

621

93

Ш 57

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

В. П. Шестак

# СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

МОСКВА 1980

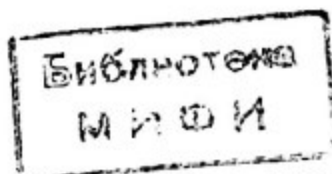
93

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

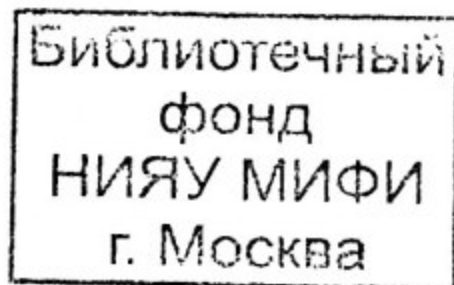
В.П. Шестак

СРЕДСТВА ОТКАЧКИ  
(Тексты лекций по курсу  
"Вакуумная техника")



Утверждено  
в качестве учебного пособия  
редсоветом института

Москва 1980



Ш е с т а к В.П. Средства откачки (тексты лекций по курсу "Вакуумная техника"). — М.: Изд. МИФИ, 1980, 96 с.

Данная работа представляет собой первую часть учебного пособия по курсу "Вакуумная техника" и содержит материалы лекций, прочитанных автором по разделу "Средства откачки и вакуумные насосы". В отличие от известных учебных пособий и учебников в настоящем пособии основное внимание уделено физическим принципам работы современных средств откачки, возможностям их использования в вакуумных системах электрофизических установок. Акцентируется внимание на специфических чертах конструкций насосов и их рабочих характеристиках.

Пособие может служить руководством при выборе средств откачки в самых разнообразных вакуумных системах.

Предназначается для студентов старших курсов физических и технических вузов, стажеров и аспирантов, а также для слушателей факультетов повышения квалификации специалистов промышленности.

## ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная техника — это техника получения, поддержания и использования вакуума. Практические потребности развивающегося общества привели к созданию современной вакуумной техники.

Вакуумная техника весьма молода. Лишь в двадцатые годы нашего века началось создание прообразов электрофизических установок наших дней, что и стимулировало бурное развитие как различных средств откачки, так и средств измерения вакуума. Достаточно сказать, что объем вакуумной камеры первого циклотрона, построенного в начале 30-х годов, составлял несколько кубических метров и получение вакуума в нем представляло собой серьезную техническую проблему.

В 60-х годах появился новый раздел вакуумной техники — техника сверхвысокого вакуума, который был связан с решением проблем получения термоядерной энергии и новыми требованиями, предъявленными современной физикой к вакуумной технике.

В современных ускорителях заряженных частиц, исследовательских термоядерных установках, имитаторах космического пространства, аппаратуре радиационно-вакуумного и космического материаловедения основная задача вакуумной техники — обеспечение необходимого разрежения простыми и надежными средствами — обычно существенно усложняется весьма жесткими требованиями. Большие локализованные и распределенные газовые нагрузки, интенсивные магнитные и электрические поля, воздействие на стенки вакуумных камер мощных электромагнитного и корпускулярного излучений, ограниченные размеры, разветвленность и геометрическая сложность вакуумных трактов — все эти факторы оказывают решающее воздействие на конструктивно-технологические решения вакуумных систем, на выбор средств откачки и поддержания вакуума. В частности, именно эти факторы определяют почти исключительное применение безмасляных средств откачки, широкое использование встроенных разрядных, криосорбционных и конденсационных насосов, способных работать в импульсных и термически неравновесных режимах и позволяющих производить откачку водорода как основной составляющей газовой нагрузки. При этом в большинстве случаев ставится задача достижения и устойчивого поддержания в вакуумных камерах молекулярной концентрации остаточного газа, эквивалентной при температуре 293 К давлению  $10^{-7}$  —  $10^{-10}$  Па. Требуемая быстрота откачки насосов иногда превышает величину  $10^7$  м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>.

Диапазон рабочих давлений, с которым имеет дело современная вакуумная техника простирается от  $10^5$  до  $10^{-12}$  Па. Очевидно, что изменение давления на 18 порядков практически невозможно обеспечить при использовании лишь одного насоса. Поэтому в современной вакуумной технике используют комбинированные средства откачки, включающие в себя насосы различных типов (рис. 1).

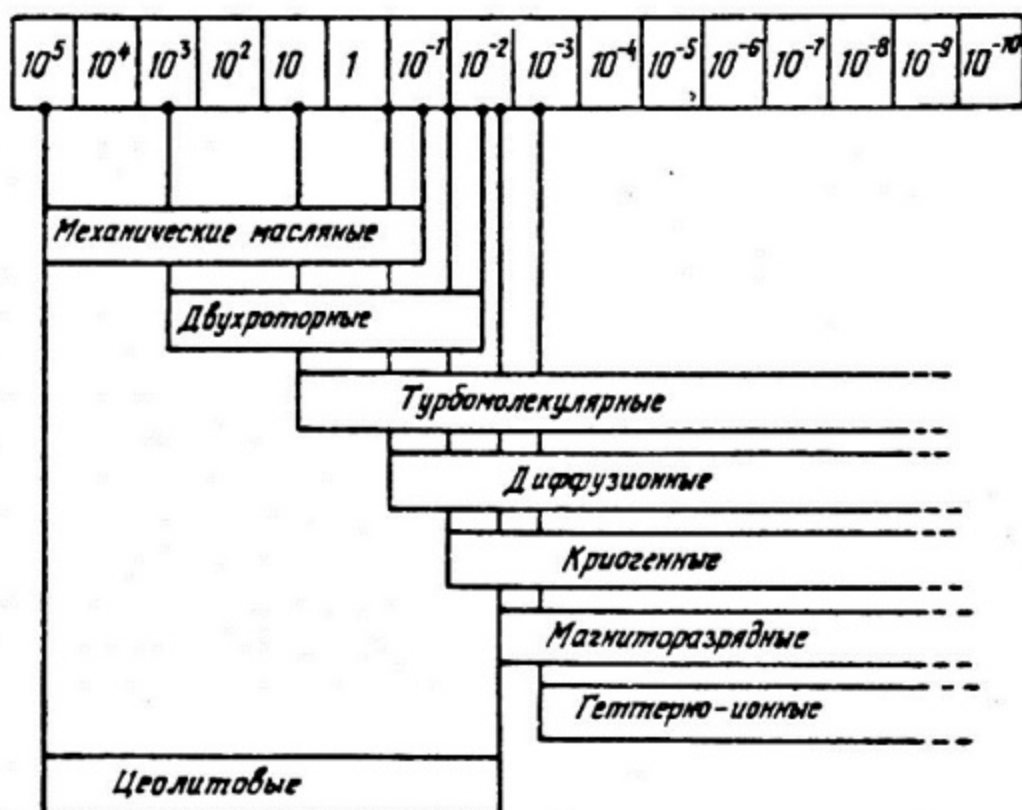


Рис. 1. Области действия современных вакуумных насосов

Основными характеристиками вакуумных насосов являются:

- величина начального давления;
- величина наибольшего выпускного давления\*;
- величина предельного давления;
- скорость откачки насоса.

\* Для насосов объемного действия.

Первая характеристика важна при построении откачной системы с использованием комбинированных средств откачки. Величина начального давления определяет потребность в насосе предварительного разрежения для нормальной работы высоковакуумного насоса. В зависимости от принципа действия высоковакуумного насоса существуют две схемы подключения насосов предварительного разрежения, изображенные на рис. 2.

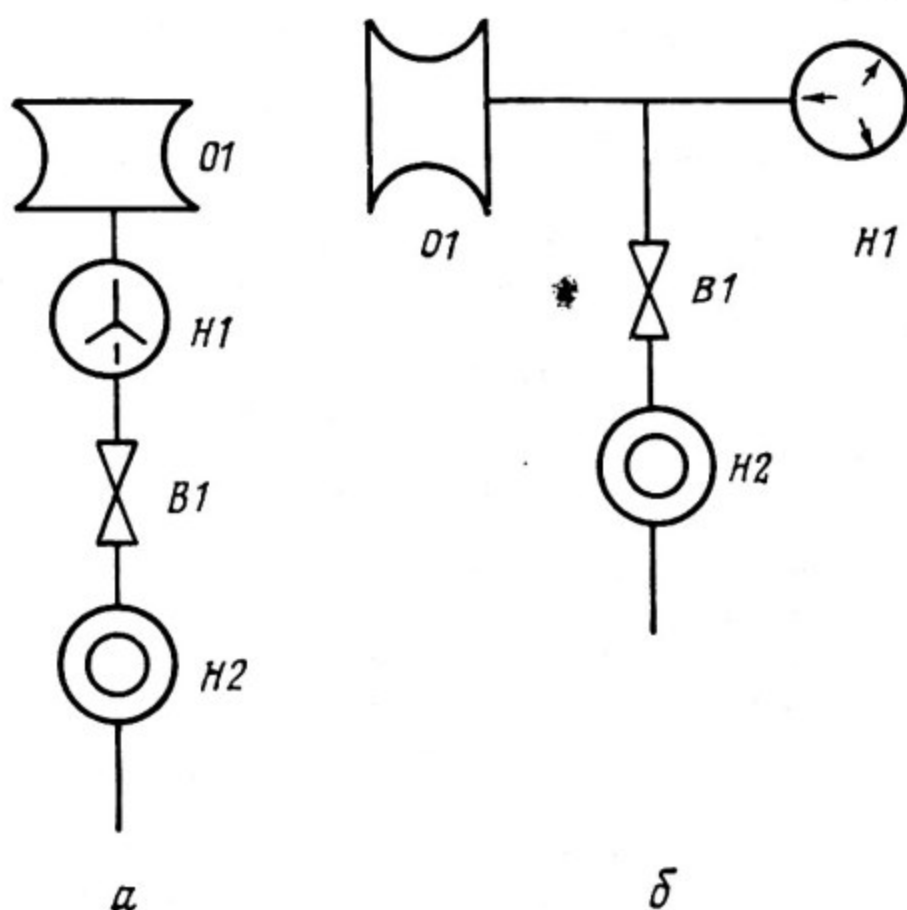


Рис. 2. Схемы подключения насосов предварительного разрежения:

а — система с высоковакуумным насосом объемного типа;  
 б — система с высоковакуумным насосом поверхностного типа;  
 O1 — откачиваемый объем; H1 — высоковакуумный насос; B1 —  
 вентиль; H2 — насос предварительного разрежения

Величина наибольшего выпускного давления, которая обычно приводится для насосов объемного действия, позволяет производить расчет комбинированных средств откачки. При превышении этой величины на выпускной стороне, газ может прорваться на высоковакуумную сторону.

Величина предельного давления или наименьшего давления, получаемого в вакуумной системе при откачке ее насосом, определяется равенством потоков откачиваемого газа и паразитных потоков, поступающих в систему извне:

$$Q \text{ откачки} = Q \text{ натекания} + Q \text{ газоотделения}.$$

Величина предельного давления равна сумме парциальных давлений в объеме. В эту сумму всегда входит и давление насыщенных паров рабочей жидкости, если таковая имеется в насосе. В справочной литературе величина предельного давления часто сообщается без учета давления паров рабочей жидкости. Считается, что в практике всегда можно устранить их влияние либо с помощью специальных улавливающих систем, либо выбором рабочей жидкости с очень низкой величиной давления насыщенных паров.

Для конкретной вакуумной системы работу средств откачки оценивают по так называемой кривой откачки. Типичный вид ее приведен на рис. 3. Используя кривую откачки, можно достаточно просто экспериментально определить величину предельного давления для конкретной вакуумной системы. Предельной считается величина давления практически не изменяющаяся во времени. Время получения такого давления в системе называется продолжительностью откачки.

Скорость откачки насоса определяется дифференциальным выражением:

$$S_H = \frac{dV}{dt},$$

где  $dV$  — объем газа, удаляемый насосом за время  $dt$ .

Это выражение справедливо лишь в том случае, когда оговаривается величина рабочего давления насоса, так как скорость откачки любого насоса является сложной функцией величины рабочего давления.

За счет наличия паразитных потоков в насос (или в установку) эффективная быстрота откачки всегда меньше номинальной:

$$S_{эф} = S_H \left( 1 - \frac{P_{\infty}}{P_{бп}} \right),$$

где  $P_{бп}$  — величина впускного (рабочего) давления.

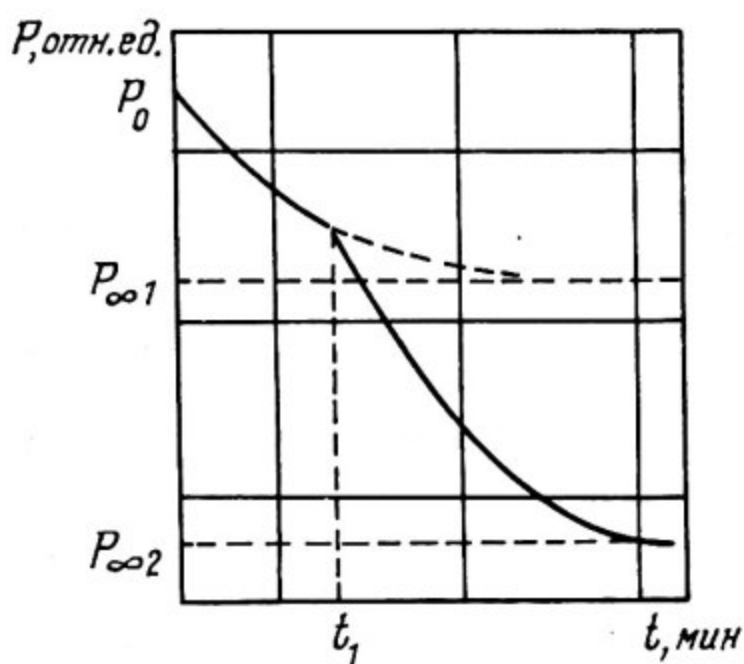


Рис. 3. Кривая откачки для комбинации двух насосов:  
 $P_0$  — начальное давление в системе;  $P_{\infty 1}, P_{\infty 2}$  — предельные давления первого и второго насосов, соответственно;  $t_1$  — момент включения второго насоса

## МЕХАНИЧЕСКИЕ НАСОСЫ С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением (ММН) используют для работы в области давлений от  $10^5$  до  $10^{-7}$  Па ( $760-10^{-3}$  мм рт.ст.) и входят в состав большинства вакуумных установок.

Насосы используются в качестве форвакуумных при работе с пароструйными, двухроторными, турбомолекулярными и другими высоковакуумными насосами, они также широко применяются для самостоятельной откачки воздуха или неактивных газов и паров.

По принципу действия ММН относятся к насосам объемного типа. Через впускной патрубок газ поступает в рабочую камеру; порция газа, заполнившая рабочий объем насоса, при вращении ротора в определенный момент времени отсекается пластиной или ротором от впускной части камеры и переносится, одновременно сжимаясь, на сторону выпуска, где эта порция газа выбрасывается в атмосферу через специальный клапан.

ММН являются вращательными насосами. Предложено большое количество различных конструкций таких насосов. Все их можно разделить на три группы (рис. 4): пластинчато-статорные (а), пластинчато-роторные (б), плунжерные (в).

К пластинчато-статорным насосам относятся такие насосы, как ВН-461 М, ВН-0,8 Г, РВН-20; к пластинчато-роторным — ВН-464, ВН-0,25-2; к плунжерным — ВН-1МГ, ВН-2МГ, ВН-6Г и т.д.

Основным вопросом при использовании ММН является вопрос: какой вакуум можно получить с их помощью?

Величина предельного давления определяется паразитными потоками откачиваемого газа в точках соприкосновения вращающихся и трущихся частей этих насосов. Следовательно, необходимо сведение этих потоков к минимальным. Для этого ротор и статор насоса помещаются в бак, наполненный маслом. Масло уплотняет имеющиеся зазоры, заполняет так называемые "вредные пространства". Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса.

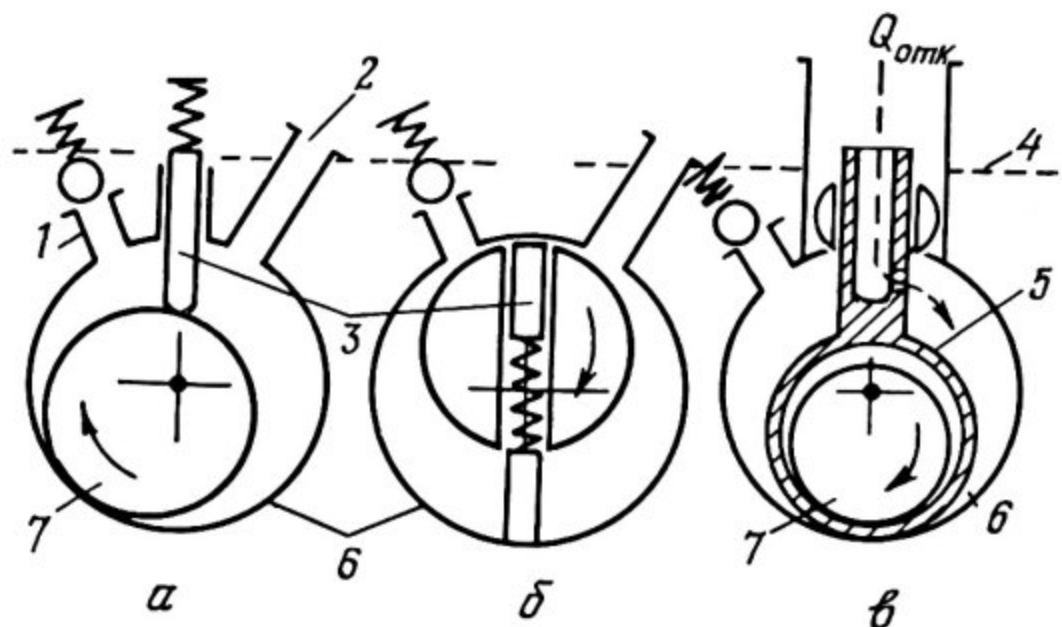


Рис. 4. Схемы устройства механических насосов с масляным уплотнением:

1 — выпускной клапан; 2 — впускной патрубок; 3 — уплотняющие пластины; 4 — уровень масла; 5 — плунжер; 6 — статор; 7 — ротор

Источниками паразитного потока являются: пары испаряющегося масла, воздух, растворенный в масле, воздух, находящийся во "вредных пространствах", к которым относятся объемы под выпускным клапаном и между клапаном и отсекающей пластиной.

Следует сказать, что основным компонентом паразитного потока является воздух (или другой откачиваемый газ), растворенный в масле.

Для того чтобы уменьшить величину этого потока, а значит, снизить величину получаемого предельного давления, разработаны конструкции двухступенчатых насосов. На рис. 5 изображена схема подобного устройства. Сальник вала насоса, выходящего в атмосферу, расположен со стороны выпускной ступени II. Всасывающая ступень I, таким образом, отделена от точки главного источника паразитного натекания воздуха (вдоль вала насоса) ступенью II. Объем первой ступени делается больше, чем объем второй ступени для обеспечения условия неразрывности потока:

$$V_1 \rho_1 = V_2 \rho_2 .$$

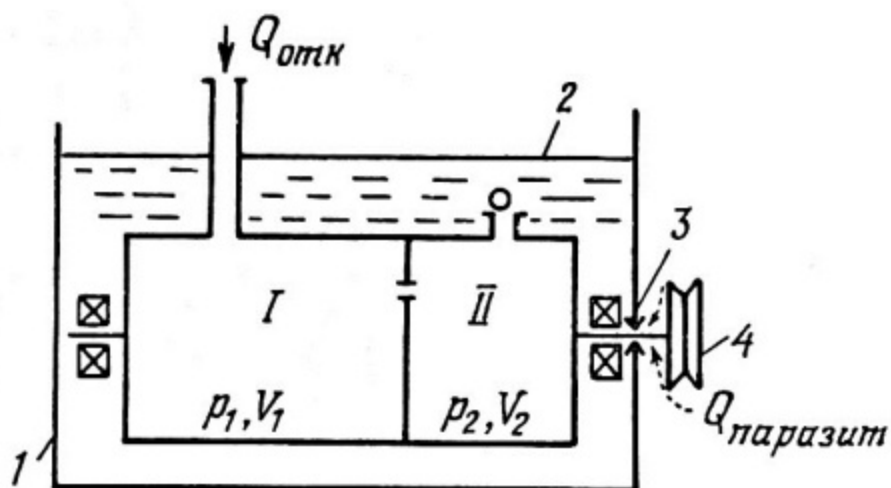


Рис. 5. Схема двухступенчатого насоса с масляным уплотнением:  
1 — бак; 2 — уровень масла; 3 — сальник; 4 — шкив привода

Такая конструкция ММН дает возможность уменьшить величину предельного давления на 1,5—2 порядка по сравнению с одноступенчатым ММН.

В характеристиках насосов, сообщаемых заводами-изготовителями, не учитывается возможность откачки конденсирующихся газов, которые не подчиняются закону Бойля-Мариотта (произведение давления газа на объем газа есть величина постоянная при неизменной температуре газа).

Откачка конденсирующихся газов является в известной мере проблемой при давлениях ниже  $10^2$  Па (1 мм рт.ст.), так как для дальнейшего понижения давления необходимо удалять из насоса газ, адсорбированный на стенках насоса, при этом чаще всего приходится иметь дело с парами воды. Пар при повышении давления выше величины  $P_{крит}$  конденсируется и растворяется в масле.

Для откачки конденсирующихся газов и паров была изобретена так называемая газобалластная откачка [2, с. 191], смысл которой сводится к тому, что суммарное давление в выпускной камере насоса над клапаном складывается из давления конденсирующегося пара и давления воздуха (сухого азота), впущенного через специальный дополнительный регулируемый клапан:

$$P_{\Sigma} = P_{балл} + P_{пар}.$$

Если суммарное давление  $P_{\Sigma}$  увеличивается до уровня  $P_{\text{вып}}$ , когда парциальное давление пара  $P_{\text{пар}}$  еще не достигает критической величины  $P_{\text{крит}}$ , то мы сможем откачать некоторую часть конденсирующегося пара. Естественно, что при этом достигаемая величина  $P_{\infty}$  ухудшается почти на порядок.

Промышленность выпускает для ММН масла ВМ-4 и ВМ-6 с упругостью паров при 293 К, соответственно,  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  Па, при 380—400 К — 10 и 1 Па. К основным требованиям, предъявляемым к вакуумным маслам ММН, можно отнести следующие: достаточно низкое давление насыщенных паров в широком интервале температур, определенная вязкость масла при работе в качестве смазки в малых зазорах насоса (около  $10^{-5}$  м). К сожалению, со временем в процессе работы в масле увеличивается удельный вес легколетучих фракций за счет явлений крекинга, которые происходят при местных перегревах пленок масла, а также за счет загрязнения масла откачиваемыми газами (особенно парами воды). Следовательно, масло в ММН необходимо периодически менять.

Кроме того, в ММН возникают зоны так называемого осмоления, в результате которого на стенках насосов возникают смолистые слои. Интенсивность осмоления зависит в первую очередь от природы откачиваемых газов и паров, а также от условий работы насоса. Нормальным температурным диапазоном ММН считается диапазон между 283 К и 318 К. При температуре ниже 283 К увеличивается вязкость масла, выше 318 К возникает его крекинг. При откачке агрессивных газов, таких, как хлор или фтор, масло разлагается, а следовательно, поверхности ММН подвергаются сильной коррозии.

Уровень масла, заливаемого в бак насоса, имеет прямое отношение к достигаемому предельному давлению, так как масло должно покрывать выпускной клапан, чтобы предотвратить попадание атмосферного воздуха в рабочий объем насоса.

ММН приводятся в действие от электродвигателя с помощью одного или нескольких клиновидных ремней и шкивов. Определенное количество энергии в ММН расходуется на постоянное перемещение масляных пленок, служащих для герметизации зазоров. Во время включения двигателя при комнатной температуре вязкость масла и нагрузка на двигатель являются наивысшими [4, с. 26]. После включения ММН рабочие поверхности быстро нагреваются и вязкость масла и его тормозное действие соответственно уменьшаются до небольшой величины.

Большая часть энергии привода расходуется на сжатие откачиваемого газа и выталкивание его через выпускной клапан. Когда насос начинает откачивать систему от атмосферного давления, в нем отсутствует разность давлений. Но как только он начал работать, на впускной стороне происходит понижение давления, которое создает поток газа через впускной патрубок. Одновременно под выпускным клапаном происходит заметное повышение давления, которое обеспечивает поднятие клапана (обычно шарик, прижатый пружинкой) и выхлоп через него откачиваемого газа. Это приводит к тому, что при включении наблюдается увеличение потребления энергии.

При дальнейшей откачке расход энергии еще более повышается за счет увеличения разности давлений. При этом, однако, постоянно уменьшается количество газа, поступающего в насос при каждом ходе всасывания, так что давление, необходимое для выпуска газа через выпускной клапан, достигается с каждым ходом сжатия все позже и позже и максимальная разность давлений занимает все меньшую долю каждого цикла.

Таким образом, потребление энергии приводом ММН уменьшается вплоть до уровня, определяемого расходом энергии на перемещение масляных пленок, обеспечение циркуляции масла и компенсации потерь в трансмиссии. На рис. 6 приведена характерная кривая потребления мощности в зависимости от величины впускного давления. Кривая имеет явный максимум при давлении  $3,3 \cdot 10^4$  Па (250 мм рт. ст.). Это обстоятельство определяет выбор электродвигателя. Например, при использовании асинхронных двигателей для облегчения их пусковых условий следует включать насос при впускном патрубке насоса, сообщаемся с атмосферой. На рис. 7 приведена типовая схема включения ММН в вакуумную систему установки. Вентиль В1 позволяет обеспечить напуск атмосферного воздуха в отключаемый ММН. Вентиль В2 отсоединяет откачиваемую вакуумную систему и защищает ее от обратного всасывания масла и загрязнения. В современных вакуумных системах используются автоматические вентили В1 и В2, что позволяет создать на их базе аварийное защитное устройство.

Быстрота откачки насоса зависит от его размеров и скорости вращения. Скорость вращения связана с выбором электродвигателя и для отечественных насосов составляет 210—540 об·мин<sup>-1</sup>, ММН с быстротой откачки до 22 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup> (6 л·с<sup>-1</sup>) преимущественно являются пластинчато-роторными. Пластинчато-статорные насосы в настоящее время уходят в историю.

