

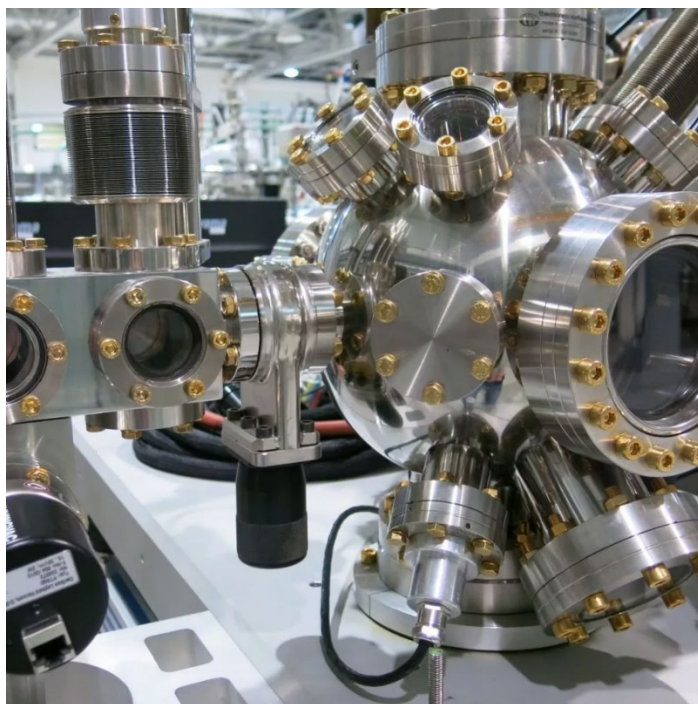
Владимирский государственный университет

В. Н. ЛОБКО

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ И ХИМИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Вакуумная техника

Учебное пособие



Владимир 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

В. Н. ЛОБКО

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ
И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вакуумная техника

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2023

ISBN 978-5-9984-1860-0

© Лобко В. Н., 2023

УДК 536.5

ББК 35.10

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры химических технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Е. С. Пикалов

Председатель правления
ООО «НПП "Макромер" имени В. С. Лебедева»
А. О. Стюнина

Главный конструктор ООО «Орион-Р»
М. П. Абламцев

Лобко, В. Н. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. Вакуумная техника [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. Н. Лобко ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 234 с. – ISBN 978-5-9984-1860-0. – Электрон. дан. (423 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows 7/10 ; встроен. проигрыватель видеофайлов ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Содержит теоретические основы и некоторые вопросы практической реализации такого важнейшего для химии и химической технологии понятия, как вакуум. Рассмотрены проблемы распределения молекул по скоростям, основные параметры поведения молекул, степени вакуума и средства его получения.

Предназначено для студентов направлений подготовки 04.04.01 – Химия, 18.04.01 – Химическая технология.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 3. Ил. 179. Библиогр.: 20 назв.

ISBN 978-5-9984-1860-0

© Лобко В. Н., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

z0	ВВЕДЕНИЕ	6
z1	Глава 1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ	8
z2	§ 1. Введение	8
z3	§ 2. Распределение молекул газа по объёму в отсутствие внешних сил. Распределение Максвелла	9
z4	§ 3. Распределение молекул газа по абсолютным значениям скорости	19
z5	§ 4. Распределение молекул при наличии потенциальных силовых полей. Распределение Больцмана	25
z6	§ 5. Распределение Гиббса	33
z7	Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ФИЗИКИ ВАКУУМА. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ	37
z8	§ 1. Понятие давления. Число соударений молекул со стенкой сосуда в единицу времени	37
z9	§ 2. Средняя длина свободного пробега молекул	41
z10	§ 3. Понятие о вакууме. Степени вакуума	47
z11	§ 4. Описание некоторых свойств газов, играющих заметную роль в вакуумной технике. Вязкость. Теплопроводность	53
z12	§ 5. Сорбция и диффузия газов в твёрдых телах	60
z13	§ 6. Режимы течения газа по трубопроводам	68
z14	§ 7. Температурное равновесие давлений	70
z15	§ 8. Понятие об откачке вакуумных систем. Основное уравнение вакуумной техники	72

z16	Глава 3. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. МЕХАНИЧЕСКИЕ ОБЪЁМНЫЕ НАСОСЫ	75
z17	§ 1. Введение	75
z18	§ 2. Поршневые вакуумные насосы	79
z19	§ 3. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (ЖКВН)	86
z20	§ 4. Спиральные вакуумные насосы	91
z21	§ 5. Двухроторные вакуумные насосы	94
z22	§ 6. Пластинчато-роторные и пластинчато-статорные вакуумные насосы	104
z23	§ 7. Плунжерные (золотниковые) вакуумные насосы	117
z24	§ 8. Мембранные (диафрагменные) вакуумные насосы	120
z25	§ 9. Винтовые вакуумные насосы	125
z26	§ 10. Турбомолекулярные насосы	128
z27	Глава 4. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. СТРУЙНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ	143
z28	§ 1. Жидкостно-струйные насосы	143
z29	§ 2. Пароэжекторные насосы	148
z30	§ 3. Бустерные насосы	152
z31	§ 4. Диффузионные насосы	156
z32	§ 5. Вакуумные ловушки	173
z33	Глава 5. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ	181
z34	§ 1. Геттерная откачка. Испарители	181
z35	§ 2. Испарительные геттерные насосы	185
z36	§ 3. Геттерно-ионные насосы	190
z37	§ 4. Магнитные электроразрядные насосы	203
z38	Глава 6. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ	216
z39	§ 1. Основы криогенной откачки. Типы криогенных насосов	216
z40	§ 2. Криоконденсационные насосы	222

z41 § 3. Криоадсорбционные насосы	223
z42 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	229
z43 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	230
z44 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	232

v0 ВВЕДЕНИЕ

Вакуумные технологии используются во многих отраслях химической промышленности, таких как технология производства неорганических материалов, органический синтез, электрохимия; в связанных с химией и основанных на химическом взаимодействии смежных отраслях металлургии, атомной и электронной промышленности, фармацевтики. Для успешной профессиональной деятельности специалисты-химики должны разбираться в вопросах, касающихся вакуумной техники как одной из высоких технологий.

Вакуумные кристаллизационные и дисцилляционные установки применяются при производстве красителей и азотных удобрений; вакуум-фильтры – для ускорения производства сульфатной целлюлозы, антибиотиков, депарафинизации смазочных масел, обогащения руд; вакуумная сушка – в производстве синтетических волокон, полиамидов, аминопластов, полиэтилена, органических растворителей. Вакуум используется в производстве сверхчистых веществ, полупроводников и других специальных материалов, в нанотехнологиях. Широко используются плазменная обработка в вакууме; диффузионная сварка керамики и металла, стали и алюминия; плазменно-химическое травление; выпаривание в вакууме – для опреснения морской воды, в солеварении, сахарной промышленности; вакуумное напыление и металлизация пластмасс, бумаги и тканей. Вакуумная пропитка распространена в производстве трансформаторов, электродвигателей, конденсаторов, кабелей. В металлургии используются процессы, связанные с химией и химической технологией, – вакуумная плавка, порошковая металлургия в вакууме и т.д. Без вакуумной техники невозможны научные исследования в области химии и химической технологии – изучение свойств чистых веществ и скоростей химических реакций, поверхностных процессов, тепловых процессов и многих других.

В учебном пособии описаны основные особенности вакуумной техники, рассмотрены теоретические основы и некоторые прикладные аспекты.

Следует особо подчеркнуть, что *учебное пособие не предназначено для профессиональных вакуумщиков*, в нём освещены указанные вопросы лишь в объёме, необходимом для специалистов-

химиков и химико-технологов. В издании не рассматриваются вопросы расчёта и конструирования вакуумных систем и агрегатов, средств откачки и измерения вакуума. В прикладном аспекте упор сделан только на разъяснение устройства и принципа действия вакуумных узлов и агрегатов, их преимуществ и недостатков. Профессионализм будущих химиков во многом будет формироваться знаниями о работе вакуумных систем, применяемых на производстве и в научной области.

При создании пособия были использованы внутренние гиперссылки, которые позволяют перейти из оглавления к конкретному параграфу или главе («z№»). Для возврата в оглавление используются ссылки «v№».

Весь демонстрационный материал, представленный в отдельной папке Animation, взят из открытых источников (web-ссылки указаны в тексте). Демонстрационные ролики представлены отдельными автономными файлами (расширение .mp4), не связанными с Интернетом. Для запуска ролика нужно войти в папку Animation и открыть файл, указанный в тексте.

v1 Глава 1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

v2 § 1. Введение

Современное состояние развития вакуумной техники, которую можно отнести к области высоких технологий, было достигнуто на основе глубокой теоретической проработки вопросов фундаментальной науки, относящихся к этой области. Успехами, которыми может гордиться такая, казалось бы сугубо прикладная отрасль, как вакуумная техника (обратите внимание на название), она обязана прочному теоретическому базису, который даёт молекулярная статистическая физика, термодинамика, физическая химия и многие отрасли физики.

Рассмотрение теоретических основ построения вакуумных систем и средств создания и измерения вакуума следует начать с основных положений молекулярной статистической физики. Описание поведения газовых систем представляют теории распределения молекул по различным параметрам Максвелла, Больцмана и Гиббса. Многие результаты, полученные в этих теориях, непосредственно используются в вакуумной технике на уровне формул для описания поведения молекул газа в системах, градации степеней вакуума, условий работы тех или иных вакуумных машин и устройств.

Распределение Максвелла молекул по импульсам, скоростям и энергиям при отсутствии действия внешних силовых полей создало основу для позднейших более точных описаний. Эта теория исходит из представлений о шестимерном фазовом пространстве (три линейные координаты и три координаты проекций импульса). Описание распределения Максвелла относится к одной, произвольно взятой, молекуле газа, и, значит, носит статистический характер.

Распределение Больцмана расширяет и дополняет теорию Максвелла, так как рассматривает газовую систему, находящуюся под действием внешнего силового поля, такого, как гравитационное поле Земли. Практически все вакуумные системы находятся именно в таких условиях, поэтому при их проектировании и эксплуатации необходимо учитывать данный фактор. Распределение Больцмана также относится к одной, произвольно взятой, молекуле газа.

Распределение Гиббса рассматривает не одну молекулу газа, а всю их совокупность, и оперирует уже $6N$ -мерным пространством линейных координат и импульсов. Это позволяет создать полную статистическую модель газовой системы. По результирующим уравнениям этой теории можно рассчитать термодинамические функции; результаты этих расчётов совпадают с выводами классической термодинамики.

v3 § 2. Распределение молекул газа по объёму в отсутствие внешних сил. Распределение Максвелла

Если на объём, занимаемый газом, не действуют внешние силы, такие, например, как сила тяжести, то составляющие его молекулы будут распределены по предоставленному объёму V статистически равномерно. Рассмотрим входящий в V элементарный объём $d\tau$, достаточно малый, чтобы обладать свойствами бесконечно малой величины, но содержащий такое достаточно большое количество частиц, чтобы к ним могли быть применены статистические закономерности. Это означает, что среднее число молекул $\langle n \rangle$ в нём будет одинаково для любого такого объёма, где бы он ни находился:

$$\langle n \rangle = N \frac{d\tau}{V}, \quad (1)$$

здесь N – общее число молекул в V .

Это утверждение носит статистический характер; в любой фиксированный момент времени реальное число молекул в равновеликих $d\tau$ может немного отличаться от $\langle n \rangle$ в силу наличия флуктуаций – небольших кратковременных отклонений от равновесия.

Молекулы в рассматриваемом объёме V находятся в постоянном хаотическом движении, сталкиваются между собой и ударяются в стенки сосуда, при этом постоянно меняются их координаты, направление движения, скорость, импульс, энергия. Поскольку через импульс, который является величиной векторной, могут быть выражены и скорость, и энергия, то для полного описания движения отдельной частицы достаточно координат и импульса. В декартовой системе координат пространство имеет три размера (трёхмерное пространство); а импульс может быть выражен через три проекции на

оси, то есть тоже имеет три размера. Таким образом, мы приходим к необходимости введения так называемого **фазового пространства** для механических систем, шестимерного, то есть имеющего три пространственные координаты и три проекции импульса. Строго говоря, такое фазовое пространство применимо только для идеальных газов, когда молекулы можно считать материальными точками.

Шесть координат фазового пространства относятся к конкретной молекуле; для описания движения всей совокупности частиц это число должно быть умножено на N . В итоге, в силу очень большой величины N , получается совершенно нерешаемая задача в экспериментальном и вычислительном аспектах. Это приводит к необходимости **статистического описания** данной системы.

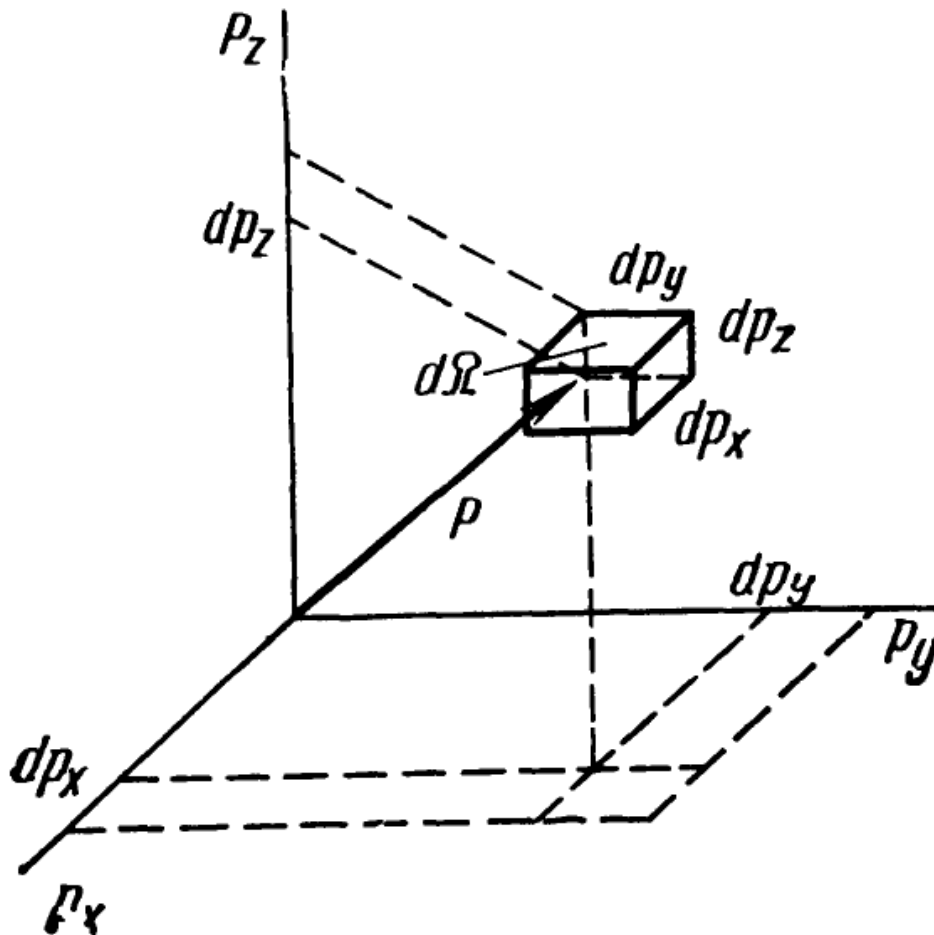


Рис. 1. Элементарный прямоугольный объём $d\Omega$ в пространстве импульсов [1, с. 44]

Рассмотрим **пространство импульсов**, как составляющую фазового пространства. Строго говоря, в любой момент времени мы будем иметь дискретный набор импульсов для каждой молекулы по всей их совокупности, но, опять-таки, в силу очень большой величины N , импульс p можно считать непрерывной случайной величиной, и тогда он может быть описан плотностью вероятности w_p . При этом в пространстве импульсов рассматривается элементарный прямоугольный объём $d\Omega$ (заметим, что он отличается от $d\tau$, который берётся по линейным координатам):

$$d\Omega = dp_x dp_y dp_z, \quad (2)$$

где p_x , p_y и p_z – проекции импульса на оси координат (см. рис 1). Для этого объёма мы имеем вероятность dW того, что проекции импульса какой-то конкретной молекулы попадут в интервалы $p_x \div (p_x + dp_x)$, $p_y \div (p_y + dp_y)$ и $p_z \div (p_z + dp_z)$. Тогда искомая плотность вероятности будет входить в соотношение:

$$dW = w_p d\Omega. \quad (3)$$

Максвелл (1859 г.) предложил найти вид w_p и dW , сделав два предположения:

1) Плотность вероятности w_p обладает свойством **изотропности**, что означает одинаковую вероятность движения частицы в любом направлении (то есть – направления импульса).

2) **Независимость** движения частицы от выбора системы координат и величин проекций импульса на оси.

На основе этих предположений было показано, что плотности вероятностей проекций импульсов w_{px} , w_{py} и w_{pz} – функции чётные, следовательно, – зависят от квадратов проекций импульсов:

$$\begin{aligned} w_{px} &= \varphi(p_x^2), \\ w_{py} &= \varphi(p_y^2), \\ w_{pz} &= \varphi(p_z^2), \end{aligned} \quad (4)$$

где функция φ – одна и та же. Тогда плотность вероятности w_p будет равна:

$$w_p = \varphi(p_x^2) \cdot \varphi(p_y^2) \cdot \varphi(p_z^2). \quad (5)$$

С другой стороны, она, по свойству изотропности импульса, должна зависеть только от его величины и не зависеть от направления, и выражаться через другую функцию ψ :

$$w_p = \psi(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) = \psi(p^2). \quad (6)$$

Вид этих введённых функций неизвестен; чтобы определить его, нужно скомбинировать (5) и (6):

$$\psi(p^2) = \varphi(p_x^2) \cdot \varphi(p_y^2) \cdot \varphi(p_z^2). \quad (7)$$

После логарифмирования и дифференцирования можно получить соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{\psi'(p^2)}{\psi(p^2)} &= \frac{\varphi'(p_x^2)}{\varphi(p_x^2)}, \\ \frac{\psi'(p^2)}{\psi(p^2)} &= \frac{\varphi'(p_y^2)}{\varphi(p_y^2)}, \\ \frac{\psi'(p^2)}{\psi(p^2)} &= \frac{\varphi'(p_z^2)}{\varphi(p_z^2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

из которых следует:

$$\frac{\varphi'(p_x^2)}{\varphi(p_x^2)} = \frac{\varphi'(p_y^2)}{\varphi(p_y^2)} = \frac{\varphi'(p_z^2)}{\varphi(p_z^2)}. \quad (9)$$

В каждую из этих дробей входят проекции импульсов только по одной оси, и, так как эти отношения равны между собой, то на самом деле они не могут зависеть от соответствующих аргументов, то есть являются константой, которую можно обозначить $(-\beta)$. Тогда будет иметь место дифференциальное уравнение:

$$\frac{\varphi'}{\varphi} = -\beta, \quad (10)$$

решение которого известно из математики. Для трёх проекций импульсов оно будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \varphi(p_x^2) &= Ce^{-\beta p_x^2}, \\ \varphi(p_y^2) &= Ce^{-\beta p_y^2}, \\ \varphi(p_z^2) &= Ce^{-\beta p_z^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где C – ещё одна константа. Если функция φ станет известной, то функция ψ будет определяться по (7). От (11) с учётом (2) можно перейти к вероятности по проекциям импульсов:

$$\begin{aligned} dW_{px} &= Ce^{-\beta p_x^2} dp_x, \\ dW_{py} &= Ce^{-\beta p_y^2} dp_y, \\ dW_{pz} &= Ce^{-\beta p_z^2} dp_z, \end{aligned} \quad (12)$$

и по объёму $d\Omega$:

$$dW = C^3 e^{-\beta p^2} d\Omega. \quad (13)$$

То есть искомая вероятность dW того, что импульс какой-то конкретной молекулы попадёт в объём $d\Omega$, будет определяться (13), где константы C и β должны быть получены из дополнительных условий.

Из условия нормировки:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} w_{px} dp_x &= 1, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} w_{py} dp_y &= 1, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} w_{pz} dp_z &= 1, \end{aligned} \quad (14)$$

которое следует из того, что при интегрировании по всему пространству проекции импульса будут иметь какие-то конкретные значения (с единичной вероятностью), можно выразить константу C , и, после интегрирования, – получить её связь с параметром β :

$$C = \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \quad (15)$$

(подробнее – см. [1, с. 47]).

С другой стороны, параметр β , в приближении идеального одноатомного газа, будет связан с абсолютной температурой T :

$$\beta = \frac{1}{2m_0 kT}, \quad (16)$$

где k – постоянная Больцмана, m_0 – масса молекулы. (Подробный вывод см. [1, с. 47 – 49]). Параметр β носит название **плотность вероятности Максвелла**.

Таким образом, обе константы становятся определёнными, и, из (2), (3), (12), (13), (15) и (16) можно получить:

$$w_{p_x} dp_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0 kT}} e^{-p_x^2/(2m_0 kT)} dp_x,$$

$$w_{p_y} dp_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0 kT}} e^{-p_y^2/(2m_0 kT)} dp_y, \quad (17)$$

$$w_{p_z} dp_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0 kT}} e^{-p_z^2/(2m_0 kT)} dp_z,$$

$$w_p d\Omega = \frac{1}{\sqrt{(2\pi m_0 kT)^3}} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\Omega. \quad (18)$$

Нетрудно видеть, что форма этих зависимостей совпадает с выражением вероятности для **нормального распределения Гаусса**, согласно которому вероятность dW того, что какая-то непрерывная случайная величина z может принимать значения от z до $z + dz$, будет равна:

$$dW(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} e^{-(z-\langle z \rangle)^2/(2D)} dz, \quad (19)$$

где $\langle z \rangle$ – среднее значение случайной величины z , D – её дисперсия. Таким образом, средние значения проекций импульсов p_x , p_y и p_z равны нулю, а их дисперсия равна:

$$D = \langle p_x^2 \rangle = \langle p_y^2 \rangle = \langle p_z^2 \rangle = m_0 kT, \quad (20)$$

то есть совпадает со средними значениями квадратов проекций импульсов.

На рис. 2 показана зависимость плотности вероятности от проекции импульса для x -составляющей. Кривая симметрична относительно оси ординат. При $p_x = 0$ имеется максимум плотности вероятности $w_{p_x MAX}$:

$$w_{p_x MAX} = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0 kT}}. \quad (21)$$

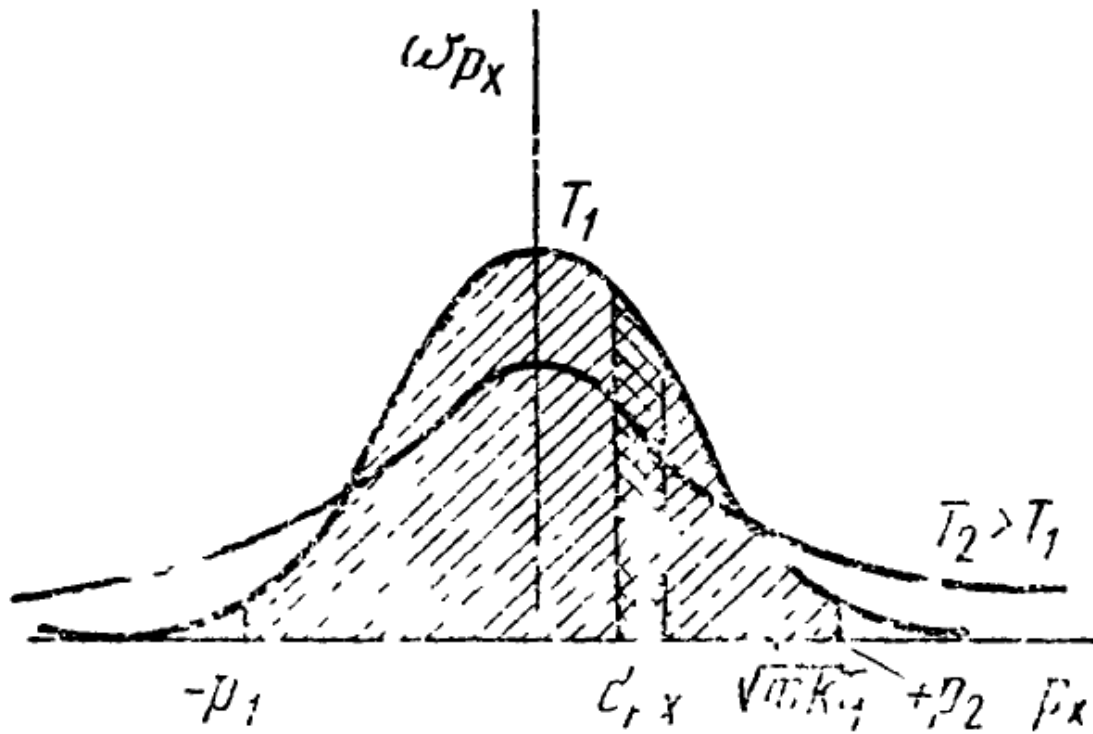


Рис. 2. Зависимость плотности вероятности w_{px} от p_x для x -компоненты [1, с. 50]

При среднеквадратичном значении p_x (корень из дисперсии):

$$p_x = \sqrt{m_0 k T} \quad (22)$$

плотность вероятности уменьшается в $\sqrt{e} = 1,65$ раза от максимума и затем асимптотически приближается к нулю.

С увеличением температуры ($T_2 > T_1$) w_{pxMAX} становится меньше (см. (21)), а среднеквадратические значения p_x и $-p_x$ — больше по модулю (см. (22)). Так как по условию нормировки площади под обеими кривыми, то есть — вероятности, равны единице, это приводит к «растяжению» кривой по горизонтали (рис. 2). На рисунке также показана вероятность попадания p_x в бесконечно малый интервал dp_x — двойная штриховка, и в конечный интервал от $-p_1$ до $+p_2$ — заштрихованная область.

От (17) и (18) можно легко перейти к **распределению по скоростям** v с учётом того, что $p = m_0 v$ и $dp = m_0 dv$:

$$w_{vx} dv_x = \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} e^{-m_0 v_x^2 / (2kT)} dv_x,$$

$$w_{vy} dv_y = \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} e^{-m_0 v_y^2 / (2kT)} dv_y, \quad (23)$$

$$w_{vz} dv_z = \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} e^{-m_0 v_z^2 / (2kT)} dv_z,$$

$$w_v dv_x dv_y dv_z = \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_0 v^2 / (2kT)} dv_x dv_y dv_z. \quad (24)$$

Для того, чтобы получить распределение по энергиям, удобнее перейти от проекций импульса в декартовых координатах к **модулю импульса** и сферическим координатам. Это позволяет получить **распределение плотности вероятности модуля импульса** w_p для шарового слоя толщиной dp (вывод см. [1, с. 54 – 55]):

$$w_p dp = \frac{4\pi p^2}{(2\pi m_0 kT)^{3/2}} e^{-p^2 / (2m_0 kT)} dp. \quad (25)$$

В идеальном газе молекулы, по определению, обладают только кинетической энергией ε :

$$\varepsilon = \frac{p^2}{2m_0}, \quad (26)$$

откуда $p = \sqrt{2m_0 \varepsilon}$. Продифференцируем это выражение:

$$dp = \sqrt{\frac{m_0}{2}} \cdot \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (27)$$

и подставим в (25); с учётом того, что вероятность $dW = w_p dp = w_\varepsilon d\varepsilon$, получим:

$$w_\varepsilon d\varepsilon = \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\pi} (kT)^{3/2}} e^{-\varepsilon / (kT)} d\varepsilon. \quad (28)$$

Это выражение для вероятности того, что энергия частицы находится в интервале от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$ (w_ε – плотность вероятности). Таким образом, (28) – **распределение по энергиям**.

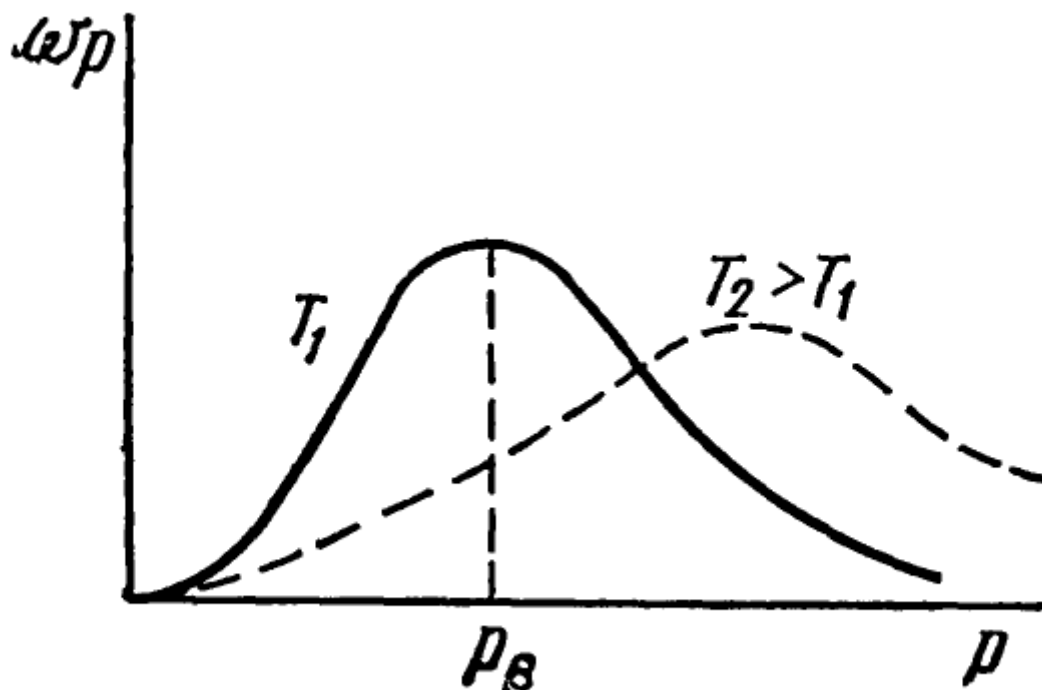


Рис. 3. Зависимость плотности вероятности w_p от модуля импульса p [1, с. 56]

По формуле (25) можно построить график зависимости w_p от p – рис. 3. Значения модуля импульса всегда положительны; кривая выходит из начала координат (при $p = 0$ $w_p = 0$). При малых значениях p экспонента близка к единице и $w_p \sim p^2$, то есть кривая представляет собой параболу и сравнительно быстро растёт. При больших значениях модуля импульса $p \gg \sqrt{2m_0kT}$ из-за отрицательной экспоненты плотность вероятности быстро убывает. Это приводит к появлению максимума на кривой в «переходной» области. Необходимо отметить, что в отличие от рис. 2 «крылья» графика несимметричны: левая часть возрастает быстро, а правая падает значительно медленнее.

