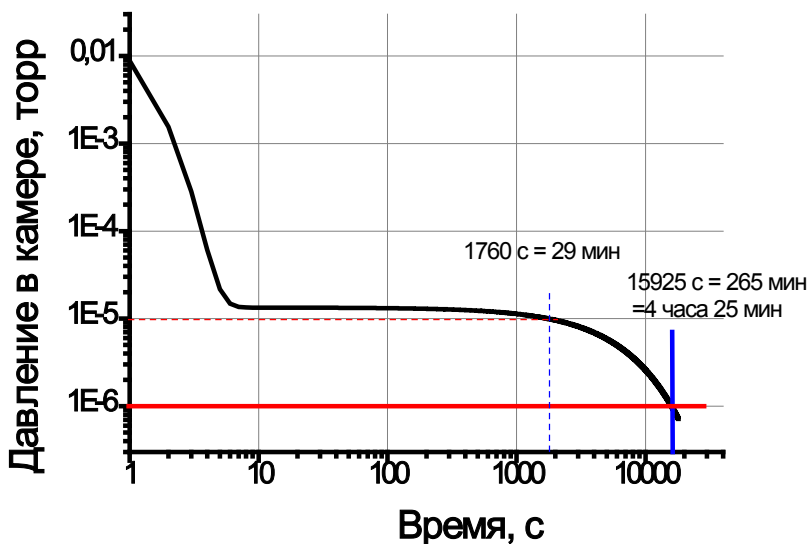


Рис. 26. Временная зависимость давления в вакуумной камере с учетом натекания

**10.** Сделаем расчет для учета влияния паров воды на скорость откачки. Воспользуемся выражением

$$t = 2,3 \frac{V_K}{S_0} \lg \left( \frac{p_{2H}}{p_{2K}} \right) + \frac{S_K K}{S_0 (1-n)} \left[ p_{2H}^{\frac{1}{1-n}} - p_{2K}^{\frac{1}{1-n}} \right].$$

Проанализируем это выражение:

- объем камеры 36 л = 0,036 м<sup>3</sup>,
- площадь поверхности камеры 6600 см<sup>2</sup>=0,66 м<sup>2</sup>,
- начальное давление пара при 30% влажности при температуре 20<sup>0</sup>С и давлении 1ат. (давление насыщенного пара при 20<sup>0</sup>С 17,54 торр) равно 17,54·133·30/100=699,8 Па,
- S<sub>0</sub> = 62,5 л/с=0,0625 м<sup>3</sup>/с,

Учтем процесс откачки механическим насосом. Максимальное начальное давление паров воды при этом будет составлять 5·10<sup>-2</sup>торр = 6,65 Па = p<sub>2H</sub>

$$\begin{aligned} t &= 2,3 \frac{V_K}{S_0} \lg \left( \frac{p_{2H}}{p_{2K}} \right) + \frac{S_K K}{S_0 (1-n)} \left[ p_{2H}^{\frac{1}{1-n}} - p_{2K}^{\frac{1}{1-n}} \right] = \\ &= 2,3 \frac{0,036}{0,0625} \lg \left( \frac{6,65}{p_{2K}} \right) + \frac{0,66 \cdot 0,0185}{0,0625 \cdot (1-2,9)} \left[ 6,65^{\frac{1}{1-2,9}} - p_{2K}^{\frac{1}{1-2,9}} \right] = \\ &= 1,3248 \cdot \lg \left( \frac{6,65}{p_{2K}} \right) - 0,103 \left[ 0,369 - \frac{1}{p_{2K}^{0,526}} \right] = \\ &= 1,3248 \cdot \lg \left( \frac{6,65}{p_{2K}} \right) - 0,038 + \frac{0,103}{p_{2K}^{0,526}}. \end{aligned}$$