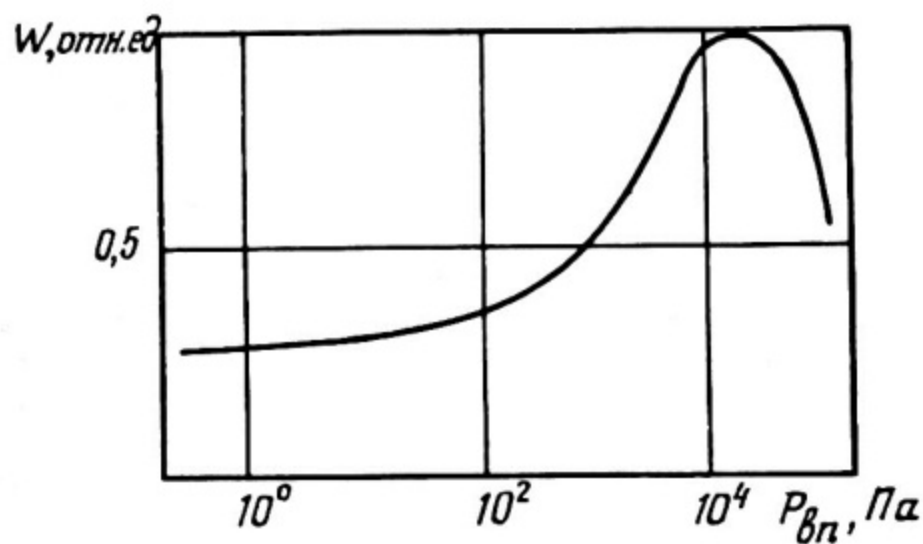


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности  $W$  от впускного давления  $P_{вп}$

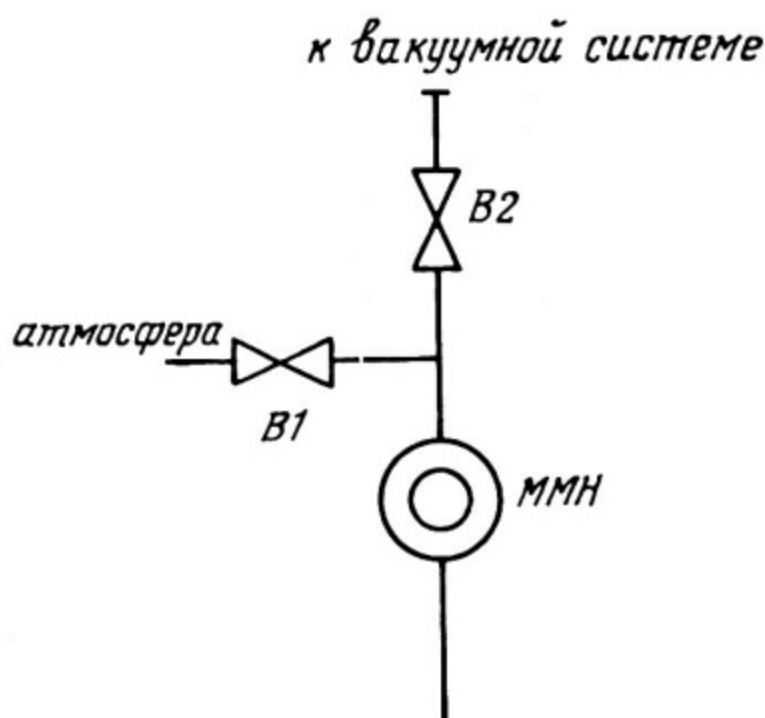


Рис. 7. Схема подключения насосов с масляным уплотнением и вакуумным системам установок

Наиболее надежными насосами в тяжелых условиях эксплуатации являются плунжерные насосы. Для них характерны и большие величины быстрот откачки (вплоть до  $1800 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  ( $500 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ )). Разработана единая серия одно- и двухступенчатых плунжерных насосов (ВН-10-2, ВН-150-1 и т.д.) с быстротой откачки от 22 до  $540 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  (от 6 до  $150 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Эти насосы имеют газобалластные устройства, позволяющие откачивать пары воды с давлением на входе в насос до  $2,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$  (17,6 мм рт.ст.).

ММН, как и любой механизм, обладает конечным КПД. Для насосов потери энергии приводят к нежелательному разогреву деталей конструкции. При геометрическом увеличении размеров насосов возникает проблема теплосъема, так как теплосъем растет всего лишь как квадрат линейных размеров, а выделение тепла как куб линейных размеров. Следовательно, наступает момент, когда необходимо вводить принудительное охлаждение. Для ММН современной конструкции эта необходимость возникает при быстроте откачки более  $100 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  ( $40 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Технические характеристики ряда современных ММН приведены в табл. 1.

Важнейшей характеристикой ММН, как и любого другого насоса, является зависимость быстроты откачки насоса от величины рабочего или впускного давления:

$$S_H = F(p_{\text{вп}}).$$

Типичная зависимость приведена на рис. 8. Спад характеристики при давлениях ниже  $10^{-2} \text{ Па}$  (1 мм рт. ст.) обусловлен удельным ростом паразитных потоков. Величина предельного впускного давления в основном определяется величиной упругости паров масел, применяемых в насосе.

Таблица 1

Характеристика	Тип насоса					
	ВН-461М	НВР-3Д (ВН-3-2)	ВН-40-1	ВН-150-2*	Д-950 (Япония)	Д4А (ФРГ)
Быстрота действия. $\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ ( $\text{л} \cdot \text{с}^{-1}$ ) ( $10^5 - 10^2$ Па)	2,8 (0,78)	11 (3)	144 (40)	360 (100)	576 (160)	6,4 (1,8)
Число ступеней	2	2	1	2	2	2
$P_{\infty}$ , Па** (мм рт.ст.)	3 ( $2 \cdot 10^{-2}$ )	$6,6 \cdot 10^{-1}$ ( $5 \cdot 10^{-3}$ )	6,6 ( $5 \cdot 10^{-2}$ )	6,6 ( $5 \cdot 10^{-2}$ )	$6,6 \cdot 10^{-2}$ ( $5 \cdot 10^{-4}$ )	$3 \cdot 10^{-2}$ ( $2 \cdot 10^{-4}$ )
Число оборотов в минуту	540	450	540	450	1200	1500
Вес (с приводом), кг	64	67,5	285	948	35	19,5
Мощность привода, кВт	0,6	0,6	5,5	13	1,5	0,25

\* Насос с водяным охлаждением.

\*\* Производятся величины суммарного давления без газобалластной системы.

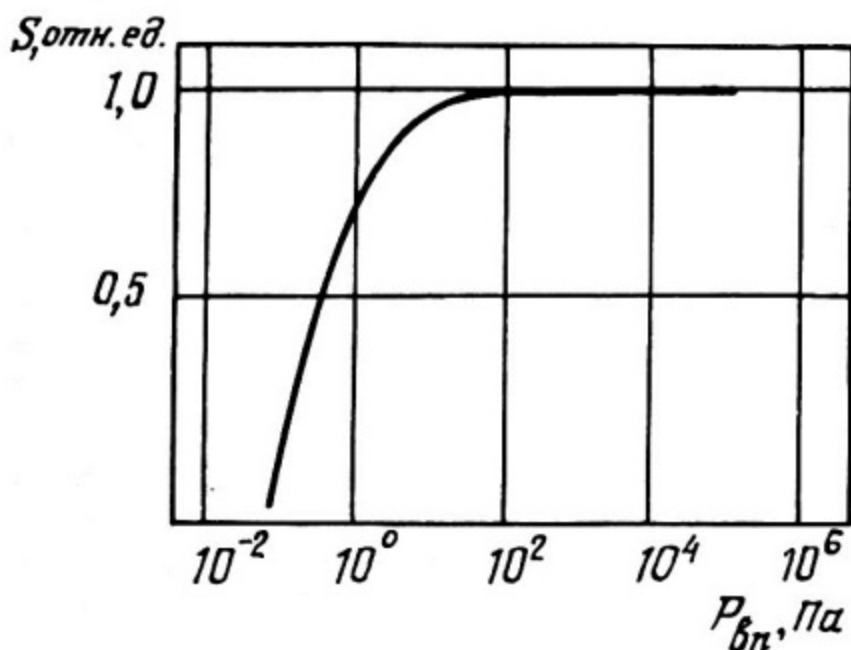


Рис. 8. Типичная зависимость быстроты откачки ММН от величины впускного давления

## ДВУХРОТОРНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Двухроторные вакуумные насосы (ДВН), называемые за рубежом насосами Рутса, предназначены для работы в области давлений от  $10^2$  до  $10^{-7}$  Па ( $1 \div 10^{-3}$  мм рт.ст.), где они наиболее экономичны по сравнению с другими типами насосов.

Использование второй ступени в ММН позволяет получить выигрыш в величине предельного давления почти на порядок. Естественно возникает вопрос — не добавить ли еще третью, четвертую и т.д. ступени? Оказывается, что такое решение не приводит к уменьшению величины предельного давления, так как все последующие ступени также являются ступенями с масляным уплотнением. Ограничение в получаемой величине  $P_{\infty}$  связаны, во-первых, с невозможностью полного обезгаживания масла и, во-вторых, с конечной величиной давления паров масла. Следовательно, третья ступень должна работать без использования масла, обладать высокой скоростью откачки при относительно малом перепаде впускного и выпускного давлений. Этот перепад не должен превышать  $10 \div 100$  Па, в этом случае возможно получить минимальные обратные потоки откачиваемого газа.

Именно такими свойствами и обладают ДВН, используемые в качестве третьей, высоковакуумной ступени ММН. Комбинация ДВН с ММН работает в оптимальных условиях при выполнении следующего равенства:

$$S_{ММН} = (0,2 \div 0,1) S_{ДВН} ,$$

где  $S_{ММН}$  и  $S_{ДВН}$  — скорости откачки ММН и ДВН, соответственно.

В рабочей камере насоса два ротора, имеющие сечения по форме близкие к цифре 8 [3, с. 108], вращаются навстречу друг другу в овальном статоре. Роторы синхронизированы и контуры их таковы, что при вращении осуществляется практически полный контакт между ними и между роторами и стенками статора. Зазоры не превышают  $(75-100) \cdot 10^{-6}$  м. Впускные и выпускные отверстия расположены так, что газ захватывается впадинами каждого из роторов. На рис. 9 поясняется принцип действия ДВН. Показан ряд последовательных положений роторов при работе насоса. Отсеченный от стороны всасывания газ при вращении роторов переносится без сжатия на сторону выпуска, где он при дальнейшем вращении роторов выталкивается из насоса. При этом создается поток откачки  $Q_{отк}$ .

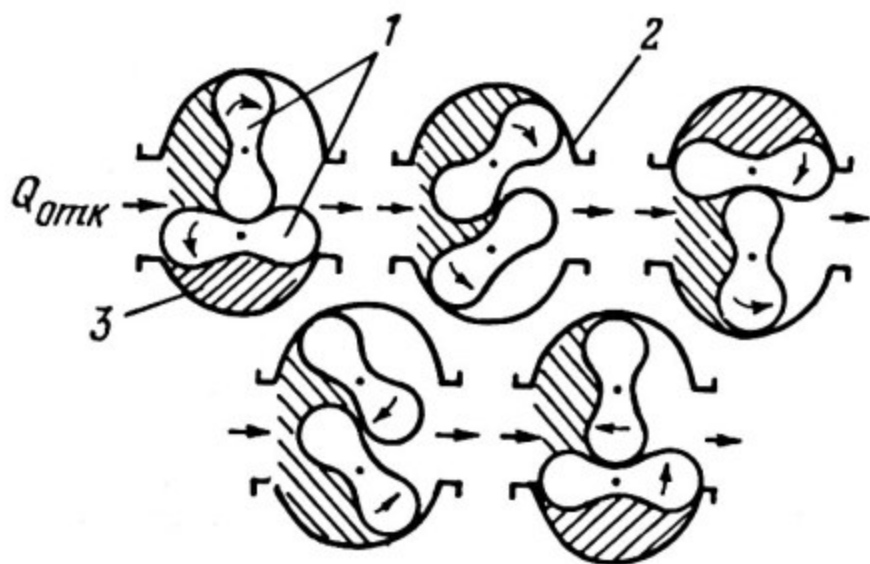


Рис. 9. Принцип действия двухроторного вакуумного насоса:

1 — роторы; 2 — статор; 3 — откачиваемый газ

Основными достоинствами ДВН являются: отсутствие трения в роторном механизме из-за наличия рабочих зазоров, простота устройства и отсутствие масла. ДВН мало чувствительны к пыли, грязи, к колебаниям величины потока откачки, не боятся прорывов атмосферного воздуха.

Наличие рабочих зазоров в ДВН приводит к тому, что величина впускного давления всегда является функцией величины выпускного давления:

$$P_{вп} = F(P_{вып}),$$

так как часть откачиваемого газа всегда образует обратный поток.

Быстрота откачки насоса зависит в первую очередь от его геометрических размеров. Известны насосы с быстротой откачки от  $18 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  до  $90\,000 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  ( $5 \div 25000 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Как и в случае ММН, принцип действия ДВН позволяет строить двухступенчатые насосы в одном корпусе, что также дает выигрыш в величине  $P_{\infty}$  на один порядок за счет снижения величины обратного потока.

Статоры ДВН обычно делают из чугуна. Впускные и выпускные патрубки насосов располагаются на плоских сторонах овального корпуса. Основная ось насоса располагается либо вертикально, либо горизонтально. Крупные роторы ДВН сваривают из стали, их поверхности тщательно полируют. Контуры роторов — сложные кривые, которые сопрягаются в вершинах и основаниях по радиусу кривизны.

Роторы должны быть тщательно сбалансированы. Валы роторов опираются на подшипники, смазка которых осуществляется так, чтобы пары масла не попадали внутрь статора. Валы роторов с одной стороны насоса входят в картер коробки передач, где они несут на себе безлюфтовые синхронизирующие шестерни. К картеру подсоединяется трубопровод от насоса предварительного разрежения (или фортракт). Таким образом, во время работы ДВН картер находится под сравнительно низким давлением и уменьшается опасность попадания масла внутрь статора через уплотняющие сальники валов.

Зазоры между торцами роторов и крышками статоров, между роторами и статором должны быть минимальны. Их размер определяется техническими условиями, так как из физических соображений следует лишь одно — режим течения газа через них при рабочих давлениях должен быть молекулярным. К техническим условиям в первую очередь относятся: допустимый градиент температур, так как охлаждение роторов представляет собой серьезную техническую проблему (роторы, нагреваясь, могут расширяться, что приводит к их заклиниванию и

выходу насоса из строя), и точность изготовления деталей насоса, включая последующую сборку.

Для вращательных механических насосов принято вычислять так называемую геометрическую быстроту откачки, чтобы были понятны основные предпосылки для конструирования. Для ДВН геометрическая быстрота откачки может быть записана выражением вида [8, с. 57]

$$S_{H_{геом}} = 2 \times V \times \pi,$$

где коэффициент 2 указывает, что за один оборот через насос переносятся две порции газа объемом  $V$ ;  $\pi$  — количество оборотов роторов в единицу времени.

Пусть осевая длина ротора равна  $L$ , площадь сечения впадины ротора  $\Delta$ , число оборотов —  $\pi$ . Тогда:

$$S_{H_{геом}} = 2 \times \Delta \times L \times \pi.$$

Если считать, что  $\Delta \approx \frac{2}{3} \frac{\pi D^2}{8}$ , где  $D$  — диаметр окружности, описываемой ротором, то

$$S_{H_{геом}} = \frac{\pi D^2}{6} \times L \times \pi.$$

В действительности эффективная быстрота откачки  $S_{H_{эф}}$  меньше величины  $S_{H_{геом}}$  из-за наличия обратных потоков  $Q_{обр}$ :

$$S_{H_{эф}} = S_{H_{геом}} - \frac{Q_{обр}}{P_{вп}} = S_{H_{геом}} - C(K_{сж}^{-1}),$$

где  $C$  — суммарная пропускная способность зазоров в насосе;  $K_{сж}$  — коэффициент сжатия насоса, вычисляемый как отношение величины выпускного давления  $P_{вып}$  к величине впускного давления  $P_{вп}$ .

Из этого выражения ясно, что для получения больших  $S_{H_{эф}}$  выгодно иметь малый коэффициент сжатия  $K_{сж}$ , молекулярный режим течения газа через зазоры насоса, при котором суммарная пропускная способность минимальна, большую скорость вращения и большие размеры насоса.

Нужно отметить, что при увеличении скорости вращения роторов или при увеличении  $K_{сж}$  увеличивается нагрев роторов. Если рабочее давление в насосе составляет величину, большую  $10^4$  Па, то охлаждение роторов осуществляется достаточно эффективно потоком откачиваемого газа. При меньших давлениях таким путем тепло не снять, поэтому обычно охлаждают коробку передач и подшипниковые узлы, но это не приводит к эффективному охлаждению роторов.

Следует еще раз отметить, что газ откачивается ДВН не так, как ММН. При откачке отсутствует фаза сжатия отсеченной порции газа, вместо нее существует операция переноса порции газа при том давлении, при котором она была отсечена, а именно  $P_{вп}$ . Затем роторы ДВН "проталкивают" эту отсеченную порцию газа на сторону выпуска в результате встречного синхронизированного вращения. Такие "проталкивания" повторяются 4 раза за один оборот, это вызывает частые колебания величины выпускного давления  $P_{впл}$  (частота больше 200 Гц) и колебания величины потока откачки. Такой неэффективный способ откачки и приводит к интенсивному разогреву роторов. Это явление учитывают, делая начальные зазоры в ДВН в 2—3 раза больше, чем зазоры в рабочем режиме.

Для охлаждения роторов на выпускной стороне ДВН устанавливают водяной холодильник, позволяющий обеспечить определенный теплосъем с роторов охлажденным колеблющимся потоком газа на выходе насоса.

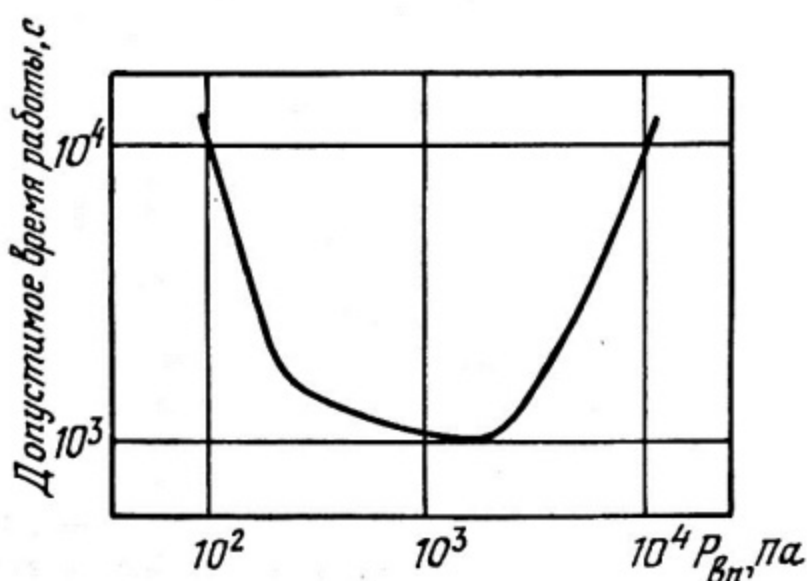


Рис. 10. Зависимость допустимого времени работы ДВН от величины впускного давления

Для ДВН существует понятие "безопасная длительность работы" с точки зрения разогрева роторов. Зависимость допустимого времени работы насоса от величины впускного давления приведена на рис. 10. Эта зависимость представляет собой кривую с явным минимумом в районе давления  $P_{вп} = 10^3$  Па. В нормальном режиме работы ДВН проходит это значение достаточно быстро и проблема аварийного разогрева не возникает, однако при откачке больших объемов или систем с постоянной газовой нагрузкой следует учитывать возможную опасность.

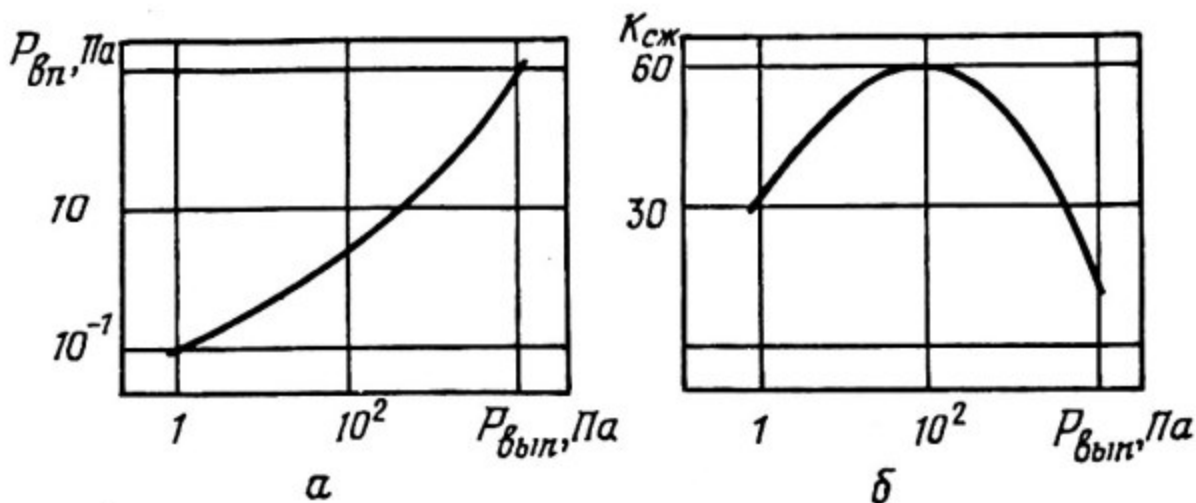


Рис. 11. Типичные зависимости  $P_{вп} = F(P_{вып})$  (а) и  $K_{сж} = F(P_{вп})$  (б) для ДВН

На рис. 11 приведены типичные зависимости величины впускного давления и коэффициента сжатия ДВН от величины выпускного давления [4, с. 224]. Спад зависимости  $K_{сж}(P_{вып})$  объясняется увеличением обратного потока газа за счет переноса некоторой части газа, сорбированной на неровностях роторов.

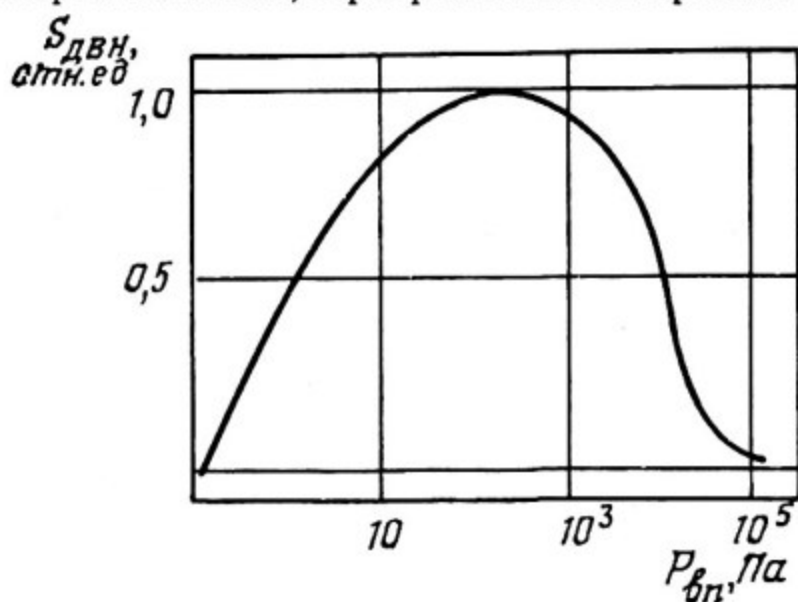


Рис. 12. Зависимость быстроты откачки ДВН от величины впускного давления

Зависимость быстроты откачки от величины впускного давления приведена на рис. 12. Поскольку величина  $P_{вп}$  являет-

ся почти линейной функцией  $P_{\text{вып}}$  (см. рис. 11), то вид и положение кривой на рис. 12 сильно зависят от выбора насоса предварительного разрежения. При уменьшении впускного давления от атмосферного до  $P_{\infty \text{ДВН}}$ , быстрота откачки вначале плавно растет, что связано с переходом режима течения газа из вязкостного в промежуточный, а затем в молекулярный. При этом за счет уменьшения суммарной проводимости зазоров падает величина обратного потока и  $K_{\text{СЖ}}$  достигает своего максимума. После достижения максимального значения  $S_{\text{ДВН}}$  начинает уменьшаться за счет увеличения разности давлений на впускной и выпускной сторонах насоса при  $P_{\text{вып}} = P_{\infty \text{ММН}}$ .

Быстрота откачки легких газов с помощью ДВН всегда меньше, чем тяжелых. Это объясняется большой проникающей способностью легких газов через те же зазоры в насосе и, следовательно, большими величинами обратных потоков. Например, быстрота откачки водорода в максимуме на 10% меньше быстроты откачки азота.

Остаточные газы в системе после ее откачки с помощью ДВН состоят в основном из окиси углерода, паров воды и паров углеводородов. Последний компонент возникает из-за использования ММН в качестве предварительного и из-за частичного просачивания паров подшипникового масла на впускную сторону.

Типичная схема включения ДВН в вакуумную систему приведена на рис. 13.

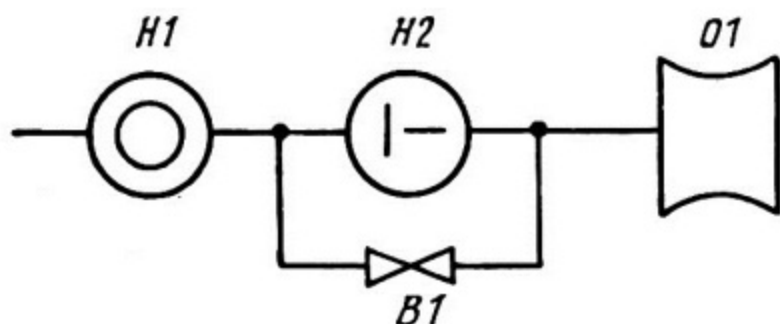


Рис. 13. Схема включения двухроторного насоса для откачки вакуумной системы:

Н1 — механический масляный насос; Н2 — ДВН; В1 — вентиль байпасной линии откачки; О1 — откачиваемый объем

Байпасная линия откачки позволяет включить ДВН—Н2 при давлении в объеме О1 равном атмосферному одновременно с ММН—Н1 без перегрузки электродвигателя и перегрева ДВН.

В таблице 2 приведены характеристики ДВН отечественного и зарубежного производства.

Т а б л и ц а 2

Параметры	2ДВН—500 (СССР)	RUVAC-WA 2000 (ФРГ)
$S$ , л·с <sup>-1</sup>	500	514
$P_{\text{пол}}$ , Па	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
$\pi$ , об·м <sup>-1</sup>	2910	3000
$P_{\text{нац}}$ , Па	$1,33 \cdot 10^2$	$10^4$
Мощность привода, кВт	7,5	7,5
Диаметр входного фланца, мм	240	150
Вес, кг	565	400
Габариты, мм	1420 x 600 x 845	1242 x 514 x 530

На базе двухроторного насоса ДВН—50 промышленность выпускает механический вакуумный агрегат (АВМ—50), в состав которого помимо ДВН входит механический масляный плунжерный насос ВН—2МГ.

Скорость откачки, обеспечиваемая АВМ—50 в диапазоне рабочих давлений от  $10^2$  до 10 Па, составляет 40 л·с<sup>-1</sup>. Предельное давление —  $6 \cdot 10^{-7}$  Па. Скорость вращения роторов составляет 2860 об·мин<sup>-1</sup>. Уплотнение вала ДВН осуществляется форвакуумным маслом, применяемым и для ММН типа ВМ—1. Мощность электропривода общего и для ММН и для ДВН — 1,7 кВт. Вес АВМ—50 — 200 кг.

АВМ—50 применяют в вакуумной металлургии, в черновых и чистовых линиях централизованных форвакуумных систем. Агрегаты имеют примерно в три раза меньший расход мощности, занимают в 2—3 раза меньшую производственную площадь, приблизительно в три раза меньше по габаритам и весу,

чем механические масляные насосы той же производительности в области давлений от  $10^2$  до  $10$  Па [10, с. 24].

## СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Впервые идея о том, что молекулы можно заставить перемещаться в требуемом направлении в результате многократных столкновений с быстро движущейся твердой поверхностью была практически реализована Геде в 1913 году.

Если скорость движения поверхности больше или равна скорости теплового движения молекул, то принцип "молекулярного беспорядка" не сохраняется, и молекулы приобретают направленность в движении в заданном направлении.