Для определения абсциссы максимума – **наиболее вероятного значения импульса** p_B , – нужно продифференцировать w_p и приравнять производную нулю:

$$\frac{dw_p}{dp} = \frac{4\pi}{(2\pi m_0 kT)^{3/2}} \left(2pe^{-p^2/(2m_0 kT)} - \frac{p^3}{m_0 kT} e^{-p^2/(2m_0 kT)} \right) = 0. \quad (29)$$

(В (25) дробь кроме p^2 выносим вперёд как константу, тогда под производной остаётся произведение p^2 на экспоненту. Дифференцирование произведения даёт сумму двух произведений – выражение в скобках в (29). Производная экспоненты берётся как производная сложной функции).

В формуле (29) рассматриваем среднюю часть и ноль справа. Дробь, как константу, отбрасываем, тогда слагаемые в скобках по модулю равны друг другу, на экспоненту сокращаем и получаем:

$$p_e = \sqrt{2m_0 kT} \quad (30)$$

– **наиболее вероятное значение импульса.**

Для определения **плотности вероятности в максимуме** из (25) выразим w_p и подставим выражение (30):

$$w_p(p_e) = \frac{4\pi}{e\sqrt{2m_0 k}} \frac{1}{\sqrt{T}}. \quad (31)$$

Таким образом, плотность вероятности в максимуме зависит только от природы молекулы (массы m_0) и температуры (обратно пропорциональна корню из температуры). Это означает, что при повышении температуры с T_1 до T_2 (рис. 3, штриховая линия) пик станет ниже и сместится направо, а сама кривая станет более «размытой», так как площадь под кривыми (то есть вероятность, равная единице) не изменится.

Из формулы (25) можно получить другие, кроме наиболее вероятного значения импульса (30), характеристические величины: среднее и среднеквадратическое (подробный вывод – см. [1, с. 57–58]). Приведём эти выражения:

Наиболее вероятное значение:

$$p_e = \sqrt{2m_0 kT}; \quad (32)$$

среднее значение:

$$p_c = \langle p \rangle = \sqrt{\frac{8m_0 kT}{\pi}}; \quad (33)$$

среднеквадратическое значение:

$$p_k = \sqrt{\langle p^2 \rangle} = \sqrt{3m_0kT}. \quad (34)$$

v4 § 3. Распределение молекул газа по абсолютным значениям скорости

Плотности вероятности различных величин в распределении Максвелла позволяют определить **среднее число частиц** dN (как бесконечно малую величину) в объёме $d\tau$ (см. (1)), обладающих определёнными значениями таких величин, как например, импульс, скорость, энергия. Поскольку молекулы в элементах фазового пространства подчиняются законам статистики (см. (1)), и, поэтому, перечисленные параметры могут считаться непрерывными случайными величинами, речь может идти о **функции распределения**. Для фазового пространства такая функция $f(\tau, \Omega)$ для числа частиц определяется как

$$dN = f(\tau, \Omega) d\tau d\Omega. \quad (35)$$

Здесь элементарный объём линейного пространства:

$$d\tau = dx dy dz, \quad (36)$$

а $d\Omega$ выражается по формуле (2).

С другой стороны, если определить концентрацию молекул n , как их количество в единице объёма

$$n = \left[\frac{1}{\text{м}^3} \right], \quad (37)$$

то среднее число этих частиц в элементарном объёме $d\tau$ составит $nd\tau$ и тогда dN будет равно произведению этой величины на вероятность попадания молекул в импульсное пространство $d\Omega$:

$$dN = nd\tau \cdot w_p d\Omega. \quad (38)$$

Из сравнения (35) и (38) имеем:

$$f(\tau, \Omega) = n w_p. \quad (39)$$

По (35), (39) и (18) окончательно получаем:

$$dN = \frac{n}{\sqrt{(2\pi m_0 kT)^3}} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\tau d\Omega. \quad (40)$$

Наибольший интерес представляет доля молекул от общего их количества, то есть dN/N , скорость которых лежит в пределах от v до $v + dv$. При этом надо различать **скорость** любой, наугад взятой, **молекулы по какой-то одной оси** (например – x) v_x , **скорость движения в трёхмерном объёме**, которая определяется произведением $dv_x dv_y dv_z$, то есть скорость в пределах от v_x до $v_x + dv_x$, от v_y до $v_y + dv_y$ и от v_z до $v_z + dv_z$, и **абсолютную (линейную) скорость молекулы v , которая не зависит от направления движения**. Доля молекул dN/N фактически представляет собой **вероятность** попадания молекул в соответствующие пределы скорости. Тогда, для первого случая, с учётом (23), **доля молекул от общего количества, имеющих скорости по отдельным осям** соответственно от v_x до $v_x + dv_x$, от v_y до $v_y + dv_y$ и от v_z до $v_z + dv_z$:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} e^{-m_0 v_x^2 / (2kT)} dv_x, \\ \frac{dN}{N} &= \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} e^{-m_0 v_y^2 / (2kT)} dv_y, \\ \frac{dN}{N} &= \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} e^{-m_0 v_z^2 / (2kT)} dv_z. \end{aligned} \tag{41}$$

Выберем одну координатную ось, например x , и рассмотрим одномерное движение всех молекул относительно её. Зависимость удобнее всего представить в осях $\frac{1}{N} \frac{dN}{dv_x} - v_x$, где N – количество молекул, v_x – компонента скорости по выбранной координате одномерного движения x , – рис. 4 (на этом рисунке v_x обозначена как \dot{x}). Наибольшее значение вероятности, равное единице, будет соответствовать нулю на оси абсцисс и максимуму на оси ординат. Вероятность будет уменьшаться симметрично по обе стороны оси ординат. При увеличении температуры максимум становится ниже и «крылья» кривой расплываются. Таким образом, этот график качественно будет иметь тот же самый вид, что и рис. 2 (см.).

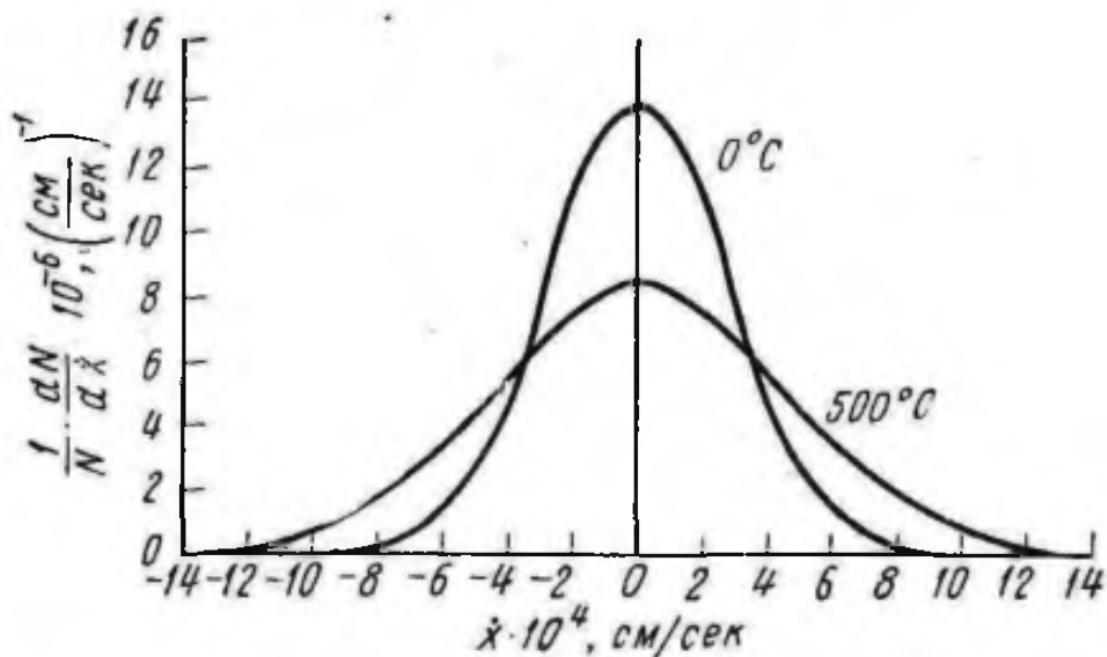


Рис. 4. Распределение молекул по одной компоненте скорости для азота при 0 и 500 °C [2, с. 202]

По аналогии с (41) из (24) можно получить **скорость движения в трёхмерном объёме**, которая будет определяться произведением $dv_x dv_y dv_z$, то есть скорость в пределах от v_x до $v_x + dv_x$, от v_y до $v_y + dv_y$ и от v_z до $v_z + dv_z$:

$$\frac{dN}{N} = \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_0 v^2 / (2kT)} dv_x dv_y dv_z. \quad (42)$$

Качественно такая зависимость будет отвечать виду рис. 4. Полученные распределения молекул по скоростям, (41), (42) и рис. 4, то есть в привязке к осям координат, отвечают поведению системы на макроуровне. Если имеет место равновесие и отсутствие действия внешних сил, то, хотя каждая отдельно взятая молекула хаотично движется, система в целом не перемещается. Поэтому наиболее вероятная усреднённая скорость всех молекул равна нулю. Другими словами, нулю равен общий вектор скорости. Это отвечает здравому смыслу, но, с другой стороны, такой подход не позволяет описывать поведение системы на микроуровне, в частности, не объясняет протекание химических реакций. Таким образом, это представление

скорости малоинформативно и необходимо рассмотреть абсолютную (линейную) скорость молекулы, которая не будет зависеть от направления движения.

Уточним различие этих двух трактовок понимания скорости. «Если рассматривать движение молекул на микроуровне, то совершенно очевидно, что молекулы двигаются в разных направлениях, постоянно сталкиваются между собой и со стенками сосуда и меняют при этом направление движения, координаты, энергию, импульс и скорость поступательного движения. А вот макропараметры системы, находящейся в равновесии, такие как температура, давление, внутренняя энергия и др., не меняются; отсутствует также макродвижение в этой системе (например, диффузия или конвекция)» [3, с. 65 – 66]. Таким образом, для понимания взаимодействия молекул на микроуровне необходимо рассматривать абсолютные линейные скорости молекул вне привязки к общим координатам. С другой стороны, такой подход не позволит судить о поведении системы в целом, поэтому эти две концепции дополняют друг друга.

Максвелл получил распределение молекул по абсолютным значениям скорости v вне зависимости от направления, перейдя от декартовых координат к сферическим и проведя интегрирование по всем возможным направлениям. При этом он получил долю молекул dN / N , скорости которых лежат в пределах от v до $v + dv$:

$$\frac{dN}{N} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT} \right) v^2 dv, \quad (43)$$

это **уравнение Максвелла распределения молекул по скоростям** (1860 г.) (сравните с (24)).

Представим график этой зависимости в осях $\frac{1}{N} \frac{dN}{dv} - v$ (также, как и на рис. 4, здесь dv перенесена в левую часть) – рис. 5 (на этом рисунке v обозначена, как c).

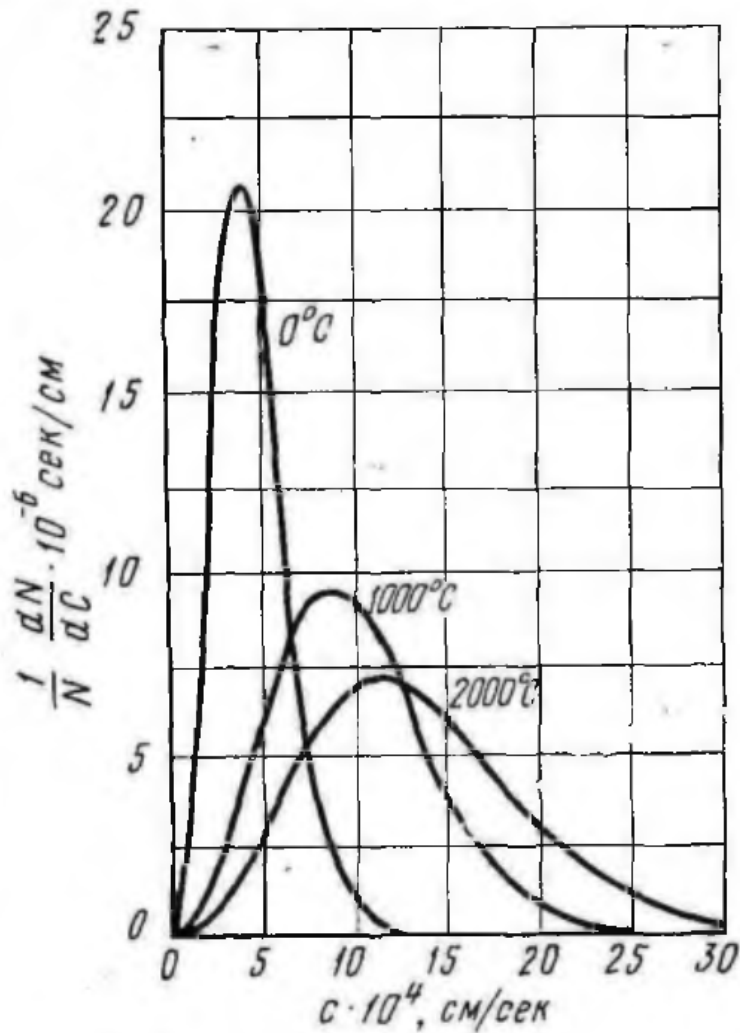


Рис. 5. Распределение молекул азота по скоростям при различных температурах [2, с. 205]

Полученные кривые будут исходить из нуля, проходить через пик и асимптотически приближаться к оси абсцисс. То есть качественно этот график будет соответствовать рис. 3. «Пик на кривых будет соответствовать **наиболее вероятной при данной температуре скорости** α . Как видно из рисунка, при повышении температуры эта скорость смещается вправо (что вполне отвечает здравому смыслу), а высота пика уменьшается, то есть доля молекул со скоростью, близкой α , уменьшается, а «крылья» кривой становятся более пологими так, что площадь под кривыми остаётся постоянной. Таким образом, распределение молекул по трёхмерным скоростям существенно

отличается от одномерного случая (рис. 4), где не имеется величины, подобной α » [3, с. 69].

Если исследовать на экстремум (43), то можно получить выражение для **наиболее вероятной скорости** α :

$$\alpha = \left(\frac{2kT}{m_0} \right)^{1/2}. \quad (44)$$

Это соотношение также можно получить из (32). Таким образом, α пропорциональна квадратному корню температуры. Аналогично, из (33) можно определить **среднюю скорость движения молекул**:

$$v_c = \langle v \rangle = \left(\frac{8kT}{\pi m_0} \right)^{1/2}, \quad (45)$$

а из (34) – **среднюю квадратичную скорость** $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$:

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \left(\frac{3kT}{m_0} \right)^{1/2} = \left(\frac{3}{2} \right)^{1/2} \alpha. \quad (46)$$

Из (44) – (46) можно установить, что:

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} > \langle v \rangle > \alpha. \quad (47)$$

Через среднюю квадратичную скорость можно выразить **давление газа** p :

$$pV_m = RT = \frac{1}{3} N_A m_0 \langle v^2 \rangle \quad (48)$$

и **энергию поступательного движения молекул**:

$$E = \frac{1}{2} N_A m_0 \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} RT. \quad (49)$$

(здесь N_A – число Авогадро, V_m – мольный объём).

Из (97) можно найти **мольную теплоёмкость одноатомного идеального газа** c_V :

$$c_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = \frac{3}{2} R. \quad (50)$$

«Чтобы лучше понять физический смысл зависимости рис. 5, мысленно разобьём ось скоростей на равные интервалы и по оси ординат отложим для i -тых интервалов соответствующие количества частиц N_i (если бы такой подсчёт был возможен), скорости которых

укладываются в интервал от v_{i-1} до v_i – рис. 6. Если через середины вершин столбиков провести плавную кривую, она качественно будет совпадать с кривыми рисунка 5, причём тем точнее, чем мельче разбиения мы сделаем. (Такая же по виду кривая получится, если по оси ординат взять не абсолютные количества частиц N_i , а их изменения ΔN_i , отнесённые к общему числу частиц N). В пределе это даст относительную производную $\frac{1}{N} \frac{dN}{dv}$ » [3, с. 68].

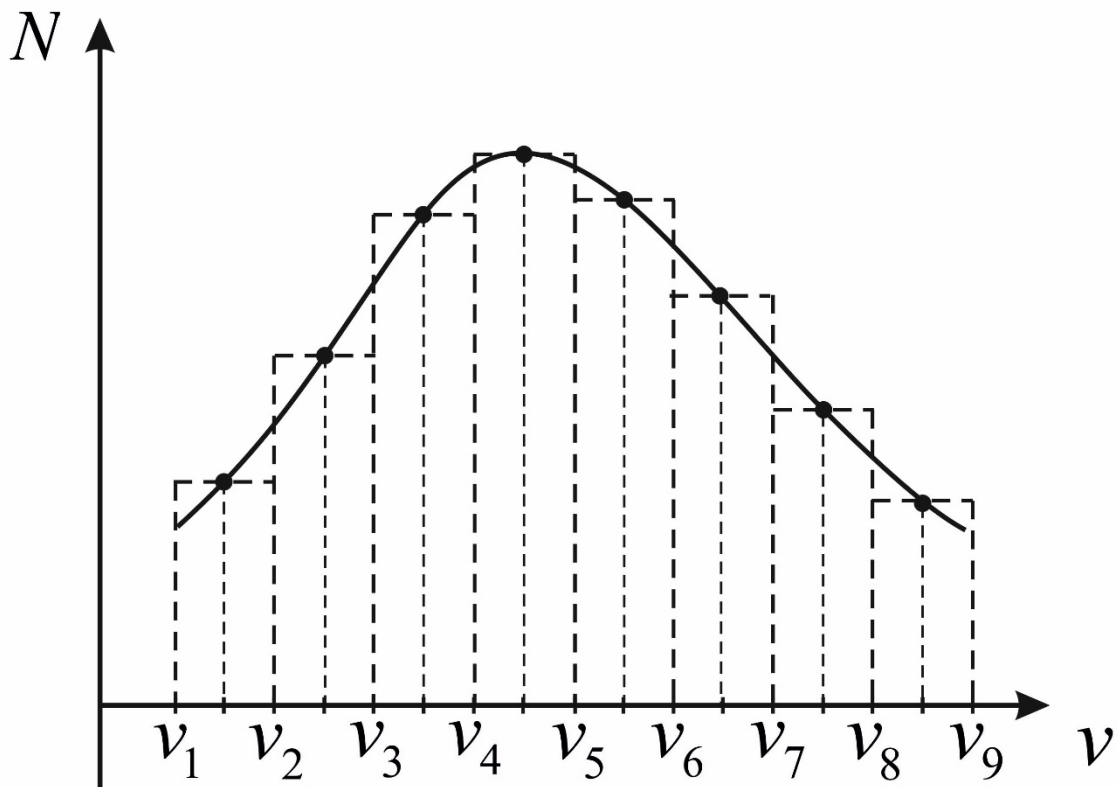


Рис. 6. Диаграмма количеств частиц N_i , имеющих скорость от v_{i-1} до v_i . Кривая строится через середины «столбиков» [3, с. 68]

v5 § 4. Распределение молекул при наличии потенциальных силовых полей. Распределение Больцмана

Все соотношения, касающиеся распределения молекул по Максвеллу, были получены в предположении, что на систему не действуют внешние силовые поля, такие как, например, поле тяготения Земли. Действие последнего на атмосферу хорошо известно: с

увеличением расстояния от поверхности Земли воздух становится более разреженным. Монотонность такого распределения нарушают атмосферные потоки: ветер, ураганы и т. п. В отношении вакуумных систем влияние гравитации Земли будет сохраняться, но с некоторыми особенностями. Все вакуумные системы замкнуты, поэтому не будет влияния случайных сторонних потоков газа. Влияние же внутренних источников возможных потоков газа, таких как откачные системы (вакуумные насосы), натекатели, ловушки и т. д., может быть учтено, так как технические параметры их работы почти всегда известны. Размеры вакуумных установок, как правило, не очень большие, поэтому, чаще всего, влиянием гравитации можно пренебречь. Этот фактор необходимо учитывать для крупноразмерных вакуумных установок и при работе некоторых измерительных систем вакуума.

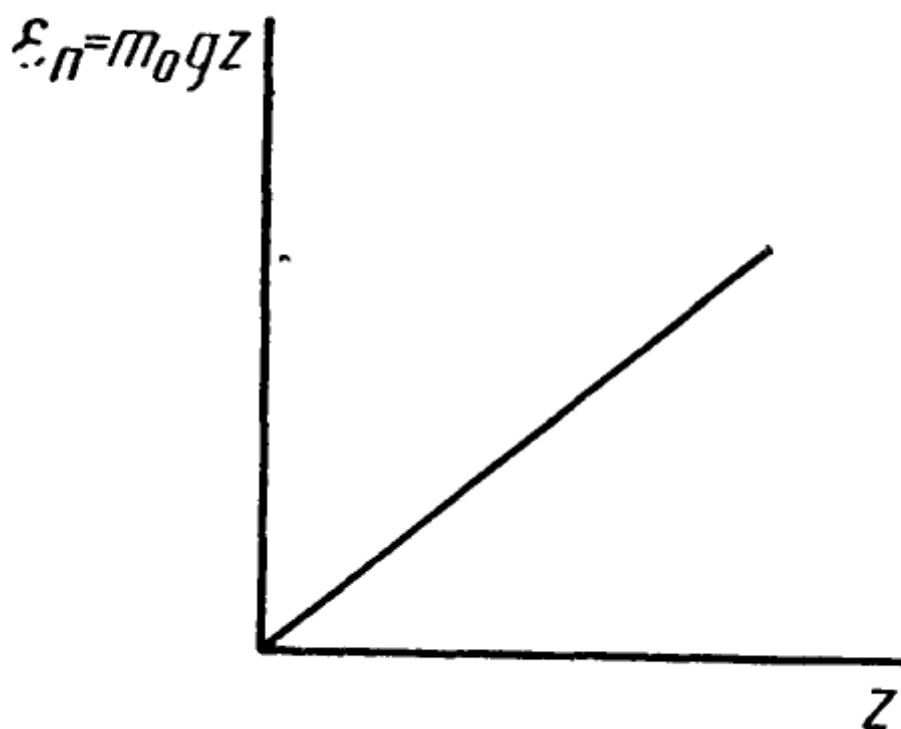


Рис. 7. Зависимость потенциальной энергии молекулы ϵ_n от высоты z
[1, с. 73]

Потенциальная энергия молекулы в поле тяготения Земли равна

$$\epsilon_n = m_0 g z, \quad (51)$$

где g – ускорение свободного падения, z – высота над поверхностью Земли. График этой зависимости представляет собой возрастающую прямую из начала координат (рис. 7). В отсутствие внешних силовых полей потенциальная энергия молекулы, находящейся в сосуде, может быть представлена моделью одномерного **потенциального ящика** размером a . Если начало координат поместить в середину этого ящика, то молекула может находиться в интервале от $-\frac{a}{2}$ до $\frac{a}{2}$ по оси абсцисс и не может выходить за пределы интервала (то есть – за стенки сосуда) – рис. 8.

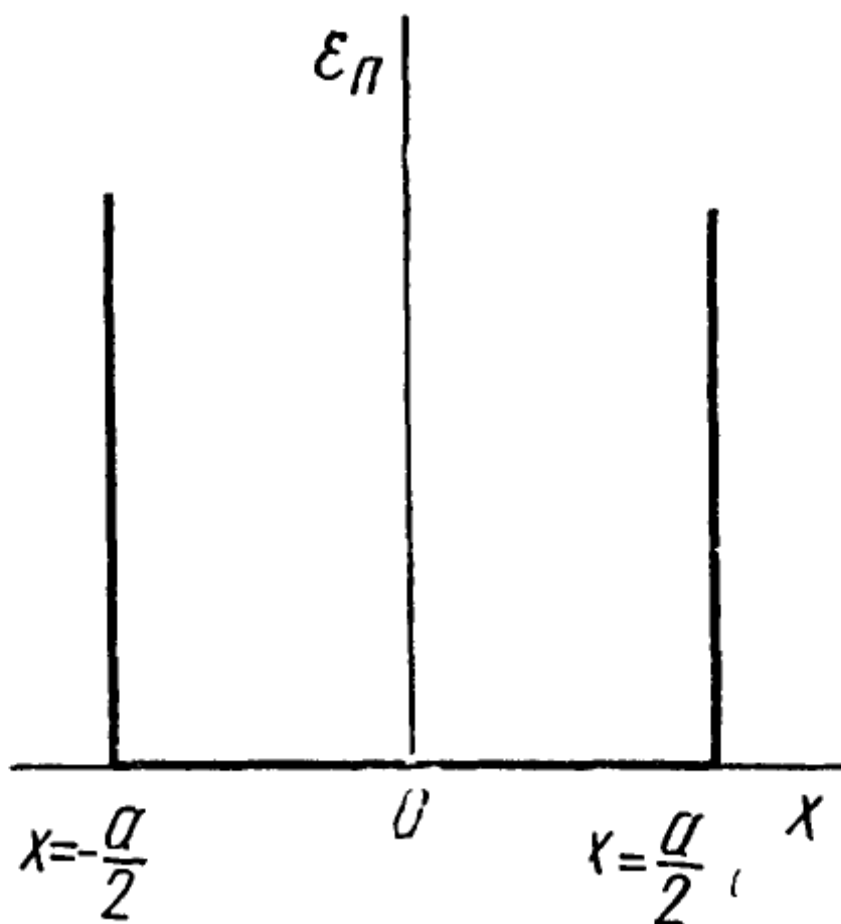


Рис. 8. Потенциальная энергия одной молекулы ϵ_n , находящейся в потенциальном ящике [1, с. 73]

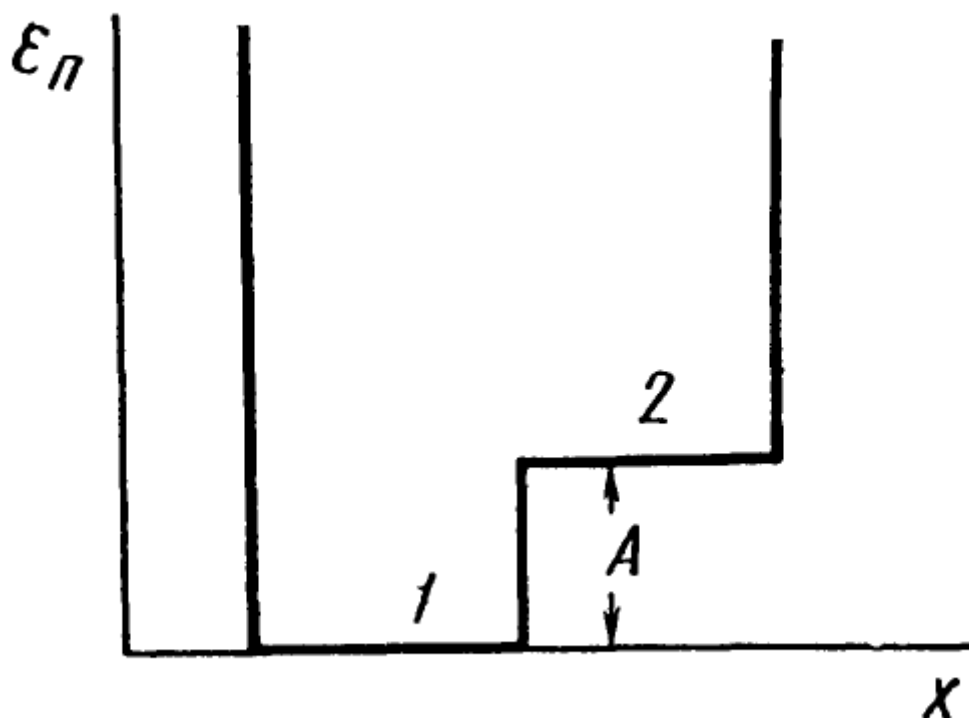


Рис. 9. Потенциальная энергия одной молекулы ϵ_n , находящейся в ступенчатом потенциальном ящике; A – работа, соответствующая разности энергий [1, с. 73]

При этом её потенциальная энергия будет равна 0 (условно). Чтобы смоделировать действие внешнего поля, направленного по горизонтали, разобьём ящик на две части (сосуд 1 и сосуд 2) – рис. 9, и предположим, что переход молекулы из сосуда 1 в сосуд 2 затруднён, а обратный переход свободен. Это означает, что молекула, перешедшая в сосуд 2, совершит работу A и повысит свою потенциальную энергию на эту величину. Аналогией этого является подъём молекулы, находящейся в атмосфере, на более высокий уровень от поверхности Земли. Таким образом, мы будем иметь на рис. 9 потенциальный ящик со ступенчатым дном. Молекулы могут переходить из первого сосуда во второй и обратно, но, во втором случае, – более легко. В каждом из

сосудов мы будем иметь распределение Максвелла по импульсам в соответствии с имеющейся концентрацией и температурой. Такой подход позволяет создать модель распределения молекул при действии внешнего силового поля: в одномерном случае система разбивается на достаточно малые участки (условные «сосуды»), каждый участок описывается обычным распределением Максвелла, общее распределение выстраивается на изменении тех или иных усреднённых параметров (таких, как импульс) в участках. Понятно, что чем мельче будут такие разбиения, тем точнее будет построена модель.