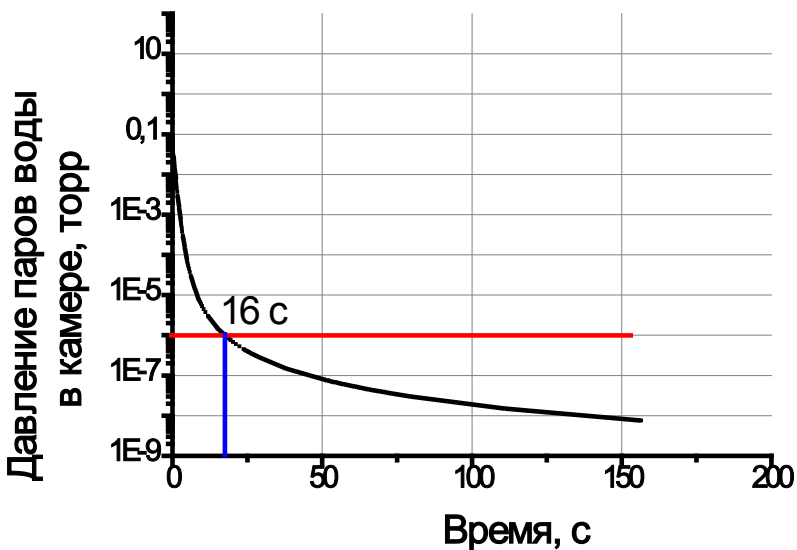


Рис. 27. Временная зависимость давления в вакуумной камере адсорбированных водяных паров

Анализ показал, что учет откачки паров воды не целесообразен.

**11.** Зависимость давления в вакуумной камере при полном цикле откачки. Соединим рис. 1 и 6.

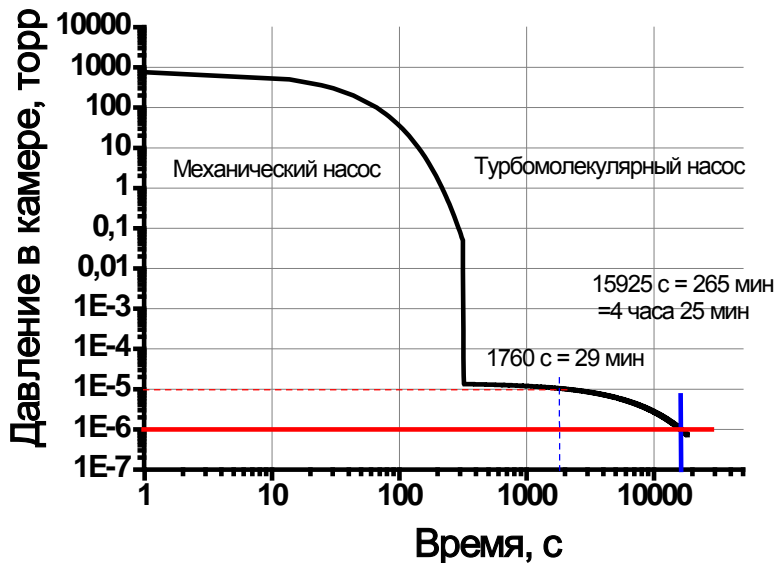


Рис. 28. Временная зависимость давления в вакуумной камере

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из графика, представленного на рис. 28, мы видим, что время достижения предельного вакуума  $\approx 4$  часа 25 мин. Это слишком много для вакуумной системы, к тому же мы не учитывали газовыделение с технологических модулей в камере. Стоит попросить производителей поставить в камеру более производительные вакуумные насосы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Механические насосы