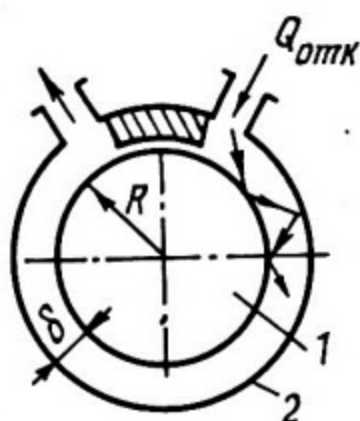


Рис. 14. Схема молекулярного насоса:  
 $R$  — радиус ротора;  $s$  — зазор между ротором и статором; 1 — ротор; 2 — статор

На рис. 14 изображена схема, поясняющая принцип действия молекулярного насоса. В этом насосе движущуюся твердую поверхность заменяет вращающийся с линейной скоростью  $v$  ротор. Угловая скорость вращения ротора  $\omega$  может быть найдена из условия равенства линейной скорости вращения  $v$  и тепловой скорости движения молекул  $\bar{v}$ . Для воздуха при тем-

пературе 293 К  $\bar{v} = 465 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , тогда при радиусе ротора  $R = 0,5 \text{ м}$  угловая скорость вращения ротора

$$\omega = \frac{v}{R} \geq \frac{\bar{v}}{R} = \frac{465}{0,5} \approx 60\,000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1},$$

а скорость вращения ротора

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = 10000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}.$$

Для получения больших коэффициентов сжатия тракт откачки, образованный зазором между ротором и статором, должен быть достаточно длинным. При этом величина зазора  $\delta$  должна плавно уменьшаться в сторону выпускного патрубка, так как при откачке происходит изотермическое сжатие газа, а следовательно, и уменьшение его объема.

В области молекулярного режима насос, схема которого изображена на рис. 14, должен работать эффективно, так как скорость ротора высока и при каждом втором соударении молекулы получают дополнительную составляющую импульса в направлении откачки. При увеличении давления и при переходе режима течения газа из молекулярного в молекулярно-вязкостный и в вязкостный эффективность откачки падает за счет возникновения отдельных слоев откачиваемого газа и уменьшения вероятности ударов молекул о поверхность ротора. Это обстоятельство иллюстрируется на рис. 15, где изображена качественная зависимость скорости откачки молекулярного насоса от величины рабочего давления.

Величина получаемого предельного давления рассматриваемого молекулярного насоса определяется конечной проводимостью зазоров между быстро вращающимся ротором и статором. В зависимости от конкретной конструкции эта величина различна, но в целом принцип откачки, реализованный Геде, позволяет производить высоковакуумную откачку вакуумных систем.

На рис. 16 приведены три варианта конструкций молекулярных насосов, созданных в разные годы. В изображенном на рис. 16,а насосе Геде (1913 г.) ротор представляет собой горизонтально расположенный цилиндр с восемью кольцеобразными канавками. Площадь поперечного сечения канавок уменьшается в 4 раза по мере удаления от центра насоса, где расположен всасывающий патрубок, к краям, где находятся каналы предвари-

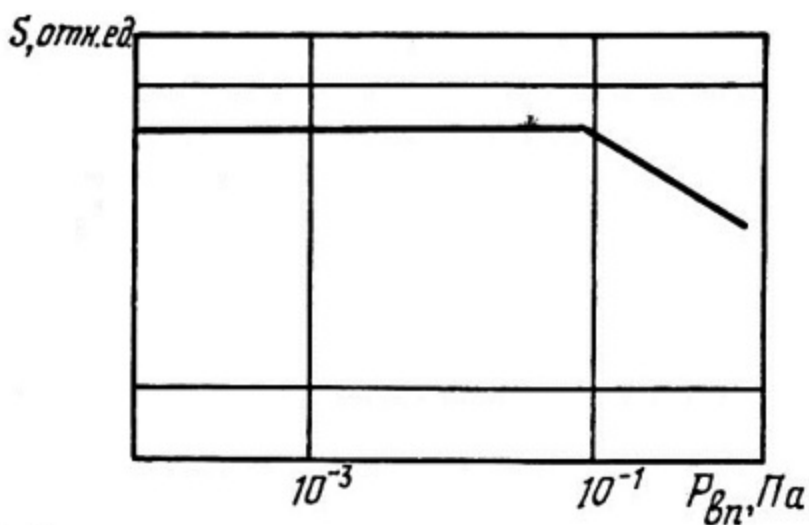


Рис. 15. Зависимость скорости откачки молекулярного насоса от величины впускного давления

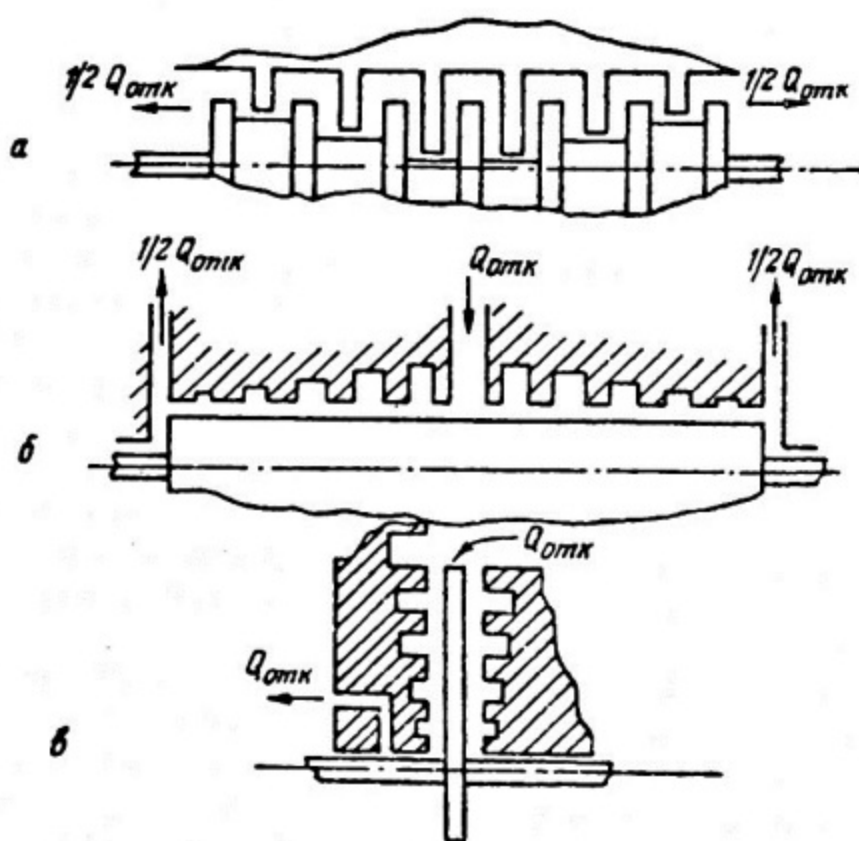


Рис. 16. Конструкции молекулярных насосов

тельной откачки и подшипники, в которых устанавливается ротор. Таким образом, при вращении ротора происходят соударения молекул откачиваемого газа с тремя быстро движущимися стенками канала, образованного канавкой на роторе и выступом на статоре (см. рис. 14). Зазоры между выступами и стенками канавок малы, их величина не превышает  $10^{-4}$  м. В результате этого, поток откачки направлен вдоль канавки на роторе в направлении, совпадающем с направлением вращения ротора. Каждая канавка представляет собой отдельную ступень откачки, которая сообщается с последующей и предыдущей ступенями с помощью поперечных отверстий в статоре, вход и выход которых находятся по обеим сторонам выступов на статоре.

При скорости вращения ротора  $10000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$  и диаметре ротора (среднем) 0,1 м Геде получил для своего насоса скорость откачки  $1,4 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$  при давлении 1 Па. Величина предельного давления —  $5 \cdot 10^{-4}$  Па. Коэффициент сжатия каждой половины насоса, которые работают параллельно, составляет величину  $2 \cdot 10^5$ . Зависимость скорости откачки от величины рабочего давления имеет колоколообразный характер.

Насос Хольвека (рис. 16, б), созданный им в 1923 году, отличается от насоса Геде тем, что ротор в нем — гладкий цилиндр, каналы откачки образованы двойными винтообразными канавками в статоре. Диаметр ротора 0,15 м, скорость вращения —  $4500 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ , зазоры в насосе не превышают величину  $3 \cdot 10^{-5}$  м. За счет уменьшенных зазоров коэффициент сжатия насоса Хольвека составлял величину  $6 \cdot 10^6$ .

К наиболее удачным ранним конструктивным решениям относится конструкция Зигбана (рис. 16, в), разработанная им в 1926 году. Ротор насоса представляет собой диск. При диаметре примерно 0,3 м на краю диска можно получить очень большую величину линейной скорости и, следовательно, высокую эффективность взаимодействия с молекулами откачиваемого газа. Скорость вращения диска от 4000 до  $8000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ . Три параллельных канала откачки образованы спиральными канавками в статоре. Глубина канавок изменяется от  $10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-2}$  м. Скорость откачки больших насосов достигает  $150 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ , практически не изменяясь до величины предельного давления  $10^{-4}$  Па. [4, с. 249—250].

Точный расчет молекулярных насосов сделать весьма затруднительно из-за переменной геометрии каналов откачки, наличия обратного потока газа через зазоры, нестационарности потока откачки, сорбционными явлениями на роторе и статоре насоса и т.д. Приближенные оценки дают некоторые соотношения, по-

звolyющие оценить ту или иную конструкцию и выявить общие закономерности, например:

$$1) K_{сж} = \frac{P_{вип}}{P_{гп}} \approx \exp \sqrt{M} ,$$

где  $M$  — молекулярный вес откачиваемого газа;

$$2) S_H \approx k \times \omega ,$$

где  $k$  — постоянный множитель;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора насоса.

### Турбомолекулярные насосы

Турбомолекулярные насосы (ТМН) сочетают принцип молекулярного увлечения и осевого компрессора и напоминают обращенную гурбину [8, с. 58]. Современный вариант ТМН был создан Беккером в 1958 году (рис. 17). В горизонтальном цилиндрическом корпусе находятся несколько кольцеобразных дисков с закрепленными и равномерно на них размещенными лопатками. Подшипники в торцах поддерживают вал, на котором укреплены диски с вращающимися лопатками, расположенными между дисками статора. Впускное отверстие расположено в середине насоса и отсюда газ откачивается в направлении торцов, оборудованных патрубками для подключения насосов предварительного разрежения. Лопатки статора и ротора имеют наклоны, которые обеспечивают максимальную скорость откачки в центре насоса и максимальный коэффициент сжатия на торцах насоса. Набегающие лопатки ротора соударяются с молекулами и сообщают им импульс движения, нормальный к поверхности лопатки и направленный к торцам. Каждая пара лопаток ротора и статора представляет одну ступень откачки. Количество лопаток определяет количество параллельных каналов откачки.

В одном насосе может быть 30—40 ступеней откачки, поэтому достигается очень большой коэффициент сжатия (до  $10^7$  по воздуху). Зазоры в насосе составляют величины порядка  $10^{-3}$  м, поэтому возможны очень большие скорости вращения ротора. При диаметре ротора 0,17 м скорость вращения до 20 000 об·мин<sup>-1</sup>. Скорость откачки при этом достигает величины 140 л·с<sup>-1</sup>. Диапазон рабочих давлений от 10 до  $10^{-7}$  Па, что является рекордом для насосов механического типа.

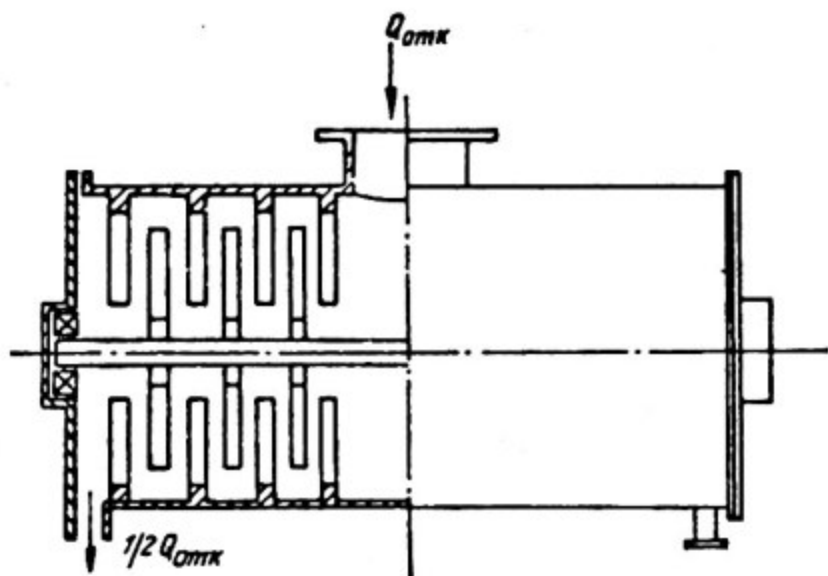


Рис. 17. Схема турбомолекулярного насоса

В молекулярном режиме работы при выполнении условия  $\lambda \gg d$  (где  $\lambda$  — длина свободного пробега молекулы,  $d$  — характерный геометрический размер системы) представления турбокомпрессора не имеют смысла и, как и в случае молекулярного насоса, можно говорить о соударениях молекул с подвижными и неподвижными поверхностями.

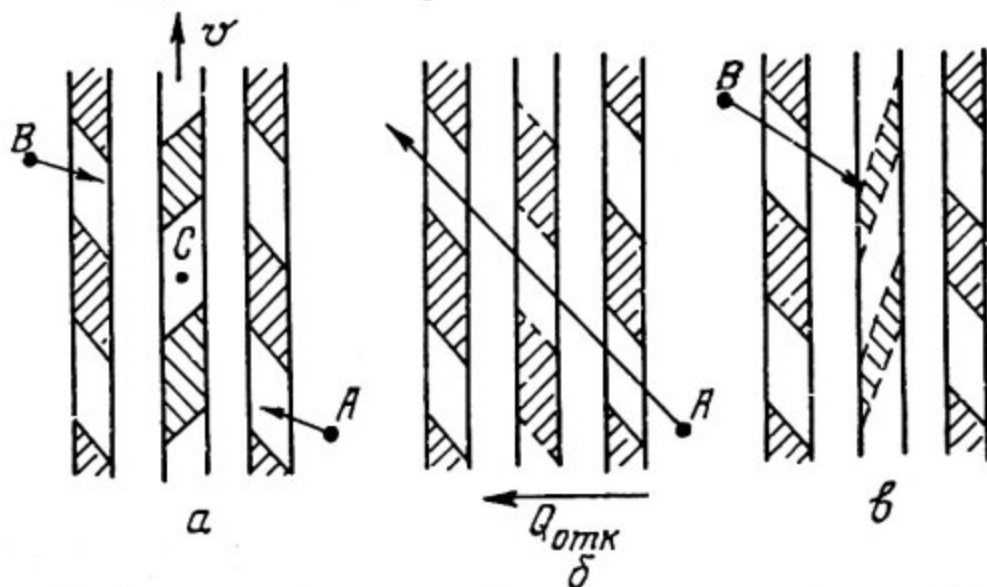


Рис. 18. Принцип действия турбомолекулярного насоса (в отношении движения молекул и лопаток ротора)

Принцип действия ТМН можно пояснить, используя рис. 18. На этом рисунке изображены три взаимных расположения молекул А и В и лопаток ТМН. В центре каждой группы находятся

лопатки ротора, движущиеся вверх с линейной скоростью  $v$ . Молекула А попадает в зону С (рис. 18, а) из-за того, что скорость ее теплового движения примерно сравнима со скоростью  $v$ . Лопатка ротора может ударить молекулу А, а может и не ударить ее. В любом случае молекула А пройдет справа налево и образуется поток откачки  $Q_{отк}$  (рис. 18, б). Для молекулы А система лопаток насоса при относительном рассмотрении (векторное сложение скоростей) будет "прозрачна", тогда как для молекулы В ситуация будет обратная (рис. 18, в). Для молекулы В столкновение с набегающей гранью практически неизбежно, что при рассмотрении относительного движения на рис. 18, в можно изобразить увеличенным наклоном лопаток ротора. Последнее обстоятельство резко уменьшает величину обратного потока и приводит к росту коэффициента сжатия насоса.

Следует еще раз обратить внимание читателя на то, что в вязкостном режиме ТМН работать не может из-за невыполнения условия  $\lambda \gg d$ .

По существу любой ТМН состоит из большого числа последовательно соединенных ступеней откачки. Суммарный коэффициент сжатия определяется из следующего соотношения:

$$K_{сж} = K_i^{\pi} ,$$

где  $\pi$  — число ступеней откачки;  $K_i$  — коэффициент сжатия одной ступени (обычно он равен 1, 2).

### Рабочие характеристики ТМН

Для обеспечения молекулярного режима течения газа в ТМН перед его включением необходимо обеспечить предварительное разрежение. Во время работы ТМН его выпускная сторона должна откачиваться вспомогательным насосом, скорость откачки которого определяется соотношением:

$$S_{всп} = 0,05 S_{ТМН} .$$

ТМН не боится внезапного впуска газа при высоком давлении ("прорыв атмосферы"). Типичная зависимость скорости откачки ТМН от величины рабочего давления приведена на рис. 19. Скорость откачки водорода меньше, чем воздуха за счет того, что для легких газов ниже  $K_{сж}$  из-за значительной величины обратного потока ( $\bar{v} \approx M^{-1/2}$  и  $\bar{v} \gg v$ ) (рис. 20).

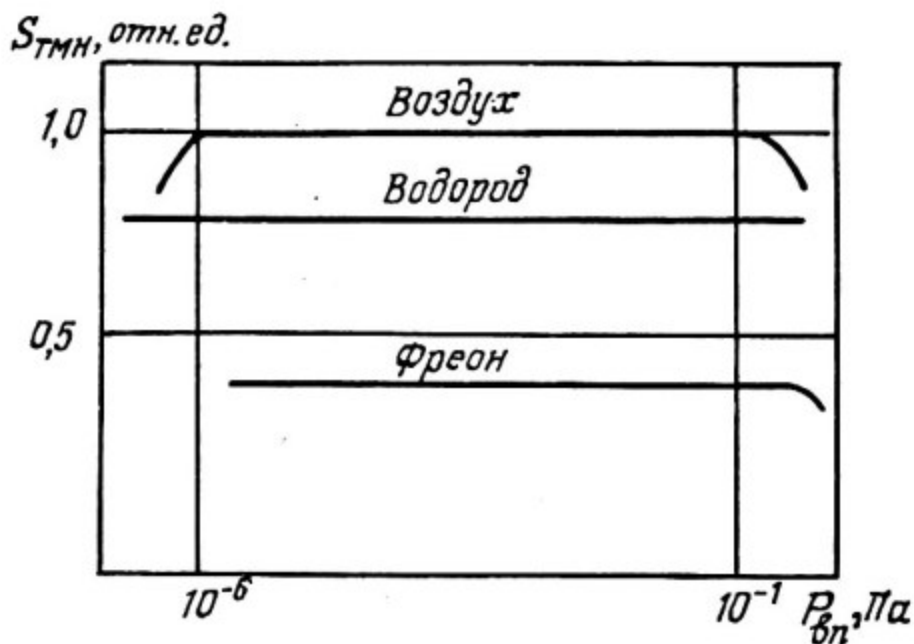


Рис. 19. Зависимость скорости откачки турбомолекулярного насоса от величины впускного давления

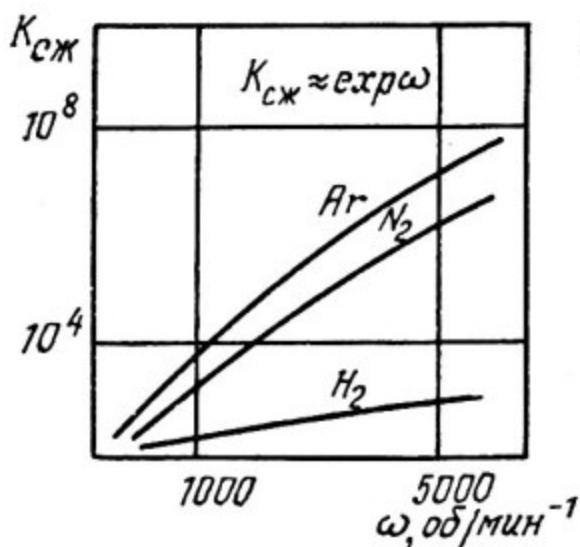


Рис. 20. Зависимость коэффициента сжатия ТМН от скорости вращения ротора

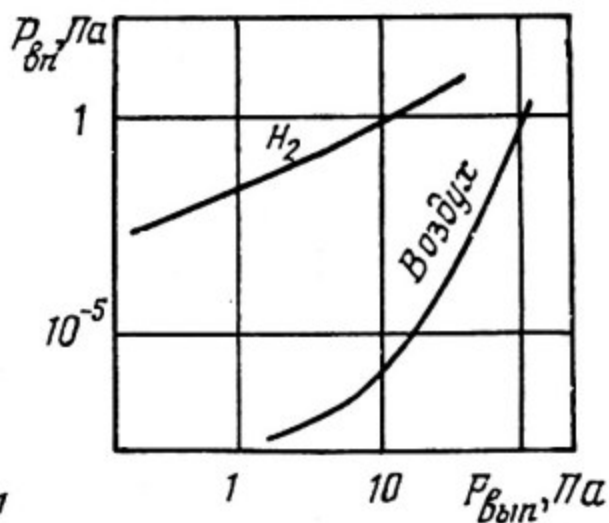


Рис. 21. Зависимость между впускным и выпускным давлениями для ТМН

Величина впускного давления ТМН зависит от величины выпускного давления (рис. 21) [4, с. 271]. Из рис. 20 и 21 следует возможность осуществлять селективную откачку вакуумной системы и поддерживать в системе заданный парциальный

состав остаточного газа за счет увеличения давления определенного компонента на выпускной стороне насоса (например, вводить в рабочий объем плазменной установки дополнительное количество водорода).

ТМН обладают рядом преимуществ по сравнению с насосами других типов. Они позволяют осуществлять безмасляную сверхвысоковакуумную откачку систем, не имеют нагретых элементов, не нуждаются в ловушках и т.п.

Величина предельного давления, получаемого с помощью ТМН, сильно зависит от степени обезгаженности последнего, что связано со значительной площадью внутренних поверхностей насоса. Прогрев насоса ведется часами, т.к. греть мы может лишь статор, ротор при этом нагревается лишь тепловым излучением. Типичные зависимости получаемого предельного давления в системе при прогреве ТМН представлены на рис. 22.

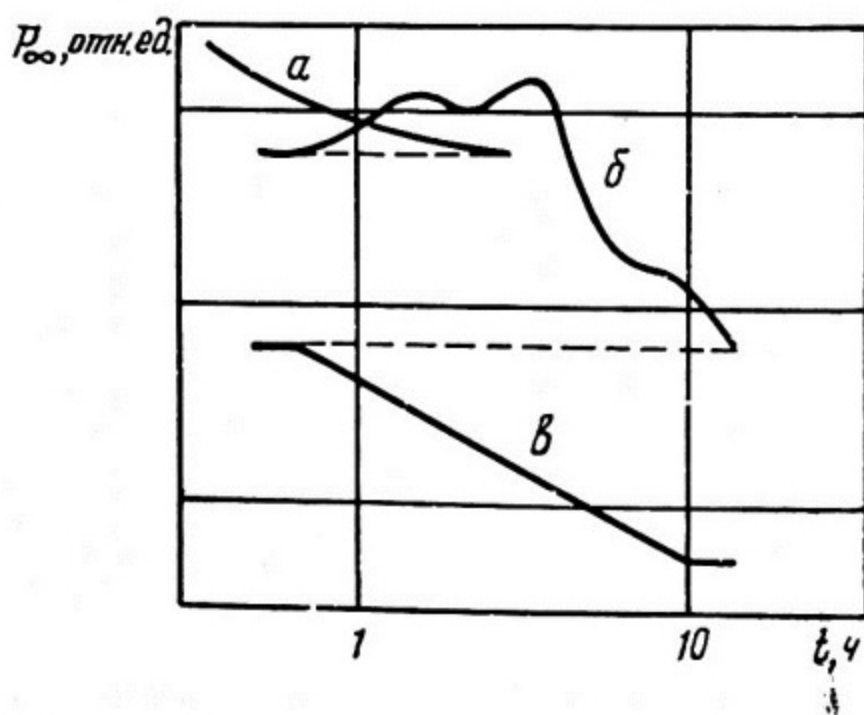


Рис. 22. Зависимость величины предельного давления ТМН от длительности откачки:

а — без прогрева; б — с прогревом; в — с охлаждением

Состав остаточного газа в системе, откачиваемой ТМН, определяется, в основном, водяными парами, водородом, окисью углерода и азотом. После проведения длительного прогрева в спектре преобладает водород.

Следует отметить, что конструкции современных турбомолекулярных насосов оптимизируются с точки зрения получения максимальной скорости вращения ротора и уменьшения миграции масла, смазывающего прецизионные высокооборотные подшипники, в направлении впускного патрубка.

Лопатки ротора современного насоса имеют форму, обеспечивающую минимальное нарастание массы по радиусу, обычно у основания толщина лопаток вдвое больше, чем на конце [11]. Угол разворота лопаток убывает в радиальном направлении, максимальный угол обычно не превышает  $35^\circ$ . Такое решение приводит к уменьшению давления лопаток на ротор, что позволяет увеличить скорость его вращения.

Ротор часто расположен вертикально, вместо подшипников используются газодинамические и магнитные подвески, что позволяет избежать попадание подшипникового масла на высоковакуумную сторону насоса.

В нашей стране выпускаются ТМН со скоростью откачки от 100 до 5000 л·с<sup>-1</sup>. Статический преобразователь частоты обеспечивает двухступенчатый запуск ТМН при частотах 150 и 300 Гц и разгон ротора до скорости вращения 18 000 об·мин<sup>-1</sup>. Охлаждение статоров насосов и подшипниковых узлов осуществляется водой.

В таблице 3 приводятся сравнительные характеристики отечественного насоса ТМН-200 [10. с. 26] и насоса производства ФРГ *Turbovac* - 200 (фирма *LEYBOLD-HERAEUS*) [11].

Т а б л и ц а 3

Параметр	ТМН-200	<i>Turbovac</i> -200
Скорость откачки по воздуху в диапазоне давлений ( $6 \cdot 10^{-7} \div 6 \cdot 10^{-6}$ ) Па, л·с <sup>-1</sup>	250	220
Предельное давление, Па	$10^{-7}$	$10^{-8}$
Скорость вращения ротора, об·мин <sup>-1</sup>	18000	36000
Мощность электропривода, кВт	0,3	0,1
Частота питающего напряжения, Гц	300	400

## Продолжение табл.3

Параметр	ТМН-200	<i>Turbovac</i> -200
Коэффициент сжатия по азоту	$10^6$	$6 \cdot 10^8$
Расположение ротора	Горизонтальное	Вертикальное

В ближайшем будущем можно ожидать, что будут созданы ТМН с охлаждением тракта откачки до температуры жидкого азота (78 К), что позволит резко увеличить коэффициент компрессии при откачке легких газов. Планируется создание насосов с неметаллическими роторами, что позволит полностью снять ограничения на применение ТМН в зонах интенсивных магнитных полей, связанные с перегревом роторов токами Фуко. Кроме этого, ведутся работы по снижению стоимости и массогабаритных характеристик ТМН.

## ДИФфуЗИОННЫЕ ПАРОСТРУЙНЫЕ НАСОСЫ

В рассмотренных выше молекулярных насосах передача импульса движения откачиваемым молекулам осуществляется за счет соударения их с быстродвижущейся поверхностью. Можно операцию передачи импульса поручить струям пара, газа или воды. Тогда молекулам откачиваемого газа будет сообщаться дополнительная скорость в направлении откачки за счет их столкновений с молекулами вещества, составляющего струю.