Для математически строго обоснованного создания модели необходимо принять **принцип детального равновесия**: *«В истинном равновесии каждому потоку можно сопоставить ему противоположный, так что равновесие имеет место не только в целом, но и детально по каждой паре противоположных процессов»* [1, с. 74]. Это означает, что равновесие подразумевает не только таковое по какому-то одному параметру (например – по импульсу), но и по другим параметрам тоже. Таким образом, в системе, находящейся под воздействием внешних сил или полей, устанавливается **подвижное равновесие** (или стационарное состояние), несмотря на наличие градиентов интенсивных величин (таких, как усреднённый импульс). В отличие от этого, при построении модели, считается, что на каждом отдельном участке имеет место **полное равновесие**. Таким образом, в модели имеет место ступенчатое распределение, хотя и очень мелкое, тогда как в реальной системе распределение монотонное.

Кроме этого, при построении модели необходимо будет принять **изотермичность системы**. В реальности это часто не соблюдается, например, в атмосфере Земли по высоте температура меняется, но учёт этого приводит к необходимости более сложной модели.

Рассмотрим одномерный случай действия внешних полей на примере поля тяготения Земли (без влияния сторонних факторов). Пусть сила действует вдоль оси x (то есть в нашем примере эта ось направлена вертикально от поверхности) – рис. 10. **Элементарный поток** частиц dJ вдоль оси определяется, как среднее число частиц dN (см. § 3), переходящее в соседний участок из элементарного объёма ($d\tau$ – см. (35)) в единицу времени dt :

$$dJ = \frac{dN}{dt}. \quad (52)$$

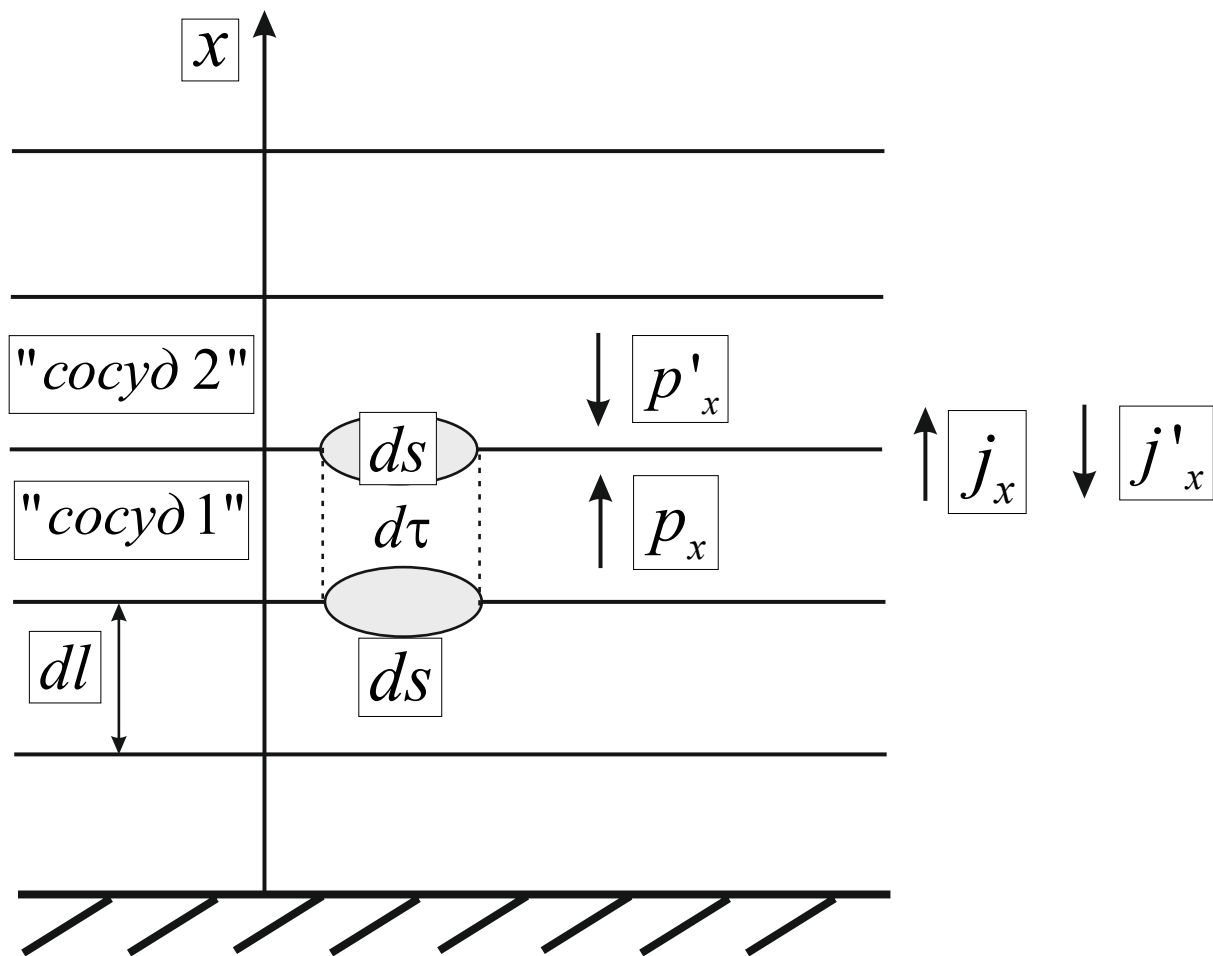


Рис. 10. Распределение молекул под действием внешних сил по координате x (на примере поля тяготения Земли). dl – элементарное перемещение; ds – элементарное сечение; $d\tau$ – элементарный объём; «сосуд 1» и «сосуд 2» – два соседних участка (слоя); p_x и p'_x – направление усреднённого импульса в сосудах 1 и 2 соответственно; dj_x и dj'_x – вектор потока из сосуда 1 в сосуд 2 соответственно

Представим элементарный объём $d\tau$ как

$$d\tau = ds \cdot dl, \quad (53)$$

где ds – элементарное сечение, перпендикулярное оси x , dl – элементарное перемещение по оси x . Скорость такого перемещения можно выразить, как:

$$v = \frac{dl}{dt}. \quad (54)$$

Из (53) и (54) выразим dt и подставим в (52):

$$dJ = v \frac{dN}{d\tau} ds. \quad (55)$$

Более универсальной величиной по сравнению с элементарным потоком dJ является **элементарная плотность потока** dj , которая не зависит от площади поперечного сечения:

$$dj = \frac{dJ}{ds}. \quad (56)$$

Скорость по оси x можно выразить через составляющую импульса p_x :

$$v = \frac{p_x}{m_0}. \quad (57)$$

Из (55), (56), (40) и (57) для оси x получим элементарную плотность потока из «сосуда 1» (слоя) в «сосуд 2»:

$$dj_x = \frac{p_x}{m_0} \frac{n_1}{\sqrt{(2\pi m_0 kT)^3}} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\Omega. \quad (58)$$

где n_1 концентрация молекул в участке («сосуде»), из которого происходит перемещение (в нашем примере – нижний по оси x участок). Предполагается, что компонента импульса p_x направлена по оси x (на рис. 10 – вверх; в примере – против действия силы тяжести) и достаточна по величине для преодоления потенциального барьера (см. рис. 9). В (58) p – полный импульс молекулы в «сосуде 1».

Перейдём к потокам, используя элементарное сечение ds :

$$dj_x ds = \frac{p_x n_1}{m_0 (2\pi m_0 kT)^{3/2}} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\Omega ds. \quad (59)$$

В следующем слое (участке), «сосуде 2» установится усреднённый импульс p'_x , который будет меньше p_x на величину потенциального барьера, полный импульс молекулы p' , определяемый импульсным пространством Ω' , а также концентрация n_2 . По принципу детального равновесия поток $dj_x ds$ должен быть скомпенсирован противопотоком $dj'_x ds$, который, по аналогии с (59) запишется:

$$dj'_x ds = \frac{p'_x n_2}{m_0 (2\pi m_0 kT)^{3/2}} e^{-(p')^2/(2m_0 kT)} d\Omega' ds. \quad (60)$$

Приравниваем правые части (59) и (60), сокращаем на ds и на $(2\pi m_0 kT)^{3/2}$:

$$\frac{p_x n_1}{m_0} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\Omega = \frac{p'_x n_2}{m_0} e^{-(p')^2/(2m_0 kT)} d\Omega'. \quad (61)$$

При переходе молекулы из «сосуда 1» в «сосуд 2» составляющие импульса по осям y и z на этих участках будут попарно равны друг другу (то есть не будут меняться):

$$dp_y = dp'_y \quad dp_z = dp'_z \quad (62)$$

Тогда, с учётом (2) имеем:

$$n_1 e^{-\frac{p^2}{2m_0 kT}} \frac{p_x}{m_0} dp_x = n_2 e^{-\frac{(p')^2}{2m_0 kT}} \frac{p'_x}{m_0} dp'_x \quad (63)$$

Так как

$$d \frac{p_x^2}{2m_0} = \frac{p_x}{m_0} dp_x; \quad d \frac{(p'_x)^2}{2m_0} = \frac{p'_x}{m_0} dp'_x, \quad (64)$$

получаем:

$$n_1 e^{-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m_0 kT}} d \frac{p_x^2}{2m_0} = n_2 e^{-\frac{(p'_x)^2 + (p'_y)^2 + (p'_z)^2}{2m_0 kT}} d \frac{(p'_x)^2}{2m_0}. \quad (65)$$

Когда молекула переходит из «сосуда 1» в «сосуд 2», её импульс уменьшается с p_x до p'_x , а соответствующая кинетическая энергия также уменьшается на величину прироста потенциальной $\Delta\varepsilon_n$, то есть, по закону сохранения энергии:

$$\frac{p_x^2}{2m_0} = \Delta\varepsilon_n + \frac{(p'_x)^2}{2m_0}. \quad (66)$$

Дифференцируем (66) ($\Delta\varepsilon_n$ не зависит от импульса):

$$d \frac{p_x^2}{2m_0} = d \frac{(p'_x)^2}{2m_0}. \quad (67)$$

С учётом (67), (66) и (62) из (65) имеем:

$$n_1 e^{-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m_0 kT}} = n_2 e^{-\frac{(p'_x)^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m_0 kT}} = n_2 e^{\frac{\Delta\varepsilon_n}{kT}} e^{-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m_0 kT}}, \quad (68)$$

откуда получается **распределение Больцмана** (1877 г.), которое связывает концентрации молекул в соседних слоях:

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{\Delta \varepsilon_n}{kT}}. \quad (69)$$

Однако распределение Больцмана можно отнести не только к соседним, но и к любым двум слоям разбиения. Если обозначить какой-нибудь слой индексом 0, то концентрация на расстоянии x будет вычисляться по формуле:

$$n(x) = n(0) e^{-(\varepsilon_n(x) - \varepsilon_n(0))/(kT)}. \quad (70)$$

От формулы (69), описывающей одномерный случай, можно перейти к трёхмерному представлению, введя **радиус-вектор** \vec{r} :

$$n(\vec{r}_2) = n(\vec{r}_1) e^{-(\varepsilon_n(\vec{r}_2) - \varepsilon_n(\vec{r}_1))/(kT)} \quad (71)$$

– **распределение Больцмана для общего случая.**

Также из распределения Больцмана (70) можно получить один из видов **барометрической формулы**, которая описывает изменение плотности атмосферы с высотой в условиях равновесия. Потенциальная энергия на высоте z над уровнем моря будет равна:

$$\varepsilon_n(z) = m_0 g z, \quad (72)$$

где g – ускорение свободного падения. Тогда:

$$n(z) = n(0) e^{-m_0 g z / (kT)}, \quad (73)$$

или, в силу пропорциональности давления и концентрации:

$$p(z) = p_0 e^{-m_0 g z / (kT)}. \quad (74)$$

§ 5. Распределение Гиббса

В случае действия на систему внешних полей при равновесии (или в стационарном состоянии) распределение частиц в пространстве неоднородно и число частиц в элементарном объёме $d\tau$, будет определяться формулой

$$n(\vec{r}) d\tau, \quad (75)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, n – переменная концентрация.

Распределение по импульсам в нашем случае будет определяться распределением Максвелла (18) и число частиц в объёме $d\tau$ с импульсом из $d\Omega$, будет равно произведению (75) на (18):

$$dN = n(\vec{r}) d\tau dW = \frac{n(\vec{r})}{(2\pi m_0 kT)^{3/2}} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\tau d\Omega. \quad (76)$$

Полученная функция распределения отличается от (40) только переменным значением концентрации $n(\vec{r})$, которое определяется распределением Больцмана (71). **Функцию распределения Максвелла-Больцмана** можно получить комбинацией (71) и (76):

$$dN = n(\vec{r}_1) e^{\varepsilon_n(\vec{r}_1)/(kT)} \frac{1}{(2\pi m_0 kT)^{3/2}} e^{-\varepsilon_n(\vec{r})/(kT)} e^{-p^2/(2m_0 kT)} d\tau d\Omega, \quad (77)$$

где $n(\vec{r}_1)$ и $\varepsilon_n(\vec{r}_1)$ – соответственно концентрация и потенциальная энергия молекул в некоторой («опорной») точке \vec{r}_1 .

В формуле (77) множитель, не зависящий от текущих линейных координат и импульса, обозначим C_N

$$C_N = n(\vec{r}_1) e^{\varepsilon_n(\vec{r}_1)/(kT)} \frac{1}{(2\pi m_0 kT)^{3/2}}. \quad (78)$$

Для определения этой константы необходимо знать концентрацию молекул хотя бы в одной точке пространства. Также она может быть определена по условию нормировки (интегрирование комбинации (77) и (78)).

Также в (77) в двух правых экспонентах можно увидеть потенциальную и кинетическую энергии, сумма которых даст полную энергию частицы ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_n(\vec{r}) + \frac{p^2}{2m_0} \quad (79)$$

В § 2 было определено шестимерное фазовое пространство, в которое входит элементарный объём $d\tau$ (см. (36)) и пространство импульсов $d\Omega$ (см. (2)). Такое фазовое пространство называется μ -пространством и обозначается $d\gamma$

$$d\gamma = d\tau d\Omega. \quad (80)$$

С учётом (78) – (80) формула (77) приводится к виду:

$$dN = C_N e^{-\varepsilon/(kT)} d\gamma, \quad (81)$$

то есть, **распределение Максвелла-Больцмана определяет среднее число молекул, находящихся в элементе фазового пространства**

$d\gamma$. Интегрирование (81) даёт условие нормировки, из которого может быть определена константа C_N :

$$N = C_N \int e^{-\varepsilon/(kT)} d\gamma. \quad (82)$$

Вероятность нахождения молекулы в $d\gamma$ будет равна:

$$dW = \frac{dN}{N} = w(\vec{r}, \vec{p}) d\gamma, \quad (83)$$

где $w(\vec{r}, \vec{p})$ – плотность вероятности. Если обозначить константу

$$C_w \equiv \frac{C_N}{N}, \quad (84)$$

то из (81), (83) и (84) получаем:

$$dW = C_w e^{-\varepsilon/(kT)} d\gamma. \quad (85)$$

Константа C_w определяется из условия нормировки для плотности вероятности:

$$\int dW = C_w \int e^{-\varepsilon/(kT)} d\gamma = 1. \quad (86)$$

До сих пор нами рассматривалась только одна молекула системы (точнее – любая, произвольно взятая). Полученные распределения можно распространить на **все молекулы системы** и получить **распределение Гиббса**. Для этого надо ввести понятие **полного фазового пространства**, или **Γ -пространства** (гамма-пространства). Если система состоит из N частиц, то размерность такого пространства будет $6N$. Одна точка такого пространства будет полностью определять состояние системы и будет состоять из $3N$ линейных координат и $3N$ проекций импульсов всех частиц системы.

$$d\Gamma = d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_N. \quad (87)$$

Общая вероятность нахождения системы в состоянии $d\Gamma$ будет равна произведению вероятностей всех молекул (85). При этом в показателе степени экспоненты окажется сумма энергий ε всех молекул; обозначим её:

$$E(\vec{r}_1, \vec{p}_1; \vec{r}_2, \vec{p}_2; \dots; \vec{r}_N, \vec{p}_N) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_N. \quad (88)$$

Тогда:

$$dW = C_w^N e^{-E/(kT)} d\Gamma. \quad (89)$$

Обозначим постоянный множитель в (89) через величину F :

$$C_w^N = e^{F/(kT)}, \quad (90)$$

то есть

$$F = kT \ln(C_w^N) \quad (91)$$

(F – свободная энергия).

Отсюда **распределение Гиббса** (1901 г.):

$$dW(\vec{r}_1, \vec{p}_1; \vec{r}_2, \vec{p}_2; \dots; \vec{r}_N, \vec{p}_N) = e^{(F-E)/(kT)} d\Gamma \quad (92)$$

Это выражение применимо не только к идеальному газу и носит самый общий характер.

**v7 Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ФИЗИКИ
ВАКУУМА. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ**

**v8 § 1. Понятие давления. Число соударений молекул
со стенкой сосуда в единицу времени**

Молекулы газа, заключённые в каком-то сосуде, занимают весь предоставленный объём и хаотически двигаются, сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда. При этом они постоянно меняют свои координаты, направление движения, скорость, импульс, энергию. **Давление P** , оказываемое газом на стенки сосуда, – **скалярная величина, постоянная в любой точке сосуда, если система находится в равновесии и барометрический эффект (см. Глава 1, § 4) не имеет заметного влияния.**

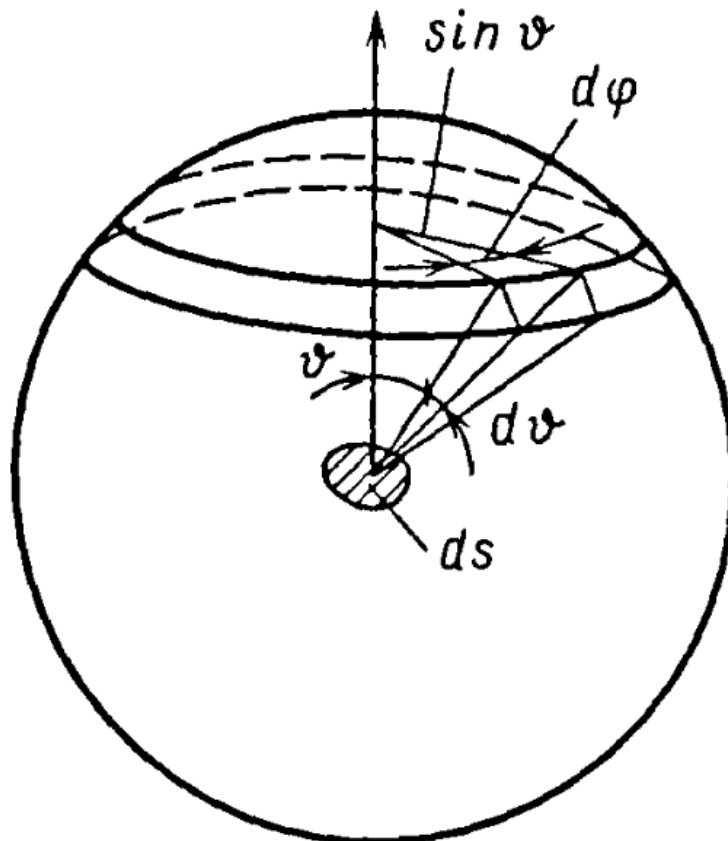


Рис. 11. Схема к определению телесного угла [4, с. 36]

Вследствие хаотичности движения молекулы могут падать на стенку сосуда под различными углами к нормали и передавать ей разные импульсы, соответствующие своим скоростям движения. Постоянство давления по всему объёму (при равновесии) означает, что любая условная «стенка», помещённая в любую точку сосуда, будет испытывать то же самое давление. Для определения числа молекул, ударяющихся в стенку, необходимо рассмотреть их движение в телесном угле $d\omega$ сферических координат. **Телесный угол**, смысл которого виден из рис. 11, будет равен:

$$d\omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi; \quad (93)$$

здесь ϑ и φ – сферические координаты при единичном радиусе-векторе. Для единицы объёма, содержащего n молекул, полный телесный угол 4π включает в себе $nd\omega/(4\pi)$ молекул. Если масса молекулы m_0 , то каждая из них сообщает элементарной площадке dS импульс относительно нормали к этой площадке, равный:

$$p = 2m_0 v \cos \vartheta. \quad (94)$$

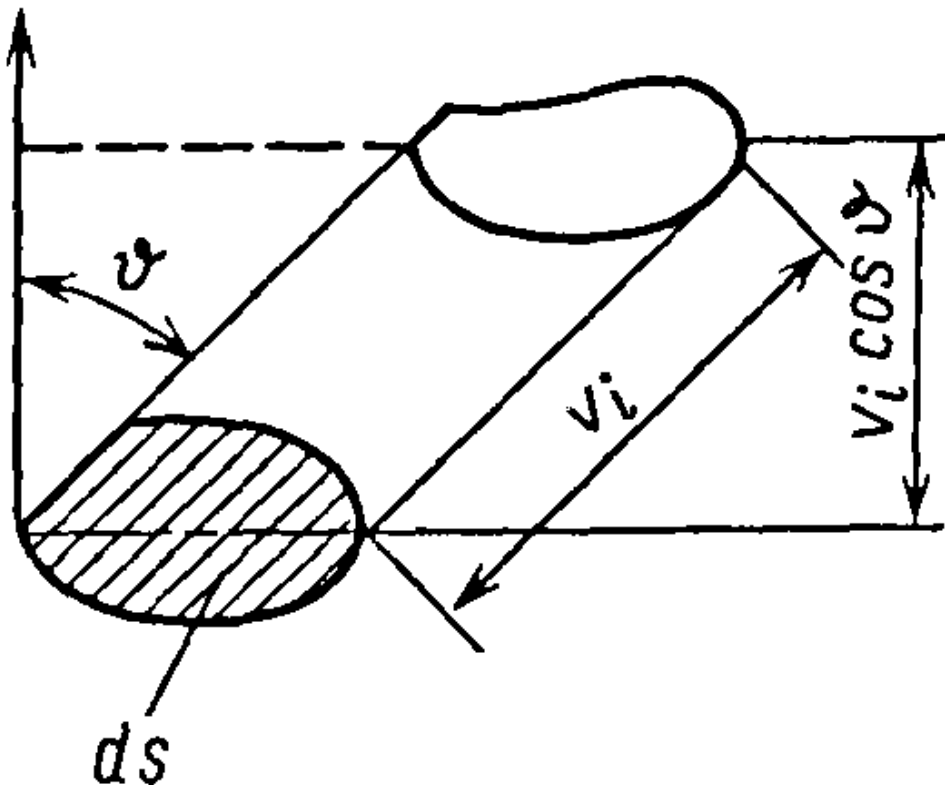


Рис. 12. Схема к определению давления газа [4, с. 37]

На поверхность dS в единицу времени и под углом ϑ будут падать все молекулы, находящиеся в цилиндре с основанием dS и высотой $v_i \cos \vartheta$ – рис. 12.

Представим распределение Максвелла молекул по скоростям (43) в виде дискретных участков с одинаковой скоростью (с индексом i), подобно модели рис. 6, то есть сделаем k разбиений по скорости. Тогда количество молекул в телесном угле

$$n \frac{d\omega}{4\pi} = \sum_{i=1}^{i=k} \left(n_i \frac{\sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} \right). \quad (95)$$

Число молекул в цилиндре (рис. 12), имеющих скорость v_i , составит

$$dS \frac{n_i v_i \cos \vartheta d\omega}{4\pi} = n_i v_i \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} dS. \quad (96)$$

Чтобы получить общее число молекул, ударяющихся в площадку dS под произвольным углом ϑ , нужно просуммировать все количества (96) и проинтегрировать по всему диапазону сферических координат φ (от 0 до 2π) и ϑ (от 0 до $\frac{\pi}{2}$):

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta}{4\pi} d\vartheta \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i dS = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i dS. \quad (97)$$

Так как средняя арифметическая скорость молекул

$$\langle v \rangle = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_i v_i}{n}, \quad (98)$$

то число соударений с единичной площадкой в единицу времени будет равно:

$$\boxed{N_q = \frac{1}{4} n \langle v \rangle} \quad (99)$$

или, с учётом (45):

$$\boxed{N_q = n \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_0}} = \frac{P}{\sqrt{2\pi m_0 kT}}}, \quad (100)$$

(последнее выражение в (100) получается из уравнения Клапейрона-Менделеева в виде $P = cRT$, где c – мольная концентрация, или $P = nkT$, где концентрация $n = [1/m^3]$).

Из (94) и (96) (последняя – в переводе на конечные разности в результате k разбиений) получаем выражение для определения давления:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{i=k} \left(2m_0 v_i \cos \vartheta \cdot n_i v_i \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} \right) = \\ & = m_0 \sum_{i=1}^{i=k} \left(n_i v_i^2 \frac{\cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (101)$$

Если проинтегрировать полученное выражение (101) по всему диапазону сферических координат φ (от 0 до 2π) и ϑ (от 0 до $\frac{\pi}{2}$), то можно получить полное давление P :

$$P = m_0 \sum_{i=1}^{i=k} \left(n_i v_i^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta}{2\pi} \right) = \frac{1}{3} m_0 \sum_{i=1}^{i=k} (n_i v_i^2). \quad (102)$$

Сумму в (102) можно связать со среднеквадратической скоростью (см. (46)):

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_i v_i^2}{n}}, \quad (103)$$

тогда

$$\boxed{P = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle}, \quad (104)$$

где $\langle v^2 \rangle$ – квадрат средней скорости движения молекул. Выражение (104) соответствует полученной ранее формуле (48), так как $\frac{N_A}{V_m} = n$.

Поскольку средняя кинетическая энергия равна (см. также (49)):

$$\langle E \rangle = \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}, \quad (105)$$

давление можно выразить как

$$P = \frac{2n \langle E \rangle}{3}. \quad (106)$$

v9 § 2. Средняя длина свободного пробега молекул

В своём движении молекулы газа сталкиваются не только со стенками сосуда, но и между собой, если их концентрация достаточна. Считается, что в идеальном газе взаимодействия между молекулами нет, и они сталкиваются, как некие упругие шарики. Хаотическое движение одной молекулы в объёме представляет собой сложную **объёмную** ломаную прямую, которая на плоскости может быть представлена рис. 13.



Рис. 13. Проекция на плоскость пути одной молекулы идеального газа в объёме. Начальное положение и следующие позиции отмечены цифрами [5, с. 37]

В реальности же даже молекулы идеальных газов, во многих случаях, не являются шарами, так как сферической симметрией молекулы не обладают вообще; её могут иметь только атомы. Таким образом, только одноатомные идеальные газы можно считать шарами. Далее, даже если принять «шаровую» модель для всех атомов, их столкновения будут происходить под произвольным углом к траектории движения; предельными случаями будут столкновения «в лоб» (рис. 14-а) и под очень острым углом (рис. 14-б). Кроме того, столкновение может произойти, если молекулы двигаются примерно в одном направлении и «задняя» молекула, скорость которой выше, может настигнуть «переднюю» (рис. 14-в).

Так как молекулы в рассматриваемой модели имеют конечные диаметры, то даже если столкновение происходит «в лоб», возможны разные варианты: от удара точно по центру (рис. 15-а) до легкого касания (рис. 15-б).