Модель	Скорость откачки, м <sup>3</sup> /ч	Предельное остаточное давление, мбар	Мощность двигателя, кВт	Диаметр всасывающего патрубка	Скорость вращения ротора, об/мин	Объем масла, л
<b>EP 10</b>	10	0,8	0,37	G <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1400	0,5
<b>EP 20</b>	20	0,8	0,75	G <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2800	0,5
<b>EP 25</b>	25	0,8	0,9	G <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2800	0,5
<b>EP 40</b>	40	0,5	1,5	G1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1400	1
<b>EP 63</b>	63	0,5	2,2	G1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1400	2
<b>EP 100</b>	100	0,5	3,0	G1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1420	2
<b>EP 160</b>	160	0,5	4,0	G2	1440	4,5
<b>EP 250</b>	250	0,5	5,5	G2	1440	7
<b>EP 300</b>	300	0,5	7,5	G2	1440	7
<b>EP 630</b>	640	0,08	15	DN100	970	35-38
<b>EP 750</b>	755	0,08	18,5	DN100	1150	35-38

**Технические характеристики вакуумных насосов НВР.  
Часть 1 - НВР малой производительности**

Наименование параметра	Ед. измерения	Значение для насоса, типа					
		<b>НВР-0,1 Д</b>	<b>2 НВР-0,1 ДМ</b>	<b>НВР-1</b>	<b>НВР-4,5 Д</b>	<b>2 НВР-5 ДМ</b>	
Быстрота действия	м <sup>3</sup> /ч (л/с)	0,4 (0,12)	0,4 (0,12)	3,6 (1)	4,5 (1,25)	19,8 (5,5)	
<b>Предельное остаточное давление:</b>	кПа (мм рт. ст.)	<b>2x10<sup>-4</sup></b> (1,5x10 <sup>-3</sup> )	<b>2x10<sup>-4</sup></b> (1,5x10 <sup>-3</sup> )	-	<b>3,3x10<sup>-5</sup></b> (2,5x10 <sup>-4</sup> )	<b>1,0x10<sup>-5</sup></b> (7,5x10 <sup>-5</sup> )	
1. Парциальное без газобалласта.		<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5x10 <sup>-2</sup> )	<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5x10 <sup>-2</sup> )	<b>1,33</b> (10)	<b>1,1x10<sup>-3</sup></b> (8x10 <sup>-3</sup> )	<b>6,7x10<sup>-4</sup></b> (5x10 <sup>-3</sup> )	
2. Полное давление без газобалласта.		-	-	-	<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5,0x10 <sup>-2</sup> )	<b>2,6x10<sup>-3</sup></b> (2x10 <sup>-2</sup> )	
3. Полное с газобалластом.		-	-	-	-	-	
Вакуумное масло ВМ-1С, ВМ-5С.							
Наибольшее рабочее давление	кПа (мм рт. ст.)	1,33 (10)	1,33 (10)	-	2,66 (20)	2,66 (20)	
Объем откачиваемого сосуда, не более	м <sup>3</sup>	0,07	0,07	0,07	1	3,5	
Давление паров воды на входе	кПа	1,33 (10)	1,33 (10)	1,33 (10)	2,66 (20)	2,7	
Объем масла	дм <sup>3</sup>	0,05	0,05	0,14	0,5	1,2	
Габаритные размеры	Д	мм	189	224	250	340	555
	Ш		71	71	143	130	170
	В		93	118	190	191	280
Масса	кг	1,7	2,5	8	10	26	