В зависимости от того, как образуется струя, струйные насосы подразделяются на: водоструйные (или жидкостные); газовые (или воздушные) струйные; пароструйные, в которых используются пары воды, ртути или вакуумного масла.

Схема водоструйного насоса изображена на рис. 23. Принцип действия основан на том, что молекулы откачиваемого газа увлекаются в направлении откачки турбулентным с завихрениями слоем высокоскоростной конической струи воды, истекающей из сопла. Угол раствора конуса струи несколько больше, чем угол раствора канала, куда входит затем струя воды с захваченными молекулами откачиваемого газа. При этом происходит двойное превращение энергии струи: сначала из потенциальной в сопле в кинетическую в свободном пространстве и затем вновь из кинетической в потенциальную энергию в канале, ко-

торый называется конфузуром. Это приводит к тому, что парциальное давление захваченного струей газа увеличивается, газ сжимается и происходит его откачка. Место захваченных струей молекул тотчас будет занято новыми молекулами откачиваемого газа, и таким образом формируется поток откачки ( $Q_{отк}$ ).

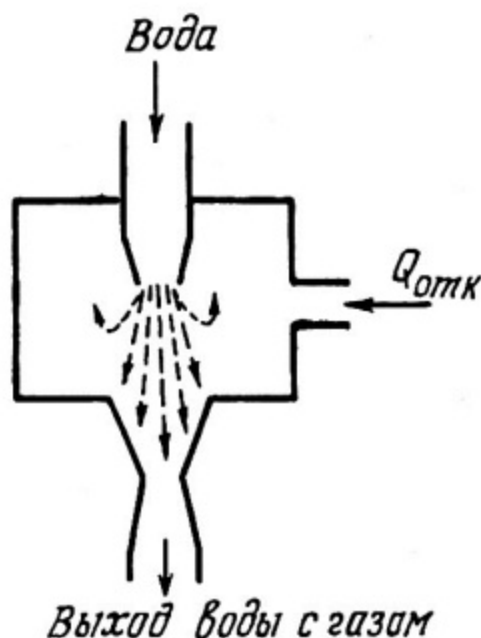


Рис. 23. Схема водоструйного насоса

Величина предельного давления, которое можно получить с помощью такого насоса, определяется давлением насыщенных паров воды при данной температуре и составляет примерно  $10^3$  Па. Скорость откачки такого насоса невелика.

Воздушный струйный насос устроен аналогично водоструйному. В качестве "рабочего тела" струи используется сухой очищенный воздух. Сверхзвуковая струя воздуха передает свой импульс окружающим молекулам откачиваемого газа в системе "сопло-диффузор", носящей название "сопло Вентури" (или "трубки Вентури"). Получаемая величина предельного давления  $10^4$  Па.

Следует отметить, что в обоих рассмотренных типах насосов важным параметром является потребление воды или воздуха в единицу времени.

Пароструйные насосы в свою очередь подразделяются на эжекторные и диффузионные.

Конструкция эжекторного пароструйного насоса весьма похожа на конструкции водоструйного и воздушного струйного насосов.

Лучшие результаты по сжатию откачиваемого газа были достигнуты для так называемого сопла Лавалья (рис. 24). Конструкция сопла оптимизируется, исходя из желания получить максимальное понижение парциального давления откачиваемого газа вблизи струи и минимальную толщину пограничного слоя  $\delta_{2p}$ .

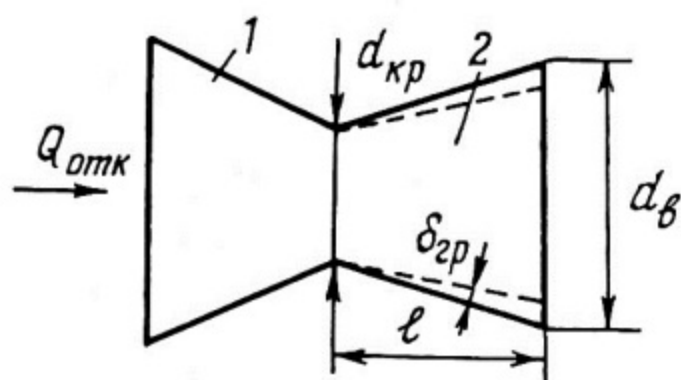


Рис. 24. Схема сопла Лавалья, применяемого в пароструйных эжекторных насосах:

- 1 — конфузор (дозвуковая часть); 2 — диффузор (сверхзвуковая часть)

На рис. 25. и 26 приведены результаты исследований сопла Лавалья с этих точек зрения. На пологом участке зависимости рис. 25 давление газа не зависит от величины потока. Повышение давления газа при параметре  $l/d_{ср} < 0,8$  связано с тем, что часть струй пара разворачивается на углы большие, чем  $90^\circ$ . При увеличении параметра  $l/d_{ср} > 5$  начинает увеличиваться толщина граничного слоя  $\delta_{2p}$ . Распределение давлений пара и откачиваемого газа в эжекторном пароструйном насосе показано на рис. 27. В зазоре между выходом эжектора и конфузором создается разрежение  $P_\infty$  за счет преобразования потенциальной энергии струи в кинетическую. В зазоре происходит захват откачиваемого газа струей, и затем струя с газом направляется в сопло Лавалья, где она тормозится, сжимая газ вплоть до атмосферного давления, при котором происходит выброс пара и газа из насоса (пунктирная линия на рис. 27).

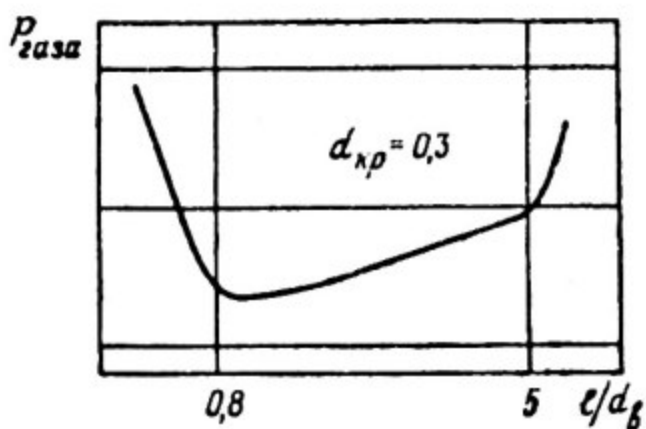


Рис. 25. Зависимость величины давления газа перед соплом от геометрических параметров сопла

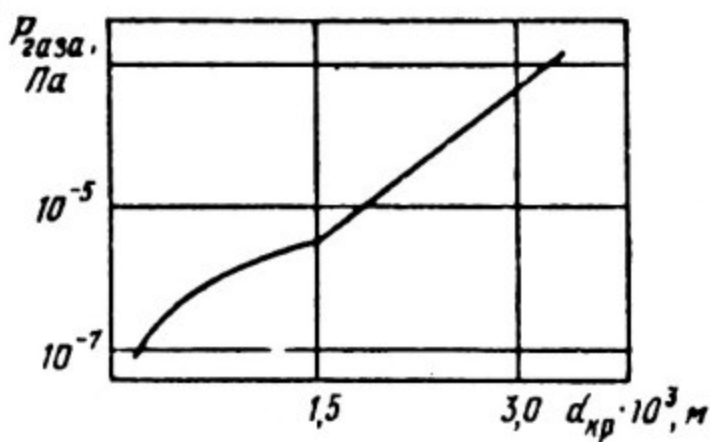


Рис. 26. Зависимость величины давления газа перед соплом от параметра  $d_{\text{кр}}$

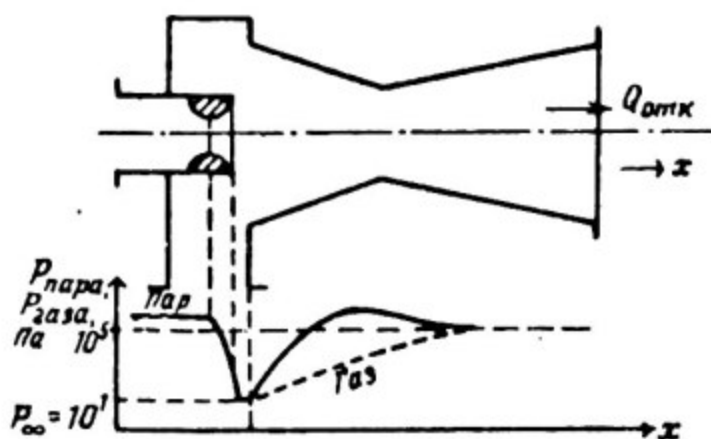


Рис. 27. Распределение давлений газа и пара вдоль оси эжекторного насоса [2, с. 219]

Скорость истечения пара из эжектора больше скорости звука в "число Маха" и поэтому пар не уходит перпендикулярно струе. Для обеспечения очень больших скоростей откачки при величине предельного давления около 60 Па эжекторные насосы делают двухступенчатыми.

Эжекторные насосы обычно используются в качестве выпускной ступени диффузионных насосов, то есть в качестве промежуточных (бустерных) между ним и вспомогательным форвакуумным насосом.

В эжекторных насосах струя пара, генерируемого в специальном испарителе, имеет большую плотность и высокую скорость движения, это означает, что насос работает при сравнительно высоких давлениях. Считают, что эжекторный насос работает в области так называемого промежуточного давления (больше  $10^{-4}$  Па), где диффузионные и механические насосы имеют незначительные скорости откачки.

В отличие от эжекторных пароструйных насосов диффузионные насосы работают при пониженных давлениях струй на впускной стороне насоса, что необходимо для обеспечения диффузионного захвата молекул откачиваемого газа.

В основу конструкции диффузионного пароструйного насоса положено явление переноса частиц одного газа по отношению к частицам другого или того же самого газа, называемое газовой диффузией. Любой газ или смесь газов в результате хаотического теплового движения молекул стремится к равномерному распределению молекул в объеме или к выравниванию молекулярных концентраций  $n$ .

В молекулярном режиме скорость диффузии зависит от скорости теплового движения молекул. Если давление повышается и режим из молекулярного переходит в вязкостный, то скорость диффузии будет зависеть еще и от длины свободного пробега молекул.

Коэффициент пропорциональности между градиентом концентрации, вызывающим движение молекул, и скоростью этого движения называется коэффициентом диффузии  $D$  :

$$\frac{dn}{dt} = -D \frac{dn}{dx} .$$

Величина коэффициента диффузии определяется многими обстоятельствами. Качественно зависимость коэффициента диффузии от условий рассмотрения выглядит следующим образом:

$$D \approx \frac{T^{3/2}}{d_0^2 \rho \sqrt{M}} ,$$

где  $T$  — температура среды;  $d_0$  — размер молекул;  $M$  — масса молекул;  $\rho$  — давление.

Таким образом, если мы имеем молекулярный режим, то перемещение молекул в направлении к струе в струйных насосах происходит под действием возникающего градиента концентраций откачиваемого газа. В случае, если плотность струи мала, молекулы газа могут диффундировать в саму струю и затем в результате молекулярных столкновений с молекулами пара получать дополнительный импульс движения в направлении откачки.

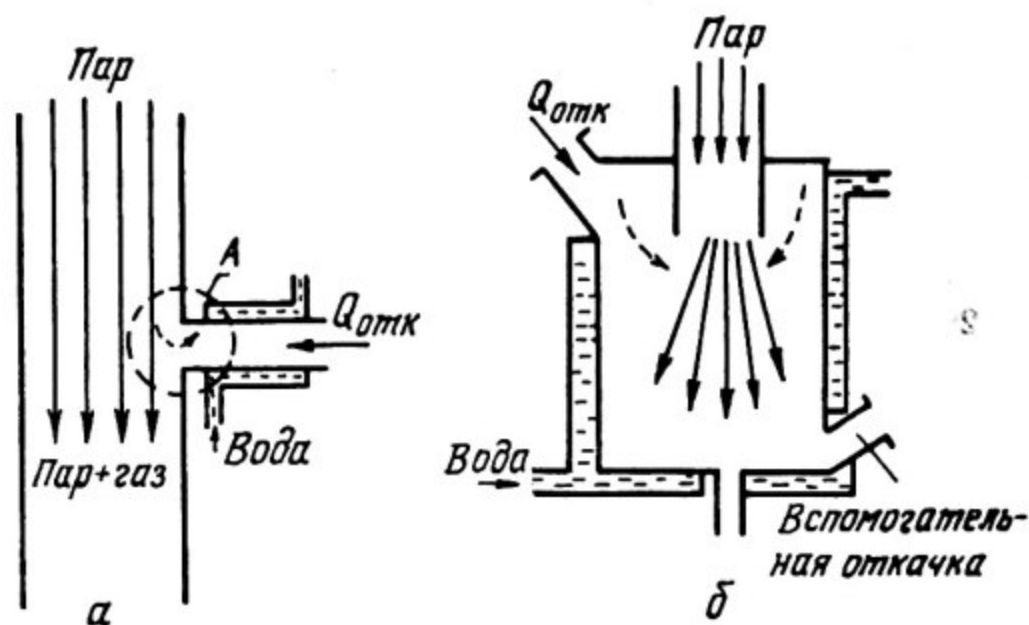


Рис. 28. Схемы первых диффузионных пароструйных насосов

Схемы диффузионных пароструйных насосов были предложены почти одновременно Геде и Ленгмюром (1915—1916 гг.). Насос Ленгмюра (рис. 28, б) отличается от насоса Геде (рис. 28, а) тем, что направления потока откачки и движения струй в нем совпадают. Это позволяет избежать возникновения турбулентных завихрений в зоне А (см. рис. 28, а), характерных для насоса Геде. В обеих конструкциях предусмотрены охлаждаемые водой холодильники для конденсации рабочего пара. Конденсированное рабочее вещество в этих насосах может быть использовано вновь и вновь при неоднократном прохождении его через испаритель.

На рис. 29 изображена схема современного диффузионного насоса, позволяющая рассмотреть основные принципы его работы. Насосы этого типа оборудуются тарельчатыми соплами, позволяющими развернуть струи пара в направлении, совпадающем с направлением откачки.

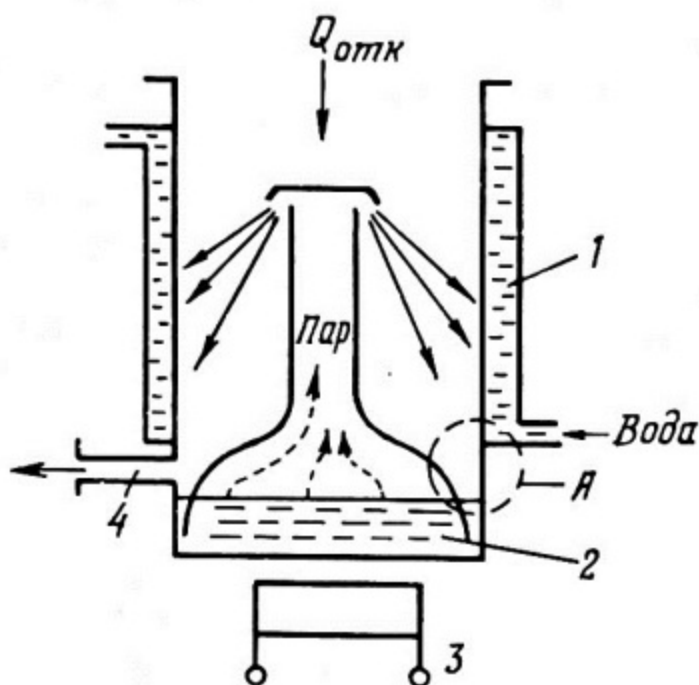


Рис. 29. Схема современного диффузионного пароструйного насоса:

- 1 — холодильник; 2 — рабочая жидкость; 3 — нагреватель; 4 — вспомогательная откачка

В этом сопле происходит преобразование потенциальной энергии давления пара в кинетическую. Струя в таком насосе представляет собой кольцевой усеченный конус, образованный постоянным потоком рабочей жидкости.

Молекулы откачиваемого газа диффундируют в струю и получают дополнительный импульс движения в направлении откачки. Концентрация молекул газа в струе мала. Часть молекул газа, подходя к струе, не может диффундировать в нее и отбрасывается обратно. Это обстоятельство учитывается коэффициентом прилипания, или коэффициентом  $\chi_0$ . Обычно этот коэффициент составляет  $0,3 \div 0,7$ .

Теория работы диффузионного пароструйного насоса рассмотрена в работе [2, с. 226—230]. Несложные расчеты позволяют получить выражение для коэффициента сжатия:

$$K_{сж} = \frac{P_{\text{вып}}}{P_{\text{вл}}} = \exp \left\{ c(L, v_n, P_n) \left[ \frac{\sqrt{MM_n} (d+d_n)^2}{\sqrt{M+M_n}} \right] \right\},$$

где  $C$  — постоянный коэффициент, зависящий от геометрических параметров конструкции и условий формирования струи;  $L$  — длина насоса;  $v_n$  — скорость струи;  $P_n$  — плотность струи или давление пара в струе;  $M$  и  $M_n$  — массы молекул газа и пара;  $d$  и  $d_n$  — размеры молекул газа и пара.

В совершенных насосах величина коэффициента сжатия достигает  $10^6$ .

Величина полного предельного давления, получаемого в насосе определяется суммой:

$$P_{\infty} = P_{\infty r} + P_n,$$

где  $P_{\infty r}$  — предельное давление откачиваемого газа;  $P_n$  — давление насыщенных паров рабочей жидкости.

Давление насыщенных паров рабочей жидкости зависит от выбора рабочей жидкости и от температуры холодильника насоса. Обычно в диффузионных насосах обеспечивается условие:

$$P_n \ll P_{\infty r}.$$

Откачиваемый газ, растворяясь в конденсированной рабочей жидкости, может вновь попадать в район сопла и увеличивать получаемое в системе предельное давление  $P_{\infty r}$ . Чтобы избежать этого растворения, рабочая жидкость, стекая в испаритель, проходит участок стенки насоса (зона А) на выпускной его стороне, свободный от холодильника и нагретый практически до температуры нагревателя. Рабочая жидкость при этом обезгаживается.

Условия контакта струй пара рабочей жидкости со стенкой насоса весьма сложны. Давление захваченного газа по мере приближения к стенке растет за счет эффекта сжатия газа паром. При этом возле стенки возникает пограничный слой, высота которого сильно влияет на величину обратного потока откачиваемого газа и, следовательно, на коэффициент сжатия насоса. Высота пограничного слоя в основном зависит от конструкции сопла насоса и от мощности подогревателя, которые влияют на величину скорости струй пара  $v_n$ .

С точки зрения уменьшения обратного потока через пограничный слой, следует увеличивать  $v_n$ , однако в результате излишнего увеличения  $v_n$  может уменьшиться коэффициент прилипания и произойти рассеивание струй пара при выходе из сопла, что приведет к забросу рабочей жидкости в откачиваемую систему. В случае недостаточной скорости  $v_n$  возникает сильная зависимость между величинами впускного и выпускного давлений (рис. 30). Выпускное давление, при котором происходит

излом зависимости  $P_{вп} = F(P_{вып})$ , называется давлением срыва струи  $P_{ср}$ . При увеличении  $P_{вып}$  больше, чем  $P_{ср}$ , струи пара начинают отрываться от стенки насоса, что приводит к увеличению высоты пограничного слоя.

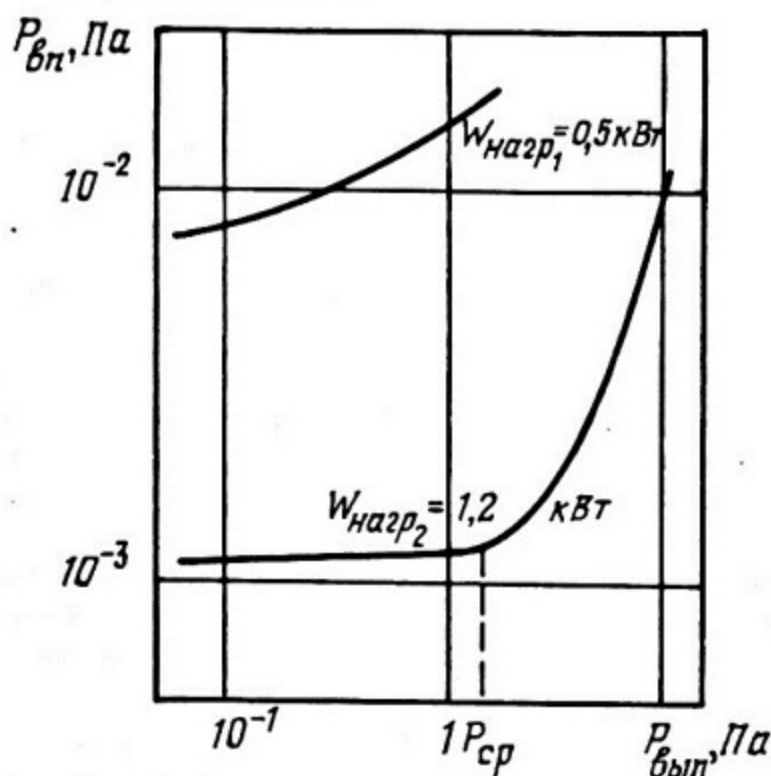


Рис. 30. Зависимость величины впускного давления диффузионного насоса от величины выпускного давления при различной мощности нагревателя

Скорость откачки  $S_0$  диффузионного насоса зависит от характера взаимодействия откачиваемого газа и струй пара. Если бы скорость струй была бы бесконечно большой, а струи не имели бы турбулентных завихрений, то конус, образованный выбрасываемым из сопла паром представлял бы собой как бы отверстие, ведущее в идеальный вакуум [2, с. 233]. При этом скорость откачки была бы равна проводимости этого отверстия:

$$S_0 = \frac{1}{4} \bar{v} A_0,$$

где  $\bar{v}$  — тепловая скорость молекул газа;  $A_0$  — площадь верхней части усеченного конуса, образованного струями.

Так как скорость пара ограничена и имеет конкретную величину  $v_n$ , то и молекулы газа, попавшие в струю, будут удаляться с той же скоростью. Образуется поток откачки  $Q$ :

$$Q = \frac{d(\rho V)}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \rho A_0 \frac{dx}{dt} = \rho A_0 v_n$$

(где  $V$  — объем удаляемого газа), тогда

$$S_0 = \frac{Q}{p} = v_n A_0.$$

При этом эффективная скорость откачки насоса

$$S_{эф} = \frac{S_0 C_0}{C_0 + S_0} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\bar{v} v_n \rho A_0}{\frac{1}{4} \bar{v} + \rho v_n}.$$

Коэффициент  $\chi_0$ , который представляет собой коэффициент эффективности захвата газа в режиме откачки, может быть записан как:

$$\chi_0 = \frac{S_0}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{\bar{v}}{v_n}}.$$

Отсюда следует, что эффективность работы насоса зависит и от рода откачиваемого газа и от параметров насоса. Скорость откачки диффузионного насоса зависит от рода откачиваемого газа. Можно записать, что скорость откачки любого  $i$ -го газа

$$S_i = k_i S_{\text{воздуха}},$$

где  $k_i$  — коэффициент, значения которого для некоторых газов приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Газ	$H_2$	He	$\frac{Ar}{H_2O}$	Ne	Воздух, $N_2, CO$	$O_2$	$CO_2$
$k_i$	1,8	1,6	1,2	1,1	1	0,95	0,85

При конструировании любого насоса всегда стоит задача максимального расширения диапазона его рабочих давлений. В случае диффузионных насосов эта задача может быть решена созданием многоступенчатого насоса или объединением нескольких насосов в одном корпусе. При этом общий коэффициент компрессии

$$K = \prod_{i=1}^n k_i,$$

где  $K_i$  — коэффициент компрессии  $i$ -й ступени. Все ступени в таком насосе включены последовательно, имеют общий испаритель, но отдельные паропроводы и разные сопла (рис. 31, а).

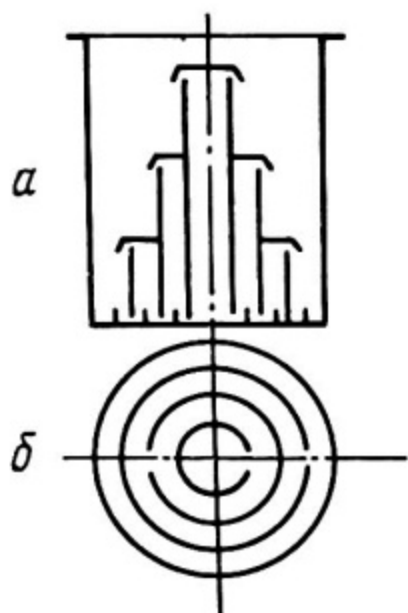


Рис. 31. Схема устройства многоступенчатого фракционирующего диффузионного пароструйного насоса:

а — паропроводы; б — лабиринт для обеспечения фракционирования масла на дне корпуса насоса (в кипятильнике)

Из условия неразрывности потока откачки следует:

$$Q_{отк} = S_0 \rho_0 = S_1 \rho_1 = S_2 \rho_2 = S_3 \rho_3 = \dots$$

Это означает, что для каждой последующей ступени относительно впускного конца можно уменьшать скорость откачки. В диффузионных насосах это достигается за счет уменьшения площади струи ( $S_0$ ) и увеличения ее плотности, т.е. можно еще больше повысить выпускное давление или общий коэффициент компрессии.

Диффузионные пароструйные насосы такого типа называются насосами разгонного (или фракционирующего) типа. У них на дно кипятильника установлен лабиринт (рис. 31, б), по которому проходит масло, стекающее по стенкам насоса в нагреватель. При такой конструкции легкокипящие компоненты диффузионного масла будут вскипать быстрее и пары этой фракции попадут в нижнее сопло; по мере продвижения масла по лабиринту будут выкипать все более и более труднокипящие

фракции масла и, наконец, в верхнее сопло попадут только те фракции, у которых величина давления насыщенных паров минимальна и значительно меньше величины предельного давления, определяемого общим коэффициентом компрессии.

### Основные характеристики диффузионных насосов

Основной характеристикой любого насоса является зависимость величины скорости откачки от величины рабочего или впускного давления. Для многоступенчатого диффузионного пароструйного насоса типичная характеристика приведена на рис. 32.

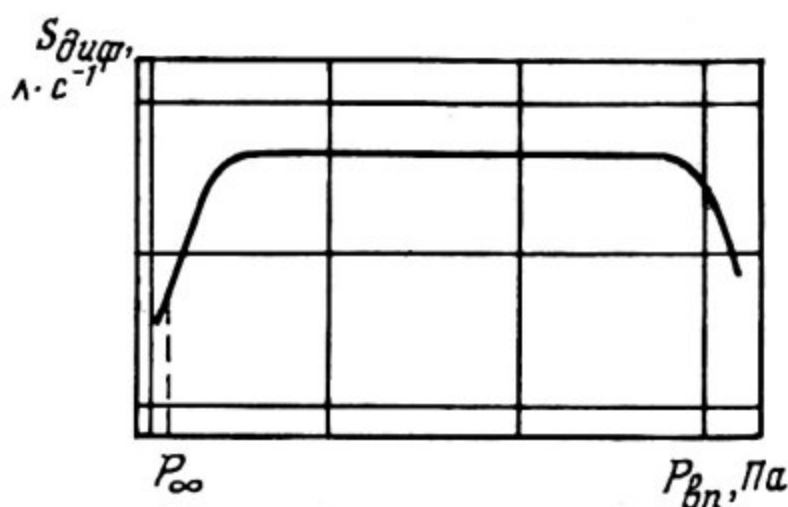


Рис. 32. Зависимость скорости откачки диффузионного насоса от впускного давления

Снижение скорости откачки при уменьшении давления связано с тем, что при этом увеличивается относительная доля обратных паразитных потоков и уменьшается величина градиента молекулярной концентрации откачиваемого газа. Снижение скорости откачки при увеличении давления происходит из-за увеличения абсолютной величины обратного потока, которое происходит из-за увеличивающейся толщины "граничного слоя". Это увеличение происходит вплоть до того момента, когда можно говорить о так называемом "срыве струи" (см. рис. 30). При этом струи пара оторвутся от стенки насоса и давления на входе и выходе насоса сравняются. Следовательно, для диффузионных насосов важным параметром является величина максимального выпускного давления:  $P_{\text{вып. макс}} < P_{\text{ср}}$ . Это давление обеспечи-

вается вспомогательным насосом, который часто называют форвакуумным.