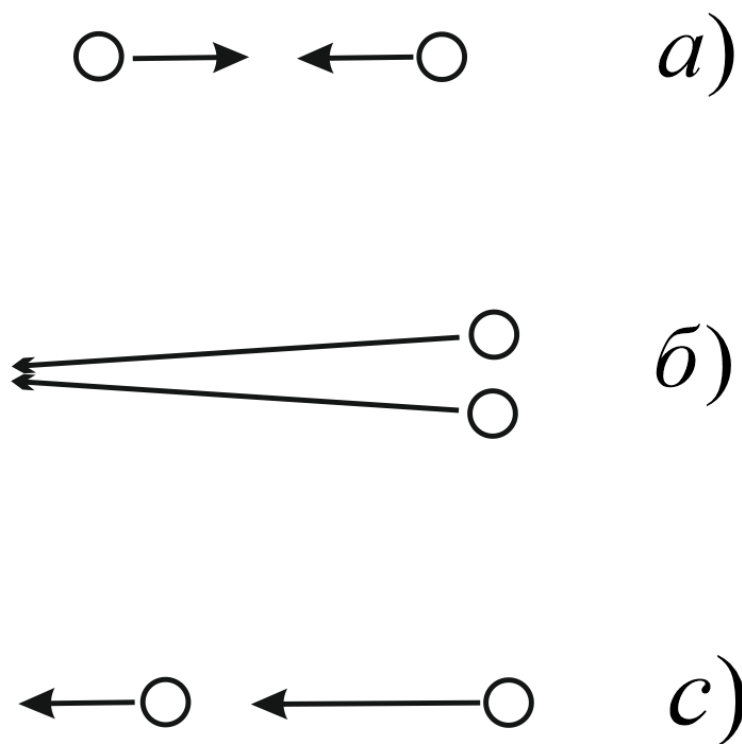


Рис. 14. Столкновения молекул идеального газа: а) – «в лоб», б) – под острым углом, в) – одна молекула, с более высокой скоростью, «догоняет» другую

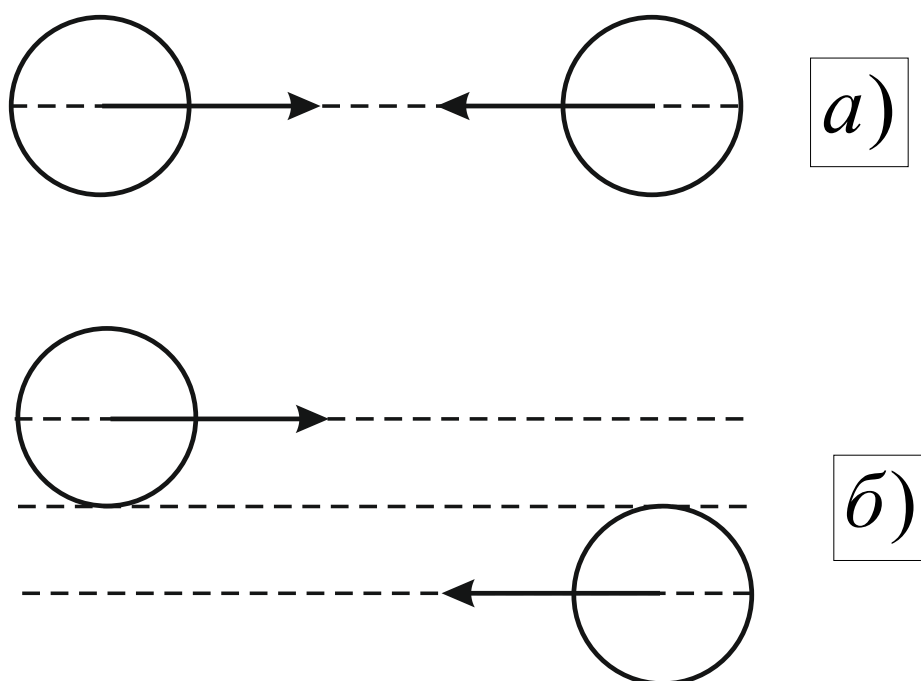


Рис. 15. Столкновения молекул идеального газа «в лоб»: а) – по центру, б) – по касательной

В реальности же молекулы могут взаимодействовать, пролетая и на некотором расстоянии друг от друга. Чаще всего межмолекулярное взаимодействие сводится к притяжению молекул, но возможны случаи отталкивания (например, если частицы заряжены). При этом траектория молекул может искривляться и уходить от первоначального направления – рис. 16. При выходе из зоны взаимодействия траектория опять может стать прямолинейной.

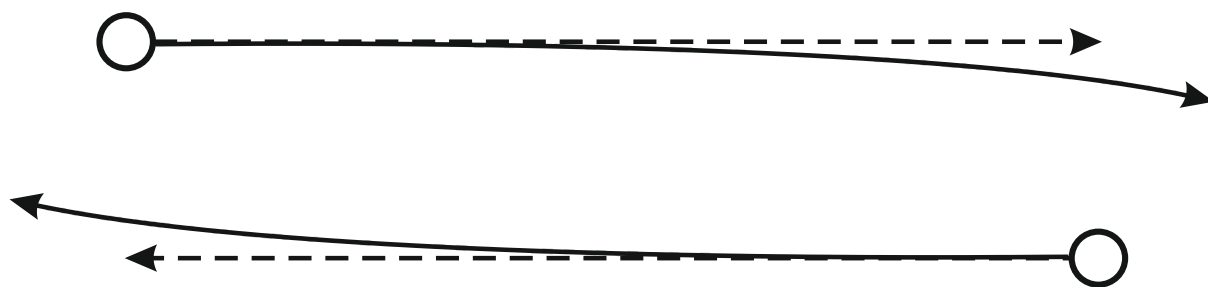


Рис. 16. Взаимодействие молекул реального газа на расстоянии

Кроме этого, реальные молекулы, имеющие самую различную форму, могут взаимодействовать, со столкновением или без, какими-то своими частями, например, функциональными группами (без химической реакции) и приобретать вращательное движение.

Все перечисленные обстоятельства приводят к необходимости введения так называемого **эффективного диаметра молекулы** σ , даже в приближении идеального газа. Это такой условный диаметр, которым должна была бы обладать реальная молекула, чтобы её поведение с достаточной точностью могло бы быть описано моделью шарообразной молекулы. Поскольку в вакуумных системах газы разрежены и большей частью отвечают концепции идеального газа, такая модель вполне приемлема для этого случая. Во многих случаях с помощью σ можно учесть и некоторые виды взаимодействия молекул. Величина эффективного диаметра устанавливается эмпирически.

Рассмотрим группу молекул в некотором объёме, двигающихся примерно в одном направлении. Пусть их количество будет N_0 . Через время dt часть первоначального количества молекул dN испытает столкновения с другими молекулами сосуда и покинет

рассматриваемую группу. Если столкновения происходят с некоторой частотой ω , и число оставшихся молекул в группе составит N , то

$$-dN = N\omega dt \quad (107)$$

(знак минус здесь стоит потому, что количество молекул в группе уменьшается). Разделим переменные и проинтегрируем в пределах времени от 0 до t , где t – время, за которое количество молекул уменьшится до N (с точки зрения математики это не совсем корректно: предел интегрирования совпадает с самой переменной), и в пределах количеств от N_0 до N :

$$-\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \omega \int_0^t dt \Rightarrow -\ln \frac{N}{N_0} = \omega t, \quad (108)$$

откуда (см. [6]. глава 1, § 7)

$$N = N_0 e^{-\omega t}. \quad (109)$$

Частота столкновений ω , которая обратна времени, за которое столкновение произойдёт, для группы молекул может быть выражена через среднюю скорость молекул $\langle v \rangle$ (см. (45)) и средний путь $\langle l \rangle$ до столкновения:

$$\omega = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle}. \quad (110)$$

Для нашего примера средняя скорость $\langle v \rangle$ будет равна отношению $\langle l \rangle$ к времени, за которое первоначальное число молекул в группе уменьшится до N , то есть – к t . Тогда показатель степени в экспоненте (109) становится равным -1 и мы получаем соотношение

$$\frac{N}{N_0} = e^{-1} = \text{const}. \quad (111)$$

Таким образом, можно прийти к выводу, что величина $\langle l \rangle$ является характеристической; она называется **средней длиной свободного пробега молекул** λ :

$$\langle l \rangle \equiv \lambda. \quad (112)$$

В рамках модели упругих невзаимодействующих шаров столкновения двух молекул произойдёт, если расстояние между молекулами будет не больше эффективного диаметра молекулы σ – рис. 17. Рассмотрим отдельную молекулу такого диаметра, а остальные

молекулы будем рассматривать, как материальные точки. При движении эта молекула за единицу времени t пройдёт пространство объёмом, равным произведению площади поперечного сечения шара на некоторую длину l , то есть $\pi\sigma^2 l$, и на этом пути столкнётся с $n\pi\sigma^2 l$ молекулами (здесь n – объёмная концентрация (37)). Путь l , пройденный молекулой, будет представлять собой ломаную прямую (см. рис. 13). Таким образом, частота соударений в этом случае будет равна:

$$\omega = \frac{n\pi\sigma^2 l}{t} . \quad (113)$$

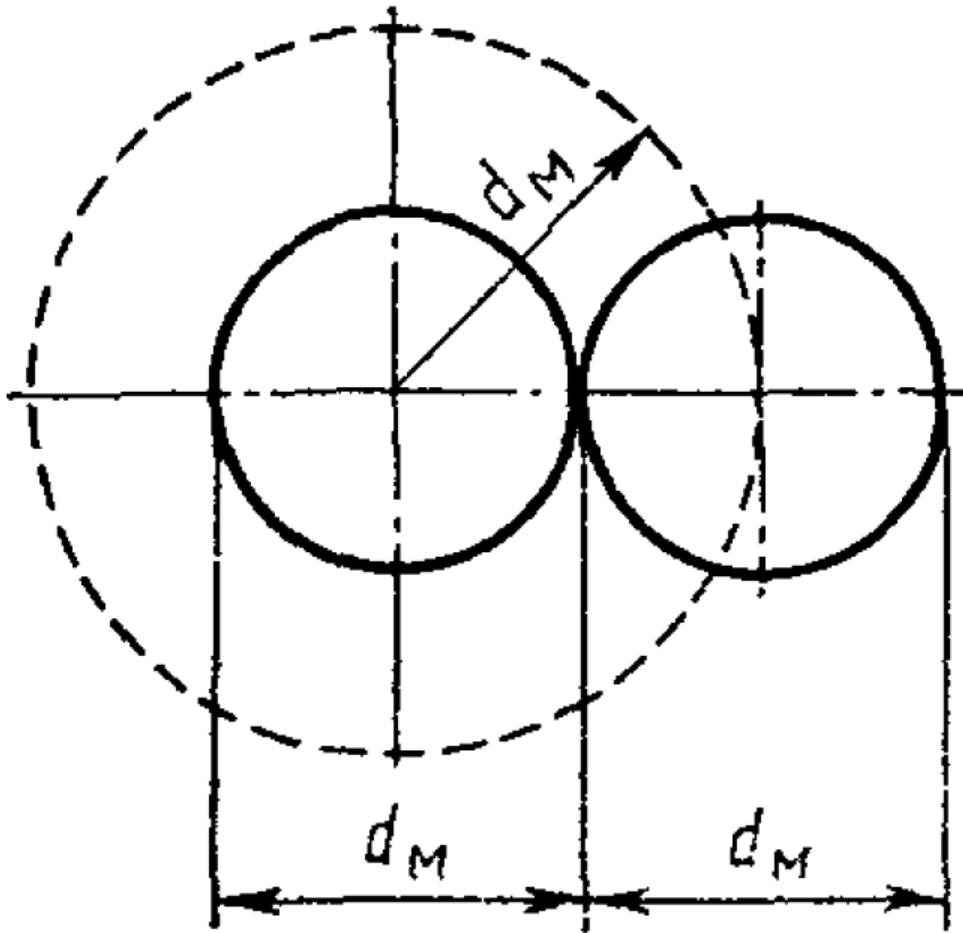


Рис. 17. Схема столкновения двух молекул в рамках модели упругих невзаимодействующих шаров. Эффективный диаметр молекулы σ здесь обозначен, как d_M [7, с. 21]

Величина l/t представляет собой **относительную скорость** молекулы к тем «материальным точкам», с которыми произошли столкновения. Однако эти материальные точки также двигаются, поэтому величину l/t нельзя идентифицировать, как среднюю скорость $\langle v \rangle$. Обозначим:

$$v_{\text{отн}} = \frac{l}{t} \quad (114)$$

В системе идентичных частиц для относительной скорости одной частицы по отношению к какой-то другой частице справедливо соотношение:

$$\langle (v_{\text{отн}}) \rangle^2 = \langle (v_1 - v_2) \rangle^2 = \langle v_1^2 \rangle - 2\langle v_1 v_2 \rangle + \langle v_2^2 \rangle, \quad (115)$$

где v_1 – скорость первой частицы, v_2 – скорость второй частицы (в нашем случае – материальной точки). При равновесии эти скорости случайны и независимы, поэтому $\langle v_1 v_2 \rangle = 0$, а сами эти скорости будут равны средней скорости молекул в системе $\langle v \rangle$:

$$v_{\text{отн}} = \sqrt{\langle (v_{\text{отн}}) \rangle^2} = \sqrt{\langle v_1^2 \rangle + \langle v_2^2 \rangle} = \sqrt{2} \langle v \rangle \quad (116)$$

Из (110) и (112) имеем:

$$\omega = \frac{\langle v \rangle}{\lambda}, \quad (117)$$

а из (113) и (114):

$$\omega = n\pi\sigma^2 v_{\text{отн}}. \quad (118)$$

Тогда из (117) и (118) с учётом (116) получается **средняя длина свободного пробега молекул**:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi\sigma^2} \quad (119)$$

Из опытных данных следует, что λ увеличивается при повышении температуры, чего не учитывает формула (119). Формально это можно связать с уменьшением σ . На практике используется преобразованная эмпирическая формула, в которую входит дополнительный множитель:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi\sigma^2 (1 + C/T)}, \quad (120)$$

где C – постоянная Сезерленда, она равна температуре, при которой в случае постоянной объёмной концентрации газа средняя длина свободного пробега молекул уменьшается вдвое по сравнению со значением, соответствующем бесконечно большой температуре.

Таблица 1. Значения средней длины свободного пробега молекул воздуха [8, с. 36]

Давление воздуха		Средняя длина свободного пути молекулы воздуха при 25 °С	
Па	мм рт. ст.		
$1 \cdot 10^5$	$750 = 7,5 \cdot 10^2$	$6,2 \cdot 10^{-8}$ м	~ 0,06 мкм
$1,333 \cdot 10^2$	$1 = 1 \cdot 10^0$	$4,6 \cdot 10^{-5}$ м	4,6 мкм
$1 \cdot 10^2$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$ м	~ 62 мкм
$1 \cdot 10$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$ м	$620 \text{ мкм} \approx 0,6 \text{ мм}$
$1 \cdot 10^0$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$ м	6,2 мм
$1 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$ м	62 мм
$1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$ м	$620 \text{ мм} \approx 0,6 \text{ м}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^0$ м	6,2 м
$1 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10$ м	62 м
$1 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	$6,2 \cdot 10^2$ м	620 м
$1 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^3$ м	6,2 км
$1 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-10}$	$6,2 \cdot 10^4$ м	62 км

В таблице 1. приведены значения средней длины свободного пробега молекул воздуха в широком диапазоне давлений от атмосферных до глубокого вакуума. Для большего удобства они даны в единицах СИ (Pa) и внесистемных единицах $Torr$ (или мм. рт. ст.).

§ 3. Понятие о вакууме. Степени вакуума

В технике вакуумом считается газ, находящийся под давлением ниже атмосферного ($1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па} = 760 \text{ Торр}$).

С теоретической точки зрения, вакуум – это часть пространства, лишённая материи в виде вещества.

Последнее означает, что вакуумированное пространство может содержать **поле** (например, электромагнитное).

Эти два определения сильно отличаются друг от друга и при этом не являются исчерпывающими. Техническое определение весьма условно, возникло случайно, так как ориентируется на атмосферное давление одной, отдельно взятой планеты (даже если это Земля), и не может быть всеобъемлющим. Такое определение не имеет под собой какой-то физической основы, так как газ при давлении 760 Torr качественно ничем не отличается от газа при давлении, например 700 Torr или 650 Torr . Реальное атмосферное давление может колебаться в широких пределах (до нескольких десятков Torr в ту и другую сторону относительно нормальной величины 760 Torr). Тем не менее в технике такое определение оправдано тем, что работа многих машин и других устройств зависит или даже определяется сравнительно небольшими перепадами давлений около атмосферного. Хотя Torr и атм – внесистемные единицы и имеют ограниченное применение (в РФ Torr (мм. рт. ст.) разрешён к применению лишь в некоторых областях техники, таких как метеорология, а атм – только техническая, физическая атмосфера запрещена к использованию), в практике вакуумной техники эти единицы иногда используются как вспомогательные, позволяющие интуитивно оценить степень достигнутого вакуума по отношению к атмосферному давлению.

Физическое определение вакуума носит сугубо теоретический характер. Абсолютного вакуума достичь невозможно. В лабораторных условиях можно получить вакуум $10^{-13} - 10^{-14} \text{ Torr}$ ($10^{-11} - 10^{-12} \text{ Па}$), при этом в 1 см^3 остаётся около 100 молекул. Причём в космическом межзвёздном пространстве вакуум на несколько порядков хуже. Тем не менее, в вакуумных устройствах, применяемых в науке и высоких технологиях, необходима ориентация именно на такую абсолютную модель и техническое определение вакуума неприемлемо.

На практике в науке и близких областях понятие **вакуум** используется не как абсолютный вакуум, а как пониженное давление газа, которое может быть получено в данных условиях теми или иными средствами откачки. Как правило, речь идёт о давлениях, на несколько порядков меньших атмосферного. В основе научной классификации

степеней вакуума лежат конкретные параметры, при определённых значениях которых качественно меняется физическое состояние системы. Основными такими параметрами являются **средняя длина свободного пробега молекул λ** (119) и (120) и **эффективный размер вакуумной камеры $d_{эфф}$** .

В вакуумных системах эти две величины связаны друг с другом. Предположим, что для шаровой камеры диаметром, например, 10 см, содержащей газ под вакуумом 1 Па, рассчитана $\lambda = 6,2$ мм (см. табл. 1). Это означает, что в объёме камеры довольно интенсивно происходят столкновения молекул. Теперь мысленно будем уменьшать размеры камеры до диаметра 6 мм, не меняя качественное состояние системы, то есть температура и объёмная концентрация n будут оставаться постоянными. (Аналогичное предположение: из исходной камеры «вырезаем» объём диаметром 6 мм). Тогда в большинстве случаев молекулы перестанут сталкиваться друг с другом и будут ударяться только в стенки камеры. При этом физические свойства газа в маленькой камере будут кардинально отличаться от оных в большой камере.

В вакуумных установках всегда есть какой-то размер внутреннего пространства, являющийся определяющим в указанном смысле. Это может быть диаметр сферической камеры, диаметр и высота камеры цилиндрической или размеры камеры в виде параллелепипеда. Также определяющими могут быть расстояния между какими-то внутренними деталями (например – электродами), диаметры трубопроводов, проходные сечения вентиля и т.п. Эти размеры и принимаются в качестве **эффективных размеров вакуумной камеры $d_{эфф}$** . Из этого следует, что в разных частях установки $d_{эфф}$ может быть разным; следовательно разным будет и вакуум,

Среднюю частоту соударений одной молекулы со стенкой $\omega_{ст}$ можно получить из число соударений с единичной площадкой в единицу времени (99), умножив его на площадь внутренней поверхности камеры S и разделив на число частиц в этой камере nV (здесь V – объём камеры, n – см (37)):

$$\omega_{cm} = \frac{N_q}{nV} S = \frac{n \langle v \rangle}{4} \cdot \frac{1}{nV} \cdot S = \langle v \rangle \frac{S}{4V}. \quad (121)$$

Величину $\frac{4V}{S} = [m^3]$ можно положить эффективным размером (диаметром) вакуумной камеры:

$$\boxed{d_{эфф} = \frac{4V}{S}}. \quad (122)$$

Эта величина весьма показательна для многих технических устройств: эффективный размер сферической камеры диаметром D :

$$d_{эфф} = \frac{2}{3} D; \quad (123)$$

для трубы диаметром D и бесконечной длины:

$$d_{эфф} = D; \quad (124)$$

для двух бесконечных параллельных плоскостей с промежутком между ними D

$$d_{эфф} = 2D.$$

Тогда из (121) и (122) получим:

$$\omega_{cm} = \frac{\langle v \rangle}{d_{эфф}}. \quad (125)$$

С другой стороны, средняя частота соударений молекул ω определяется по (117). **Отношение ω_{cm} к ω называется критерием Кнудсена:**

$$\boxed{Kn = \frac{\omega_{cm}}{\omega} = \frac{\lambda}{d_{эфф}}}. \quad (126)$$

Критерий Кнудсена, как безразмерная величина, служит для научно обоснованной классификации степеней вакуума. По этому критерию выделяют три степени:

$$\text{Низкий вакуум} - \boxed{Kn \ll 1; \quad \lambda \ll d_{эфф}} \quad (127)$$

Столкновения между молекулами значительно преобладают над столкновениями со стенками. Пример: если на пути молекулярного пучка поставить небольшой экран (например, при напылении в вакууме), то на стенках сосуда не получается изображения этого экрана.

$$\text{Средний вакуум} - \boxed{Kn \approx 1; \quad \lambda \approx d_{эфф}} \quad (128)$$

Частоты соударений молекул между собой и со стенками сосуда примерно одинаковы.

Высокий вакуум – $\boxed{Kn \gg 1; \lambda \gg d_{эфф}}$ (129)

Столкновения молекул со стенками сосуда значительно превосходят по частоте их столкновения между собой. Пример: экран на пути молекулярного пучка даёт изображение этого экрана на стенке сосуда.

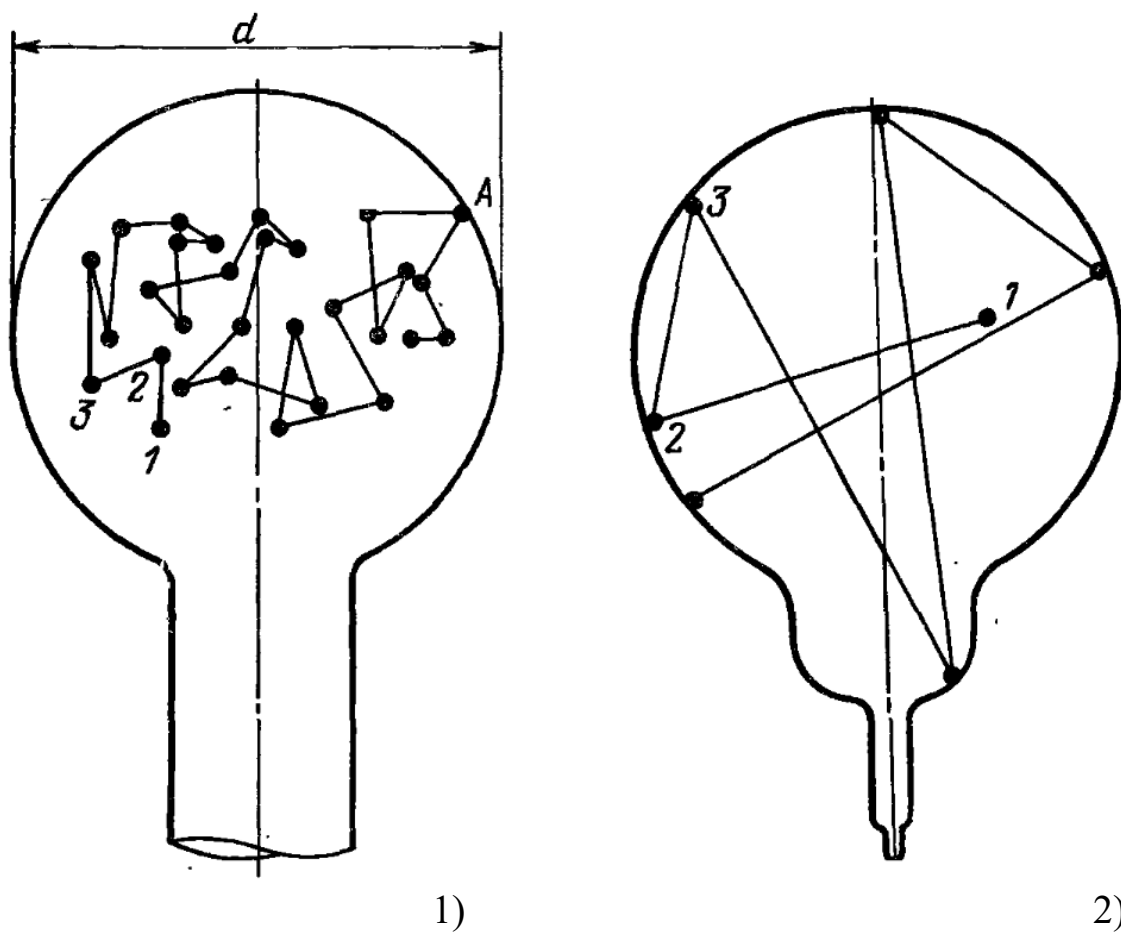


Рис. 18. 1). Путь молекулы газа в условиях низкого вакуума, $Kn \ll 1; \lambda \ll d_{эфф}$, 1, 2, 3 и т.д. – места столкновений с другими молекулами; 2). путь молекулы газа в условиях высокого вакуума, $Kn \gg 1; \lambda \gg d_{эфф}$, 1 – исходное положение, 2, 3 и т.д. – места неупругих столкновений со стенками сосуда [8, с. 40]

Никакой чёткой границы между этими степенями вакуума нет, однако многие физические свойства кардинально меняются при

переходе системы из одного состояния в другое. Возможны варианты, когда при одном и том же давлении (и температуре) в системе в разных её частях (например в каких-то камерах и трубопроводах) будут разные степени вакуума. Типичные пути молекул при низком и высоком вакууме для обычных камер показаны на рис. 18.

Кроме перечисленных степеней по физическим показателям из области высокого вакуума выделяют ещё область **сверхвысокого вакуума**. В качестве определяющего параметра здесь выступает **степень покрытия поверхности** камеры или каких-то деталей **адсорбированными молекулами**. Этот параметр неактуален для обычных давлений и низкого и среднего вакуума, но играет важную роль в научном и технологическом плане в области сверхвысокого вакуума. Причиной этого является то, что в этих условиях степень заполнения поверхности может очень сильно уменьшаться. Из теории адсорбции известно, что **степень покрытия поверхности молекулами газа** Θ определяется по формуле:

$$\Theta = \frac{f \tau_0 \exp\left(\frac{Q_a}{RT}\right)}{a_m \sqrt{2\pi m_0 kT}} P, \quad (130)$$

где f – вероятность адсорбции молекул на свободной поверхности (в первом приближении принимается за 1), τ_0 – время пребывания в адсорбированном состоянии, Q_a – теплота адсорбции, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, a_m – количество молекул, необходимое для образования монослоя молекул на поверхности, m_0 – масса молекулы, k – константа Больцмана, P – давление газа.

Величина эта во многих случаях может быть рассчитана. Например, для азота ($P = 7,9 \cdot 10^4 \text{ Па} = 591 \text{ Торр}$ и $T = 298 \text{ К}$) $\Theta = 9 \cdot 10^{-3}$; для CO_2 ($P = 31 \text{ Па} = 2,3 \cdot 10^{-1} \text{ Торр}$ и $T = 298 \text{ К}$) $\Theta = 4 \cdot 10^{-4}$ [7, с. 35–42]. Таким образом, при обычной температуре в области низкого и среднего вакуума заполненность поверхности, как правило, невелика.

Если по технологическим условиям в высоковакуумной установке задана какая-то заполненность $\Theta_{зад}$, то критерием может служить:

Сверхвысокий вакуум –

$$\boxed{Kn \gg 1; \lambda \gg d_{эфф}; \Theta < \Theta_{зад}} \quad (131)$$

Например, для воды при $\Theta_{зад} = 10^{-3}$ требуется давление около $10^{-9} \text{ Па} \approx 10^{-11} \text{ Торр}$.

Иногда, по технологическим причинам, область низкого вакуума подразделяют на **разрежение** (давление от атмосферного до нескольких десятков или даже сотен *Torr*) и собственно **низкий вакуум**. Такая градация не является общепризнанной, но в данном учебном пособии понятие «разрежение» будет использоваться.

Таблица 2. Ориентировочные давления по степеням вакуума [8, с. 39]

Степень вакуума		Низкий	Средний	Высокий	Сверхвысокий
Область давлений	Па	> 100	$100—10^{-1}$	$10^{-1}—10^{-5}$	$< 10^{-5}$
	мм рт. ст. (примерно)	> 1	$1—10^{-3}$	$10^{-3}—10^{-7}$	$< 10^{-7}$

Очень часто при установлении конкретных границ степеней вакуума по давлению ориентируются на технологические возможности тех или иных средств получения вакуума, то есть средств откачки. Так, с помощью механических форвакуумных насосов можно получить вакуум $10^1 \div 10^{-1} \text{ Па}$ ($10^{-1} \div 10^{-3} \text{ Торр}$), и эта величина берётся как граница между низким и средним вакуумом. Ориентировочные значения давлений по степеням вакуума для обычных вакуумных камер приведены в табл. 2.

v11 § 4. Описание некоторых свойств газов, играющих заметную роль в вакуумной технике. Вязкость. Теплопроводность

Вязкость.

При движении газа вблизи внутренней поверхности элементов вакуумной установки слои газа, прилегающие к этой поверхности, двигаются более медленно, чем внутренние слои, из-за эффекта торможения. Этот эффект передаётся и последующим слоям, более удалённым, но в меньшей степени. Таким образом, если движение газа происходит, например, в трубопроводе, наивысшая скорость будет наблюдаться по центру трубы, а ближе к краям потока будет иметь место плавное снижение скорости слоёв. Величина этого снижения и будет определяться вязкостью. Этот эффект будет наблюдаться при относительном движении любых слоёв газа друг относительно друга.