**Технические характеристики вакуумных насосов НВР.  
Часть 2 - НВР высокой производительности**

Наименование параметра	Ед. измерения	Значение для насоса, типа				
		2 НВР-60 Д	2 НВР-90 Д	2 НВР-250 Д	2 НВР-20 Д	2 НВР-5 ДГ
Быстрота действия	М <sup>3</sup> /ч (л/с)	60 (17,6)	90 (25)	230 (63)	19,8 (5,5)	18 (5)
<b>Предельное остаточное давление:</b>	кПа (мм рт. ст.)	<b>1x10<sup>-5</sup></b> (7,5x10 <sup>-5</sup> )	<b>1x10<sup>-5</sup></b> (7,5x10 <sup>-5</sup> )	<b>1x10<sup>-5</sup></b> (7,5x10 <sup>-5</sup> )	<b>1,3x10<sup>-5</sup></b> (1x10 <sup>-4</sup> )	<b>2,6x10<sup>-5</sup></b> (2x10 <sup>-4</sup> )
1. Парциальное без газобалласта.		<b>6,7x10<sup>-4</sup></b> (5x10 <sup>-3</sup> )	<b>6,7x10<sup>-4</sup></b> (5x10 <sup>-3</sup> )	<b>6,7x10<sup>-4</sup></b> (5x10 <sup>-3</sup> )	<b>6,7x10<sup>-4</sup></b> (5x10 <sup>-3</sup> )	<b>6,7x10<sup>-4</sup></b> (5x10 <sup>-3</sup> )
2. Полное давление без газобалласта.						
3. Полное с газобалластом.		<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5x10 <sup>-2</sup> )	<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5x10 <sup>-2</sup> )	<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5x10 <sup>-2</sup> )	<b>6,7x10<sup>-3</sup></b> (5x10 <sup>-2</sup> )	-
Вакуумное масло ВМ-1С, ВМ-5С.						
Наибольшее рабочее давление	кПа (мм рт. ст.)	2,66 (20)	2,66 (20)	2,66 (20)	2,66 (20)	2,66 (20)
Объем откачиваемого сосуда, не более	м <sup>3</sup>	12	12	25	3,5	3,5
Давление паров воды на входе	кПа	2,66 (20)	2,66 (20)	2,66 (20)	2,66 (20)	-
Объем масла	дм <sup>3</sup>	6	6	14	1,2	2,1
Габаритные размеры	Д	850/908	850/908	1080	585	628
	Ш	300/304	300/304	330	240	220
	В	400/458	400/458	526	290	324
Масса	кг	100	100	210	20	50

## Технические характеристики насосов Busch Zebra

Модель	0006 В	0010 В	0014 В	0021 В	0030 В
Скорость откачки, м <sup>3</sup> /ч	5,7	9,6	14,2	20,5	30,2
Давление, гПа	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
Мощность двигателя, Вт	450	450	450	750	750
Частота оборотов, мин <sup>-1</sup>	1500	1500	1500	1500	1500
Вес	22	25	25	35	35

## Технические характеристики пластинчато-роторных насосов Becker O

Модель	Расход, м <sup>3</sup> /ч	Давление, мбар	Мощность, кВт	Скорость вращения, об/м	Уровень шума, дБ	Объем масла, л	Вес, кг
O 5.4	4	3	0,1	2750	87	0,06	5,5
O 5.6	6,4	2	0,3	1400	53	0,15	18
O 5.8	8	2	0,35	2750	60	0,25	10

## Технические характеристики вакуумных насосов Edwards RV

Модель	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Предельное давление, Па		Макс. быст- рота откачки па- ров воды, кг/ч
		без газобал- ласта	с газобалла- стом	
RV3	3,3	0,2	3	0,22
RV5	5,1	0,2	3	0,22
RV8	8,5	0,2	3	0,29
RV12	12,0	0,2	3	0,29

## Технические характеристики пластинчато-роторных насосов PVR DS и PHV-K

Серия и номер из- делия	Наименование характеристики				
	Скорость откачки, м <sup>3</sup> /ч	Предельный вакуум, мбар	Мощность двигателя, кВт	Уровень шума, дБ	Масса насоса, кг
DS 102	5,70	2,0x10 <sup>-3</sup>	0,45	—	22,0
202	9,60			—	25,0
302	14,22			—	
402	20,52		0,75	—	35,0
602	30,34			—	
PHV 5	4,80	1,0x10 <sup>-3</sup>	0,4	52,0	22,5
10	10,20				24,0
20	20,40		0,75	54,0	34,0
30	30,00				38,0
40	40,20		1,5		70,0
50	49,80				83,0
75	75,00		2,2	56,0	89,0