Для диффузионного пароструйного насоса важным параметром является мощность нагревателя.

При уменьшении мощности нагревателя величина предельного давления уменьшается, что, в первую очередь, связано с уменьшением явления крекинга масла по фракциям. Однако при этом уменьшается и величина  $P_{\text{вып. макс}}$  из-за уменьшения плотности струи и, следовательно, увеличения обратной диффузии молекул откачиваемого газа через струю. Скорость откачки также уменьшается из-за уменьшения скорости струи  $v_{\text{п}}$ .

При увеличении мощности нагревателя предельное давление увеличивается из-за увеличения крекинга масла, плотность струи растет, что приводит к увеличению величины  $P_{\text{вып. макс}}$  и к уменьшению скорости откачки из-за уменьшения коэффициента  $\chi_0$ .

На рис. 33 приведены зависимости основных параметров насоса от величины мощности нагревателя. Для любого насоса существует некая пороговая величина мощности нагревателя  $W_{\text{нагр. пор}}$ , ниже которой насос работать не может, так как энергия, поступающая из нагревателя, меньше энергии парообразования рабочей жидкости.

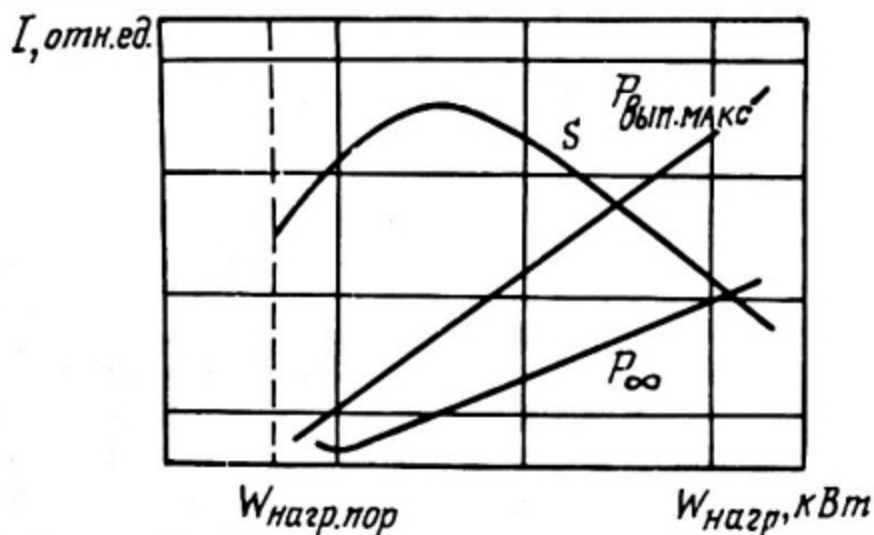


Рис. 33. Зависимость основных параметров диффузионного насоса от мощности нагревателя

С точки зрения откачки разных газов диффузионный насос обладает явно выраженной селективностью. От молекулярной массы газа зависят: величина тепловой скорости молекул газа, коэффициент взаимной диффузии газа в струю пара и коэффициент  $\chi_0$  конкретного насоса.

Для определенных режимов работы диффузионного насоса можно записать:

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  скорости откачки газов с молекулярным весом  $M_1$  и  $M_2$ , соответственно.

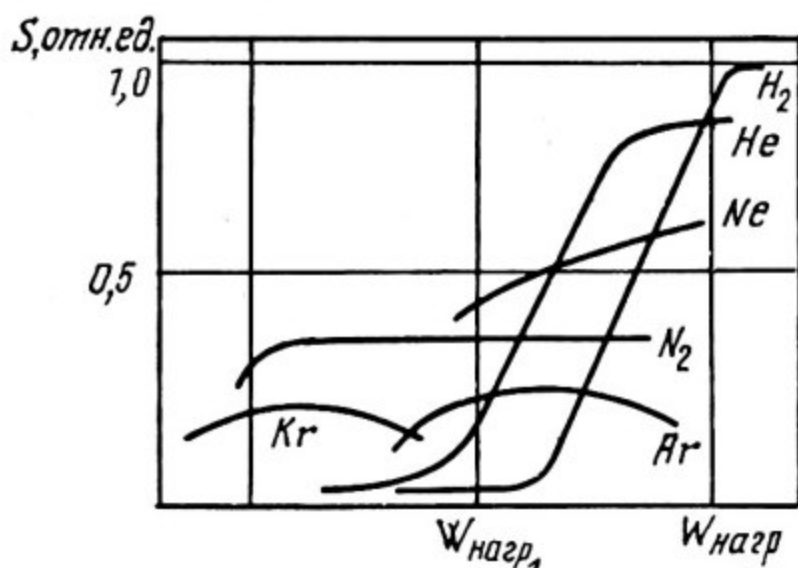


Рис. 34. Зависимость величины скорости откачки диффузионного насоса от мощности нагревателя для разных газов

Это соотношение аналогично соотношению для пропускных способностей. Однако для диффузионного насоса оно не всегда выполняется. Здесь следует учитывать величину мощности нагревателя, так как коэффициент компрессии диффузионного насоса зависит от параметров  $v_n$  и  $p_n$  (давление пара), определяемых мощностью подогревателя. На рис. 34 изображены зависимости величины скорости откачки диффузионного насоса от мощности нагревателя. Можно видеть, что при значении мощности нагревателя  $W_{нагр.1}$  азот откачивается с максимальной скоростью, а водород при этом практически не откачивается, так как он легко диффундирует через струю в обе стороны. Таким образом, при увеличении мощности нагревателя или увеличении плотности струи действительно получается соотношение  $S_1/S_2 = \sqrt{M_2/M_1}$ , однако для разных газов для его выполнения необходимо иметь разную мощность нагревателя.

Это обстоятельство означает, что для откачки с максимальной эффективностью разных газов мы должны настраивать или

выбирать определенный режим работы конкретного диффузионного насоса.

### Достоинства и недостатки диффузионных насосов

К достоинствам диффузионных насосов относятся:

- большой коэффициент компрессии или возможность получения высокого вакуума;
- простота конструкции, отсутствие движущихся механических частей и, следовательно, отсутствие изнашивания;
- уменьшение величины предельного давления при длительной работе за счет того, что происходит откачка легкокипящих фракций масла;
- возможность получения широкого диапазона скоростей откачки при пропорциональном изменении геометрических размеров конструкции ( $S$  от 1 до  $2 \cdot 10^5$  л·с<sup>-1</sup>).

К недостаткам диффузионных насосов, кроме селективной откачки разных газов, следует отнести то, что в спектре остаточных газов в откачиваемой вакуумной системе широко представлены углеводородные соединения с общей формулой  $C_nH_m$ , где  $n$  и  $m$  — целые числа от 1 до 20 и с молекулярными массами от единицы до 250. В современных электрофизических установках и других вакуумных системах наличие углеводородных соединений чаще всего недопустимо и поэтому для улавливания обратного миграционного потока паров масла в направлении откачиваемой вакуумной системы (обычная величина потока  $3 \cdot 10^{-6}$  г·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>) необходимо устанавливать различные ловушки, снижающие величину эффективной скорости откачки.

Величина получаемого в вакуумной системе предельного давления определяется суммой парциальных давлений остаточных газов и давления насыщенных паров рабочей жидкости диффузионного насоса, проникающих из насоса в откачиваемый объем.

Следовательно, для снижения величины предельного давления необходимо уменьшить величину потока паров рабочей жидкости, попадающего в откачиваемый объем. Для этой цели в вакуумной технике используются ловушки различного типа [3, с. 166].

Ловушки различаются по физическому принципу улавливания паров рабочей жидкости и могут:

- конденсировать эти пары;
- адсорбировать их на своих поверхностях;

- связывать молекулы пара химически;
- полимеризовать их в твердые соединения;
- разлагать в атомарное состояние вплоть до атомарных углерода и водорода и т.д.

В настоящее время широко используются охлаждаемые конденсационные ловушки. Это связано в первую очередь с тем, что давление паров сильно зависит от температуры пара. В таблице 5 приведены значения давлений насыщенных паров ртути и вакуумного масла при различных температурах. Для придания молекулам пара нужной температуры на пути мигрирующего в откачиваемую систему потока паров рабочей жидкости устанавливают специальные устройства, называемые вымораживающими ловушками. Эти ловушки должны обладать большой пропускной способностью, чтобы не слишком снижать величину эффективной скорости откачки, должны быть "оптически плотными", чтобы каждая молекула пара смогла удариться о поверхность ловушки, и, наконец, они должны обеспечивать эффективное охлаждение с помощью выбранного хладагента [4, с. 130]. В таблице 6 приведены температуры различных используемых в вакуумной технике хладагентов.

Т а б л и ц а 5

Давление пара, Па	Температура, К				
	293	273	195	87	77
Ртуть	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-8}$	$10^{-25}$	$10^{-27}$
Масло	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-13}$	$10^{-15}$

Т а б л и ц а 6

Температура, К					
воды	твердого CO <sub>2</sub>	жидких			
		O <sub>2</sub>	воздуха	N <sub>2</sub>	He
273	195	90	87	77	4

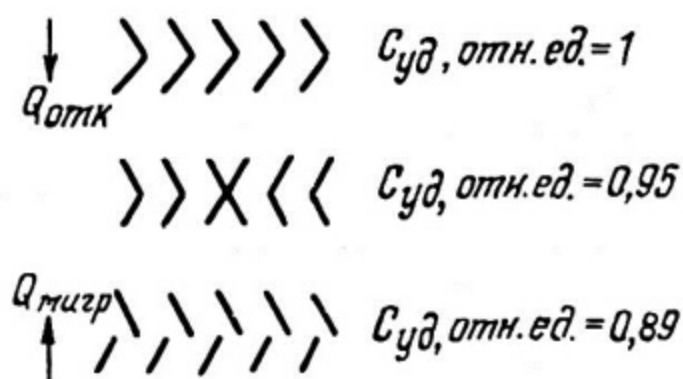


Рис. 35. Различные типы вымораживающих ловушек диффузионных насосов

В диффузионных насосах наибольшее распространение получили ловушки так называемого шевронного типа (рис. 35). Они отличаются не только конструктивно, но и по величине удельной пропускной способности  $C_{уд}$ , имеющей размерность: л · с · м<sup>-2</sup>. Установка ловушки шевронного типа на 30—40% снижает величину эффективной скорости откачки вакуумной системы.

Для ликвидации миграционного потока паров масла из механических масляных насосов (обычная величина потока  $1,4 \times 10^{-4}$  г · с<sup>-1</sup> · м<sup>-2</sup>) чаще всего применяются сорбционные ловушки, в которых происходит адсорбция паров масла на сильно развитых поверхностях различных сорбентов при комнатной температуре. В качестве сорбента в настоящее время используется смесь, состоящая из активированного угля, окиси алюминия и силикагеля, что обеспечивает надежное и длительное улавливание паров масла и улучшает состав остаточных газов механического насоса [10, с. 146].

Результат действия различных улавливающих систем можно проиллюстрировать таблицей 7.

Т а б л и ц а 7

Параметр	Без ловушки	С ловушкой		
		шеvronной, охлаждение водой	шеvronной, охлаждение жидким N <sub>2</sub>	термосорбционной, ионной
Величина потока пара масла ВМ-1, г · с <sup>-1</sup> · м <sup>-2</sup>	$3 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-11}$

## Рабочие жидкости для высоковакуумных и сверхвысокововакуумных диффузионных пароструйных насосов

Характеристики высоковакуумных пароструйных насосов существенно зависят от свойств рабочей жидкости. Основными требованиями, предъявляемыми к рабочим жидкостям для высоковакуумных насосов являются [10, с. 154]:

1) низкая упругость пара (давление насыщенных паров) при комнатной температуре. Повышенная упругость пара масла может вызвать ухудшение предельного давления в откачиваемом объеме;

2) высокая упругость пара при рабочей температуре в кипятыльнике, способствующая повышению максимального выпускного давления насоса благодаря увеличенной плотности паровой струи;

3) узкий фракционный состав. Неоднородность состава жидкости может привести к прониканию в откачиваемый объем легкокипящих фракций и тем самым к повышению остаточного давления в нем, к изменению характеристик насоса;

4) термическая стабильность при рабочей температуре в кипятыльнике насоса. При термическом разложении рабочей жидкости в кипятыльнике ухудшаются вакуумные характеристики насоса;

5) термоокислительная стабильность. Это требование особенно важно в случаях, когда в насос может прорваться воздух при атмосферном давлении и вступить в контакт с кипящим маслом;

6) подвижность при температуре стенки насоса, обеспечивающая стекание конденсированного пара в кипятыльник. При повышенной вязкости рабочей жидкости может нарушаться циркуляция последней в насосе;

7) малая способность к газопоглощению. Способность рабочей жидкости поглощать газы приводит к ухудшению предельного вакуума в откачиваемом объеме.

В современной вакуумной технике рабочими жидкостями для высоковакуумных насосов являются минеральные масла, эфирные и кремнийорганические вещества, называемые синтетическими маслами.

Минеральные масла получают вакуумной дистилляцией нефтяных продуктов. Это неоднородные по составу жидкости, состоящие из смеси углеводородов различного химического состава и молекулярного веса со средней упругостью пара  $10^{-6} \div 10^{-9}$  Па.

Нужно отметить, что не каждая нефть может удовлетворить одновременно всем семи вышеперечисленным условиям. Собственно именно поэтому поиск исследователей был направлен на создание искусственных масел.

Масла ВМ—1 и ВМ—2 представляют собой дистилляты медицинского вазелинового масла, получаемые однократной высковакуумной дистилляцией [7, с. 42]. Упругость паров этих масел составляет  $10^{-7}$  Па, предельное давление, получаемое на этом масле —  $10^{-5}$  Па.

Масло ВМ—5 получают двухкратной возгонкой медицинского вазелинового масла, благодаря чему в сравнении с маслом ВМ—1 оно обладает более однородным фракционным составом и повышенной термической стойкостью. Упругость паров —  $10^{-7}$  Па, предельное давление, получаемое без вымораживающих ловушек —  $10^{-6}$  Па. Время достижения предельного давления с маслом ВМ—5 в 1,5—2 раза меньше, чем с маслом ВМ—1.

Кремнийорганические жидкости — соединения, молекулы которых состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода с присоединенными углеводородными радикалами по свободным связям кремния. Даже после длительной работы в насосах при периодическом попадании атмосферного воздуха кремнийорганические жидкости не образуют смолистых налетов на внутренних деталях насосов.

Масла ПЭС—В—1 и ПЭС—В—2 представляют собой узкие фракции полиэтилсилоксановой жидкости, получаемые путем синтеза. Они обладают очень высокой термоокислительной стабильностью.

Масло ПФМС—2/5л — узкая фракция синтезированной полифенилметилсилоксановой жидкости. Обладает еще более высокой термоокислительной стойкостью, чем ПЭС—В—2. К свободным связям кремния в цепочке присоединяется метил  $\text{CH}_3$  или бензольные кольца. По другим параметрам это масло не лучше масла ВМ—5.

В нашей стране выпускаются два вида сверхвысковакуумных масел: ФМ—1 и 5Ф4Э. Масло ФМ—1 является практически чистым триметилпентафенилтрисилоксаном, полученным возгонкой продукта синтеза. По воздухостойкости превосходит масло ПФМС—2/5л. Упругость паров —  $10^{-8}$  Па, получаемое предельное давление без вымораживающей ловушки  $5 \cdot 10^{-7}$  Па. Масло 5Ф4Э — синтезированный пентафениловый эфир, обладает меньшей способностью к миграции в откачиваемый объем по сравнению с маслом ФМ—1. Упругость его паров —  $10^{-9}$  Па, получаемое

предельное давление —  $5 \cdot 10^{-7}$  Па. Время достижения предельного давления в 2—3 раза меньше, чем с маслом ВМ—5.

Стабильность рабочих жидкостей определяется при сравнении суммарных парциальных давлений углеводородов в спектре остаточных газов. Спектральный состав минеральных масел достаточно широк и содержит составляющие от 12 до 250 а.е.м., для синтетических масел этот диапазон существенно уже и смещен в сторону тяжелых масс — от 100 до 150 а.е.м.

Достоинства диффузионных пароструйных насосов весьма существенны и следует ожидать, что в случае изобретения новой рабочей жидкости, оптимально удовлетворяющей всем поставленным условиям, имеющей очень узкий фракционный состав и собственный масс-спектр, а также минимальную миграционную способность, эти насосы будут широко использоваться в современной технике.

#### Совместная работа механического и диффузионного насосов

Параметры вспомогательного насоса, соответствующего данному диффузионному насосу, определяются исходя из уравнения неразрывности потока откачки [2, с. 262]:

$$Q_{отк} = p_{всп} S_{всп} = p_{диф} S_{диф},$$

где  $p_{всп}$  — давление на входе вспомогательного насоса или давление на выпускной стороне диффузионного насоса,  $p_{диф}$  — впускное давление диффузионного насоса.

Для надежной работы необходимо выполнение неравенства:

$$p_{всп} \cdot S_{всп} \geq p_{диф} S_{диф}.$$

Так как и  $S_{всп}$  и  $S_{диф}$  являются функциями давления, то это неравенство должно выполняться даже в наиболее неблагоприятных условиях, а именно:

$$p_{всп.мин} S_{всп.мин} \geq p_{диф.макс} S_{диф.макс}.$$

На практике такого случая быть не может, так как при  $p_{диф.макс} S_{диф}$  не может быть велика или максимальна. Таким образом, скорость откачки вспомогательного насоса должна определяться из условия:

$$S_{всп.мин} \geq \frac{p_{диф.макс}}{p_{всп.мин}} S_{диф.макс}.$$

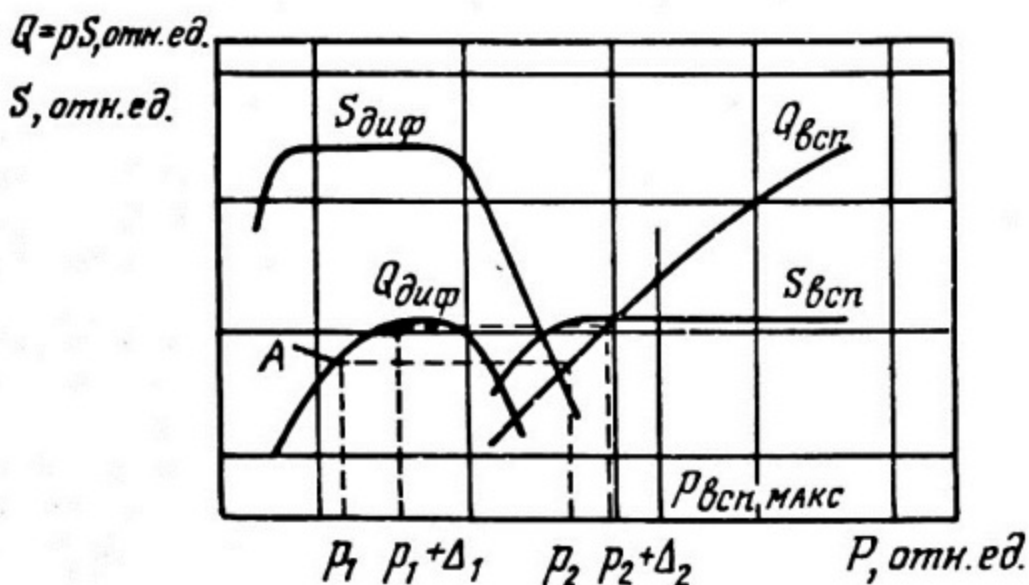


Рис. 36. Скорость откачки и производительность системы диффузионного и механического масляного насосов

На рис. 36 приведены характеристики скорости откачки вспомогательного и диффузионного насосов, а также построенные по этим характеристикам кривые производительности насосов или величин потока откачки. В этом случае принято говорить о конкретных режимах работы обоих насосов.

Пусть впускное давление диффузионного насоса равно  $p_1$ , этому давлению соответствует производительность диффузионного насоса в точке А. Не меньшую производительность должен иметь и вспомогательный насос, при этом величина его впускного давления должна быть меньше величины  $p_{\text{всп. макс}}$ . В рассматриваемом случае давление  $p_2 < p_{\text{всп. макс}}$ . Следующий этап проверки заключается в том, чтобы оценить: справится ли система двух насосов с внезапным увеличением давления на входе в диффузионный насос на величину  $\Delta_1$ ? Операция проверки производится аналогично вышеописанной и вновь можно убедиться, что давление  $p_2 + \Delta_2 < p_{\text{всп. макс}}$ . Это означает, что вспомогательный насос подобран верно и система двух насосов будет надежно работать.

Некоторые рабочие параметры современных диффузионных пароструйных насосов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Параметр	Тип насоса	
	Н-2Т-3	Н-5Т-3
Рабочий диапазон давлений, Па	$6,6 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-4}$	$10^{-7} - 6,6 \cdot 10^{-5}$
Скорость откачки по воздуху, л · с <sup>-1</sup>	1500	3000
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Максимальное выпускное давление, Па	40	40
Мощность нагревателя, кВт	1,7	2,2
Рабочая жидкость	ВМ-1	ВМ-1
Скорость откачки вспомогательного насоса, л · с <sup>-1</sup>	65	135

### СОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Все ранее рассмотренные насосы относятся к насосам так называемого объемного типа. Эти насосы характеризуются создаваемым в них потоком откачки с выбросом его в атмосферный воздух, то есть удалением из откачиваемого объема определенной доли молекул газов, которые находятся в свободном состоянии.

Сорбционные насосы в этом отношении существенно отличаются от насосов объемного действия. В них свободные газы переводятся в связанное состояние за счет различных физических эффектов и удерживаются в самом насосе определенное время, именуемое ресурсом работы насоса, поэтому они называются насосами поверхностного действия.

Газ называется связанным, если он удерживается на поверхности материала за счет различных сорбционных эффектов или содержится в этом материале в виде объемных включений. Различают три вида сорбции:

— адсорбция, или "прилипание" молекул к поверхности за счет действия молекулярных сил притяжения;

— абсорбция, или проникновение молекул внутрь материала.

При возникновении градиента концентрации молекул газа в тол-

ще материала и на его поверхности адсорбция переходит в абсорбцию [2, с. 149]. При увеличении температуры системы "молекула — стенка" абсорбция увеличивается, а адсорбция уменьшается. При понижении температуры адсорбция увеличивается, а абсорбция уменьшается;

— хемосорбция, или удержание молекул за счет так называемых сильных взаимодействий, например, химических-ковалентных и ионных. При контакте со стенкой молекулы газа, прежде чем хемосорбироваться, проходят стадию адсорбирования [5, с. 103].

У сорбции есть обратное явление — десорбция. При десорбции газы из связанного состояния вновь переходят в свободное и при этом в вакуумной системе повышается давление. Основной причиной десорбции является повышение температуры системы "молекула-стенка", что приводит к увеличению амплитуд колебаний молекул и кристаллической решетки стенки и, как результат, к разрыву молекулярных связей.

Основой явлений сорбции и десорбции являются силы и энергия взаимного притяжения между атомами и молекулами, зависящие от расстояния между ними.

Известны два вида взаимодействия частиц: слабые, проявляющиеся на больших расстояниях и определяющиеся дисперсионными силами Ван-дер Ваальса [5, с. 45], и сильные, возникающие на меньших расстояниях и определяющиеся, в основном, валентными силами.

Зависимость потенциальной энергии системы частиц  $E$  от расстояния между частицами  $x$  может быть записана в виде уравнения:

$$E(x) = \int_{x_0}^{\infty} F(x) dx,$$

где  $F$  — сила притяжения или отталкивания между частицами.

Эта зависимость изображена на рис. 37 [5, с. 118]. В принципе эта зависимость представляет собой кривую перехода от слабых (б) к сильным (а) взаимодействиям при сообщении системе частиц дополнительной энергии активации (в).

Удержание газа в связанном состоянии определяется глубиной потенциальных "ям" (а) и (б), в которых молекулы и атомы свободного газа и сорбента (материал, который сорбирует) находятся в равновесии. Молекула газа совершает колебания относительно положения равновесия с амплитудой, зависящей от ее "температуры" (кинетической энергии).

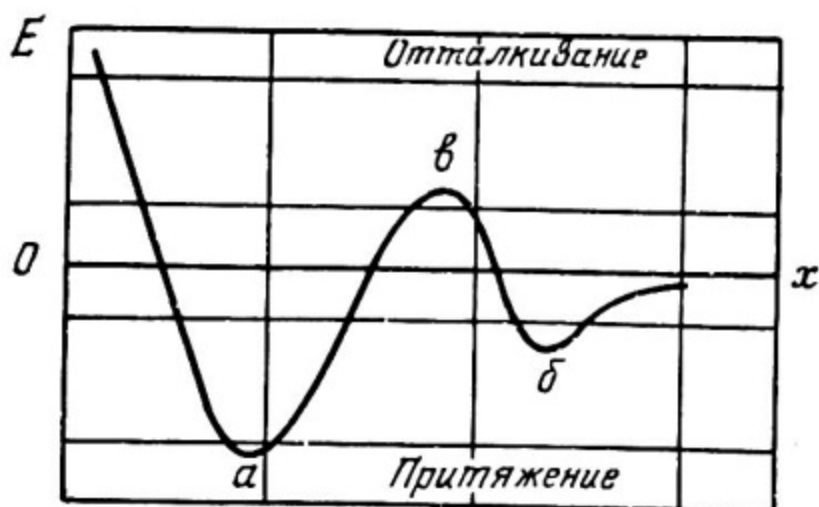


Рис. 37. Энергетика процессов сорбции

Потенциальная "яма" (б) соответствует явлению адсорбции, а потенциальная "яма" (а) — явлению хемосорбции. Нужно отметить, что кривая, приведенная на рис. 37, есть результат "механического" сложения двух зависимостей для двух электронных состояний системы "молекула—сорбент" [5, с. 122]. Вероятность адсорбции или хемосорбции определяется термодинамическим состоянием системы "молекула-сорбент". С точки зрения рассмотрения явления сорбции, между адсорбцией и хемосорбцией принципиального различия нет, различие заключается лишь в виде взаимодействия.

Все приведенные выше сведения по физике сорбционных явлений относятся к мономолекулярным слоям газов на поверхности сорбента.

Для откачки или перевода свободного газа в связанное состояние важно определить время пребывания молекулы газа на откачивающей поверхности  $\tau_{пр}$ :

$$\tau_{пр} = \tau_{пр0} \exp \left[ \frac{E_{акт}}{R_0 T_c} \right],$$

где  $\tau_{пр0}$  — период колебаний молекулы в потенциальной "яме", обычно порядка  $10^{-13}$  с;  $E_{акт}$  — энергия активации, направленная на возникновение десорбции;  $R_0$  — универсальная газовая постоянная ( $R_0 = kN_A$ );  $T_c$  — температура поверхности.