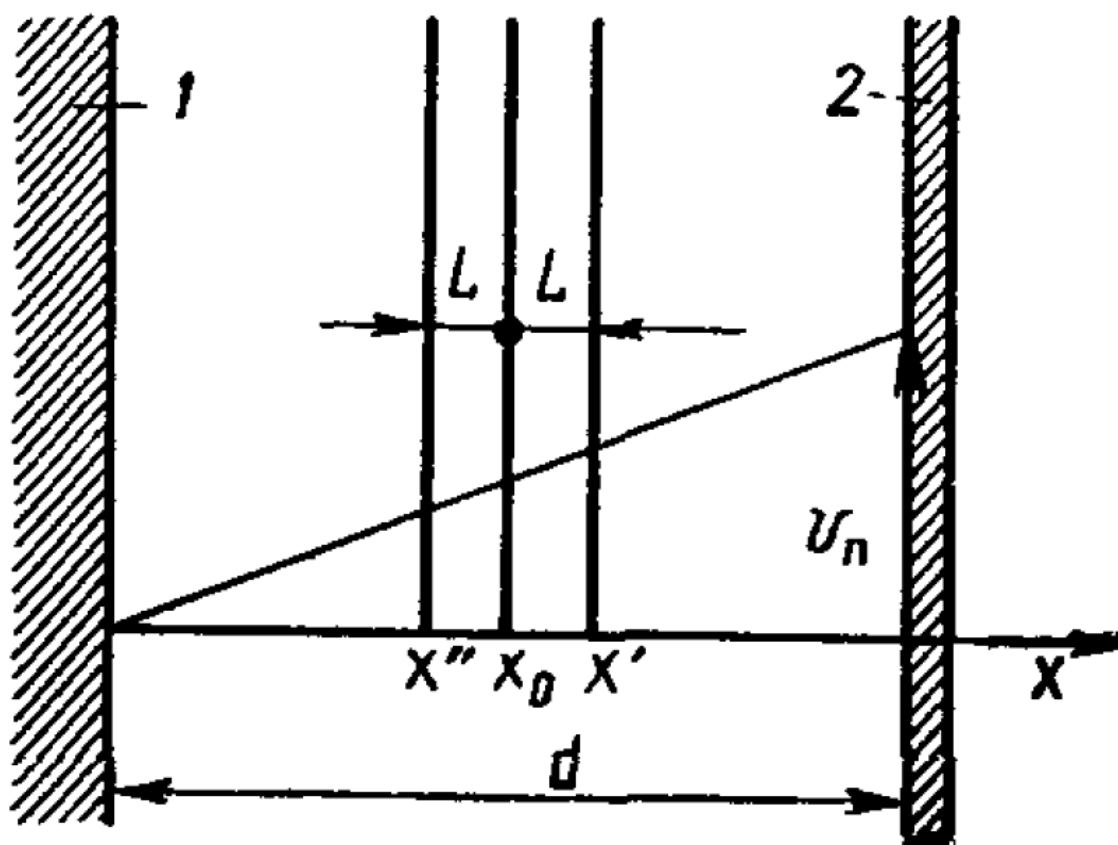


Рис. 19. Расчётная схема для определения коэффициента вязкости газа при низком вакууме [7, с. 56]

Рассмотрим движение двух смежных слоёв газа с разными скоростями. Молекулы в слоях двигаются не только в сторону течения общего потока, но какая-то часть молекул может переходить из слоя в

слой, то есть для них будет иметь место некий усреднённый поперечный вектор движения (скорости). Молекулы, переходящие из слоя в слой, будут иметь разные импульсы, что и приводит к возникновению вязкости. Описанный эффект будет иметь место только для области низкого вакуума.

Пусть в вакуумной камере имеется подвижная пластина 2 и неподвижная 1 (рис. 19). Между ними снизу вверх движется поток газа со скоростью v_n . Расстояние между пластинами разобьём на слои, толщина которых L будет равна длине свободного пробега λ . В сечении x_0 происходят столкновения молекул, вылетевших из плоскостей x' и x'' в противоположных направлениях, в среднем одинаковое количество. Всего таких молекул (используем (99)) будет $n\langle v \rangle / 4$. Изменение импульса при одном столкновении $2m_0\lambda \frac{dv_n}{dx}$, тогда общее изменение импульса в сечении x_0 в единицу времени:

$$\frac{1}{2} m_0 n \lambda \langle v \rangle \frac{dv_n}{dx}. \quad (132)$$

Сила трения, возникающая по всей поверхности переноса A , определяется этим импульсом и, по второму закону Ньютона, будет равна:

$$F = -\frac{1}{2} m_0 n \lambda \langle v \rangle \frac{dv_n}{dx} A = -\eta \frac{dv_n}{dx} A, \quad (133)$$

где коэффициент пропорциональности представляет собой **коэффициент динамической вязкости**:

$$\eta = \frac{1}{2} m_0 n \langle v \rangle \lambda = \frac{1}{2} \rho \langle v \rangle \lambda \quad (134)$$

(ρ – плотность газа).

Подстановка (45) и (120) в (134) даёт выражение для η , используемое на практике:

$$\eta = \frac{\sqrt{m_0 k T}}{\pi^{3/2} \sigma^2 (1 + C/T)} \quad (135)$$

С повышением температуры коэффициент вязкости увеличивается.

Коэффициентом кинематической вязкости ν называется отношение:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (136)$$

Теплопроводность.

При низком вакууме плотность газа велика, а вязкость мала, поэтому передача тепла может осуществляться конвекцией. Наоборот, в области среднего и высокого вакуума конвективным теплообменом почти всегда можно пренебречь.

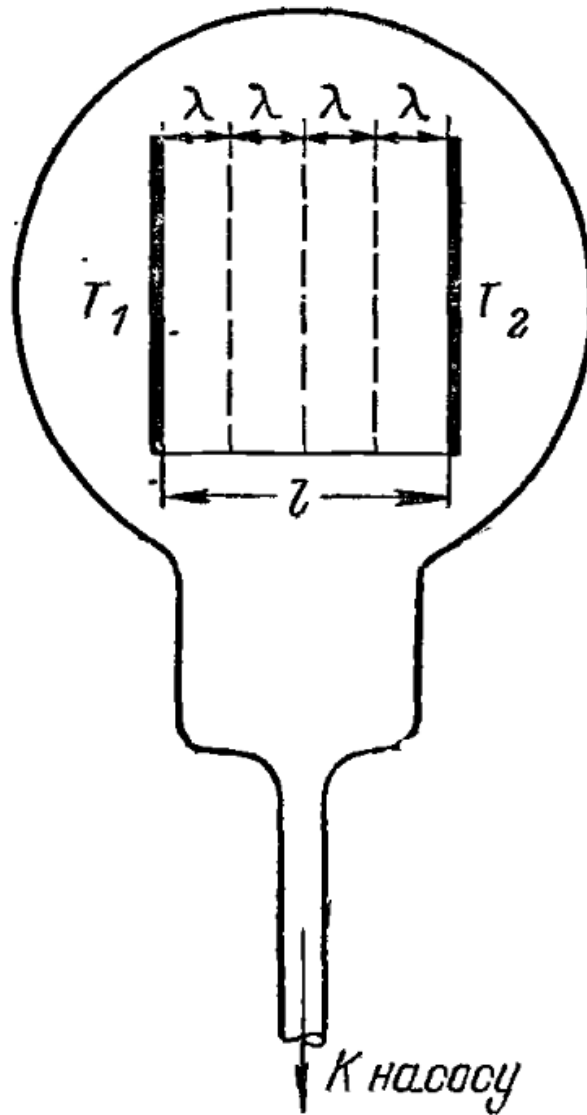


Рис. 20. Схеме теплопроводности в условиях низкого вакуума $\lambda \ll d_{эфф}$. Температура $T_1 > T_2$, l – расстояние между пластинами [5, с. 34]

Передача тепла излучением почти полностью определяется температурой и для высокого вакуума не зависит от давления газа.

Теплопроводность является основным практически значимым механизмом переноса тепла в вакуумных системах низкого и среднего вакуума.

Рассмотрим две параллельные пластины, расположенные на расстоянии l друг от друга в вакуумной камере, с температурами $T_1 > T_2$ – рис. 20. В условиях низкого вакуума молекулы, находящиеся вблизи от горячей пластины могут передавать теплоту холодной пластине не напрямую, а только опосредованно, через газовую среду. Разделим пространство между пластинами на слои толщиной λ . Тогда по горизонтальной оси установится температурный градиент и будет происходить перенос тепла за счёт теплопроводности.

В области низкого вакуума теплопроводность не будет зависеть от давления газа: при повышении давления увеличивается количество переносчиков тепла (молекул), но и уменьшается λ . Этот факт подтверждается экспериментально. При повышении вакуума количество переносчиков тепла (молекул) уменьшается, но, при этом, уменьшается число столкновений и соответствующий ему перенос тепла.

Мощность теплового потока в области низкого вакуума вычисляется по формуле:

$$Q = \lambda_{\text{тепл}} \frac{T_1 - T_2}{l} A, \quad (137)$$

где A – поверхность каждой из пластин, $\lambda_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопроводности газа:

$$\lambda_{\text{тепл}} = 2,09 \cdot 10^2 \varepsilon \rho \lambda \langle v \rangle c_V = [Bm / (m \cdot K)], \quad (138)$$

здесь ε – множитель (для одноатомных газов равен 2,5, для двухатомных 1,9, для трёхатомных 1,75), ρ – плотность, λ – длина свободного пробега, $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул, c_V – теплоёмкость при постоянном объёме.

В (137) ρ прямо пропорциональна давлению, а λ – обратно пропорциональна ему же, поэтому $\lambda_{\text{тепл}}$ практически не зависит от давления. Поэтому **в области низкого вакуума теплопроводность газа от давления не зависит.**

Мощность теплового потока в области высокого вакуума вычисляется по формуле:

$$Q = \alpha P \sqrt{\frac{2R}{\pi MT}} (T_1 - T_2) A, \quad (139)$$

где P – давление, R – универсальная газовая постоянная, M – мольная масса, T – средняя температура пластин, α – коэффициент аккомодации ($\alpha = 0,2 \div 0,95$), который учитывает нюансы взаимодействия молекулы с поверхностью.

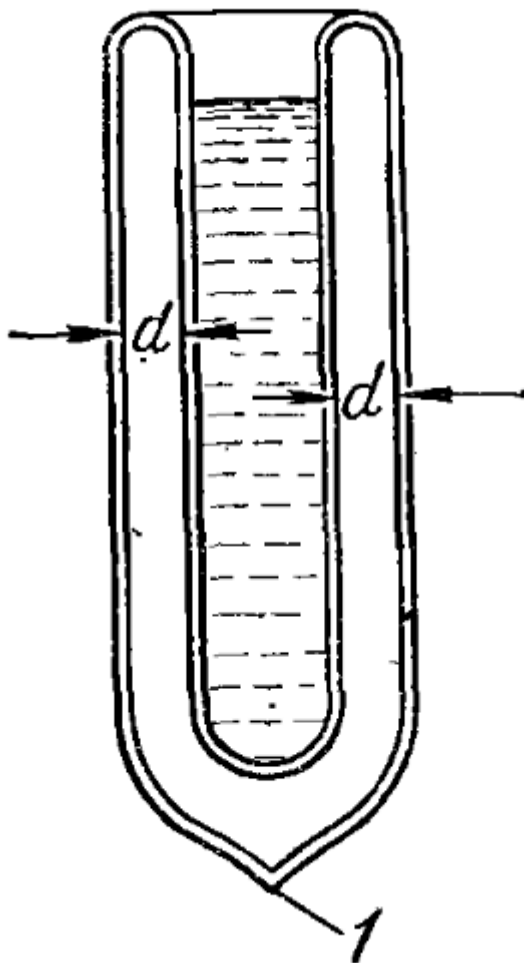


Рис. 21. Стеклоый сосуд Дьюара для переноски сжиженных газов. d – ширина откачанного до высокого вакуума пространства; 1 – место отпайки колбы после откачки [8, с. 47]

Из (139) следует, что в области высокого вакуума теплопроводность газа прямо пропорциональна давлению.

Следует заметить, что мощность теплового потока при этом очень низкая.

На этом свойстве основан принцип действия сосудов Дьюара (так называемых «дьюаров») – стеклянных сосудов с двойными стенками, газ между которыми откачан до высокого вакуума – рис. 21. Дьюары с зеркальным покрытием используются в термосах.

В области среднего вакуума теплопроводность газа в некоторой степени зависит от давления.

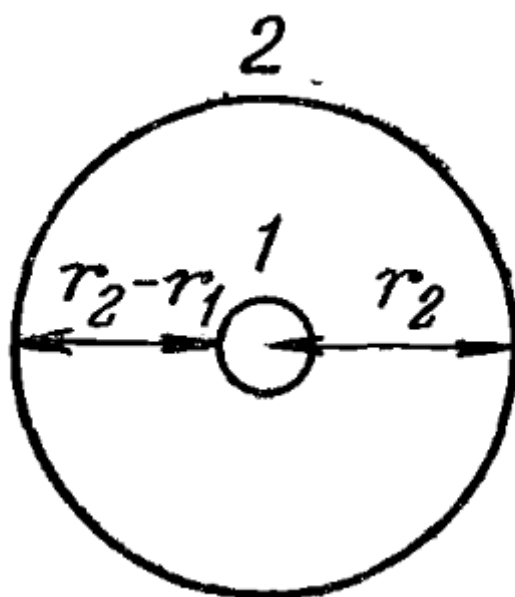


Рис. 22. Нагретая проволока 1 радиусом r_1 в холодной колбе 2 радиусом r_2 (поперечное сечение) [8, с. 47]

На явлении теплопроводности основана работа тепловых измерителей вакуума (вакуумметров), нашедших самое широкое применение в вакуумной технике. Самая оптимальная конструкция представляет собой нагретую тонкую проволоку, натянутую по оси полого цилиндра, температура которого близка к комнатной – рис. 22. Газ из цилиндра откачан до среднего или низкого вакуума (тепловые вакуумметры рассмотрены в соответствующем разделе).

В этом случае перенос тепла осуществляется в радиальном направлении, причём поверхность проволоки значительно меньше

поверхности цилиндра. На границе газового слоя, прилегающего к проволоке, толщиной $r \ll \lambda$, тепловой поток, идущий от проволоки, значительно меньше холодного теплового потока, идущего от цилиндра. Таким образом, основной перепад температур имеет место в области от поверхности проволоки до r , где нет потерь тепла при столкновениях между молекулами (то есть как в высоком вакууме). При этом мощность теплового потока достаточно велика и может быть подсчитана по формуле (сравните с (139)):

$$Q = 2\pi l \lambda_{\text{тепл}} \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)}, \quad (140)$$

где l – длина проволоки, r_1 и r_2 – радиусы проволоки и колбы. Для расстояний $r \gg \lambda$ тепловой поток будет определяться формулой (139), подставив в которую $A = 2\pi r_1 l$, будем иметь:

$$Q = \alpha P \sqrt{\frac{8\pi R}{MT}} (T_1 - T_2) r_1 l. \quad (141)$$

Формула (140) может быть использована для расчётов газоразрядных приборов с накалившимся катодом и электрических ламп накаливания.

v12 § 5. Сорбция и диффузия газов в твёрдых телах

Сорбция.

Сорбционные явления играют одну из самых главных ролей в вакуумной технике. Проблемы дегазации вакуумных и сверхвысоковакуумных систем, работа многих средств откачки и устройств для измерения вакуума, использование тех или иных технических и технологических устройств обусловлены этими явлениями. Чаще всего они имеют место на границе раздела фаз газ – твёрдое тело.

Сорбция подразделяется на три основных вида: **адсорбция** (или **физическая адсорбция**) – отложение молекул газа на поверхности твёрдого тела без образования химических связей, **хемосорбция** (**химическая адсорбция**) – соединение молекул газа с поверхностью с образованием более прочных связей, по величине близких к химическим (но без химической реакции), **абсорбция** – поглощение газовых молекул объёмом твёрдого тела. Противоположные процессы

называются десорбцией. Поглощающее вещество называется сорбентом (адсорбентом, абсорбентом), а поглощаемое – сорбатом (адсорбатом, абсорбатом).

Физическая адсорбция. В основе лежат силы межмолекулярного взаимодействия (ван-дер-ваальсовы силы) – ориентационное и дисперсионное взаимодействие; индукционный эффект играет малую роль. Твёрдое тело имеет тем большую адсорбционную способность, чем больше его поверхность; для увеличения адсорбции без изменения геометрических размеров увеличивают шероховатость поверхности или делают её более развитой, губчатой (например – «чернение» платины).

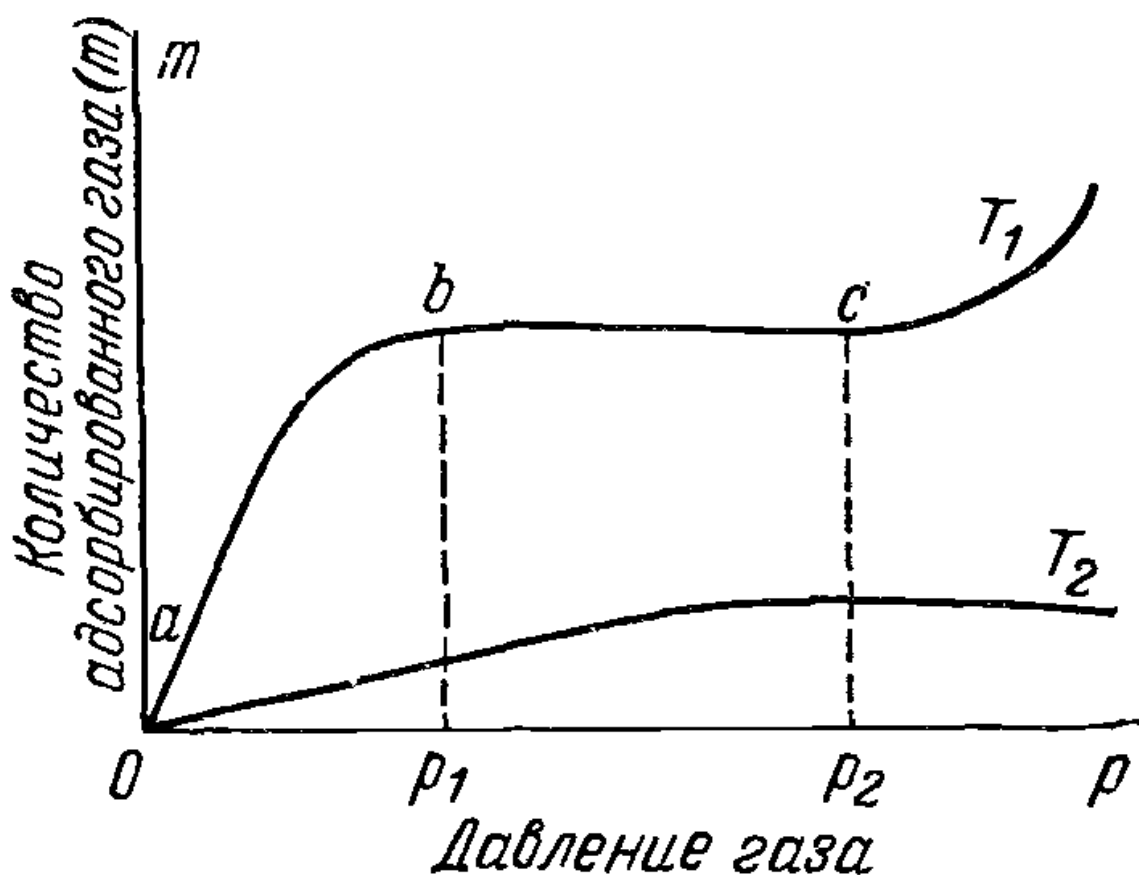


Рис. 23. Изотермы адсорбции при разных температурах $T_2 > T_1$ [5, с. 58]

Адсорбция уменьшается с увеличением температуры, причём этот процесс полностью обратим. Изотермы адсорбции представлены на рис. 23. Количество адсорбированного газа значительно меньше при

более высоких температурах при одинаковых давлениях. Участок ab на верхней кривой относится к низким давлениям, здесь количество адсорбента растёт пропорционально давлению до тех пор, пока вся поверхность адсорбата не будет заполнена мономолекулярным слоем. Доля поверхности адсорбента, занятая молекулами адсорбата, вычисляется по формуле:

$$\theta = \frac{cP}{1 + cP}, \quad (142)$$

где c константа (приводится в таблицах), P – давление. При низких давлениях $cP \ll 1$ и $\theta = cP$ (что и наблюдается на рис. 23).

Участок bc соответствует насыщению; второй слой молекул не удерживается на поверхности, давление не растёт. При достаточно больших давлениях возможно образование многомолекулярных слоёв – участок правее c ; см. также рис. 24. В подавляющем большинстве случаев в вакуумных системах многослойная адсорбция места не имеет.

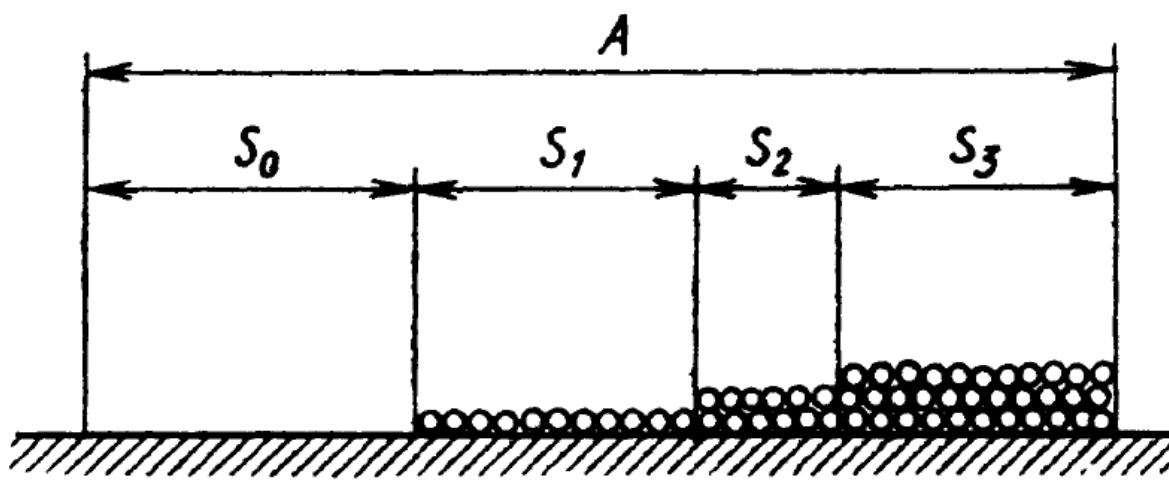


Рис. 24. Модель многослойной адсорбции [7, с. 36]

Теплоты адсорбции Q_a всегда положительны ($\Delta H_{адс} < 0$), то есть это процесс всегда самопроизвольный. Величины теплот значительно меньше таковых для хемосорбции. После установления равновесия оно оказывается подвижным: на микроуровне одновременно с одинаковой скоростью протекают два процесса – адсорбция и десорбция. **Время**

адсорбции (то есть – пребывания молекулы в адсорбированном состоянии) описывается уравнением Френкеля:

$$\tau_a = \tau_0 e^{Q_a/RT}, \quad (143)$$

где τ_0 – минимальное время пребывания молекулы в адсорбированном состоянии; $\tau_0 \approx 10^{-13} \text{ с}$. Таким образом, τ_a зависит только от Q_a .

Основные откачные газы (N_2 , O_2 , CO_2 , Ar) имеют теплоту адсорбции в пределах от 12 кДж/моль до 20 кДж/моль ; для них $\tau_a \approx 1 \text{ с}$ при 77 К , и $\tau_a \approx 10^{-10} \text{ с}$ при 293 К – рис. 25. Пары воды и масел, представляющие проблемы при высоковакуумной откачке и обладающие теплотой адсорбции $Q_a \approx 80 \text{ кДж/моль}$, имеют $\tau_a \approx 10^{43} \text{ с}$ при 77 К , и $\tau_a \approx 10^2 \text{ с}$ при 293 К . У гелия $Q_a \approx 10^2 \text{ кДж/моль}$ и τ_a близко к минимальному значению 10^{-13} с при 77 К ,

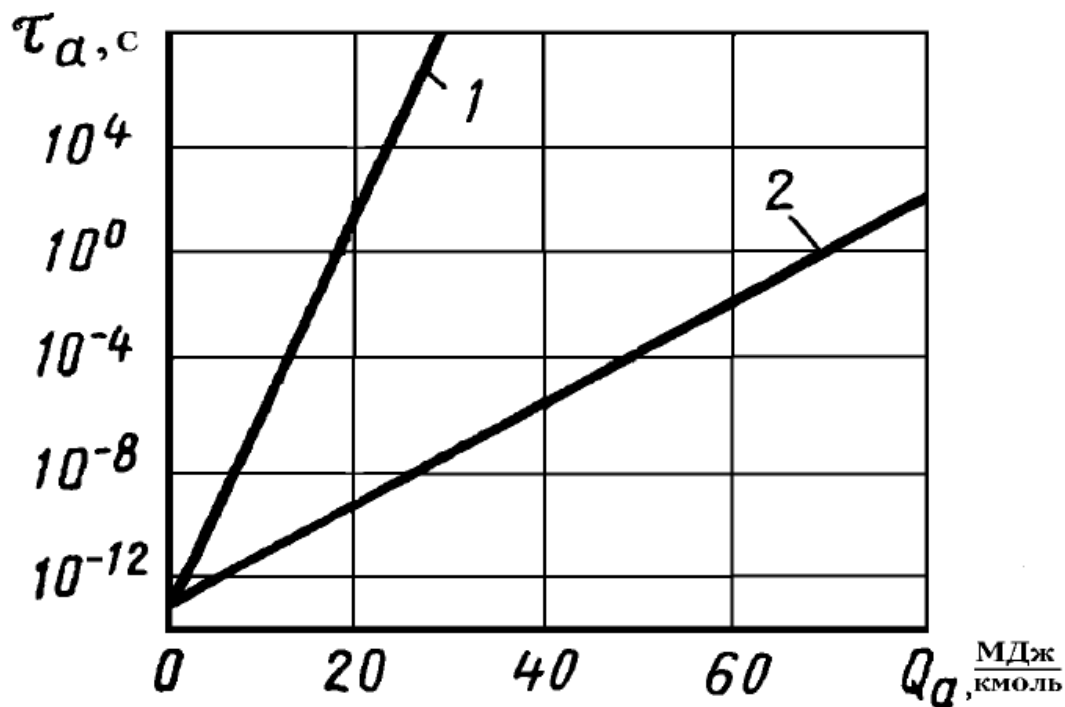


Рис. 25. Зависимость времени адсорбции от теплоты адсорбции; 1 – при 77 К (температура жидкого азота), 2 – при 293 К [7, с. 29]

Следует отметить, что адсорбированные молекулы могут мигрировать по поверхности твёрдого тела.

Химическая адсорбция. Для хемосорбции теплота адсорбции обычно превышает значение $Q_a \approx 80 \text{ кДж/моль}$, то есть она такая же, как теплоты химических реакций. При вакуумировании хемосорбированные молекулы удаляются наиболее трудно, что требует иногда применения специальных средств (сильное нагревание и т. д.).

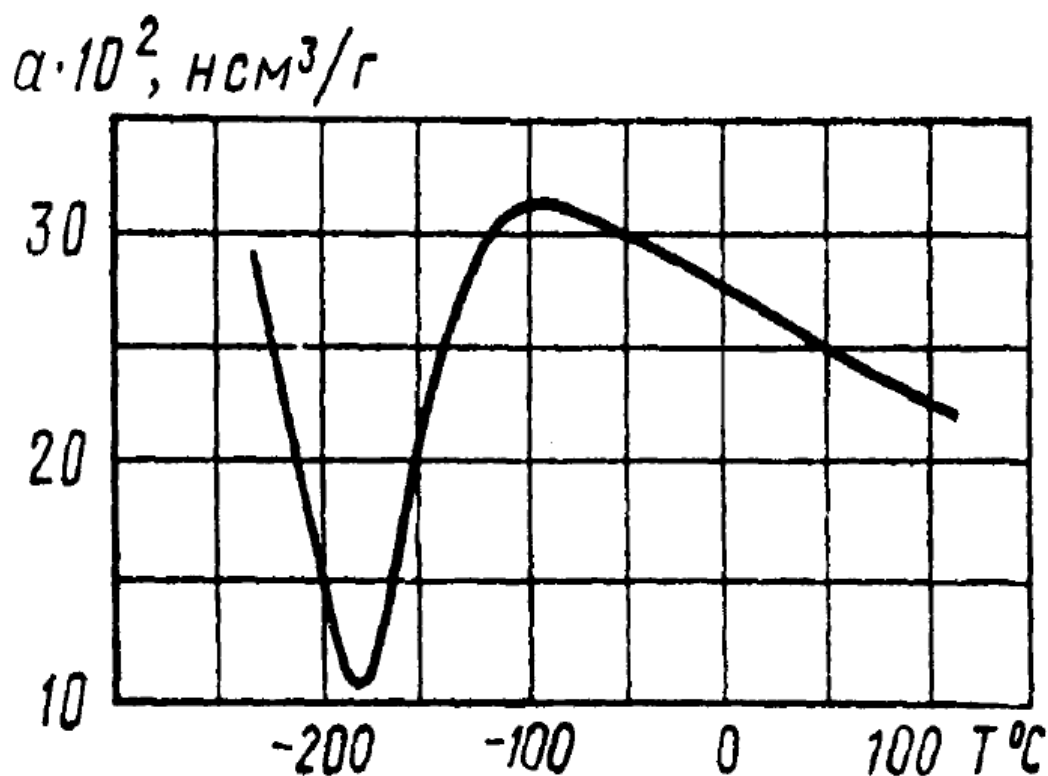


Рис. 26. Изобара адсорбции водорода на никелевом порошке при $2,7 \cdot 10^4 \text{ Па}$ [7, с. 28]

Хемосорбция почти всегда мономолекулярна и может быть описана уравнением Лэнгмюра, которое определяет количество молекул, адсорбированных на единице поверхности:

$$a = \frac{a_m bP}{1 + bP}, \quad (144)$$

где

$$b = \frac{f \tau_0 \exp(Q_a/RT)}{a_m \sqrt{2\pi m_0 kT}},$$

f – вероятность адсорбции конкретной молекулы, $\tau_0 \exp(Q_a/RT)$ – время адсорбции, a_m – количество молекул, образующих монослой на единице поверхности.