## Турбомолекулярные насосы

### Технические характеристики турбомолекулярных насосов Leybold TURBOVAC TMP

№ /параметр	Скорость откачки, л/с	Давление, мбар	Давление max форвакуумного насоса, мбар	Скорость min форвакуумного насоса, м <sup>3</sup> /ч	Масса, кг
<b>TURBOVAC TMP 50</b>	55,0	$3,75 \times 10^{-8}$	$0,75 \times 10^{-1}$	3,3	2,0
<b>TURBOVAC TMP 151</b>	145	$1,0 \times 10^{-10}$	$3,75 \times 10^{-1}$	5,0	8,0
<b>TURBOVAC TMP 361</b>	345	$7,5 \times 10^{-11}$		19,8	12,0
<b>TURBOVAC TMP 600</b>	560	$<1,0 \times 10^{-10}$	$4,00 \times 10^{-1}$	30,8	17,0
<b>TURBOVAC TMP 1000</b>	1100	$1,0 \times 10^{-10}$	$3,75 \times 10^{-1}$		25,0
<b>TURBOVAC TMP 1100</b>	1050	$2,0 \times 10^{-10}$	$7,50 \times 10^{-2}$	22,0	22,0



Технические характеристики турбомолекулярных насосов TURBOVAC i/iX

Характеристика	TURBOVAC i/iX 350	TURBOVAC i/iX 450	TURBOVAC i/iX T 350	T 4TURBOVAC i/iX 50
Скорость откачки, л/с				
N <sub>2</sub>	290	430	290	430
Ar	260	400	260	400
He	360	440	360	440
H <sub>2</sub>	35	420	320	400
Нагрузка по газу, мбар x л/с				
N <sub>2</sub>	4,5		11,5	
Ar	2,0		6,0	
He	8,0		20,0	
H <sub>2</sub>				
степень сжатия				
N <sub>2</sub>	1x10 <sup>11</sup>		1x10 <sup>10</sup>	
Ar	1x10 <sup>11</sup>			
He	1x10 <sup>8</sup>			
H <sub>2</sub>	1x10 <sup>8</sup>		1x10 <sup>4</sup>	
Скорость вращения, об/мин	60000			
Расход воды на охлаждение, л/ч	50—100			
Время разгона, мин	5,5		3,5	

## Технические характеристики турбомолекулярных насосов TURBOVAC MAGintegra

Характеристика	300 iP	400 iP	600 iP	700 iP	1300 iP	1700 iP	2200 iP
<b>Скорость откачки, л/с</b>							
N <sub>2</sub>	300	365	550	590	1100	1610	2100
Ar	260	330	520	540	1050	1480	1900
He	260	280	570	600	1130	1710	2050
H <sub>2</sub>	190	200	410	430	1220	1660	1750
<b>степень сжатия</b>							
N <sub>2</sub>	1,0x10 <sup>10</sup>	1,0x10 <sup>10</sup>	1,6x10 <sup>10</sup>	1,6x10 <sup>10</sup>	1,0x10 <sup>8</sup>		
Ar	-	-	-	-			
He	9,2x10 <sup>4</sup>	9,2x10 <sup>4</sup>	1,7x10 <sup>6</sup>	1,7x10 <sup>6</sup>	2,0x10 <sup>5</sup>		5,0x10 <sup>4</sup>
H <sub>2</sub>	3,2x10 <sup>3</sup>	3,2x10 <sup>3</sup>	3,4 x10 <sup>4</sup>	3,4 x10 <sup>4</sup>	8,0x10 <sup>3</sup>	4,0x10 <sup>3</sup>	5,0x10 <sup>3</sup>
Предельное давление, мбар	1x10 <sup>-8</sup> -1x10 <sup>-10</sup>				1,0x10 <sup>-8</sup> 1,0x10 <sup>-8</sup>	2,0x10 <sup>-5</sup> 1,0x10 <sup>-9</sup>	1,0x10 <sup>-8</sup> 1,0x10 <sup>-8</sup>
Скорость вращения, мин <sup>-1</sup>	58800		48000		37800	33000	30600
Время разгона, мин	5,0		6,0		7,0		
Вес, кг	12,0		17,0		40,0	45,0	50,0