При создании сорбционного насоса необходимо заботиться об увеличении времени  $\tau_{пр}$ . Для этого можно осуществить ряд мер: во-первых, необходимо выбрать сорбенты, обеспечивающие большую энергию связей (например, такие, как титан и пористые материалы типа цеолита); во-вторых, необходимо понизить температуру поверхности сорбента, тем более, что сорбция — экзотермический процесс; в-третьих, необходимо предварительно активировать откачиваемый газ или увеличить его кинетическую энергию; в-четвертых, необходимо обеспечить условие мономолекулярности слоя откачиваемого газа на поверхности сорбента за счет генерации новых слоев сорбента поверх связанных газов (замуровывание).

Величина предельного давления, получаемого в сорбционном насосе, в первую очередь зависит от величины десорбции в нем или от времени пребывания молекулы газа на откачивающей поверхности, тем более, что откачиваемый газ не удаляется из объема, а находится внутри его в связанном состоянии.

Все сорбционные насосы можно разделить на четыре группы, отличающиеся механизмом перевода молекул в связанное состояние:

- криогенные конденсационные насосы, в которых величина  $\tau_{пр}$  увеличена за счет снижения температуры поверхности;
- цеолитовые насосы, в которых связывание молекул происходит сильно развитыми охлажденными поверхностями, реальный размер которых в  $10^3 - 10^5$  раз превышает "геометрический";
- сублимационные насосы, в которых для откачки используются чистые, непрерывно генерируемые, сильно сорбирующие поверхности;
- ионные насосы, в которых откачиваемый газ активируется ионизацией с последующим ускорением в электрических полях в направлении сорбирующей поверхности.

## КРИОГЕННЫЕ НАСОСЫ

Конденсационные криогенные насосы относятся к перспективным средствам получения вакуума. Криогенный насос — единственный тип насоса, позволяющий получать очень высокий вакуум и обеспечивать сверхчистые вакуумные условия при откачке с атмосферного давления. В конденсационных насосах газы откачиваются за счет конденсации на поверхностях, охлажденных до 2(0) К и ниже.

Задолго до появления конденсационных насосов в вакуумной технике для уменьшения величины предельного давления использовались ловушки, охлаждаемые жидким азотом, на поверхностях которых вымораживались пары масел, воды, двуокись углерода и т.д. Но использование вымораживания газов на поверхностях, охлаждаемых до температуры ниже температуры тройной точки, в качестве средства для откачки систем было предложено лишь в 1949 г. советскими учеными.

Конденсационная откачка основана на фазовом превращении вещества из газообразного в жидкое или твердое при вымораживании его на охлажденных поверхностях. Достижимая величина парциального давления какого-либо газа определяется давлением его насыщенных паров при температуре конденсирующей поверхности. В таблице 9 приведены температуры кипения  $T_{кип}$  широко применяемых криожидкостей, температуры тройных точек  $T_{тр}$  для ряда веществ, температуры  $T_L$ , при которых давления насыщенных паров определяются заданной величиной, и значения удельной скорости откачки  $S_0$  данного вещества конденсирующей поверхностью ("температура" откачиваемого газа 293 К) [12, с. 5].

Из таблицы видно, что для получения конденсационным способом давлений ниже  $10^{-5}$  Па по всем газам, кроме гелия, необходимо охладить конденсирующую поверхность до температуры жидкого гелия.

При охлаждении поверхности до температуры жидкого азота не будет наблюдаться эффект откачки основных газов.

Главной проблемой, которая существует в криогенной технике, является проблема удержания хладагента в жидком состоянии. В качестве хладагентов в вакуумной технике обычно используются жидкие азот и гелий. Причем жидкий азот, как наиболее дешевый, используется в качестве дополнительного теплоизолятора для систем, заполняемых жидким гелием.

Конструкция криогенного насоса чрезвычайно проста. Он представляет собой теплоизолированный объем со стенкой внутри, называемой криопанелью, которая охлаждается хладагентом и обращена к откачиваемой камере.

Процесс криогенной откачки можно рассмотреть на основе схемы, изображенной на рис. 38.  $N$  — количество молекул, падающих на поверхность криопанели с температурой  $T_L$ , охлаждаемой хладагентом с температурой  $T_x$ ;  $\eta$  — коэффициент прилипания — выражается отношением числа молекул, оставшихся на криопанели на неопределенно долгое время, к общему числу молекул  $N$ .

Таблица 9

Вещество	$T_{пл},$ K	$T_{тр},$ K	Температура насыщенных паров $T_L, K,$ при давлении $P_L, Па$								$S_0 \cdot 10^4,$ $л \cdot с^{-1} \cdot м^{-2}$
			$10^{-11}$	$10^{-9}$	$10^{-7}$	$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	$10^1$	$10^3$	
H <sub>2</sub> O	373	273,1	113	124	137	153	173	198	233	284	15
CO <sub>2</sub>	195	216,5	59	65	72	81	91	106	125	153	9
Метан CH <sub>4</sub>	111,5	190,6	24	27	30	34	40	48	59	78	16
O <sub>2</sub>	90	54,5	22	24	27	30	34	40	48	63	11
Ar	87,3	83,8	20	22	25	29	33	39	48	62	10
N <sub>2</sub>	77,4	63,2	18	20	22	25	29	34	42	54	12
Ne	27,1	24,5	5	6	7	8	9	11	14	18	14
H <sub>2</sub>	20,4	14,0	2,7	3	3,5	4	5	6	8	12	44
He	4,2	—	0,21	0,31	0,3	0,4	0,5	0,65	1	1,3	31

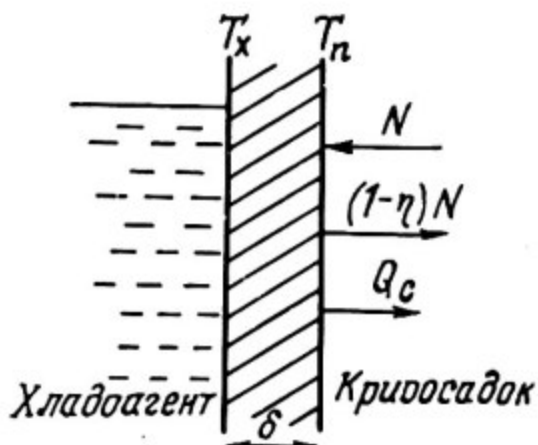


Рис. 38. Схема процесса криогенной откачки

Вплоть до состояния сверхвысокого вакуума скорость откачки криопанели прямо пропорциональна коэффициенту прилипания и корню квадратному из отношения температуры газа к его массе.

Кроме потока отраженных молекул, с криопанели существует и сублимационный поток (поток испаряемых молекул)  $Q_c$ , снижающий скорость откачки.

Полная скорость откачки криогенного насоса определяется площадью поверхности криопанели, поскольку это насос поверхностного действия.

Процесс откачки в криогенном насосе может быть разделен на два этапа. Первый этап определяется чистотой конденсирующей поверхности. Пока поверхность криопанели чистая, преобладает явление адсорбции, которое определяется коэффициентом прилипания. При увеличении толщины слоя конденсата наступает второй этап откачки — конденсация, определяемый коэффициентом конденсации, который практически является коэффициентом прилипания для явления самоадсорбции, т.е. когда молекулы газа конденсируются на криосадке (сконденсированный слой) того же газа.

Толщина слоя криосадка  $\delta$  определяет эффективность работы насоса и, в конечном счете, его ресурс. При увеличении толщины слоя криосадка уменьшается коэффициент конденсации, увеличивается температура на слое криосадка  $T_n$  и растут потери хладагента.

При откачке смеси газов криогенным конденсационным насосом с температурой криопанели  $T_n$ , большей температуры

тройной точки данного газа, может наблюдаться режим "криозахвата" — замуровывание неконденсируемых примесей в слой конденсата.

### Заливной конденсационный насос

На рис. 39 приведена схема заливного конденсационного насоса. Конструкция его достаточно проста. Жидкий гелий заливается в шаровидную полость в центре насоса. Шаровидная форма этой полости или криопанели обеспечивает изотропность пространства вокруг нее. Криопанель сделана из полированной меди, что увеличивает коэффициент отражения поверхности почти до единицы и тем самым уменьшает приток тепла и потери хладагента. Для уменьшения влияния теплового излучения стенок криопанель устанавливается в защитных экранах, охлаждаемых жидким азотом. Вспомогательный насос, обычно ТМН, применяется для предварительной откачки объема и для откачки неконденсирующихся газов, таких, как водород, гелий и т.д., которые без вспомогательного насоса будут накапливаться в системе.

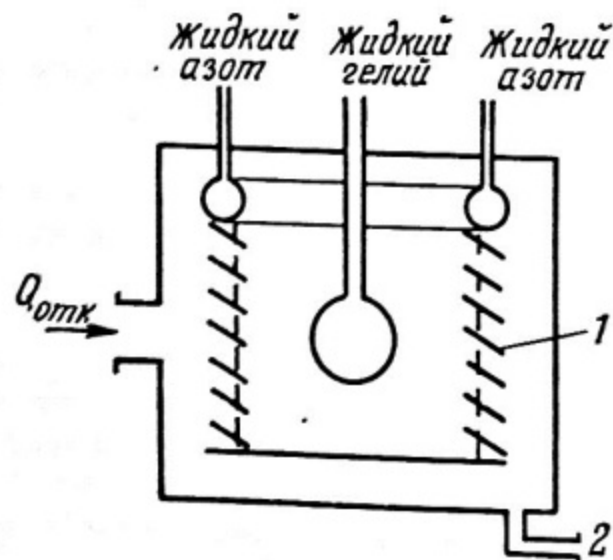


Рис. 39. Схема заливного конденсационного насоса:  
1 — жалюзийный экран; 2 — вспомогательный насос

В процессе работы на поверхности шара образуется слой конденсата, но обычно он тонкий и первое время не сказывается на общей эффективности работы насоса.

Все элементы крепления в таких насосах изготавливаются из материалов с низкой теплопроводностью, таких, как нержавеющая сталь или нейзильбер.

Давление паров азота при 20 К составляет  $10^{-9}$  Па, а предельное давление азота, получаемое в конденсационном насосе, составляет  $10^{-10}$  Па. Это обычная величина для криогенных насосов, определяемая механизмом криозахвата и возникновением сопутствующей откачки. Особенно характерна при этом адсорбционная откачка азота на конденсированных слоях воды и двуокиси углерода.

Скорость откачки конденсационных насосов может быть очень велика, так как определяется геометрическими размерами криопанели, каждый квадратный сантиметр площади которой может обеспечить скорость откачки до  $11 \cdot 6 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ . В случае применения азотного экрана примерно лишь треть молекул откачиваемого газа будет доходить до криопанели и это обстоятельство определяет эффективность насоса или коэффициент захвата в режим откачки. Но даже в случае применения экрана максимальная скорость откачки на его поверхности может составить величину  $3,8 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \text{ см}^2$ , что тоже очень много. Простота и большие значения скорости откачки определяют в первую очередь перспективность использования криогенных насосов.

В настоящее время созданы и испытаны заливные криогенные насосы с расходом жидкого гелия приблизительно  $10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  (при расходе жидкого азота несколько литров в сутки), имеющие скорости откачки до  $10^4 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ . Реально создание насоса со скоростью откачки  $10^5 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ .

### Проточный конденсационный насос

Основным недостатком заливных насосов является малый удельный теплосъем в условиях кипения криожидкости в большом объеме. Проточные конденсационные насосы не имеют этого недостатка. Для повышения эффективности насоса по теплоемкости хладагента в современной вакуумной технике часто вместо жидкого гелия применяют газообразный при температуре 20 К. Такая замена существенно снижает общую стоимость установки, представляющей собой комбинацию собственно криогенного насоса и ожижителя, или компрессора гелия.

В проточных конденсационных насосах отсутствуют условия кипения криожидкости, хладагент циркулирует по различным контурам холодильника. Наибольшее распространение по-

добные насосы получили в космических имитаторах т.е. при откачке камер очень больших размеров. Криопанели охлаждаются циркулирующим газообразным гелием при температуре 20 К, экраны — жидким азотом при температуре (77—100) К.

Т а б л и ц а 10

Параметр насоса	Род газа	Величина
Скорость откачки, л·с <sup>-1</sup>	N <sub>2</sub>	700
	H <sub>2</sub>	1000
	Ar	590
	H <sub>2</sub> O	2100
Предельное давление, Па		10 <sup>-7</sup>
Начальное давление, Па		13 ÷ 40
Расход хладагента, Па·л·с <sup>-1</sup>	жидк. N <sub>2</sub>	2,4·10 <sup>2</sup>
	He	6,7·10
Полная производительность насоса (емкость), Па·л	N <sub>2</sub>	4·10 <sup>7</sup>
	H <sub>2</sub>	2,5·10 <sup>5</sup>
Время включения в работу, с		5,4·10 <sup>3</sup>
Габаритные размеры, м: насоса компрессора		∅ 0,2 · В 0,54 Ш 0,4 · Д 0,6 · В 0,5
Вес насоса с компрессором, кг		75

В таблице 10 приводятся данные современного проточного конденсационного насоса типа *CRYO—И6*, выпускаемого фирмой *ULVAC CORP.* (Япония), достаточно наглядно демонстрирующие основные характеристики подобных насосов.

Схема устройства насоса *CRYO—И6* и зависимость скорости откачки от величины рабочего давления приведены на рис. 40. При увеличении давления скорость откачки криогенных насосов растет, но резко снижается экономическая эффективность всей

системы из-за большого расхода хладагента. Поэтому эти насосы нуждаются в предварительной откачке системы с помощью вспомогательных насосов [2, с. 602].

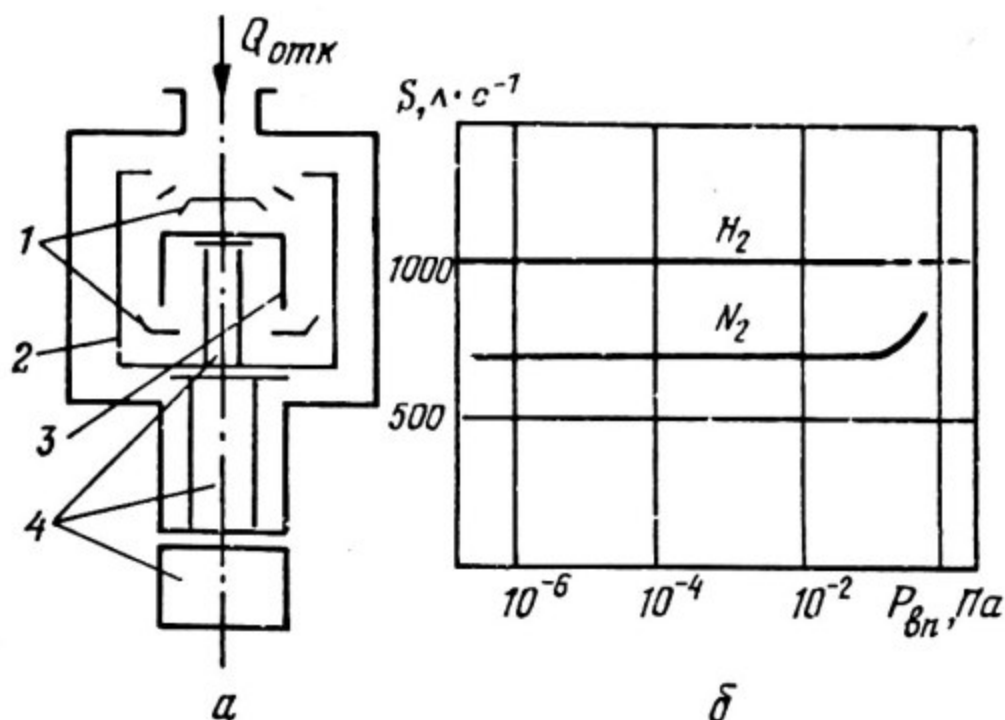


Рис. 40. Схема устройства насоса *CRYO* —И6 (а) и зависимость скорости откачки от величины впускного давления (б):  
1 — отражатели; 2 — экран; 3 — криопанель; 4 — холодильник первой, второй и третьей ступени

Быстрота откачки криогенных насосов и их экономичность в большой степени зависят от конструкции криопанелей и окружающих их оптически плотных экранов. На рис. 41 изображена конструкция криопанелей и экранов, позволяющая в 2 раза увеличить коэффициент захвата по сравнению с конструкциями, использующими экраны шевронного типа [2, с. 606].

На рис. 42 дана типовая функциональная схема вакуумной установки, откачиваемой криогенным насосом.

Криогенные насосы обладают рядом существенных преимуществ в сравнении с насосами других типов, к ним в первую очередь относятся:

- высокие скорости откачки при сверхнизких давлениях;
- очень чистый спектр остаточных газов, определяемый, в основном, неонам, водородом и гелием;
- простота конструкции и надежность в работе;

— небольшие габариты и вес, возможность изготавливать встроенные в вакуумную систему конструкции и т.д.

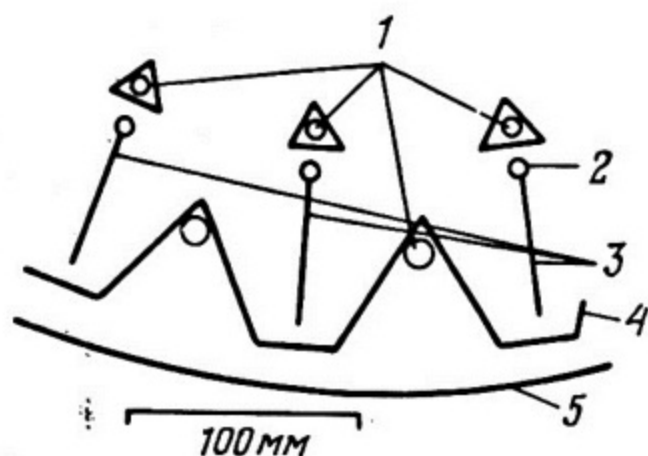


Рис. 41. Оптимальная конструкция криопанелей и экранов в вакуумной камере с цилиндрической или сферической симметрией:

1 — жидкий азот; 2 — жидкий гелий; 3 — криопанели; 4 — экран; 5 — стенки вакуумной камеры

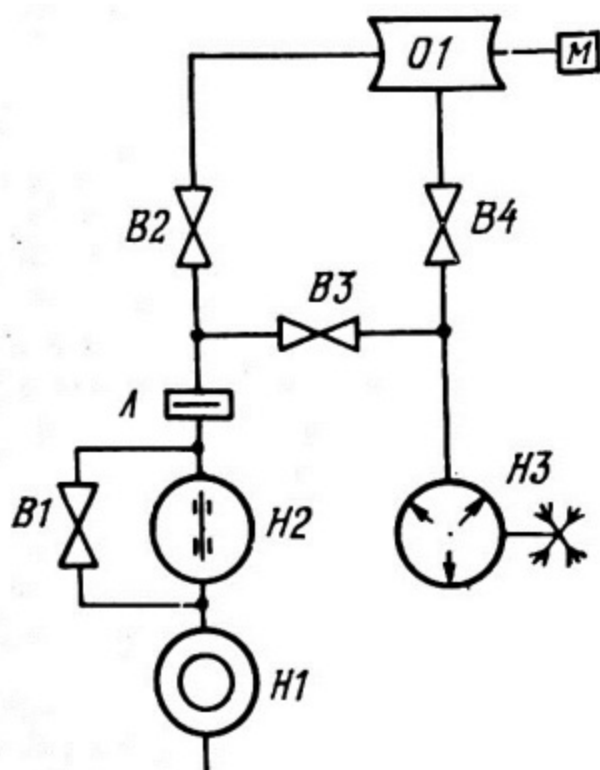


Рис. 42. Функциональная схема вакуумной установки с криогенным насосом

Криогенная вакуумная техника относительно молода. Ее прогресс тесно связан с вопросом создания экономичных холодильных установок. В настоящее время широко используются так называемые каскадные ожижители гелия [8, с. 92], в которых используется детандирование или адиабатическое расширение гелия. При адиабатическом расширении температура газа понижается, например, если воздух при температуре 293 К был сжат до давления  $8 \cdot 10^6$  Па, то при адиабатическом расширении этого воздуха до давления  $10^5$  Па его температура снизится до 84 К. В случае использования нескольких каскадов расширения можно получить предельно низкие температуры.

С точки зрения наименьших потерь хладагента, его необходимо производить как можно ближе к криогенному насосу. Рассмотренный выше насос *СРУО* —И6 относится к типу насосов с автономными ожижителями или насосов с малыми газовыми холодильными машинами (ГХМ). Современные ГХМ обеспечивают мощность 4 Вт на уровне 20 К и примерно 10 Вт при 77 К [12, с. 22], что позволяет эксплуатировать насос при давлениях 13 Па, осуществляя до 30 000 откачек камеры объемом 100 л.

По мере накапливания конденсата на криопанели производительность насоса снижается. Для восстановления нормальной работоспособности криопанель оттаивается, а накопленный газ откачивается вспомогательными насосами.

## ЦЕОЛИТОВЫЕ НАСОСЫ

В случае криогенной откачки главным параметром, определяющим эффективность откачки, является температура поверхности, а не ее состояние. Для цеолитовых насосов, которые используют для откачки явление адсорбции за счет слабых взаимодействий, важно состояние поверхности, а точнее ее реальная площадь. От того, насколько развита поверхность адсорбента, зависит количество откачиваемого газа.

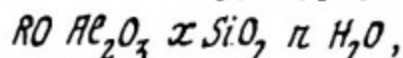
Относительная роль различных эффектов, вызывающих адсорбцию различных веществ, показана в таблице 11 [12, с. 24—25]. Чисто электростатические силы характерны для молекул с постоянным дипольным моментом (ориентационный эффект) или с наведенным дипольным моментом (индукционный эффект). Дисперсионные силы взаимодействия определяются изменениями плотности электронного облака, что приводит к возникновению мгновенных диполей. Дисперсионные силы проявляются в любых молекулах, даже неполярных [5, с. 45].

Таблица 11

Вещество	Эффект, %		
	ориентационный	индукционный	дисперсионный
Окись углерода	0	0	100
Иодистый водород	0,1	0,4	99,5
Хлористый водород	14,4	4,2	81,4
Аммиак	44,6	5,4	50
Вода	77	4	19
Этиловый спирт	55	12,6	32,4

По типу взаимодействия с откачиваемым газом все адсорбенты можно разделить на три группы: гетерополярные, анионные и ковалентные.

Гетерополярные адсорбенты характеризуются наличием катионов и анионов, поэтому их откачные свойства определяются, в основном, электростатическими силами. Этот тип адсорбентов имеет большее сродство спольярными молекулами ( $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  и т.д.), чем с неполярными ( $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $Ar$  и т.д.). Примером гетерополярных адсорбентов являются природные и искусственные цеолиты. Цеолиты представляют собой семейство алюмосиликатов, имеющих структурную формулу:



где  $RO$  — окисел металла;  $n$  — число молекул кристаллизационной воды;  $x$  — мольное соотношение окислов  $SiO_2/Al_2O_3$ .

Величина мольного соотношения определяет форму цеолита. При  $15 > x > 2$  имеем цеолиты типа  $X, Y$ , а при  $x \leq 2$  — типа  $A$ . Цеолиты построены из тетраэдров окислов  $SiO_2$  и  $AlO_4$ .

У большинства синтетических цеолитов шестичленные кольца тетраэдров образуют кубооктаэдры, имеющие сравнительно большие свободные пространства, которые и определяют характерные размеры полостей цеолита.

В структуре цеолитов различают первичную и вторичную пористость.

Первичная пористость образуется при нагреве цеолита до 450—700 К за счет удаления из внутренних полостей кристаллизационной воды. Эта пористость может быть представлена в

виде сферических полостей, соединяемых между собой узкими порами или каналами. Диаметры этих пор и каналов находятся в пределах  $(3,8-10) \cdot 10^{-10}$  м.

Вторичная пористость образуется при соединении отдельных кристаллов цеолита, имеющих размеры в несколько микрон, в гранулы при помощи различных связующих добавок. Диаметры вторичных пор составляют  $(5-10) \cdot 10^{-7}$  м. Доля поверхности вторичных пор мала, поэтому их вклад в процесс откачки невелик. Они служат только каналами для доступа газа к внутренним полостям цеолита.

Для всех цеолитов характерна большая селективность откачных свойств, определяемая малыми размерами пор и каналов, которые сравнимы с диаметрами молекул.

В настоящее время синтезирован ряд искусственных цеолитов типа:  $NaA$ ,  $CaA$ ,  $NaX$  и т.д., в том числе специально предназначенный для целей вакуумной техники:  $CaA-4B$ . Цеолиты применяют в виде кристаллических порошков или гранул, таблеток или шариков, состоящих из таких порошков и добавок связующих веществ.

Ковалентные адсорбенты поглощают газы только за счет дисперсионного эффекта. Примером ковалентных адсорбентов являются активированные угли — твердые тела, состоящие из кристаллического углерода.

Примером анионных адсорбентов являются силикагели — высокомолекулярные твердые кремниевые кислоты, получаемые в процессе конденсации в водном растворе и затем высушиваемые.

Сравнение свойств и характеристик адсорбентов можно провести, используя табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Адсорбент	Диаметр пор, $10^{-10}$ м	Удельная поверхность, $м^2 \cdot г^{-1}$	Плотность $г \cdot см^{-3}$
Цеолит CaA	5	800	0,72
Полимерный активированный уголь БАУ	20	57	0,26
Тонкопористый силикагель СШ-10	32	600	0,77

В современной вакуумной технике наиболее широко применяются цеолиты. Синтетические цеолиты обычно обозначаются числом, определяющим максимальный размер молекул газа, которые могут проникать в каналы.

Адсорбированные на внешней поверхности цеолита молекулы газа могут мигрировать в каналы и поры и по ним далее во внутренние полости, где они оседают на стенках.

Сорбционная способность цеолитов в отношении инертных газов практически равна нулю, для водорода, молекула которого имеет наименьший диаметр, очень мала. Эффективность сорбции сильно зависит от температуры как молекул, так и адсорбента. От температуры зависят период и интенсивность колебаний системы молекула-сорбент, а также проницаемость каналов и пор.

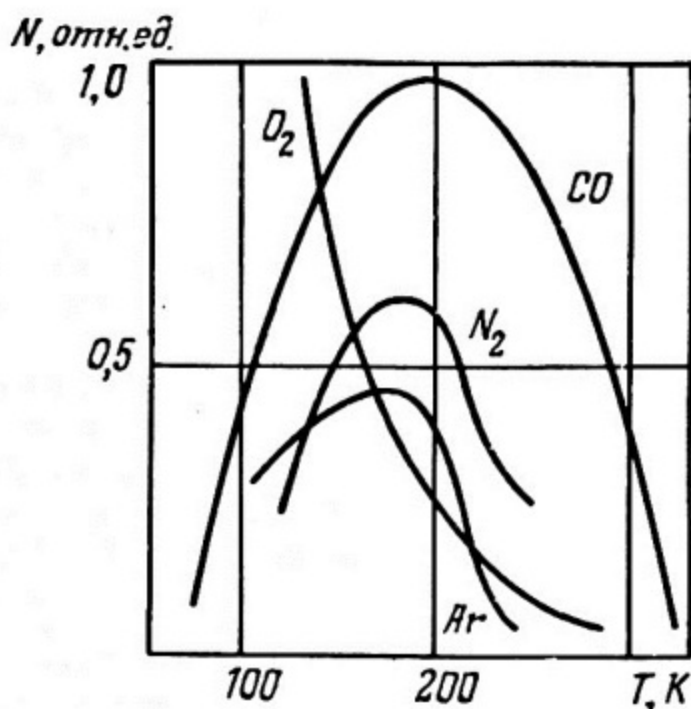


Рис. 43. Зависимость количества газа, адсорбируемого цеолитом, от температуры

Зависимости рис. 43 представляют влияние температуры адсорбента на количество газа, адсорбированного 100 г цеолита типа 4 А при давлении  $10^5$  Па [2, с. 295]. Сорбция кислорода увеличивается с понижением температуры, так как диаметр молекулы кислорода ( $28 \cdot 10^{-10}$  м) меньше диаметров молекул азота ( $4 \cdot 10^{-10}$  м) или аргона ( $3,8 \cdot 10^{-10}$  м). При уменьшении температу-

ры увеличивается эффективность явления конденсации в каналах и порах адсорбента.