Отличие хемосорбции и физической адсорбции наглядно проявляется на изобарах адсорбции. На рис. 26 представлена изобара адсорбции водорода на никелевом порошке. Сначала количество поглощённого водорода с ростом температуры убывает (физическая адсорбция), затем, после минимума, наступает резкое возрастание, связанное с хемосорбцией, а затем опять идёт медленный спад.

Химическая адсорбция – процесс как правило необратимый или обратимый частично. Часто для дегазации требуется значительное повышение температуры.

Абсорбция. Поглощение газов толщей твёрдого тела сопровождается либо образованием **твёрдых растворов** (то есть без химической реакции), либо – **химической реакцией** с образованием продуктов взаимодействия, то есть новых химических веществ (например – оксидов). Во втором случае крайне сложно удалить эти вещества при откачке или дегазации.

При образовании твёрдых растворов получают примеси внедрения, когда молекулы абсорбата внедряются в междоузлия атомной решётки, искажая её, и примеси замещения, когда они замещают атомы в узлах решётки. Процесс абсорбции тесно связан с **диффузией** этих примесей в толще твёрдого тела. Диффузия проходит по двум механизмам в соответствии с видом примеси: для примесей замещения – по механизму замещения (более медленная диффузия), для примесей же внедрения характерна свободная миграция по междоузлиям. В большинстве случаев газы образуют примеси внедрения.

Одновременно с абсорбцией имеет место обратный процесс десорбции. Если система в этом случае приходит к равновесию, концентрация примеси будет соответствовать **растворимости** газа в твёрдом теле S . Она определяется **законом Генри**:

$$\boxed{S = \Gamma P}, \quad (145)$$

где Γ – константа Генри.

Частным случаем абсорбции с образованием твёрдых растворов является распад газа на поверхности твёрдого тела (без образования химического соединения с абсорбентом) и абсорбция полученных частиц внутрь твёрдого тела, которое в этом случае может выступать как катализатор, но не как реагент. Типичным примером является взаимодействие молекулярного водорода (двухатомный газ) с металлами. В этом случае растворимость водорода определяется законом Сивертса:

$$S = S_0 \sqrt{P}, \quad (146)$$

где S_0 – константа Сивертса.

Температурная зависимость растворимости подчиняется закону Аррениуса.

Диффузия газов в твёрдых телах описывается законами Фика и полученным на их основе дифференциальным уравнением диффузии.

Первый закон Фика: плотность потока частиц \vec{J} пропорциональна антиградиенту концентрации через **коэффициент диффузии** D :

$$\vec{J} = -D \cdot \text{grad}(c);$$

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad - \quad \text{одномерный случай} \quad (147)$$

где x – координата, c – концентрация растворённых молекул,

Второй закон Фика: скорость изменения концентрации в данной точке в данный момент времени равна дивергенции потока с обратным знаком:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div} \vec{J};$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad - \quad \text{одномерный случай} \quad (148)$$

где t – время. В общем случае D зависит от координаты, времени и концентрации.

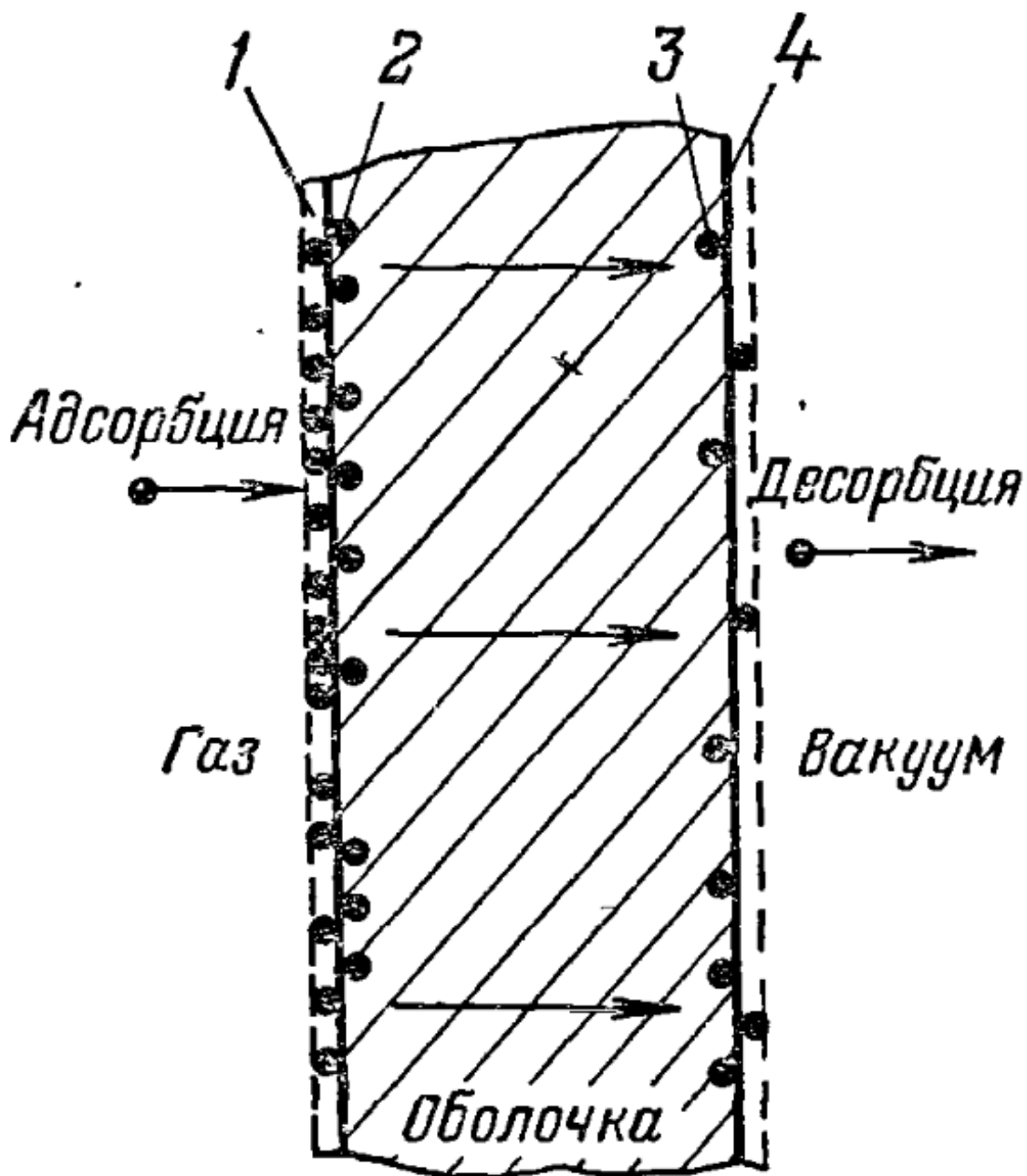


Рис. 27. Проникновение газа через оболочку вакуумного прибора. 1 – адсорбированный слой газа с наружной стороны оболочки; 2 – молекулы газа, только что растворившиеся в материале оболочки; стрелки показывают основное направление диффузии растворившихся молекул; 3 – растворившиеся молекулы газа, продиффундировавшие к внутренней стороне оболочки; 4 – молекулы газа, вышедшие на внутреннюю поверхность оболочки [5, с. 66]

Дифференциальное уравнение диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \cdot \text{grad}(c));$$
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, t, c) \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad - \quad \text{одномерный случай} \quad (149)$$

Если $D = \text{const}$:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (150)$$

Большое практическое значение в вакуумной технике имеет проникновение газов из внешней среды в откачиваемое пространство через оболочку вакуумной камеры – рис 27. В частности, водород, особенно при повышенных температурах, легко диффундирует через многие металлы. Это создаёт большие проблемы при откачке в высоковакуумных и сверхвысоковакуумных установках. При этом может устанавливаться **стационарный поток** через стенку камеры (оболочки), когда по всей толщине стенки имеет место постоянный градиент концентраций. Для толщины стенки d из (145), (146) и (150) можно получить выражение для стационарного потока:

$$J = DS \frac{P_1 - P_0}{d} \quad - \quad \text{для одноатомных газов}$$
$$J = DS \frac{\sqrt{P_1} - \sqrt{P_0}}{d} \quad - \quad \text{для двуатомных газов} \quad (151)$$

где произведение DS называется **проницаемостью** твёрдого тела по данному газу.

§ 6. Режимы течения газа по трубопроводам

При больших давлениях и высоких скоростях откачки в трубопроводах может возникать **турбулентный** (вихревой) режим течения газа, но это не является характерным для вакуумных систем.

Он может встречаться только на начальном этапе откачки от атмосферы.

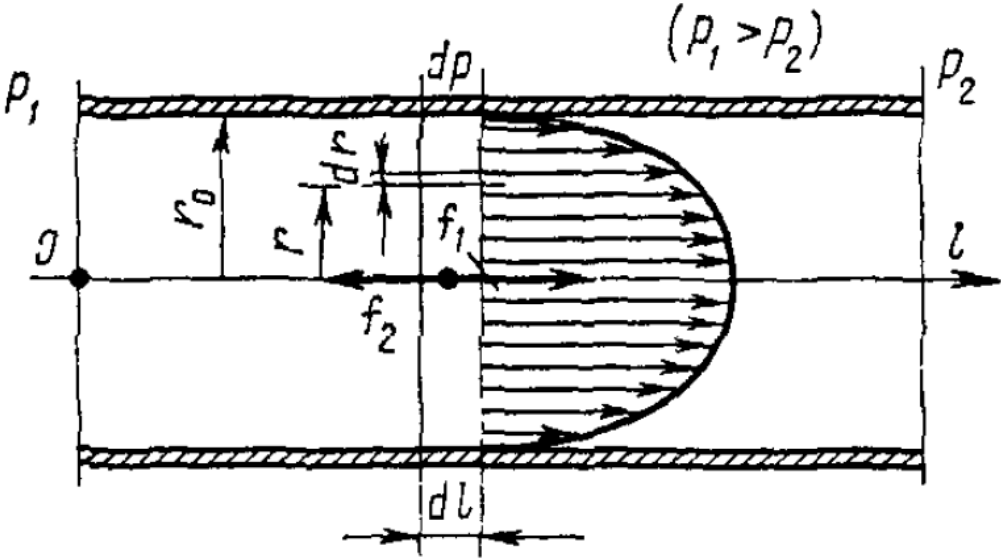


Рис. 28. Течение газа в трубопроводе при вязкостном режиме [7, с. 71]

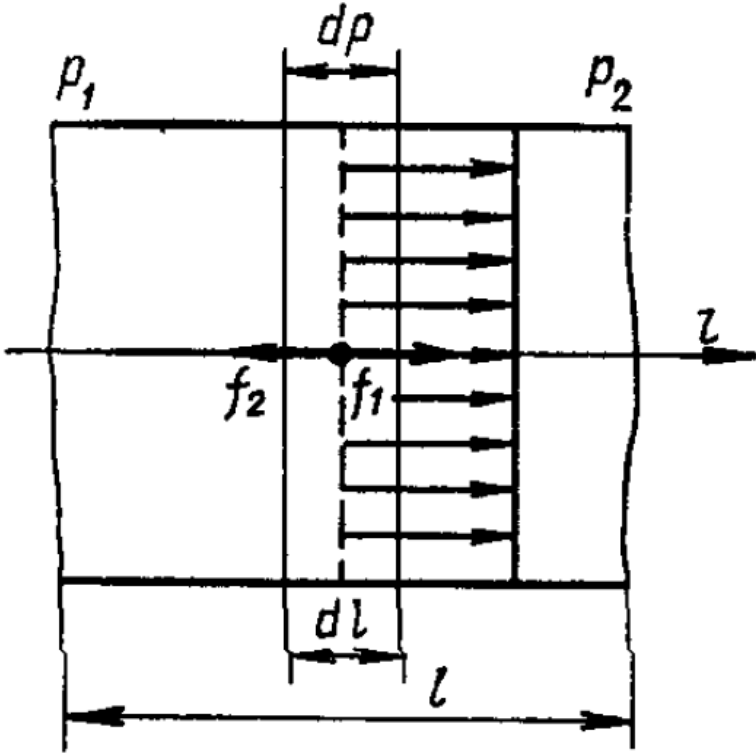


Рис. 29. Течение газа в трубопроводе при молекулярном режиме [7, с. 72]

В области низкого вакуума при **вязкостном режиме** средняя длина свободного пробега молекул λ значительно меньше диаметра трубопровода. Слой газа непосредственно у поверхности остаётся неподвижным, другие слои движутся тем быстрее, чем ближе слой к центру трубопровода – рис. 28. Проводимость круглого трубопровода обратно пропорциональна коэффициенту динамической вязкости газа.

При высоком вакууме в **молекулярном режиме** течения газа длина свободного пробега λ больше диаметра трубы, движение молекул независимо и они сталкиваются лишь со стенками трубопровода – рис. 29. Проводимость трубопровода в этом режиме не зависит от давления. Молекулы газа не «связаны» движением друг с другом и при откачке с одинаковой вероятностью двигаются как в сторону насоса, так и в сторону откачиваемой камеры. Эффект откачки достигается тем, что молекулы, попавшие в насос, тем или иным способом удаляются из откачиваемого объёма.

В области среднего вакуума имеет место **молекулярно-вязкостный режим**.

v14 § 7. Температурное равновесие давлений

В вакуумных системах часто встречаются, соединённые между собой трубопроводами отдельные камеры, температура газа в которых будет различна. При этом возникает вопрос, будут ли одинаковы давления газа в этих камерах? В обычных условиях в камере с более высокой температурой устанавливается меньшая плотность и объёмная концентрация, но давление при равновесии должно быть равно давлению во второй камере, иначе будут иметь место соответствующие потоки газа. То есть в системе устанавливается механическое равновесие (по давлениям), тогда как термического равновесия нет (разные температуры поддерживаются принудительно).

В соответствии с этим **при низком вакууме** условием отсутствия газовых потоков в двух, соединённых между собой камерах, имеющих различную температуру, является **равенство давлений** в этих камерах, $P_1 = P_2$. При этом соотношение концентраций и температур (по уравнению Клапейрона-Менделеева):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (152)$$

При высоком вакууме, когда движение молекул в объёме независимо друг от друга, механическое равновесие не может быть достигнуто, и устанавливается **стационарное состояние**, при котором потоки газа из первой камеры во вторую и из второй в первую становятся равными. Используя формулу для числа соударений с единичной площадкой в единицу времени (99) в качестве выражения для потока через сечение трубопровода, с учётом (45), имеем:

$$\frac{n_1 \left(\frac{8kT_1}{\pi m_0} \right)^{1/2}}{4} = \frac{n_2 \left(\frac{8kT_2}{\pi m_0} \right)^{1/2}}{4}, \quad (153)$$

откуда:

$$\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad \text{и} \quad \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}. \quad (154)$$

Таким образом, **в высоком вакууме** условием установления стационарных газовых потоков в двух, соединённых между собой камерах, имеющих различную температуру, является соотношение (154) (**эффект Кнудсена**).

В области среднего вакуума можно пользоваться приближённой формулой

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/(2(1+d/\lambda))}, \quad (155)$$

где d – эффективный диаметр трубопровода, λ – средняя длина свободного пробега молекул.

Эффект Кнудсена необходимо учитывать, например, при вакуумных измерениях. Если вакуумметр находится при температуре $T_1 = 293 \text{ K}$, а давление измеряется в камере с температурой жидкого азота $T_2 = 77 \text{ K}$, то ошибка измерения может составить $P_1/P_2 \approx 2$. Если же давление измеряется тем же вакуумметром в вакуумной печи с температурой $T_2 = 1273 \text{ K}$, ошибка будет $P_1/P_2 \approx 0,5$.

v15 § 8. Понятие об откачке вакуумных систем. Основное уравнение вакуумной техники

Простейшая вакуумная система состоит из откачиваемой камеры 1, системы вакуумных насосов 5 и трубопровода 4 между ними – рис. 30. Также в неё как правило, входят вакуумные вентили 3 и измерители вакуума – вакуумметры (манометры).

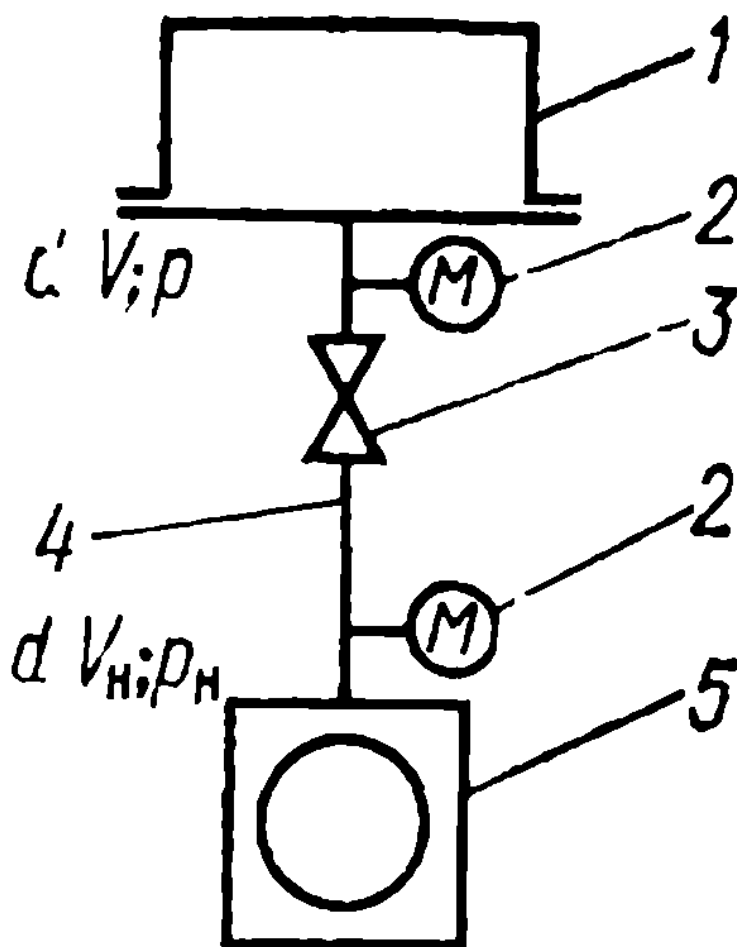


Рис. 30. Простейшая вакуумная схема. 1. – откачиваемая камера; 2. – вакуумметр (манометр); 3. – вакуумный вентиль; 4. – трубопровод; 5. – вакуумный насос [5, с. 39]

Создаваемый в камере вакуум зависит от быстроты откачки насоса, сопротивления трубопровода и быстроты натеканий в самой камере. Последние возникают по причине негерметичности системы

(натекание газа через вакуумные неплотности), десорбции газов с поверхности и из объёма материалов камеры и других элементов системы, диффузии внешних газов через стенки вакуумных конструкций. Если система достаточно вакуумплотна, низкий и даже средний вакуум может сохраняться при отсечении откачки длительное время (например вакуум в электровакуумных приборах, радиолампах может сохраняться годы и даже десятилетия). При создании же высокого и, особенно, сверхвысокого вакуума требуется постоянная откачка; при отключении вакуумного насоса и надёжного перекрытия камеры (вакуумным вентиляем) вакуум довольно быстро «портится».

Давление газа на входе в вакуумный насос называется **впускным давлением** (на рис. 30 – P_n). При установившемся процессе откачки оно примерно равно (или немного меньше) целевому значению вакуума (на рис. 30 – P). Давление на выходе вакуумного насоса называется **выпускным** $P_{\text{вып}}$. Например, механический форвакуумный насос работает от атмосферы ($P_{\text{вып}} = 760 \text{ Torr}$) и может откачивать систему до $P_n \approx 10^{-3} \text{ Torr} \approx 10^{-1} \text{ Па}$. Если с ним в паре работает высоковакуумный диффузионный паромасляный насос с $P_{\text{вып}} = 0,2 \text{ Torr} = 26,6 \text{ Па}$ и $P_n = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Torr} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$, то необходимо следить, чтобы после форвакуумной откачки и отключения форвакуумного насоса значение $P_{\text{вып}}$ высоковакуумного насоса не превысило паспортное значение. Обычно в таких системах форвакуумный насос работает постоянно.

Быстротой действия вакуумного насоса S_n при данном впускном давлении P_n называется объём газа, поступающий в работающий насос в единицу времени при этом давлении.

Быстротой откачки вакуумной системы S_0 называется объём газа, поступающий в единицу времени из откачиваемой камеры в трубопровод при давлении P .

Потоком газа в данном сечении PS называется количество газа, проходящее в единицу времени через поперечное сечение вакуумного трубопровода.

Трубопровод оказывает сопротивление прохождению откачиваемого газа, поэтому $P > P_n$. Величина, обратная этому сопротивлению, называется **проводимостью трубопровода** U .

Эти величины связаны между собой **основным уравнением вакуумной техники**:

$$S_0 = \frac{S_n U}{S_n + U} \quad (156)$$

Оно лежит в основе расчётов вакуумных систем.

v16 Глава 3. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. МЕХАНИЧЕСКИЕ ОБЪЁМНЫЕ НАСОСЫ

v17 § 1. Введение

В этой главе будут рассмотрены устройство и принцип действия различных вакуумных насосов. В силу специфики данного учебного пособия теоретические основы и технические характеристики не рассматриваются.

По принципу действия вакуумные насосы весьма разнообразны и используются для получения низкого, среднего и высокого вакуума в различных диапазонах рабочего давления. Их можно классифицировать следующим образом.

1. Механические вакуумные насосы.

- 1.1. Поршневые насосы.
- 1.2. Жидкостно-кольцевые насосы.
- 1.3. Двухроторные насосы.
- 1.4. Пластинчато-роторные и пластинчато-статорные насосы.
- 1.5. Плунжерные насосы.
- 1.6. Турбомолекулярные насосы.

2. Струйные вакуумные насосы.

- 2.1. Жидкостно-струйные насосы.
- 2.2. Пароэжекторные насосы.
- 2.3. Бустерные насосы.
- 2.4. Диффузионные насосы.

3. Насосы на электрофизических принципах действия.

- 3.1. Испарительные геттерные насосы.
- 3.2. Геттерно-ионные насосы.
- 3.3. Магнитные электроразрядные насосы.
- 3.4. Геттерные вакуумные насосы.

4. Крионасосы.

- 4.1. Высоковакуумные конденсационные насосы.
- 4.2. Низковакуумные конденсационные насосы.
- 4.3. Адсорбционные насосы.

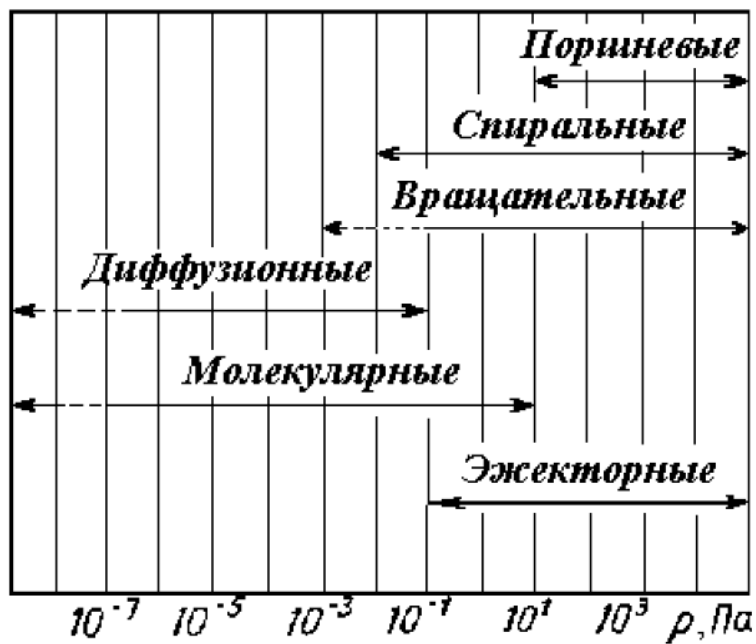


Рис. 31. Диапазоны рабочих давлений механических вакуумных насосов. Пунктир – лабораторные образцы, остальное – промышленные [7, с. 156]

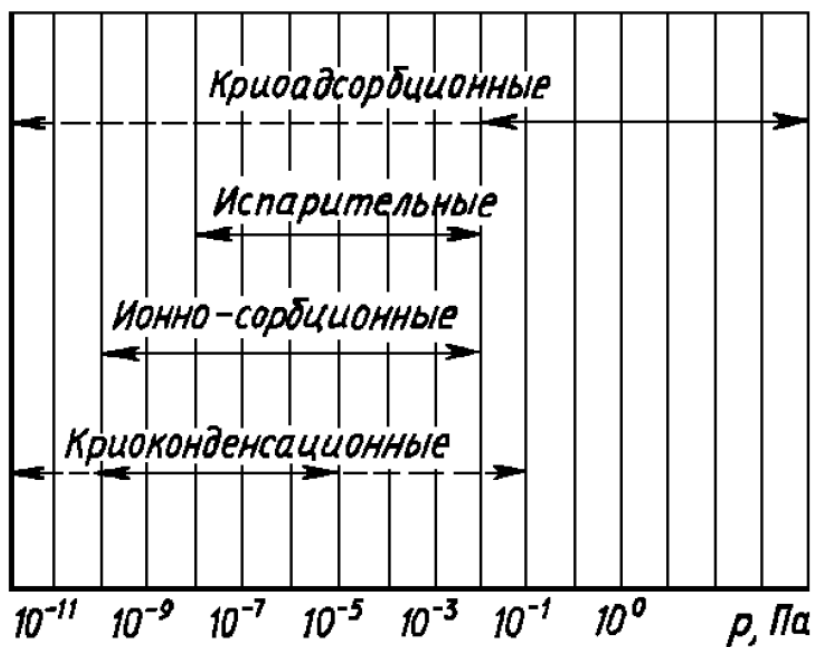


Рис. 32. Диапазоны рабочих давлений насосов физико-химических принципов действия. Пунктир – лабораторные образцы, остальное – промышленные [7, с. 197]

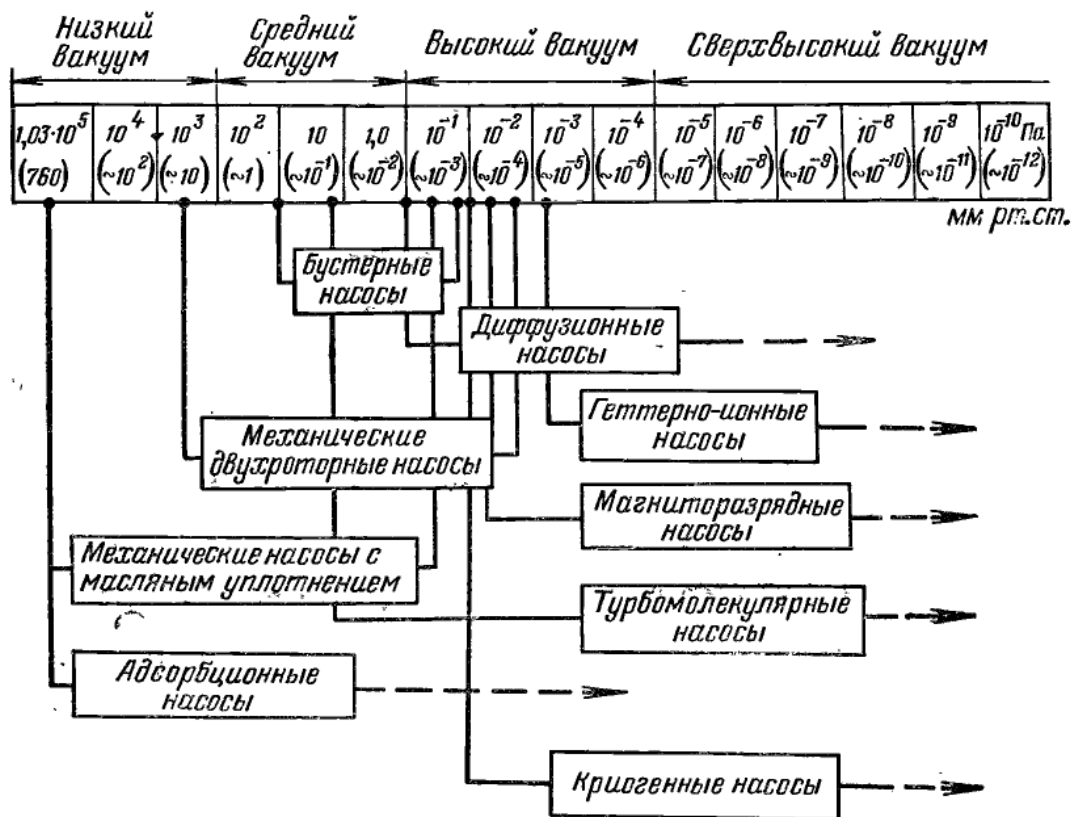


Рис. 33. Области действия вакуумных насосов. В скобках приведены давления в Torr [8, с. 85]

Таблица 3. Основные параметры вакуумных насосов [8, с. 86-87]

Тип насоса	Давление, Па		Быстрота действия, л/с
	полное	остаточное	
Водоструйные	100—665 (~ 10—50)	—	0,1—300
Водокольцевые	400—665 (~ 30—50)	200—400 (~ 15—30)	1—800
Многопластинчатые	200—330 (~ 15—25)	200—330 (~ 15—25)	2—1200
С масляным уплотнением:			
одноступенчатые	2—6,6 (1,5 · 10 ⁻² —5 · 10 ⁻²)	0,27—0,66 (2 · 10 ⁻³ —5 · 10 ⁻³)	0,5—500
двухступенчатые	0,66—2 (5 · 10 ⁻³ —1,5 · 10 ⁻²)	10 ⁻² —6,6 · 10 ⁻² (1 · 10 ⁻⁵ —5 · 10 ⁻⁴)	0,2—50
Двухроторные:			
одноступенчатые	0,66 (5 · 10 ⁻³)	6,6 · 10 ⁻² (5 · 10 ⁻⁴)	15—4 · 10 ⁴
двухступенчатые	10 ⁻³ —10 ⁻² (~ 10 ⁻⁵ —10 ⁻⁴)	10 ⁻⁴ —10 ⁻³ (~ 10 ⁻⁶ —10 ⁻⁵)	5—50

(продолжение табл. 3)

Тип насоса	Давление, Па		Быстрота действия, л/с
	полное	остаточное	
Пароводяные эжекторные:			
низковакуумные	100 (~ 1)	—	5—10 ⁵
средневакуумные	10 ⁻¹ —1 ($\sim 10^{-3}$ —10 ⁻²)	—	10 ³ —10 ⁵
Паромасляные бустерные	10 ⁻² ($\sim 10^{-4}$)	—	200—3 · 10 ⁴
диффузионные высоковакуумные	6,6 · 10 ⁻⁴ ($\sim 5 \cdot 10^{-6}$)	6,6 · 10 ⁻⁵ ($\sim 5 \cdot 10^{-7}$)	5—2 · 10 ⁵
диффузионные сверхвысоковакуумные	6,6 · 10 ⁻⁷ ($\sim 5 \cdot 10^{-9}$)	10 ⁻⁹ ($\sim 10^{-11}$)	100—2 · 10 ⁵
Парортутные	—	10 ⁻⁴ —10 ⁻¹⁰ ($\sim 10^{-6}$ —10 ⁻¹²)	5—10 ⁴
Турбомолекулярные	—	10 ⁻⁷ —10 ⁻⁹ ($\sim 10^{-9}$ —10 ⁻¹¹)	50—10 ⁴
Сорбционные:			
адсорбционные	—	10 ⁻¹ —10 ⁻³ ($\sim 10^{-3}$ —10 ⁻⁵)	1—10
испарительные	—	10 ⁻⁷ —10 ⁻¹¹	2—2 · 10 ⁴
геттерные	—	($\sim 10^{-9}$ —10 ⁻¹³)	2—5 · 10 ⁴
ионно-геттерные	—	10 ⁻⁷ —10 ⁻¹¹ ($\sim 10^{-9}$ —10 ⁻¹³)	2—5 · 10 ⁴
магнитные электроразрядные	—	10 ⁻⁷ —10 ⁻⁹ ($\sim 10^{-9}$ —10 ⁻¹¹)	2—10 ⁴
Криогенные:			
конденсационные	—	10 ⁻⁷ —10 ⁻⁹ ($\sim 10^{-9}$ —10 ⁻¹¹)	50—10 ⁵
криосорбционные	—	10 ⁻¹³ —10 ⁻¹⁵ ($\sim 10^{-12}$ —10 ⁻¹⁵)	500—10 ⁵

Примечания: 1. Прочерк в таблице означает, что данный параметр не используется.