## Технические характеристики турбомолекулярных насосов Edwards EXT

Характеристика	EXT75 Dx	EXT556 H
Скорость откачки, л/с		
N <sub>2</sub>	42,0—66,0	540,0
He	49,0—59,0	580,0
H <sub>2</sub>	48,0—54,0	500,0
Степень сжатия		
N <sub>2</sub>	1x10 <sup>11</sup>	1x10 <sup>10</sup>
He	1x10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>8</sup>
H <sub>2</sub>	5x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>8</sup>
Остаточное давление, Па	5X10 <sup>-6</sup> -5X10 <sup>-7</sup>	2X10 <sup>-7</sup> -1X10 <sup>-8</sup>

## Технические характеристики турбомолекулярных насосов Edwards nEXT

Характеристика	nEXT240	nEXT300	nEXT400
Скорость откачки, л/с			
N <sub>2</sub>	240,0	300,0	400,0
He	230,0	340,0	390,0
H <sub>2</sub>	165,0	280,0	325,0
Степень сжатия			
N <sub>2</sub>	1,0X10 <sup>11</sup>	1,0X10 <sup>11</sup>	1,0X10 <sup>11</sup>
He	3,0X10 <sup>5</sup>	1,0X10 <sup>6</sup>	1,0X10 <sup>8</sup>
H <sub>2</sub>	1,0X10 <sup>4</sup>	5,0X10 <sup>4</sup>	5,0X10 <sup>5</sup>
Предельное остаточное давление, Па	6,0×10 <sup>-6</sup> — 5,0×10 <sup>-8</sup>	6,0×10 <sup>-6</sup> — 5,0×10 <sup>-8</sup>	1,0×10 <sup>-6</sup> — 1,0×10 <sup>-8</sup>

Технические характеристики турбовакуумных насосов  
Edwards STP

Модель	STP301 STP301C	STP451 STP451C	STP603 STP603C	STP1003 STP1003C
Скорость откачки, л/с				
N <sub>2</sub>	300,0	480,0	650,0	1000,0
H <sub>2</sub>	300,0	460,0	550,0	800,0
Остаточное давление, Па	6,5x10 <sup>-6</sup>			6,5x10 <sup>-7</sup>
Скорость вращения, об/ мин	48000	35000		
Время выхода на режим, мин	3,0	6,0		
Мощность электродвигателя привода, кВт	0,55	0,80		
Вес изделия, кг	11,0	12,0	31	

Технические характеристики турболекулярных насосов  
Pfeiffer HiPase

Модель	HiPase 300M	HiPase 700M	HiPase 800M
Скорость откачки, л/с			
N <sub>2</sub>	255	685	790
He	215	600	625
H <sub>2</sub>	170	480	700
Ar	250	660	775
Предельное остаточное давление, Па	1,0x10 <sup>-5</sup>		
Скорость вращения, мин <sup>-1</sup>	6000	49200	
Питание / мощность, В/Вт	48 / 300		
Масса, кг	13,1 - 17,2	15,7 - 20,8	17,1 - 21,5