Откачивающие свойства цеолита обычно определяются на основании экспериментальных зависимостей количества адсорбированного газа (на единицу массы цеолита) от давления. При повышении температуры из него выделяется большое количество предварительно откаченного газа. Из этого следует возможность регенерации (или очистки) цеолита в процессе эксплуатации при его прогреве в вакууме.

Цеолитовые насосы являются единственными насосами, которые обеспечивают предварительную откачку вакуумных систем, не искажая спектр остаточных газов в системах тяжелыми углеводородами (так называемая безмасляная откачка).

В качестве хладагента для цеолитовых насосов используется дешевый и доступный жидкий азот (77К), что при строгом рассмотрении не позволяет отнести цеолитовый насос к разряду криогенных, как это делается в ряде литературных источников.

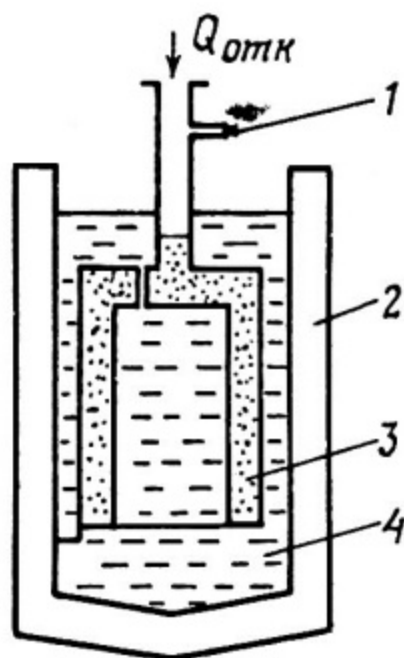


Рис. 44. Схема цеолитового насоса:

- 1 — предохранительный клапан; 2 — внешний сосуд Дьюара; 3 — цеолит; 4 — хладагент

Конструкция современного цеолитового насоса весьма проста (рис. 44). Она удовлетворяет следующим требованиям: адсорбент находится в полном тепловом контакте с хладагентом.

том, элементы насоса изготавливаются из расчета обеспечения максимальной пропускной способности для потока откачиваемого газа, обеспечена возможность периодической регенерации адсорбента после его насыщения (вместо внешнего сосуда Дьюара надевается внешняя электрическая печь).

Цеолитовые насосы обычно выполняются из нержавеющей стали. Вопрос одновременного и быстрого охлаждения засыпанного внутрь насоса адсорбента является одним из центральных при конструировании насоса. Коэффициент теплопроводности адсорбционной полости, особенно в условиях вакуума, очень мал ( $10^{-5} - 10^{-6}$  кал  $\cdot$  с $^{-1}$   $\cdot$  см $^{-1}$   $\cdot$  град $^{-1}$ ) и поэтому для увеличения скорости охлаждения и для понижения температуры поглощающего слоя в полость с адсорбентом иногда добавляют стружку из материалов с высокой теплопроводностью или используют разделительные медные пластины. Высота насоса и его диаметр — противоречащие факторы с точки зрения получения максимальной скорости откачки и длительного сохранения хладагента в жидком состоянии. Отношение площади адсорбента к высоте его слоя выбирается оптимально, исходя из этих двух требований.

Цеолитовые насосы сравнительно невелики по размерам. В зависимости от типа насоса они вмещают от нескольких сотен грамм до нескольких килограммов адсорбентов. Это позволяет создавать в объемах до нескольких сотен литров разрежение 1—10 Па. Для получения более низкого давления ( $10^{-1} - 10^{-2}$  Па) целесообразна последовательная работа двух или более насосов. Следует заметить, что, в принципе, предельное давление, получаемое с помощью цеолитового насоса, не может быть меньше  $6,5 \cdot 10^{-7}$  Па, так как оно определяется неоткачиваемыми насосом компонентами воздуха ( $He$ ,  $Ne$ ,  $H_2$ ). Однако на практике при откачке воздуха, начиная с атмосферного давления, в начальный период насос работает в вязкостном режиме и в результате турбулентности движения потока газа происходит захват в режим откачки и неоткачиваемых компонентов воздуха и их дальнейшее замуравывание в каналах и порах цеолита.

Цеолитовые насосы нашли применение в вакуумных системах с повышенными требованиями к чистоте спектра остаточного газа, в частности к наличию углеводородных загрязнений, паров воды и т.д. Простота конструкции, отсутствие электрических и других коммуникаций, высокая надежность в работе, широкий диапазон рабочих давлений — все это делает привлекательным использование цеолитовых насосов. Следует отметить возможность дальнейшего снижения величины получаемого предельного давления в случае перевода цеолитового насоса в криогенный режим

заменой хладоагента на более низкокипящий, вплоть до жидкого гелия. Одной из причин, тормозящих более широкое использование адсорбентов в вакуумной технике, является их недостаточно высокая механическая прочность, что приводит к попаданию цеолитовой пыли в откачиваемый объем.

В нашей стране выпускается цеолитовый насос ЦВН-1-2 и на его базе цеолитовый вакуумный агрегат ЦВА-1-2, в который входит два насоса ЦВН-1-2, работающих попеременно для обеспечения непрерывности процесса откачки. В ЦВА для предварительного удаления из откачиваемого объема основного количества газа применен водоструйный насос. Параметры насоса ЦВН-1-2 и агрегата ЦВА-1-2 приводятся в таблице 13. В таблице 14 приведен примерный парциальный состав остаточного газа в системе, откаченной насосом ЦВН-1-2 (полное давление — 1,5 Па).

Т а б л и ц а 13

Параметры	ЦВН-1-2	ЦВА-1-2
Предельное давление, Па	1	$10^{-2}$
Максимальный объем откачиваемого воздуха, л	100	100
Время откачки, исключая предварительное охлаждение цеолита, ч	1	2
Расход жидкого азота, л · ч <sup>-1</sup>	6	6
Марка адсорбента	СаА-5	СаА-5
Количество адсорбента, кг	1	2

Т а б л и ц а 14

Газ	Ne	He	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> + CO	Ar
%	58	28	5,5	6	1	0,5	0,5

## ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

Испарительные геттерные и ионно-геттерные насосы различных типов в настоящее время наиболее распространенный и эффективный класс безмасляных средств откачки.

Геттерные насосы являются насосами поверхностного действия, в которых связывание газов происходит за счет явления хемосорбции.

Свойство напыленных металлов связывать молекулы газа известно более 100 лет. Небольшие количества геттера — материала, сорбирующего газ, позволяли улучшать вакуум в отпаянных вакуумированных изделиях, например, в лампах накаливания использовался белый фосфор, в радиолампах — барий, титан. Следы активных слоев газа геттера видны у цоколя кинескопа после распыления терморезистивной таблетки соединения бария, алюминия и титана.

Развитие техники высоковакуумных диффузионных насосов остановило развитие геттерных насосов. Однако во второй половине 50-х годов интерес к ним вновь возник в связи с необходимостью получения "чистого" безмасляного вакуума.

К этому времени в металлургии были достигнуты большие успехи в получении чистого титана, у которого наиболее широк спектр хемосорбции по разным газам.

Для хемосорбции необходима чистая титановая поверхность, не покрытая ни окисными пленками, ни слоями сорбированных молекул. Новые слои геттера образуются либо испарением металла, либо распылением. Исходя из различия этих процессов, известны и различные типы геттерных насосов.

Исторически геттерными насосами называются насосы, в которых генерация новых слоев геттера обеспечивается испарением металла (или термическим распылением в отличие от ионного распыления, имеющего место в магниторазрядных насосах).

В ионно-геттерных насосах сорбция термически распыляемым геттером сочетается с электрической откачкой газов, не взаимодействующих с геттером. Ионизация газа используется также для расщепления сложных молекул (пары  $H_2O$ ,  $CH_4$ , тяжелые углеводороды). Под действием электрического поля ионы движутся к запыляемым геттером электродам и бомбардируют их поверхность. При этом часть ионов проникает на некоторую глубину бомбардируемой поверхности и удерживается там.

## Сорбционные характеристики напыленных металлических пленок

Основным фактором при выборе геттерных материалов является сорбционная активность газов и пленок. Один из физических показателей этой активности — теплота сорбции, определяющая прочность связи сорбированных молекул с активными центрами геттера [9, с. 5].

Малое значение теплоты сорбции инертных газов, характерное для геттерных материалов, делает невозможной эффективную откачку этих газов испарительными насосами.

Кроме требования высокой сорбционной активности, к геттерным материалам предъявляется ряд других требований. Геттер должен легко испаряться при не слишком высоких температурах, чтобы не происходило испарение и других материалов, но и не слишком низких, чтобы можно было производить прогрев для обезгаживания системы. Геттер должен быть активным в широком диапазоне температур; образующиеся в геттере продукты реакций должны быть пористыми для обеспечения взаимодействия молекул не только с поверхностным слоем. Образующиеся химические соединения должны быть устойчивыми.

Наибольшее распространение в качестве геттера получил титан, иногда используют цирконий, тантал, барий, реже — молибден, магний, гафний.

Сорбционные свойства пленок сильно зависят от их температуры и условий образования. Запыляемые геттером стенки насоса (или специальные вкладыши — конденсаторы) принудительно охлаждаются воздухом, водой, жидким азотом, реже — жидким водородом.

Инертные газы и углеводороды напыленными пленками металлов практически не поглощаются, их удаляют вспомогательным пароструйным насосом или при помощи ионной откачки. При вспомогательной откачке не удается полностью освободиться от углеводородов, так как они (например, метан) синтезируются на пленке как на катализаторе. При наличии в спектре остаточных газов углеводородов предельное давление не может быть меньше  $10^{-9}$  Па.

При охлаждении пленки геттера до температуры 77 К предельное давление может быть понижено до давления  $10^{-11}$  Па. Кроме того, увеличивается скорость откачки за счет интенсивной адсорбции.

Представление о влиянии температуры и условий образования геттерных пленок на их сорбционные характеристики дают приводимые в таблице 15 средние значения скорости откачки водорода и азота пленками титана.

Т а б л и ц а 15

Режим напыления	Температура пленки, К	Удельная скорость откачки, л·с <sup>-1</sup>	
		H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Непрерывный	77	23	10
	293	4	5
Периодический	77	26	7
	293	15	1

### Испарители геттерных насосов

Испарители являются основными элементами геттерных насосов, так как характеристики насоса в основном определяются типом примененного испарителя.

Для сравнения испарителей геттерных насосов берутся четыре основных параметра:

- энергетическая эффективность или отношение величины подводимой к испарителю мощности к скорости испарения геттера;
- коэффициент использования геттера;
- скорость испарения геттера и диапазон ее регулирования;
- величина максимального давления, при котором включается испаритель.

Основные характеристики наиболее распространенных испарителей приведены в таблице 16.

Таблица 16

Параметры	Тип испарителя			
	Твердофазный			Жидкофазный электронно-лучевой
	прямока- нальный	косвенный канал	дуговой	
Энергетическая эффективность, Вт·мг·с <sup>-7</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>
Коэффициент использования	0,4	0,7	0,9	0,95
Полная скорость испарения, мг·с <sup>-7</sup>	0—1	0—1	3—20	0—30
Максимальное давление запуска, Па	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	10	10 <sup>-2</sup>

В отечественных насосах наибольшее распространение получили прямонакальные биметаллические испарители. Эти испарители представляют собой отрезок биметаллической проволоки с молибденовым керном, на который иодидным способом осажден слой титана. Через керн пропускается прямой ток до 200 А и при этом температура титана достигает 1423 К, что достаточно для его испарения. В геттерных насосах устанавливается от одного до шести таких прямых или V-образных элементов, содержащих от 1 до 17 г распыляемого титана. Скорость испарения регулируется регулировкой пропускаемого тока, максимальный ресурс работы одного испарительного элемента — 600 ч.

Максимальное давление запуска не должно превышать величину 10<sup>-2</sup> Па. При более высоких давлениях и меньших скоростях испарения на поверхности испаряемого титана образуются слои химических соединений титана с откачиваемыми газами, резко снижающие скорость испарения.

Высокая производительность насоса, значительный ресурс работы достигаются при использовании электронно-лучевых испарителей.

В электронно-лучевом испарителе разогрев проволочного геттера происходит при бомбардировке геттера мощным электронным пучком. Ресурс работы такого испарителя определяется

запасом проволоки — геттера и ресурсом термокатода электронной пушки, он составляет несколько тысяч часов.

В дуговых испарителях источником распыляемого геттера служит катодное пятно дуги постоянного тока. Плотность тока в пятне достигает величины  $10^6 - 10^7 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ . Дуга горит в парах испаряемого титана, что позволяет поддерживать ее горение вплоть до давлений  $10^{-6} - 10^{-7} \text{ Па}$ . При давлении меньше 10 Па катодное пятно хаотически перемещается по поверхности испаряемого титана. Последний при этом охлаждается водой. Испарение титана происходит более или менее равномерно.

Дуговые испарители обычно используют при работе в условиях больших газовых нагрузок в диапазоне давлений  $10 - 10^5 \text{ Па}$ . Меньшее давление получить сложно, так как в насосе происходят интенсивные газовыделения и фотодесорбция под воздействием теплового и ультрафиолетового излучения дуги. При работе дугового испарителя из-за синтеза и диссоциации метана на пленках титана происходят значительные колебания давления. Дальнейшее увеличение давления запуска ограничено необходимым условием движения катодного пятна, при его прекращении возникает опасность прогара катода.

Конструкция испарительного геттерного насоса проста. Практически это некий объем, в котором устанавливается выбранный испаритель. Откачка ведется слоями геттера, напыляемыми на стенки этого объема.

Оптимальные условия работы геттерного насоса не отличаются от условий для других насосов поверхностного действия:

1) откачиваемый газ должен постоянно и равномерно поглощаться на всей сорбирующей поверхности;

2) необходимо обеспечить защиту откачиваемой вакуумной системы от попадания в нее распыляемого геттера при максимальной пропускной способности экранов;

3) стенки должны выдерживать охлаждение вплоть до температуры жидкого азота;

4) должна допускаться произвольная ориентация насоса на установке.

На рис. 45 показана конструктивная схема современного отечественного геттерного насоса из серии НИБ, при разработке которого были учтены все соображения по оптимизации конструкции [9, с. 16].

Блок испарителей 2 работает в периодическом режиме, в момент испарения геттера жалюзи 4 закрыты, при отключении испарителей они открываются. Корпус насоса 3 выполнен из тонкой гофрированной нержавеющей стали. Гофрировка не

только обеспечивает механическую прочность корпуса, но и определяет равномерность насыщения геттерной пленки в процессе откачки. Охлаждение насоса производится хладагентом, заливаемым в полость 1.

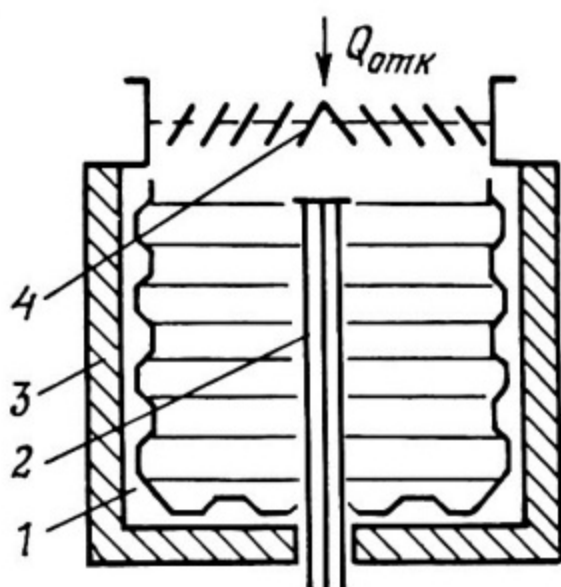


Рис. 45. Геттерный насос оптимальной конструкции серии НИБ

Предельное давление для серии НИБ составляет  $6 \cdot 10^{-9}$  Па при скорости откачки по водороду до  $2 \cdot 10^5$  л·с<sup>-1</sup>. Эти насосы предназначены для использования при откачке водорода в ускорительных и термоядерных установках.

Скорость откачки насоса в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^{-9}$  Па постоянна.

### Испарительные ионно-геттерные насосы

Для лучшей откачки не сорбируемых геттером газов, для расщепления и диссоциации сложных молекул, для управления движением молекул откачиваемого газа в геттерных насосах добавляется система ионизации газа.

Обычно ионизация осуществляется электронным ударом с преимущественным образованием положительных ионов.

Механизм откачки в ионно-геттерном насосе можно разделить на четыре части:

— положительные ионы двигаются в электрическом поле к отрицательным электродам и бомбардируют их, при этом

часть ионов проникает внутрь этих электродов и удерживается там, а часть производит "катодное распыление", ведущее к десорбции и распылению геттера;

— распыляемый в результате бомбардировки геттер осаждается на нераспыляемых поверхностях и сорбирует откачиваемый газ;

— поглощение инертных газов определяется, во-первых, внедрением их ионов в материал бомбардируемой поверхности и, во-вторых, "замуровыванием" нейтральных молекул распыляемым металлом;

— производится откачка как в простом испарительном геттерном насосе.

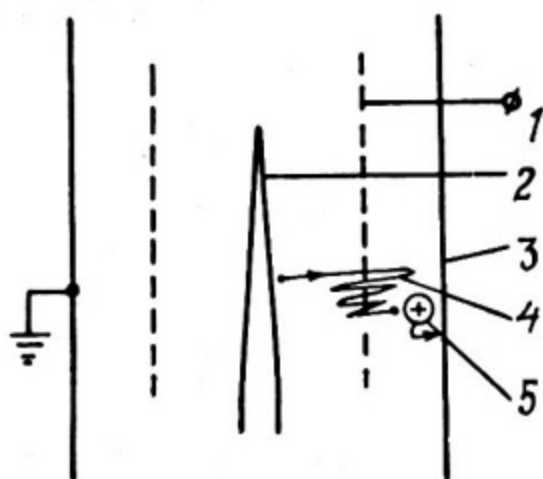


Рис. 46. Схема ионизатора ионно-геттерного насоса:

1 — анодная сетка (220—300 В); 2 — термокатод; 3 — стенка насоса; 4 — траектория электронов; 5 — ион откачиваемого газа

Простейшая схема ионизатора, широко применяемого в ионно-геттерных насосах, представлена на рис. 46. Электроны эмиттируются термокатодом, изготовленным из вольфрама и нагретым до температуры 2300 К, ускоряются в электрическом поле, определяемым потенциалом анодной сетки, и начинают совершать колебания относительно анодной сетки до тех пор, пока не ударятся о нее или не встретятся с молекулой откачиваемого газа. Длина траекторий электронов должна быть велика, чтобы увеличить вероятность ионизации. После акта ионизации положительный ион идет к стенке насоса и, если на ней напыляется геттер, то ион сорбируется на ней. Время удержания обычно

достаточно, чтобы этот ион был "замурован" новыми слоями непрерывно распыляемого геттера.

Наибольшее распространение в СССР получили насосы типа ГИН.

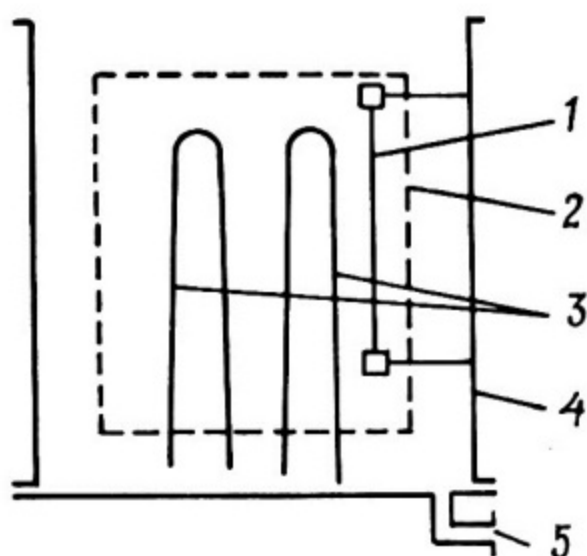


Рис. 47. Электродная система насоса ГИН-05М:

1 — термокатод ионизатора; 2 — анод ионизатора; 3 — испаритель титана; 4 — корпус насоса; 5 — вспомогательная откачка

Схема электродной системы ионно-геттерного насоса типа ГИН-05М1 изображена на рис. 47. Для увеличения длины траектории электронов анодная сетка делается очень редкой. Два прямонакальных испарителя могут работать поочередно, ресурс работы насоса составляет 1500 часов при давлении  $10^{-5}$  Па. Анодная сетка выполняется из молибденовой проволоки толщиной  $8 \cdot 10^{-4}$  м, на нее подается потенциал 1200 В, термокатод ионизатора выполняется из вольфрама диаметром  $5 \cdot 10^{-4}$  м, мощность питания катода 100 Вт позволяет разогревать его до температуры 2773 К. Общая площадь стенок насоса, представляющих собой одновременно и конденсатор для напыляемого титана и коллектор образующихся ионов, составляет  $0,168 \text{ м}^2$ .

Скорость откачки подобного насоса: по водороду —  $1500 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ , по азоту —  $600 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ , по воздуху —  $450 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$  при скорости испарения титана  $4 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1}$  и общей потребляемой насосом мощности 0,85 кВт.

Скорость откачки геттерно-ионного насоса постоянна во всем диапазоне рабочих давлений ( $10^{-6} - 10^{-4}$  Па). Масс-спектр остаточных газов свободен от тяжелых углеводородов в резуль-

тате их термического разложения, и определяется, в основном, синтезированным метаном и плохо откачиваемыми инертными газами.

К недостаткам ионно-геттерных насосов относятся:

- малая быстрота откачки инертных газов;
- чувствительность к повышению величины рабочего давления;
- ограниченный ресурс рабочего времени из-за ограниченного запаса титана.

Для увеличения быстроты откачки инертных газов необходимо повышать эффективность ионизации откачиваемого газа. Это может быть достигнуто увеличением длины траекторий электронов в насосах орбитронного типа. Их полное название: электростатические испарительные ионно-геттерные насосы орбитронного типа.

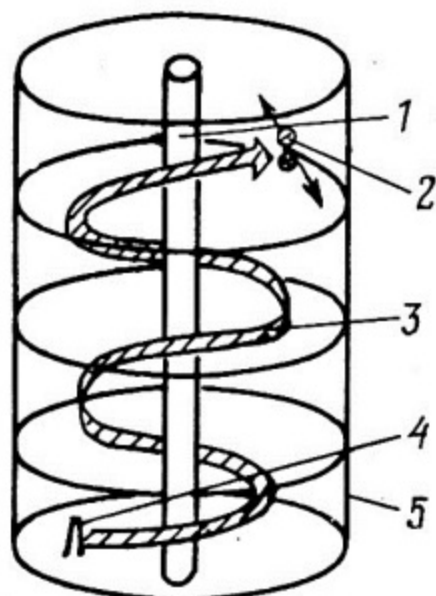


Рис. 48. Схема ионизатора насоса орбитронного типа  
1 — стержневой анод; 2 — акт ионизации; 3 — траектория электронов; 4 — катод; 5 — сетка (стенка корпуса насоса)

Схема действия ионизатора такого насоса показана на рис. 48. Электроны инжектируются одним или несколькими прямоканальными вольфрамовыми катодами с достаточным угловым моментом, чтобы миновать центральный стержневой анод и двигаться по спиральным орбитам вдоль него. Положение и форма катода подобраны так, что осевая и радиальная симметрии электрического поля системы нарушены. Электроны двигаются

по орбитам со скоростью, имеющей осевую, радиальную и тангенциальную составляющие, до тех пор, пока не ударятся о центральный стержень. Электроны будут двигаться по спиральным орбитам от одного конца стержня к другому, изменяя знак скорости в осевом направлении. Попадание электронов на центральный стержневой анод, имеющий малое поперечное сечение, затруднено. Поэтому электроны движутся по орбитам достаточно долго, вследствие чего и эффективность ионизации газа резко возрастает. Образовавшиеся ионы уходят на стенку насоса, на которую напыляются новые слои геттера, и сорбируются там. Обычно распыляемый титан размещают непосредственно на стержневом аноде и титан распыляется пропусканием прямого тока через анод.

Предельное давление, получаемое в системах, откачиваемых орбитронными насосами, составляет  $6,7 \cdot 10^{-8} - 6,7 \cdot 10^{-9}$  Па. При охлаждении стенок насоса жидким азотом эта величина снижается еще на два порядка. В отечественном сверхвысоковакуумном насосе СОН-А-1 получаемое предельное давление составляет  $10^{-10} - 10^{-11}$  Па при скорости откачки по воздуху  $500 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ . Максимальное давление запуска —  $10^3$  Па. Ресурс насосов орбитронного типа составляет 300—2000 ч. Их рекомендуется использовать для откачки больших количеств активных газов и смесей активных газов с инертными. Применять их для откачки инертных газов нецелесообразно из-за плохого использования сорбционной способности геттерной пленки [10, с. 74].

## МАГНИТОРАЗРЯДНЫЕ НАСОСЫ

В отличие от геттерных в магнитоэлектрических насосах распыление геттера осуществляется не термическим нагревом, а путем ионной бомбардировки. Для получения высокой эффективности ионизации в насосе для ионизации используется самостоятельный тлеющий разряд.

В конце 30-х годов голландец Пеннинг обнаружил, что в магнитном поле самостоятельный тлеющий разряд может существовать при практически любых значениях давления, в том числе и при сверхнизких (выполняется условие Таундсена о том, что в самостоятельном разряде каждая заряженная частица должна воссоздавать новые заряженные частицы и их количество должно быть достаточно для поддержания разряда).

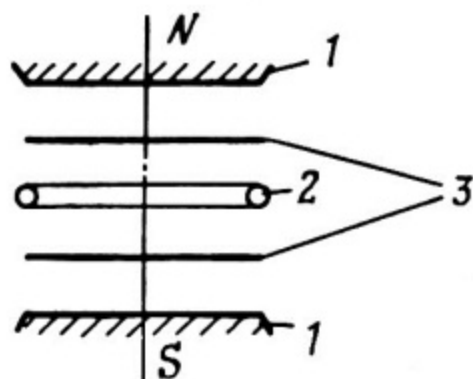


Рис. 49. Схема ячейки Пеннинга:

1 — магнит; 2 — анод;  
3 — катоды

Схема известной ячейки Пеннинга изображена на рис. 49. Ось симметрии такой ячейки совпадает с направлением магнитного поля. В такой ячейке любой электрон, оказавшийся в зоне действия полей, не может сразу попасть на анод, так как он движется по силовой линии магнитного поля. Таким образом, электрон начинает совершать колебательные движения между плоскими катодами внутри кольцевого анода до столкновения с молекулой откачиваемого газа.

Комбинация скрещенных электрического и магнитного полей является "ловушкой" для электронов. При этом длина траектории каждого электрона становится очень большой и вероятность акта ионизации молекул откачиваемого газа значительно возрастает. В результате возникает самостоятельный высоковольтный разряд, который характеризуется разрядным током, создаваемым ионами, приходящими на катоды ячейки.

Если катоды сделать из титана, а анод сделать развитым для увеличения площади, то получим распыление геттера с помощью ионной бомбардировки, геттер будет напыляться слоями на развитый анод и будет происходить сорбция молекул откачиваемого газа, т.е. образуется насос нового типа.