2. При размещении элементов сорбционных и криогенных насосов на стенках откачиваемого объема быстрота действия может составить миллионы л/с.

3. В скобках даны значения давлений, выраженные в мм рт. ст.

Области применения механических насосов приведены на рис. 31, а насосов физико-химического принципа действия — на рис. 32. На рис. 33 показаны области действия этих же насосов в привязке к областям низкого, среднего и высокого вакуума.

Основные параметры вакуумных насосов представлены в табл. 3, — быстродействие и полное и остаточное давление.

v18 § 2. Поршневые вакуумные насосы

Принцип действия поршневых насосов сводится к периодическому поступлению части откачиваемого газа из камеры в цилиндр насоса, отсечению объёма цилиндра от объёма камеры, и выталкиванию газа наружу из цилиндра с помощью поршня. Отсечение обеспечивается системой клапанов или золотником. Более производительны золотниковые насосы. Один из таких насосов, ПВН (поршневой вакуумный насос) системы МВТУ им. Баумана, представлен на рис. 34 и рис. 35.

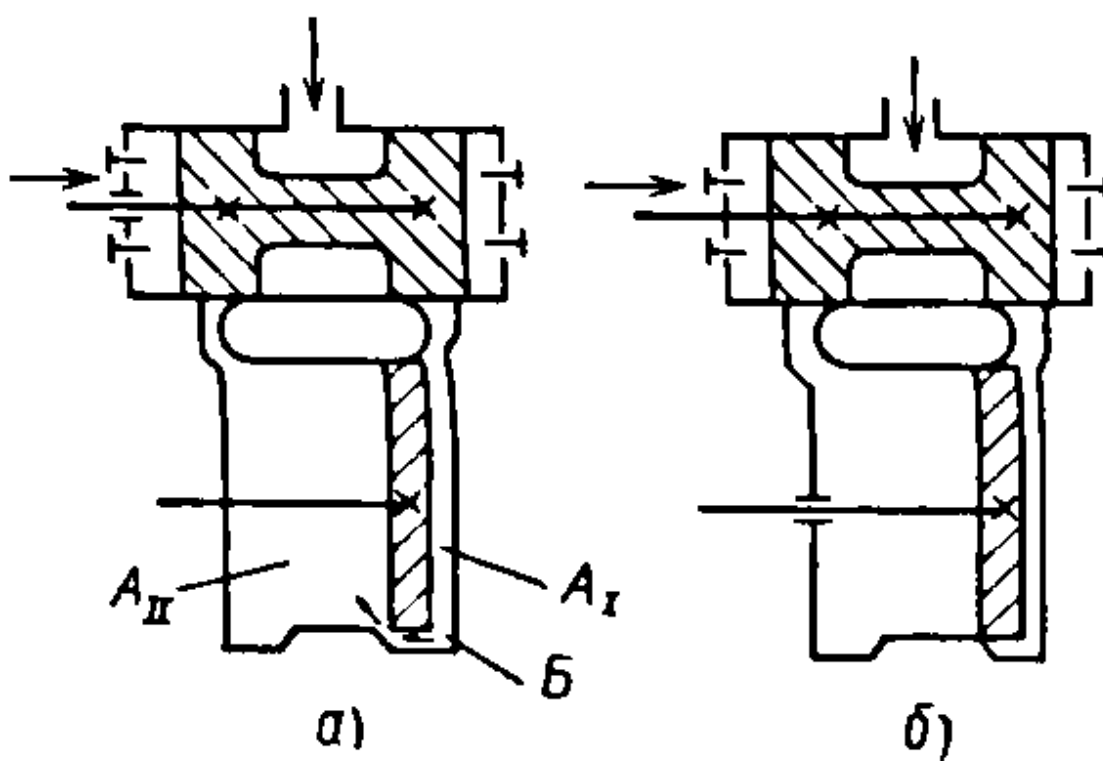


Рис. 34а-б. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником: A_I , A_{II} – полости цилиндра; B_I – полость золотника; B – перепускные каналы [4, с. 282]

Конструкция золотника (рис. 34а) сводится к следующему. В нижней части расположен цилиндр с полостями A_I и A_{II} . В нём по горизонтали передвигается поршень (заштрихованное сечение), который изображён в крайнем правом положении. Вверху цилиндра имеются два канала (на рисунке – слева и справа), через которые может

поступать откачиваемый газ или производиться выхлоп этого газа наружу. Сверху расположена полость золотника V_1 (рис. 34к), внутри которой по горизонтали может передвигаться золотник (заштрихованная деталь в виде «Н»). Золотник служит для своевременного перекрытия или освобождения каналов, по которым движется газ. В полости золотника слева и справа находятся клапаны («буква Т», лежащая на боку), через которые происходит выхлоп откачиваемого газа наружу. Перемещение поршня и золотника производится с помощью горизонтальных управляющих стержней; синхронность этих перемещений обеспечивается механикой насоса. Откачиваемый газ поступает в насос сверху. При движении поршня (например, слева из крайнего положения, направо) в полости цилиндра по ходу движения (в нашем примере – в правой полости) происходит

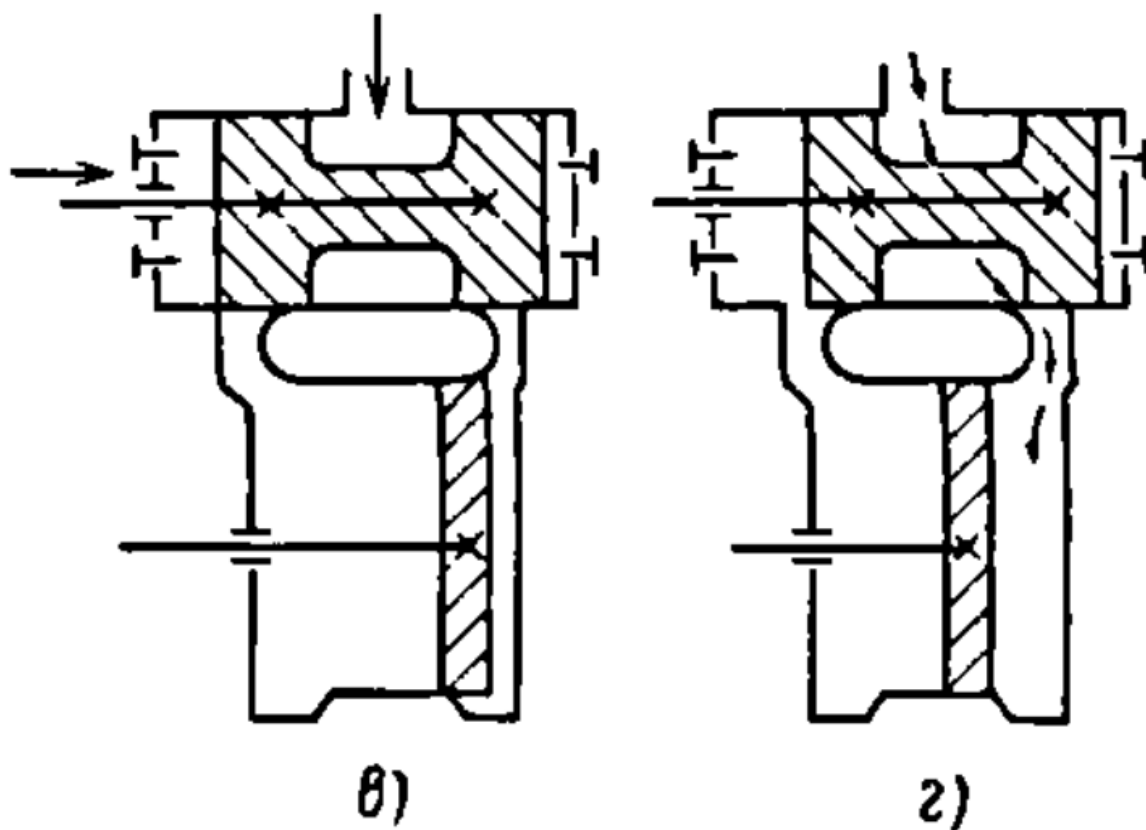


Рис. 34в-г. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником: A_1, A_2 – полости цилиндра; V_1 – полость золотника; Б – перепускные каналы [4, с. 282]

сжатие и выброс газа. Одновременно в другой полости (в примере – левой) происходит всасывание газа по каналам из откачиваемой камеры. При движении поршня в другом направлении происходят аналогичные процессы. Если поршень двигался слева направо, то при его крайнем правом положении в полости A_I (рис. 34а) образуется мёртвая зона с повышенным давлением газа, который не смог удалиться наружу. В цилиндре предусмотрены перепускные каналы Б (рис. 34а), через которые этот газ стравливается в полость A_{II} цилиндра (в эту полость происходит всасывание, но давление там всё равно меньше, чем в мёртвой зоне). Устройство перепускных каналов показано на рис. 34н.

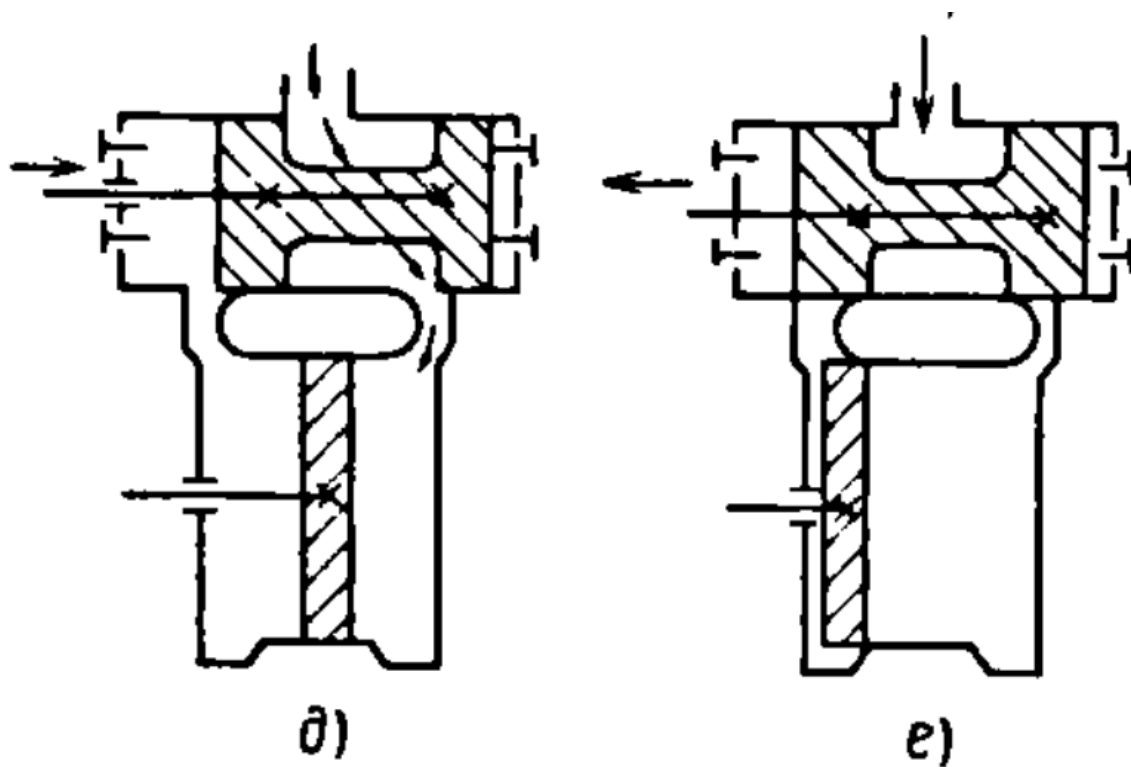


Рис. 34д-е. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником: A_I , A_{II} – полости цилиндра; V_I – полость золотника; Б – перепускные каналы [4, с. 282]

Рассмотрим работу насоса. В исходном положении (рис. 34а) поршень завершает движение вправо и происходит перепуск газа из мёртвой зоны в полость A_{II} через канал Б. Золотник находится в среднем положении и двигается тоже направо. Затем поршень

начинает двигаться влево и перекрывает канал Б (рис. 34б). Далее поршень ещё сдвигается немного влево, полость A_I начинает расширяться и давление газа ней падает – рис. 34в. Золотник,двигающийся вправо, правый канал пока перекрывает, а затем (рис. 34г) – открывает для всасывания. Поршень двигается налево и всасывает газ через правый канал. Золотник занимает крайнее правое положение (рис. 34д) и начинает двигаться вправо. При этом движении он перекрывает правый верхний канал и всасывание прекращается (рис. 34е). Дальнейшее движение поршня немного влево приводит к уменьшению давления в полости A_I , затем открывается левый перепускной канал Б (рис. 34ж), через который газ из малого (на этот момент) объёма A_{II} перепускается в A_I (рис. 34з). Поршень достигает левого крайнего положения и начинает двигаться вправо. Во время перепуска верхние каналы перекрыты золотником. Перепуск продолжается, пока поршень,двигающийся вправо, не закроет левый перепускной канал (рис. 34и).

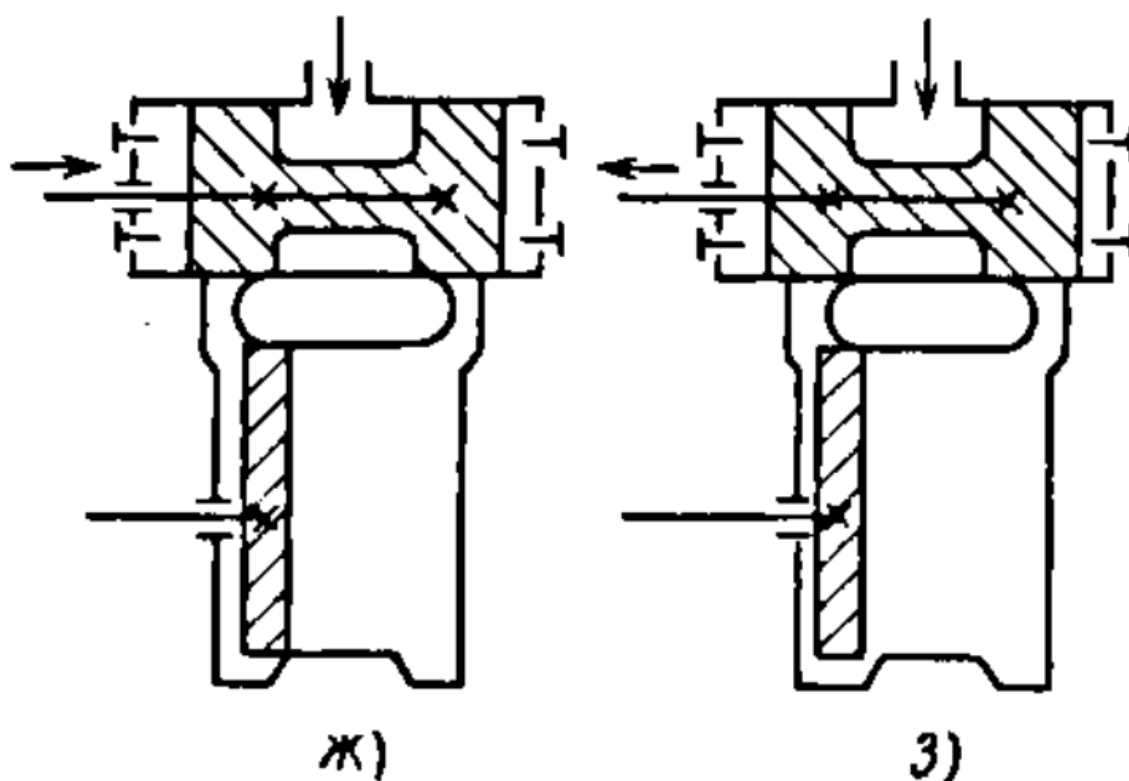


Рис. 34ж-з. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником: A_I , A_{II} – полости цилиндра; V_I – полость золотника; Б – перепускные каналы [4, с. 282]

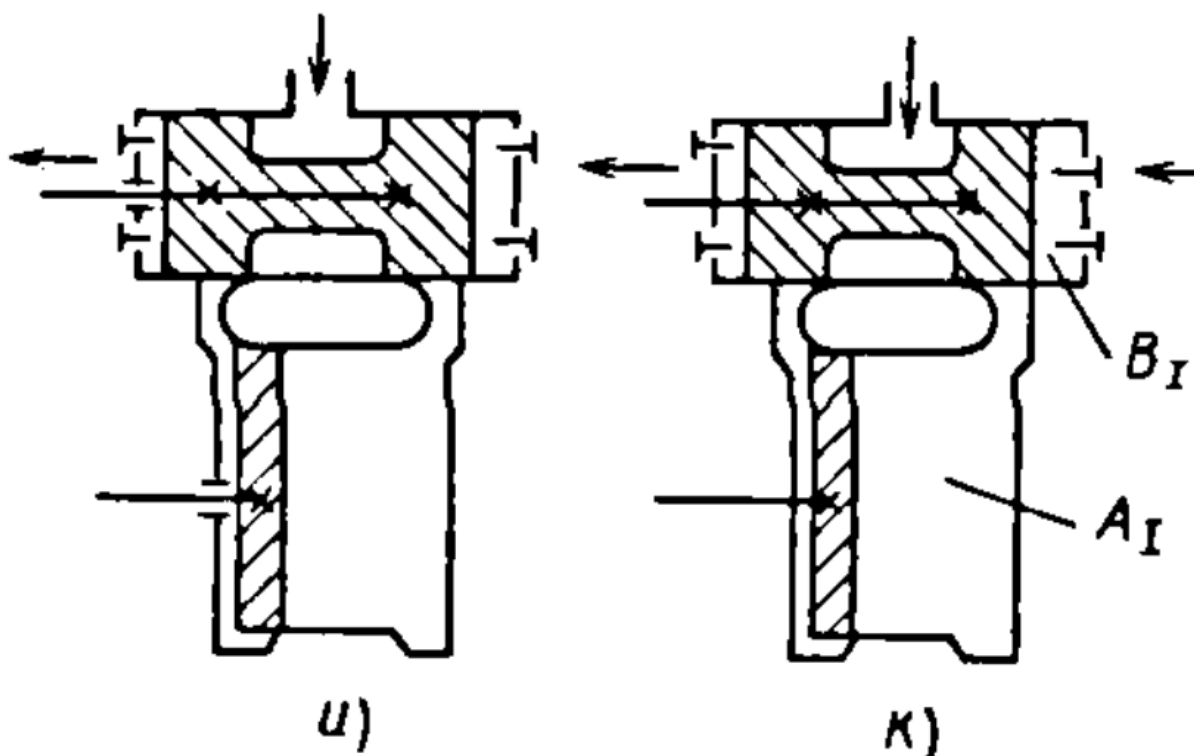


Рис. 34и-к. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником: A_I , A_{II} – полости цилиндра; B_I – полость золотника; B – перепускные каналы [4, с. 282]

После закрытия левого перепускного канала, через небольшое время, золотник, продолжающий двигаться влево, начинает открывать правый верхний канал и полости A_I и B_I соединяются (рис. 34к); так как поршень продолжает двигаться вправо, происходит выброс откачиваемого газа из A_I и B_I через правые верхние клапаны наружу. При этом объём A_I уменьшается, а B_I – увеличивается, так как золотник движется влево. Затем золотник достигает крайнего левого положения (рис. 34л) и начинает двигаться направо. После этого и объём A_I , и объём B_I уменьшается. Причём слева от поршня происходит всасывание, а справа – нагнетание и выброс газа. Через некоторое время золотник перекрывает верхние каналы (рис. 34м) и, спустя небольшое время, поршень открывает правый перепускной канал, и система приходит в исходное положение – рис 34а.

В описанной схеме золотник, помимо своей основной функции, на некоторых стадиях выполняет дополнительное сжатие газа, поэтому

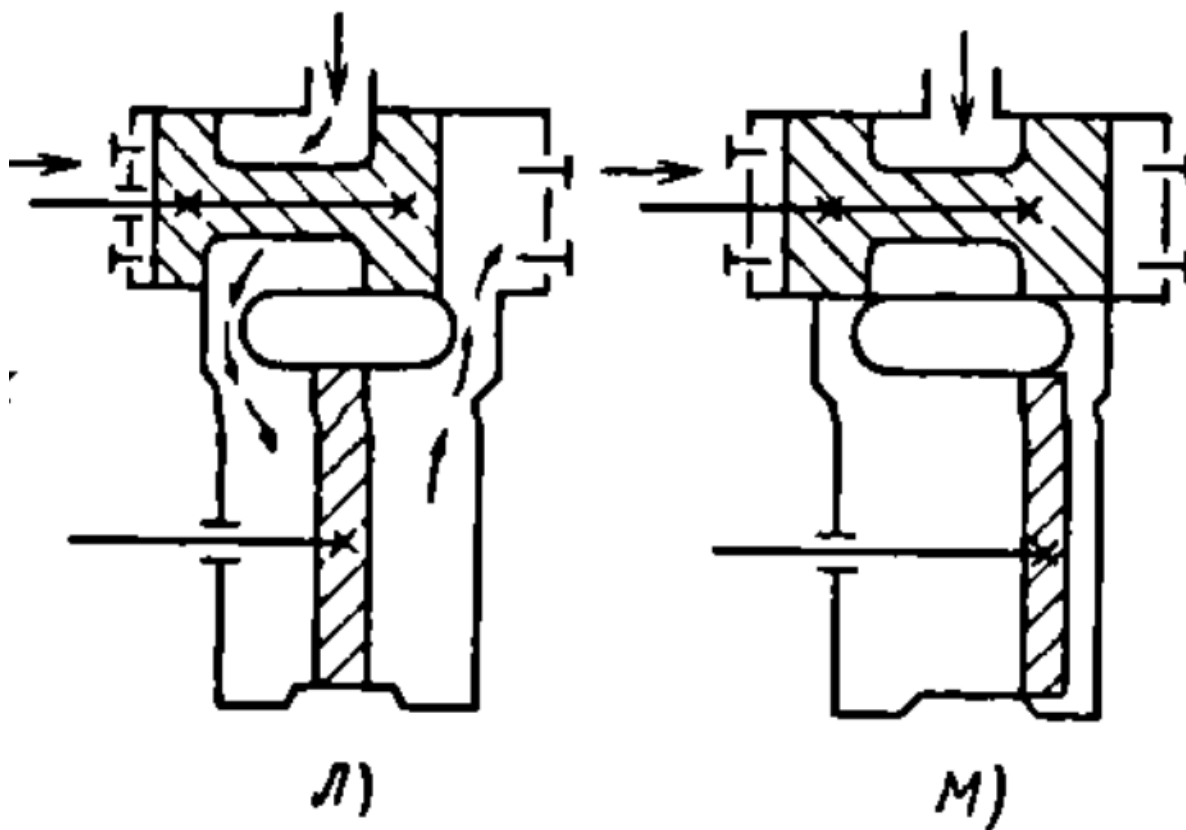


Рис. 34л-м. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником: A_I, A_{II} – полости цилиндра; B_I – полость золотника; Б – перепускные каналы [4, с. 282]

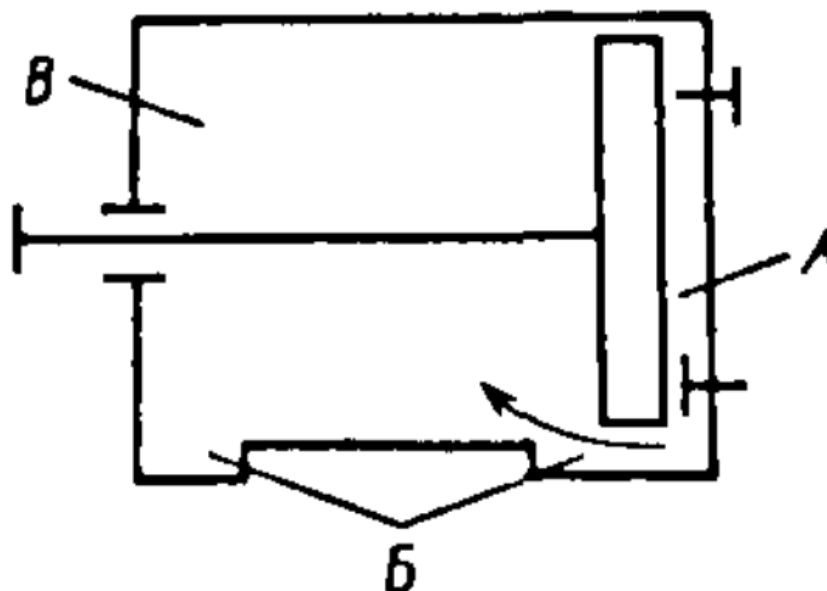


Рис. 34н. Схемы перепуска газа на зеркале цилиндра: А, В – полости цилиндра, Б – перепускные каналы [4, с. 281]

схема считается **двухступенчатой**. Существуют также **одноступенчатые схемы**, менее производительные.

Синхронность работы поршня и золотника обеспечена механической конструкцией насоса с приводом от электрического двигателя через соответствующие устройства (кривошипно-шатунный механизм и др.).

Вакуумное уплотнение работающих механизмов осуществляется с помощью вакуумного масла. Упрощённо можно считать, что изображённое на рис. 34 устройство может быть погружено в ёмкость с вакуумным маслом. Верхний патрубок соединён с откачиваемой камерой, зазоры между поршнем, золотником и соответствующими цилиндрами уплотняются вакуумным маслом, препятствующим проникновению газа и смазывающим трущиеся поверхности. При начале работы насоса откачиваемый газ вытесняет масло из полостей цилиндров. Выхлоп откачиваемого газа происходит через верхние клапаны, левые и правые, непосредственно в вакуумное масло, залитое во внешнюю ёмкость. Оттуда газ попадает в атмосферу.