## Технические характеристики турбомолекулярных насосов Pfeiffer ATP

Характеристика		ед. изм.	АТР 2300М	
Присоединительный фланец			DN200 ISO F, CF	DN250 ISO F, CF
Скорость откачки по	N <sub>2</sub>	л/сек	1250	1750
	Ar		1200	1650
	He		1700	1800
	H <sub>2</sub>		1700	1700
Степень сжатия по	N <sub>2</sub>		10 <sup>8</sup>	
	Ar		10 <sup>8</sup>	
	He		10 <sup>5</sup>	
	H <sub>2</sub>		7*10 <sup>3</sup>	
Частота вращения		об/мин	31 000	
Минимальное остаточное давление		мбар	10 <sup>-9</sup>	
Макс. давление на входе			0,05	
Макс. давление на выхлопе			1,5	
Расход воды на охлаждение		л/час	60	
Габаритные размеры	высота	мм	290	
	диаметр		315	
Масса		кг	52	

## Технические характеристики насосов Agilent TwisTorr

Модель	84 FS	304 FS	750	850	2300
<b>Производительность, л/сек</b>					
N <sub>2</sub>	67,0	250,0	700,0	750,0	2050,0
Ar	60,0		680,0	700,0	—
He	69,0	255,0	680,0	690,0	1800,0
H <sub>2</sub>	59,0	220,0	580,0	590,0	1500,0
<b>Степень сжатия</b>					
N <sub>2</sub>	1,0x10 <sup>11</sup>				8,0x10 <sup>8</sup>
Ar					—
He	1,3x10 <sup>7</sup>	1,0x10 <sup>8</sup>	2,0x10 <sup>8</sup>	2,0x10 <sup>8</sup>	8,0x10 <sup>5</sup>
H <sub>2</sub>	1,8x10 <sup>5</sup>	1,5x10 <sup>6</sup>	2,5x10 <sup>6</sup>	2,5x10 <sup>6</sup>	4,0x10 <sup>4</sup>
Предельное давление, мбар	4,0x 10 <sup>-10</sup>	1,0x10 <sup>-10</sup>			
Давление max, мбар	14,0	10,0	6,0		4,0
Скорость вращения, тыс. об/мин	81,0	60,0	21,0—49,5		33,3
Масса, кг	2,05	5,50	15,90	16,10	54,20

## Технические характеристики насосов Agilent Turbo V

Модель	81-M	81-T	551	701	1001	1K-G	2K-G	3K-G
Расход, л/сек								
N <sub>2</sub>	77,0	77,0	550	690	1050	1080	1600	2200
He	65,0	65,0	600	620	900	1150	—	1900
H <sub>2</sub>	50,0		510		920	730	—	—
Степень сжатия								
N <sub>2</sub>	5,0x10 <sup>8</sup>	7,0x10 <sup>6</sup>	1,0x10 <sup>9</sup>		5,0x10 <sup>8</sup>	3,0x10 <sup>5</sup>	1,0x10 <sup>7</sup>	
He	8,0x10 <sup>4</sup>	3,0x10 <sup>3</sup>	1,0x10 <sup>7</sup>		4,0x10 <sup>4</sup>	—	6,0x10 <sup>3</sup>	
H <sub>2</sub>	7,0x10 <sup>3</sup>	3,0x10 <sup>2</sup>	1,0x10 <sup>6</sup>		1,5 x 10 <sup>4</sup>	—	—	
Давление, мбар	5,0x10 <sup>-10</sup>	5,0x10 <sup>-9</sup>	1,0x10 <sup>-10</sup>		1,0x10 <sup>-10</sup>	1,0x10 <sup>-8</sup>	1,0x10 <sup>-8</sup>	
Скорость вращения тыс. об/мин	80,00		42,00	38,00	45,66	33,00	31,00	
вес, кг	2,00	1,82	16,00	19,00	26,80	35,00	52,00	