В 1956 г. советский ученый Э.М. Рейхрудель, а в 1958 г. американец Л.Д. Холл предложили идею создания мощного насоса на основе использования ячейки Пеннинга. По существу насос представляет собой большое количество параллельно включенных ячеек Пеннинга, объединенных едиными катодными пластинами и общим магнитным полем. Схема диодного магниторазрядного насоса (вариант Холла) изображена на рис. 50.

Число ячеек в современных насосах превышает несколько тысяч: магнитное поле, величина индукции которого составляет 0,07—0,15 Тл, образуется оксидно-бариевыми пластинчатыми магнитами и направлено перпендикулярно катодным пластинам.

Величина прикладываемого анодного напряжения составляет несколько киловольт. Зажигание разряда происходит при подаче анодного напряжения на электроды насоса. Свободные электроны, всегда имеющиеся в разрядном промежутке, начинают совершать сложное колебательное движение между катодами, вызывая возбуждение и ионизацию газовых молекул и появление вторичных электронов. В результате этого процесса

в полости анодных ячеек формируется стабильный пространственный заряд с электронной концентрацией  $10^{16} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , поддерживающий самостоятельный газовый разряд вплоть до давлений  $10^{-9} - 10^{-11} \text{ Па}$  [9, с. 29].

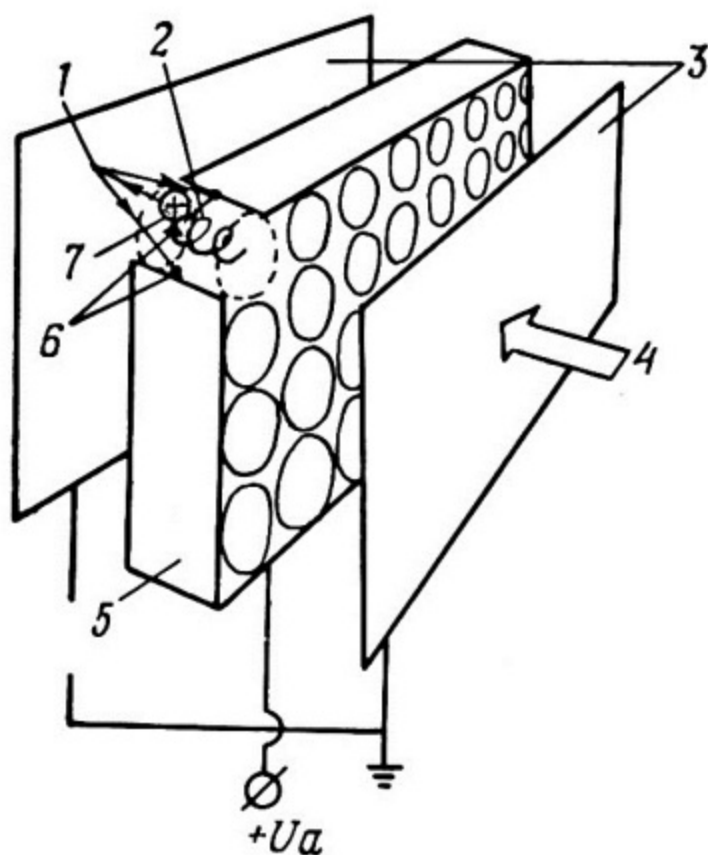


Рис. 50. Схема диодного магнитоэридного насоса:  
 1 — точка распыления; 2 — траектория электрона; 3 — титановые катоды; 4 — магнитное поле; 5 — ячеистый анод (медь);  
 6 — титан; 7 — ион газа

Образовавшиеся положительные ионы ускоряются в аксиальном электрическом поле и бомбардируют катоды, вызывая их интенсивное распыление. В среднем один падающий ион выбивает один атом титана. Большая часть распыленных атомов осаждаются на поверхности анода, образуя непрерывно обновляемую пленку геттера.

По современным представлениям откачка газов магнитоэридным насосом является результатом двух основных меха-

низмов поглощения. Один из них — хемосорбция газов распыленным геттером; второй — растворение газов в катодах и пленках распыленного геттера (адсорбция и "замуровывание").

Большинство атмосферных газов химически активны ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ , легкие углеводороды) и, за исключением водорода, откачиваются путем хемосорбции, образуя термически стойкие окиси, нитриды и карбиды титана. Поглощение этих газов в насосе имеет необратимый характер. Механизм откачки активных газов поясняется на рис. 51.

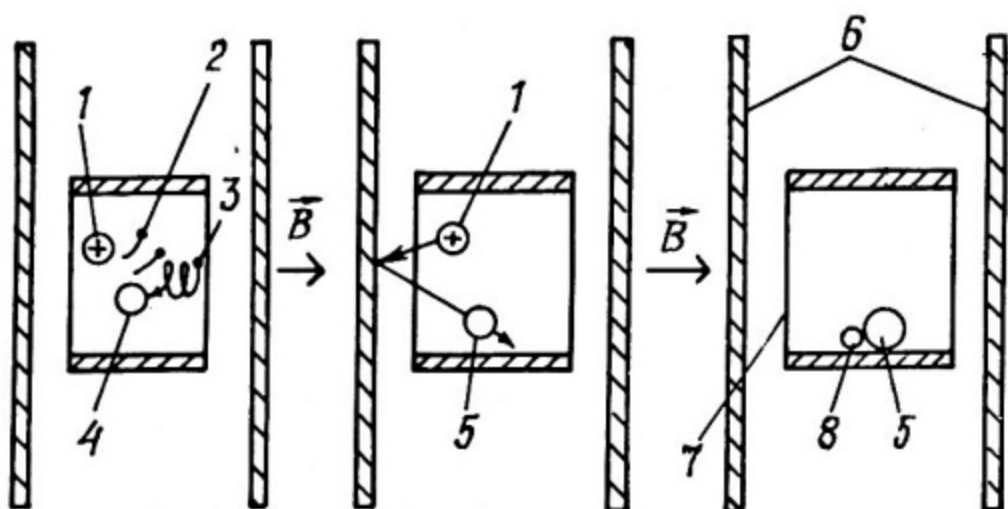


Рис. 51. Механизм откачки активных газов диодным магнито-разрядным насосом:

1 — ион газа; 2 — выбитый электрон; 3 — инициативный электрон; 4 — молекула газа; 5 — молекула титана; 6 — титановые катоды; 7 — анод; 8 — молекула сорбированного газа

Молекулы газа, не взаимодействующие с титаном (углеводороды, пары воды, тяжелые сложные молекулы), в разряде диссоциируют на простые компоненты, которые в свою очередь ионизируются и откачиваются.

Углерод, образующийся при диссоциации сложных молекул, отлагается на внутренних поверхностях насоса. На аноде атомы углерода образуют карбид титана, имеющий низкий коэффициент распыления. Этим объясняется уменьшение скорости откачки магнито-разрядных насосов при попадании в них паров масла или продуктов его крекинга.

Самостоятельный разряд в ячейке Пеннинга имеет высокую эффективность ионизации, определяемую как отношение числа ионизированных молекул к числу электронов во внешней цепи.

Однако из-за различия эффективности ионизации для разных газов, из-за различия коэффициентов распыления титана для ионов разной массы и из-за различной химической активности газов магниторазрядные насосы обладают значительной селективностью при откачке смесей газов.

Относительные значения скорости откачки диодных магниторазрядных насосов при откачке различных газов приведены в таблице 17 [10, с. 57].

Т а б л и ц а 17

Газ	Скорость откачки, %	Газ	Скорость откачки, %
Водород	270—300	Азот	98—100
Метан	270	Окись углерода	85—100
Легкие углеводороды	90—160	Двуокись углерода	82—100
Этиловый эфир	135	Кислород	55—57
Пары воды	100—130	Гелий	11—20
Сухой воздух	100	Аргон	1—4

Рассмотрим особенности откачки водорода и инертных газов, которая не только важна с практической точки зрения, но и имеет ряд особенностей при использовании рассматриваемых магниторазрядных насосов.

Откачка водорода обусловлена двумя процессами — растворением нейтральных молекул водорода титановыми катодами и внедрением ионов водорода в тело катода с последующей диффузией.

Легкие ионы водорода слабо распыляют титановые катоды и новые пленки геттера образуются медленно, т.е. поверхностный слой катода плохо очищается и быстро насыщается. Вследствие этого на поверхности катодов возникает диффузионный барьер,

препятствующий сорбции нейтральных молекул водорода. Поэтому при давлении меньшем  $10^{-6} - 10^{-7}$  Па скорость откачки насоса падает, так как откачка определяется лишь ионным механизмом.

Титан и водород хорошо реагируют друг с другом, образуя гидрид титана ( $TiH_2$ ). Максимальная скорость откачки водорода получается при напылении рыхлой пленки титана в атмосфере аргона.

Гидрид титана, включенный в титан, имеет бóльший объем, чем сам титан, что приводит к образованию внутренних напряжений и трещин в местах максимальной концентрации водорода, к расслоению катодов и, как следствие, к замыканию электродов и выходу насоса из строя. Это явление наблюдается после 200—250 ч откачки водорода при давлении  $3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Для выявления механизма откачки инертных газов в магниторазрядный насос был напушен радиоактивный газ радон. После нескольких часов откачки был сделан радиографический анализ внутренних поверхностей насоса. Откаченный радон сосредоточился на катодах напротив ребер анодных сот. Небольшое количество радона содержалось и на аноде, куда он, видимо, попадал из-за отражения от катодов.

Радон концентрируется на катоде под ребрами анодных сот, так как там происходит наименьшее распыление титана, а распыляемый на оси анодных ячеек титан интенсивно запыхляет эти зоны, "замуровывая" сорбированные ионы инертного газа (см. рис. 52, а).

Хотя инертные газы плохо откачиваются диодными магниторазрядными насосами, следует заметить, что их содержание в воздухе невелико (аргона — 0,93%, гелия —  $5 \cdot 10^{-4}$  %) и скорость их откачки вполне достаточна с точки зрения получения сверхвысокого вакуума в большинстве практических случаев.

При длительной откачке аргона с давлением  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па в вакуумной системе возникают периодические колебания давления — так называемая "аргонная нестабильность". Она возникает вследствие реэмиссии сорбированных ранее атомов аргона.

Иногда "аргонная нестабильность" возникает и при длительной (несколько сот часов) откачке воздуха при давлении  $10^{-3}$  Па.

Ионы аргона вызывают интенсивное распыление катодов. Поэтому работа магниторазрядных насосов при давлении  $10^{-7}$  Па приводит к быстрому очищению поверхностей и уменьшает вероятность возникновения "аргонной нестабильности". По этой же причине "аргонная нестабильность" нехарактерна для насосов, эксплуатируемых в широком диапазоне давлений.

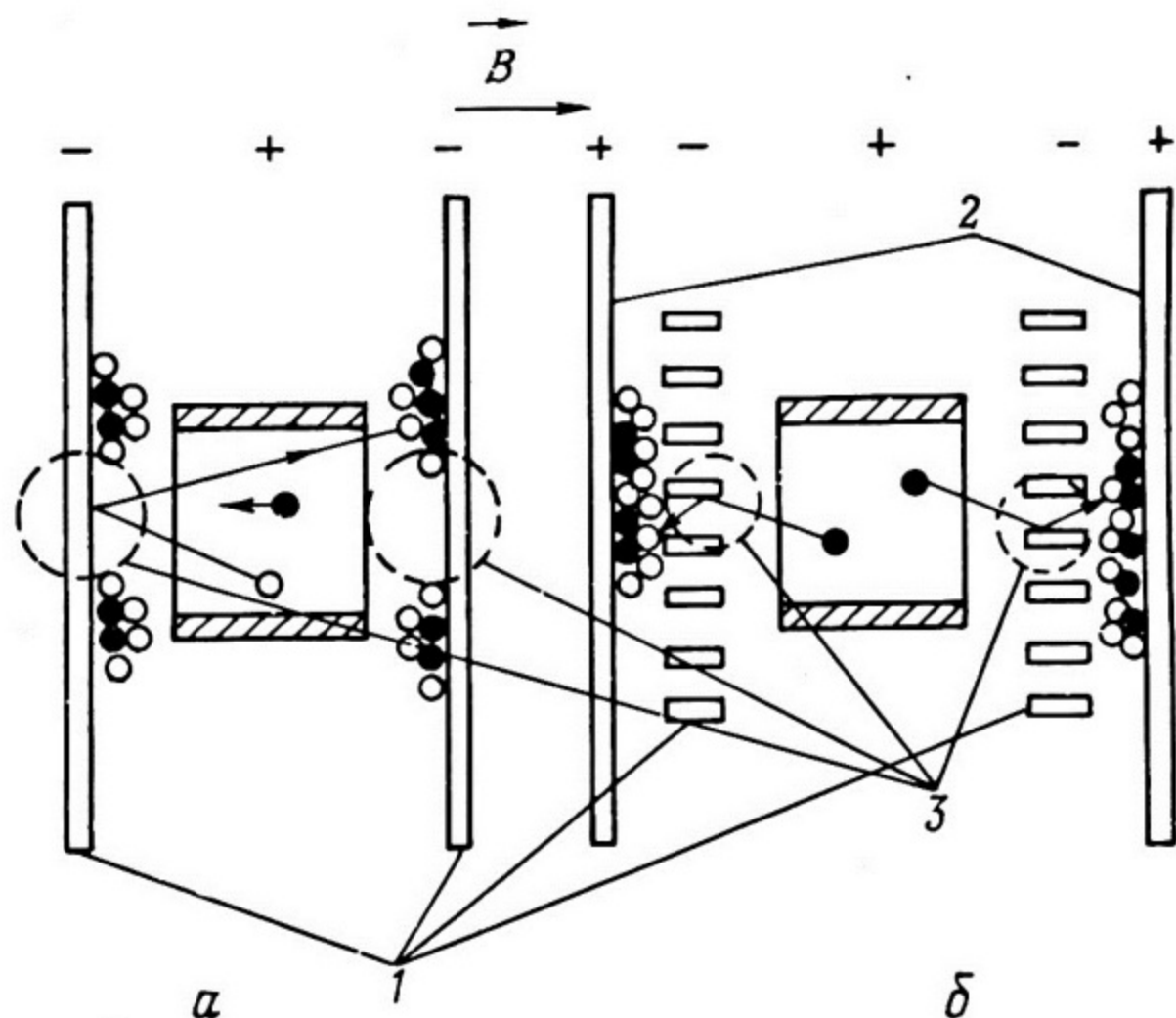


Рис. 52. Механизм откачки инертных газов диодным (а) и триодным (б) магниторазрядными насосами (о — молекулы титана, ● — ионы инертного газа):

1 — титановые катоды; 2 — коллектор; 3 — зоны максимального распыления

На этом принципе основан метод эффективной очистки внутренней поверхности и катодов магниторазрядных насосов, а также металлических высоковакуумных систем ("аргонная тренировка"). После "аргонной тренировки", состоящей в том, что насос работает при давлении  $10^{-7} - 10^{-2}$  Па при постоянном напуске аргона и откачке его вспомогательным насосом, увеличивается скорость откачки магниторазрядного насоса по всем

газам, уменьшается время получения предельного давления и уменьшается вероятность возникновения "аргонной нестабильности".

Для увеличения скорости откачки инертных газов необходимо увеличивать площадь нераспыляемой поверхности катода. Например, можно делать катод ребристым — в катоде фрезеруются продольные канавки шириной до  $2 \cdot 10^{-3}$  м и глубиной до  $3 \cdot 10^{-3}$  м. Однако канавки снижают ресурс работы насоса, а технологичность изготовления насоса резко уменьшается.

Другой вариант повышения скорости откачки инертных газов — использование трехэлектродного или триодного магнито-разрядного насоса. Механизм откачки инертных газов в таком насосе поясняется на рис. 52, б. Катод делается решетчатым с сеткой мельче, чем у анода. Корпус насоса представляет собой коллектор ионов, анод аналогичен аноду в диодной конструкции.

Часть ионов, благодаря полупрозрачной структуре катода, проходит мимо него, замедляется в тормозящем электрическом поле, изменяет направление своего движения и с меньшей энергией бомбардирует катод с обратной стороны. Другая часть прошедших катод ионов достигает стенки насоса или коллектора с очень небольшой или нулевой энергией и "замуровывается" распыляемым с катода титаном.

Скорость откачки аргона в триодном насосе в 25—30 раз больше, чем в диодном. Дополнительным преимуществом является то, что триодный насос легко запускается даже при начальном давлении 10 Па. Недостаток триодной конструкции в том, что термически изолированный катод разогревается сильнее, чем в диодной конструкции, что приводит к увеличенному газовыделению.

В дифференциальном диодном насосе, также имеющем повышенную скорость откачки инертных газов, один из катодов выполнен из металла, который распыляется легче, чем титан, например, из тантала. На рис. 53 приведены сравнительные схемы действия диодных обычного и дифференциального насосов.

Легко распыляемый тантал, осаждающийся на катоде из титана, интенсивно "замуровывает" внедрившиеся в катод ионы и препятствует их реэмиссии под действием ионной бомбардировки.

Дифференциальный насос обеспечивает стабильную откачку инертных газов со скоростью, сравнимой со скоростью откачки, получаемой в триодном насосе.

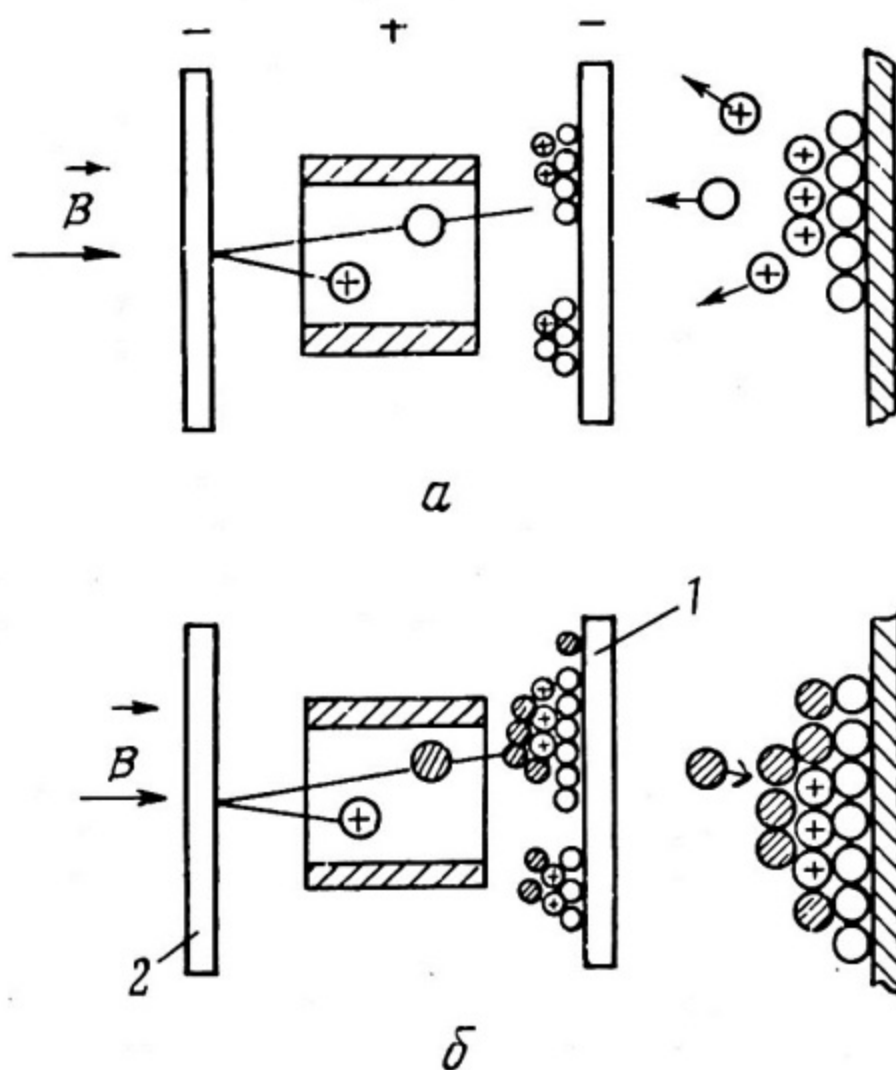


Рис. 53. Механизм действия диодных обычного (а) и дифференциального (б) насосов (о — титан,  $\oplus$  — ионы газа,  $\otimes$  — атомы материала катода с высокой распылительной способностью):

1 — катод с низкой распылительной способностью; 2 — катод с высокой распылительной способностью

На рис. 54 приведены сравнительные зависимости скорости откачки "чистого" аргона для всех рассмотренных типов магниторазрядных насосов от времени их действия. Пунктирные линии обозначают развивающиеся явления "аргонной нестабильности" [11].

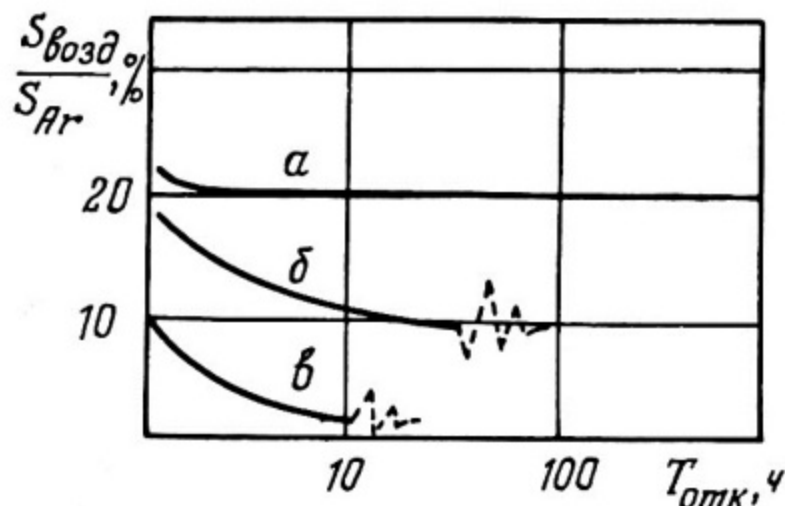


Рис. 54. Сравнение свойств дифференциального (а), триодного (б) и диодного (в) магниторазрядных насосов при откачке инертного газа (аргона)

В первом приближении скорость откачки магниторазрядных насосов определяется величиной разрядного тока. Величина разрядного тока является функцией: давления, конфигурации разрядной ячейки, величины магнитного и электрического полей. Для определенной конструкции и режима работы зависимость разрядного тока от величины рабочего давления практически линейна и может служить для ориентировочного определения величины давления в системе. Таким образом, магниторазрядные насосы обладают способностью саморегулировать расход энергии и титана в зависимости от величины рабочего давления.

Максимальное начальное давление определяется только степенью разогрева электродов насоса и может быть увеличено при охлаждении последних. Например, при охлаждении проточной водой анода диодного насоса.

По сравнению с геттерными и ионно-геттерными насосами магниторазрядные имеют в 10 раз больший ресурс работы, что определяется значительным запасом титана в катодных пластинах и решетках. Кроме того, магниторазрядные насосы не боятся прорыва газа при повышенном давлении, например, атмосферного воздуха.

Зависимость скорости откачки магниторазрядного насоса от величины рабочего давления имеет четко выраженный максимум в области давлений  $10^{-3} - 10^{-4}$  Па. Типичная характеристика представлена на рис. 55 [10, с. 60].

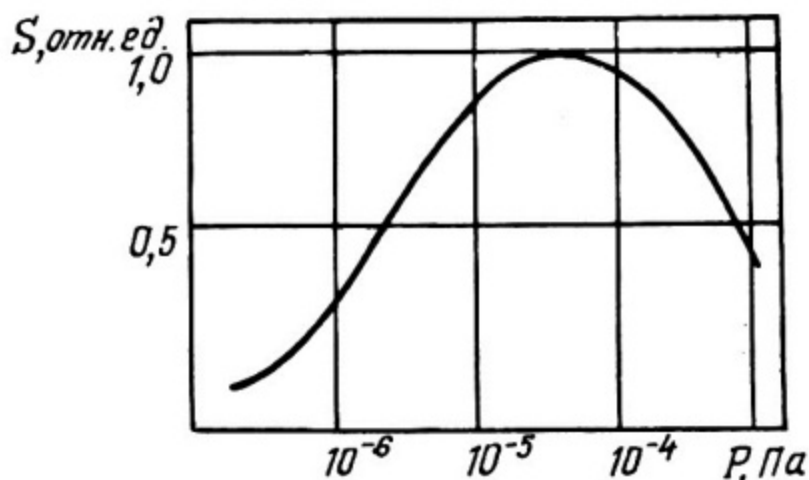


Рис. 55. Зависимость скорости откачки воздуха диодными магнетронными насосами от давления

Параметры отечественных магнетронных насосов различных серий приведены в таблице 18. В серии насосов неохлаждаемых магнетронных диодных НМД выпускается дифференциальный насос НМД-0,25-2 со скоростью откачки аргона  $50 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ . Кроме того, выпускается триодный магнетронный насос ТРИОН-150 со скоростью откачки воздуха  $200 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ , аргона  $30 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$  и с возможностью охлаждения электродов жидким азотом.

Таблица 18

Параметр	Серия НОРД, НМДО (охлаждаемый)	Серия НМД (неохлаждаемый)
Скорость откачки воздуха, $\text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	10 — 1000	6—1200
Предельное давление, Па	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$
Максимальное начальное давление, Па	6,7	1,3
Напряжение источника питания, кВ	-7	+7
Вес, кг	30—400	21—100

## Использованная литература

1. Меньшиков М.И. Лекции по вакуумной технике, прочитанные в МИФИ в разные годы.
2. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. -- М.: Мир, 1975.
3. Королев Б.И. и др. Основы вакуумной техники. Учебник для учащихся техникумов. — М.: Энергия 1975.
4. Пауэр Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. — М.: Энергия, 1969.
5. Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. — М.: Сов. радио, 1979.
6. Эшбах Г.Л. Практические сведения по вакуумной технике. — М.: Энергия, 1966.
7. Папок К.К. Смазочные масла. — М.: Воениздат, 1962.
8. Глазков А.А., Милованова Р.А. Учебная лаборатория вакуумной техники. — М.: Атомиздат, 1971.
9. Контор Е.И. Геттерные и ионно-геттерные насосы. — М.: Машиностроение, 1977.
10. Вакуумная техника. Справочные материалы. — М.: Реклама, 1975.
11. Проспекты фирм "LEYBOLD - HERAEUS", "EDWARDS", "ULVAC CORPORATION", "BALZERS", "SOGEV", "ULTEK - PERKIN - ELMER".
12. Великанов Е.Г., Гришин С.Ф., Гуревич Л.С. Криогенные насосы. — М.: Машиностроение, 1977.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение .....	3
Механические насосы с масляным уплотнением .....	8
Двухроторные вакуумные насосы .....	16
Сверхвысоковакуумные турбомолекулярные насосы .....	24
Диффузионные пароструйные насосы .....	34
Сорбционные насосы .....	55
Криогенные насосы .....	58
Цеолитовые насосы .....	67
Геттерные насосы .....	74
Магниторазрядные насосы .....	83
Использованная литература .....	94

**Шестак Валерий Петрович**  
**"Средства откачки"**

**Редактор Е.Н. Кочубей**  
**Технический редактор Н.М. Генкина**  
**Корректор Н.Н. Смолина**

---

Л— 85615      Подписано в печать 7/1-1981г.      Формат 60x84 1/16  
Объем 6 п.л.      Уч.-изд.л. 5      Тираж 200 экз.      Цена 24 коп.  
Изд. № 074—1      Зак. 1392

---

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 1

Список опечаток

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
8	5-я сверху	и входят в состав	, они входят
13	1-я снизу	и вакуумным систе- мам	к вакуумным сис- темам