## Технические характеристики насосов КУКУ серии F

Показатели	F-70E	F-80E	F-110E	F-3500E
Приемный фланец	ISO 63 / CF 63	ISO 63 / CF 63	ISO 100 / CF 100	ISO 400
Насосная скорость L / S (N)	70	62	110	3500
Степень сжатия (N)	$> 10^6$	$> 10^6$	$> 10^8$	$> 10^8$
Кэффициент сжатия (H)	$4 \times 10^3$	$4 \times 10^3$	$5 \times 10^2$	$5 \times 10^2$
Предельное давление (мбар)	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$
Время запуска (мин)	1.5	1.8	2	<20
Скорость вращения (оборотов в минуту)	51000	72000	42300	15000
Ориентация	Любые	Любые	Любые	Вертикальный +/- 5%
Подложка давления (мбар)	0,1	0,1	0,1	0,1
Выходной фланец	KF16	KF16	KF25	KF 100
Вес (кг)	9	9	34	640
Контроллер	FD	TCP 100	FD110A	FD3500KW



## Криогенные насосы

### Технические характеристики криогенных насосов GVT ICP

Наименование \ № изделия	150	200	200 L	250 / L	300	320 / L	320+/ L
Скорость откачки, л/с							
N <sub>2</sub>	660	1500		2500	3000	3200	
H <sub>2</sub>	1300	2200		5200	4900	7800	
Ar	550	1200		2000	2500	2665	
H <sub>2</sub> O	2200	4000		6500	10000	11000	
Пропускная мощность насоса, STD л							
Ar	860	1100	1500	2000	2100		2100
H <sub>2</sub>	10	30	10	30	30		38
Пропускная способность кроссовера, л	150,0	300,0					
Время перезарядки, мин	80,0	85,0	60,0	120,0		135,0	97,0
Давление, торр	$< 10^{-9}$						
max скорость, торрхл/с							
Ar	6,0	10,0					13,0
вес, кг	11,0	22,0	21,0	26,0	34,0	34,0 / 21	

## Технические характеристики крионасосов GVT HPM

Наименование \ № изделия	20	25	30	30 L	32 L	40 / 40 L	55
Скорость откачки, л/с							
N <sub>2</sub>	1700	2500	4000	4000	5000	14000	
H <sub>2</sub>	3500	7000	10000	13000	15000	30000	
Ar	1400	2000	3500	3300	4500	12000	
H <sub>2</sub> O	6000	6000	10000	11000	16000	40000	
Пропускная мощность насоса, СТД л						5000	
Ar		2500	3000	3000		44 / 3500	11000
H <sub>2</sub>		30	34	38		42	120
Пропускная способность кроссо- вера, л	300	400	580	400		550	
Время перезарядки, мин	55	60	75	65		110 / 80	125
Давление, торр	$< 10^{-9}$						
вес, кг	25,0	30,0	28,0	30,0	52,0/42,0	104,0	

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.И. Пипко, В..Я. Плисковский и др. Основы вакуумной техники. М.: Энергоиздат, 1981. 321 с.
2. Л.Н.Розанов Вакуумная техник. М.: Высш. шк., 1990. 59 с.
3. Дж. Уэтсон. Техника сверхвысокого вакуума. М.: Мир, 1988. 315 с.
4. А. Рот. Вакуумные уплотнения. М.: Энергия, 1971. 165 с.
5. Б.И. Королев, В.И. Кузнецов и др. Основы вакуумной техники. М.: Энергия. 1975. 309 с.
6. Ситников А.В. Физические основы вакуумной техники: учеб. пособие. Воронеж: ВГТУ, 2011. 80 с.
7. Шешин Е.П. Вакуумные технологии: учеб. пособие. М.: Интеллект, 2009. 504 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Формирование исходных данных для расчета.....	3
1.1. Описание установки.....	3
1.2. Выбор вакуумных насосов.....	6
1.3. Разработка вакуумной системы.....	48
1.4. Исходные данные.....	50
2. Расчет.....	53
Заключение.....	73
Приложение.....	74
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	90

Учебное издание

Ситников Александр Викторович  
Стогней Олег Владимирович

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ОТКАЧКИ  
ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В авторской редакции

Компьютерная версия А.В. Ситникова, О.В. Стогней

Подписано к изданию 25.12.2017.  
Объем 1,8 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14