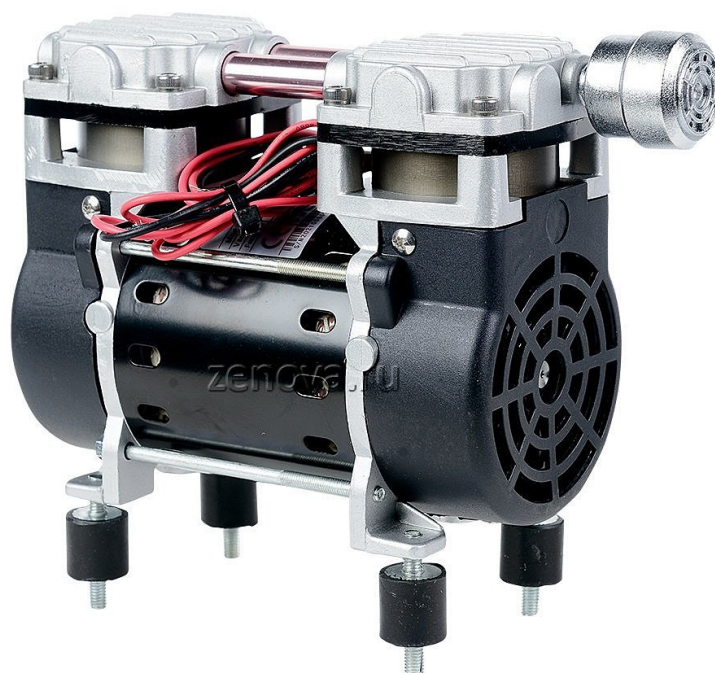


Рис. 35а. Поршневой безмасляный вакуумный насос Zenova RP-300V-220 [<https://zenova.ru/category/porshnevie-vakuumnyje-nasosy/model/rp-300v-220>]



Рис. 35б. Поршневой вакуумный насос Stairs Vacuum PVP-140V
[<https://zenova.ru/category/porshnevie-vakuumnyje-nasosy/model/pvp-140v>]

Реальное устройство насосов сложнее. В частности, требуется интенсивное водяное охлаждение цилиндров. Промышленность выпускает насосы ПВН марок ЗВНП-3, ВНП-6 и 2ДВНП-6. Они производят откачку от атмосферы до остаточного давления около 400 – 40 Па. Некоторые современные поршневые насосы представлены на рис. 35а и 35б.

v19 § 3. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (ЖКВН)

Эти насосы также называются насосами с жидкостным поршнем. Принцип их действия следующий (рис. 36). Цилиндрический корпус 1 с торца имеет всасывающее отверстие 3 и выхлопное отверстие 5. В цилиндре (статоре) эксцентрично (несоосно) расположено рабочее колесо (ротор) 2 с неподвижно закреплёнными лопатками. Внутри цилиндра залита жидкость (например – вода). При вращении ротора жидкость под действием центробежных сил прижимается к внутренним стенкам цилиндра и образует жидкостное кольцо 4. Длина лопаток рабочего колеса подобрана так, чтобы их концы заходили в жидкостное кольцо. Таким образом, между жидкостным кольцом и лопатками насоса образуются замкнутые отдельные ячейки. При

движении ротора размер этих ячеек всё время меняется. Сначала их объём увеличивается (на рис. 36 – см. справа) и газ через торцевое отверстие 3 всасывается в полость насоса. Затем объём ячеек начинает уменьшаться, газ сжимается и через выхлопное отверстие 5 удаляется из насоса.

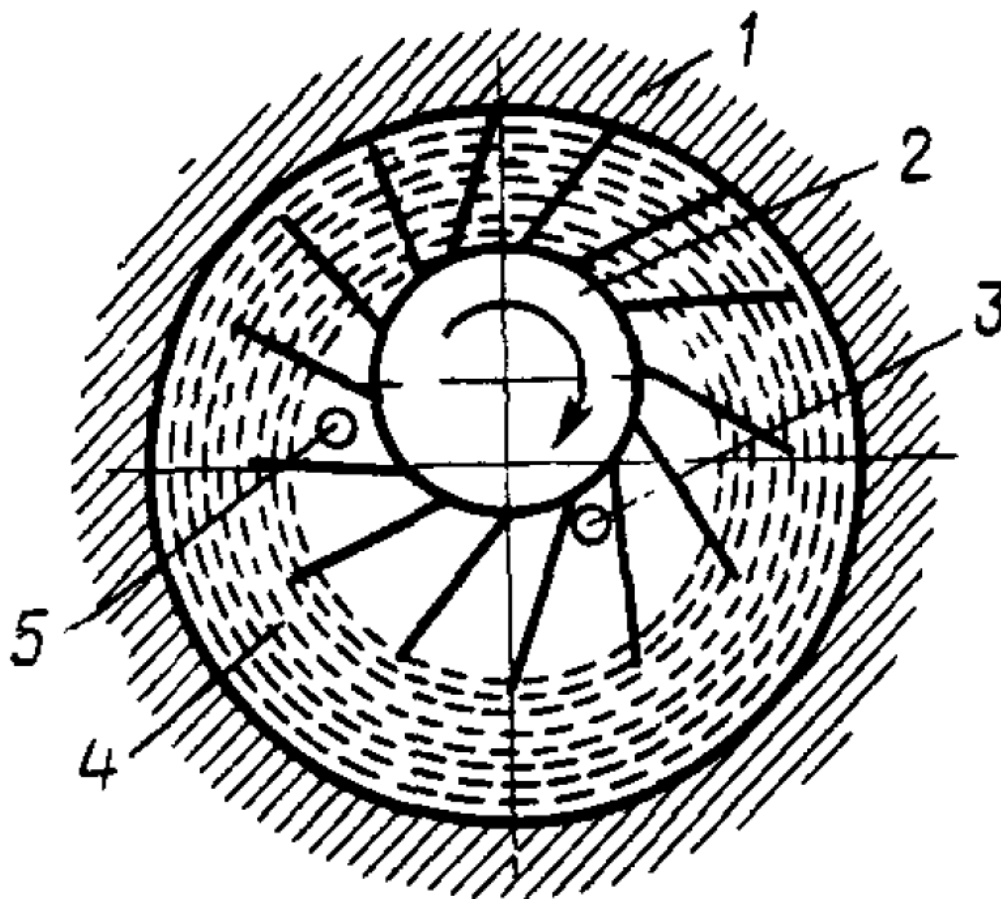


Рис. 36. Схема жидкостно-кольцевого насоса. 1 – цилиндрический статор; 2 – эксцентричный ротор; 3 – впускное отверстие; 4 – жидкостное кольцо; 5 – выхлопное отверстие [7, с. 164]

В реальных насосах присутствуют не отверстия 3 и 5 (рис. 36), а окна *в* и *г* соответственно (рис. 37а). При увеличении ячеек в движении в них всё время поступает откачиваемый газ из окна *в*, а при уменьшении объёма ячеек те сначала отсечены от всех окон и газ в них сжимается, а в конце происходит выхлоп в окно *г*.

Существует разновидность ЖКВН двойного действия (рис. 37б). Статор этих насосов представляет собой в сечении овал. Ротор с

лопатками расположен соосно. В торце статора имеются два всасывающих и два нагнетающих окна. Если в насосе простого действия (рис. 37а) работа происходит как бы «с одной стороны», то в насосе двойного действия (рис. 34в) – как бы «с двух сторон». Однако быстрота действия двойных насосов повышается не в два раза, а на 40 – 60%. Конструкция этих насосов значительно сложнее, а жидкостное кольцо в овальном цилиндре менее устойчиво. В настоящее время эти насосы используются крайне мало.

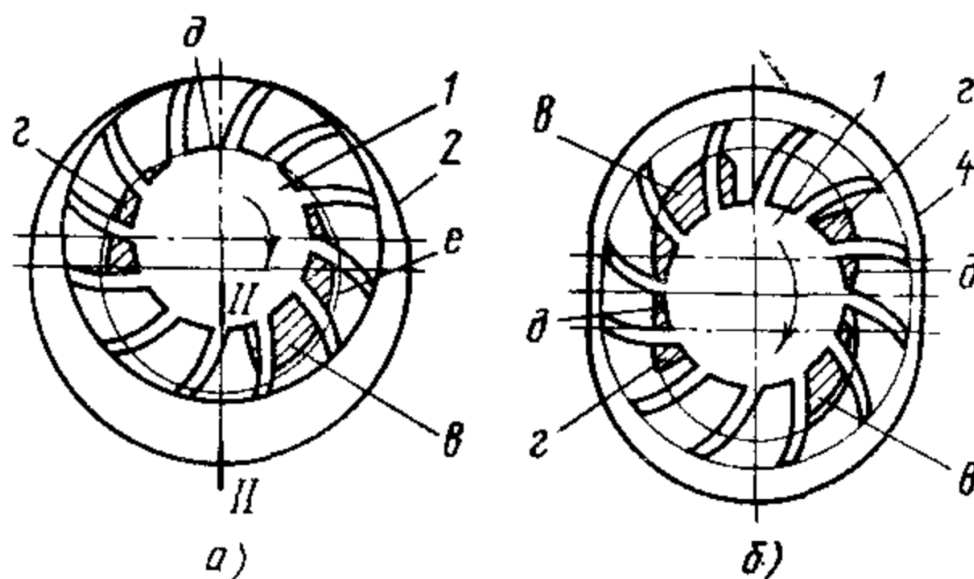


Рис. 37. Схемы ЖКВН простого (а) и двойного (б) действия. 1 – ротор; 2, 4 – статор (корпус); e, в – впускное отверстие; z, д – выхлопное отверстие [9, с. 215]

Конструкция ЖКВН не имеет клапанов и распределительных устройств (таких как золотники), и в этом их большое преимущество. Но самым главным преимуществом при этом является возможность откачки агрессивных, легко разлагающихся, полимеризующихся, воспламеняющихся и взрывоопасных газов и смесей. При этом требуется подбор соответствующей рабочей жидкости. В этом плане ЖКВН делятся на водокольцевые (марок ВВН) и жидкостно-кольцевые (марок ЖВН). В качестве рабочих жидкостей могут быть использованы кислоты, щёлочи, органика и т. д.

Указанные преимущества делают ЖКВТ уникальными по области применения. Откачку они производят от атмосферы до

остаточных давлений, определяемых давлением насыщенного пара рабочей жидкости.

На рис. 38 представлен водокольцевой ЖКВН марки ВВН-6.

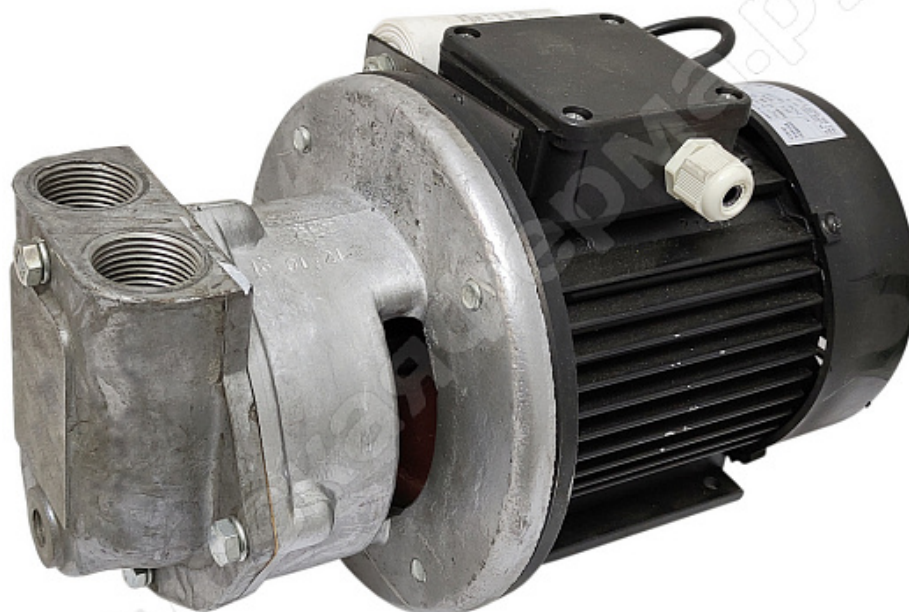


Рис. 38. Вакуумный насос водокольцевой ВВН-6
[<https://www.russkayaferma.ru/catalog/vakuumnyye-nasosy/vakuumnyy-nasos-vodokoltsevoy-vvn-6/>]

В окнах Медиа 1 и Медиа 2 представлена демонстрация работы водокольцевых насосов.

Медиа 1:

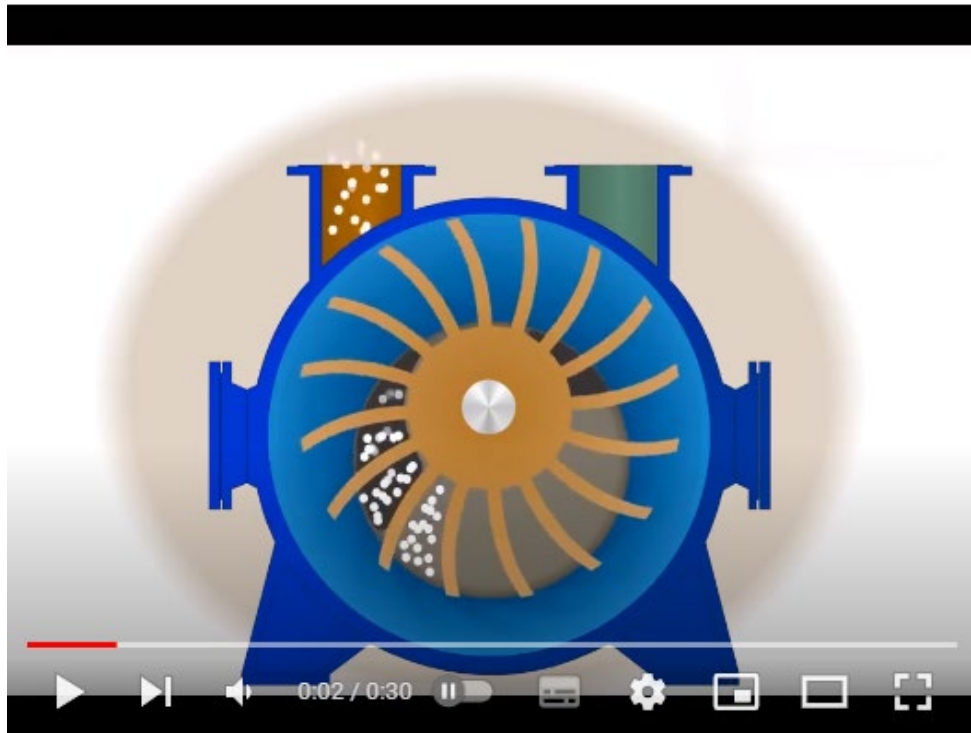
Принцип работы вакуумного водокольцевого насоса

<https://www.youtube.com/watch?v=-QDMaWbBhls>

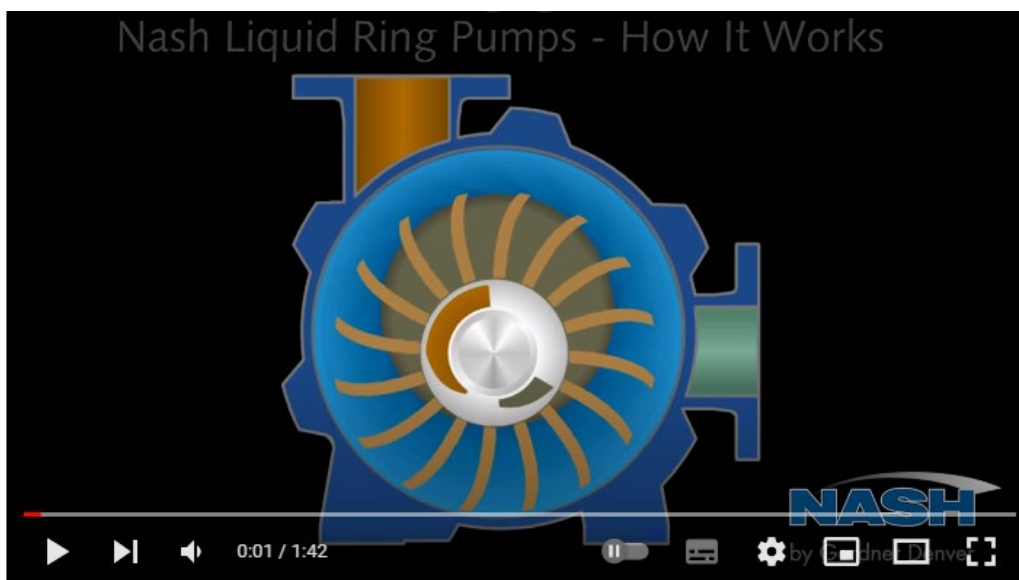
Медиа 2:

NASH Liquid Ring Vacuum Pump - How It Works

<https://www.youtube.com/watch?v=Y99ulE85e8Q>



Принцип работы вакуумного водокольцевого насоса
Откройте в папке Animation файл:
Медиа 1. Принцип работы вакуумного водокольцевого насоса



NASH Liquid Ring Vacuum Pump - How It Works
Откройте в папке Animation файл:
Медиа 2. Принцип работы водокольцевого вакуумного насоса
NASH

v20 § 4. Спиральные вакуумные насосы

На принципе постепенного сжатия и выхлопа откачиваемого газа в объёмах меняющейся величины построена и работа спиральных насосов. Конструкция такого насоса представлена на рис. 39. В корпусе насоса закреплена ленточная неподвижная спираль 3. Подвижная спираль 2 таких же размеров вставляется как бы внутрь неподвижной. По оси корпуса располагается вал, который вращается во внешних опорных подшипниках и входит внутрь насоса через вакуумное уплотнение. На торце этого вала эксцентрично крепится стержень, на который надевается центр подвижной спирали. При вращении вала

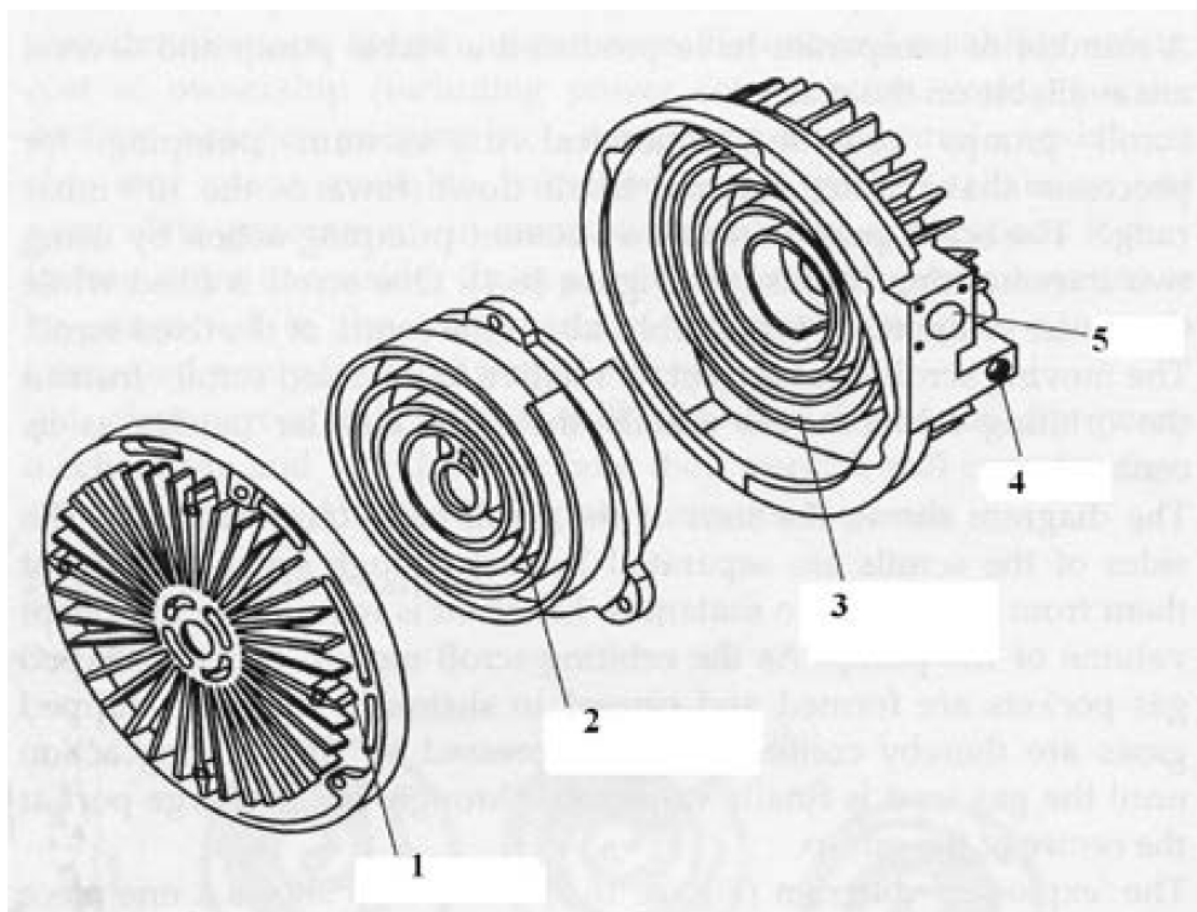


Рис. 39. Конструкция спирального насоса: 1 – крышка, 2 – движущаяся спираль, 3 – неподвижная спираль, 4 – выход, 5 – вход [7, с. 164]

эксцентричный стержень описывает небольшую окружность; все точки подвижной спирали как бы повторяют это движение, причём по оси эта спираль не вращается. Вся конструкция закрывается крышкой 1, которая крепится к корпусу. Всасывающее (входное) отверстие 5 находится на корпусе насоса, выхлоп происходит по центру (оси) и выведен также к краю корпуса – 4.

Работа насоса сводится к следующему (рис. 40). Между спиральями образуется серповидная полость с газом, поступившим из патрубка 5. При вращении вала и круговом движении подвижной спирали эта полость перемещается от края в сторону центра, постепенно уменьшая свой объем – последовательные положения 1 – 7 рис.40. Серповидная полость доходит от края до центра спирали за несколько оборотов центрального вала (или – циклов движения подвижной спирали).

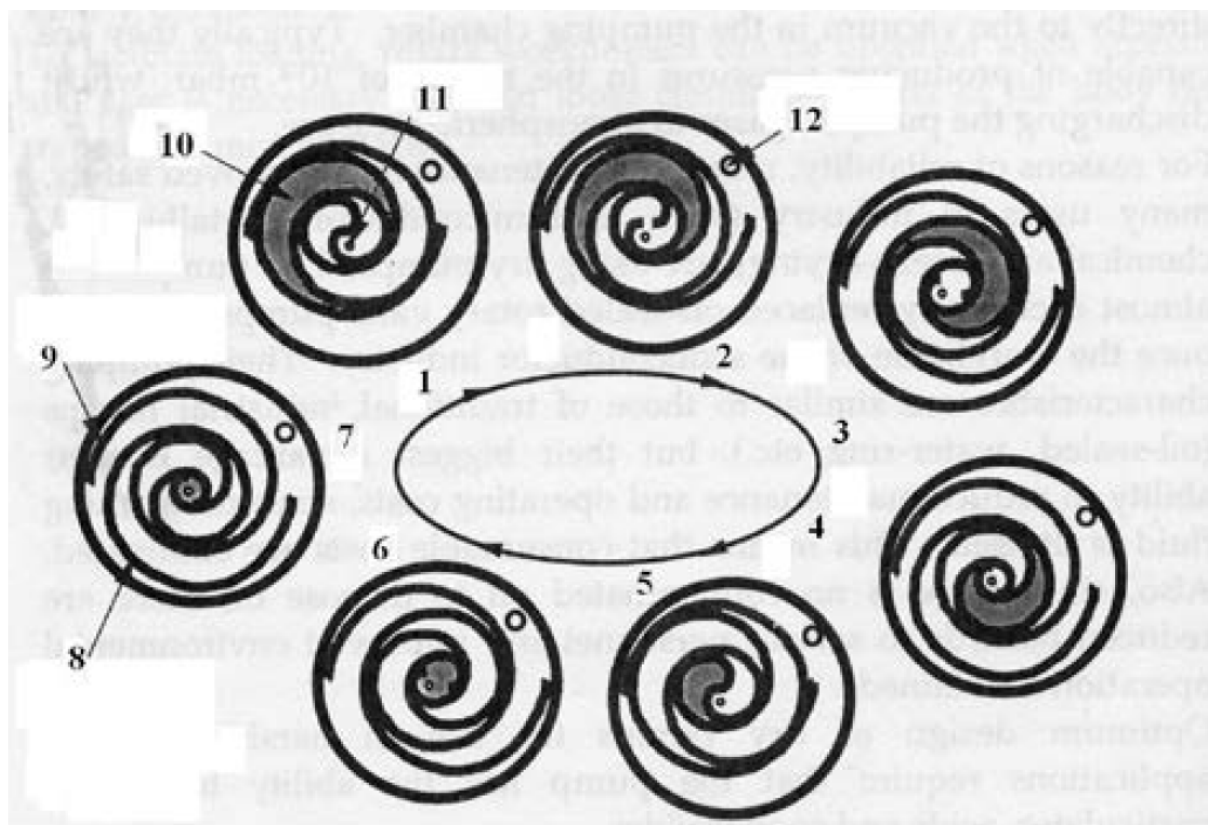


Рис. 40. Принцип действия спирального насоса: 1 – 7 – последовательные положения спиралей, 8 – подвижная спираль, 9 – неподвижная спираль, 10 – откачиваемый газ, 11 – выход, 12 – вход [7, с. 163]

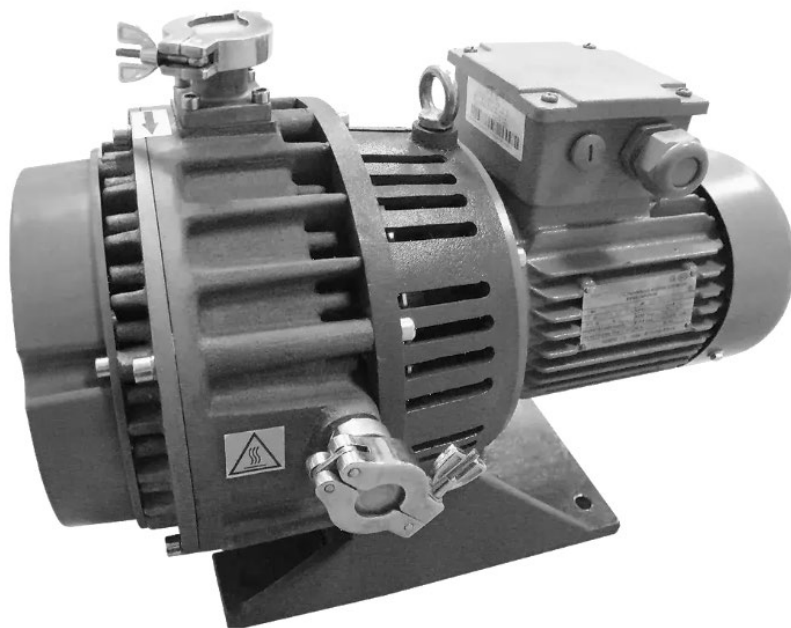


Рис. 41. Спиральный насос российской фирмы ERSTEVAK
[<https://vacuumid.com/articles/spiralnye-nasosy-vakuumnye-prinsip-raboty-forvakuumnye-nasosy-spiralnogo-tipa-sukhie-bezmaslyanye/>]



Рис. 42. Спиральный насос японской фирмы Anest Iwata
[<https://vacuumid.com/articles/spiralnye-nasosy-vakuumnye-prinsip-raboty-forvakuumnye-nasosy-spiralnogo-tipa-sukhie-bezmaslyanye/>]

Спиральные насосы могут работать только в очень чистых условиях, при отсутствии пыли или активных газов. Им присущи большая быстрота откачки, малые габариты, бесшумность и низкие вибрации. Спиральные насосы «безмасляные», т.е. не вносят загрязнений в вакуумную систему. Предельное остаточное давление довольно низкое: около 10 Па.

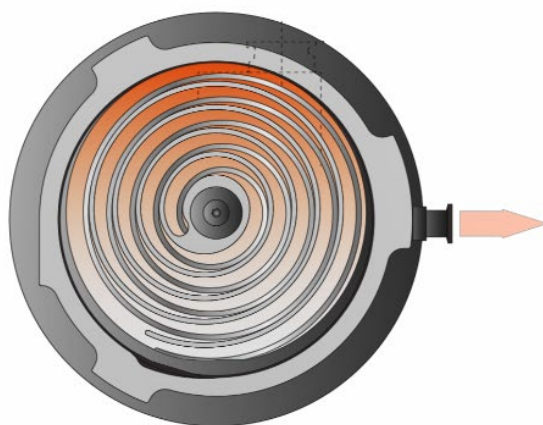
На рис. 41 и 42 показаны некоторые промышленные спиральные насосы.

В окне Медиа 3 представлена демонстрация работы спирального насоса.

Медиа 3:

Спиральный насос. Демонстрация работы

<https://www.buschvacuum.com/ru/ru/products/vacuum-pumps/scroll/scroll-technology/>



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 3. Спиральный насос. Демонстрация работы

v21 § 5. Двухроторные вакуумные насосы

Двухроторные вакуумные насосы (рис. 43) имеют два параллельных вала, вращающихся навстречу друг другу, синхронизация движения которых обеспечена двумя одинаковыми

шестернями, расположенными вне самого насоса. На валы жёстко насажены два ротора, в сечении напоминающие цифру 8; на самом деле в основе этого профиля лежит математическая кривая лемниската, которой соответствуют внешние обводы «восьмёрки». Такие профили при вращении роторов навстречу друг другу позволяют им соприкасаться только по одной линии, параллельной валам. Эта линия,

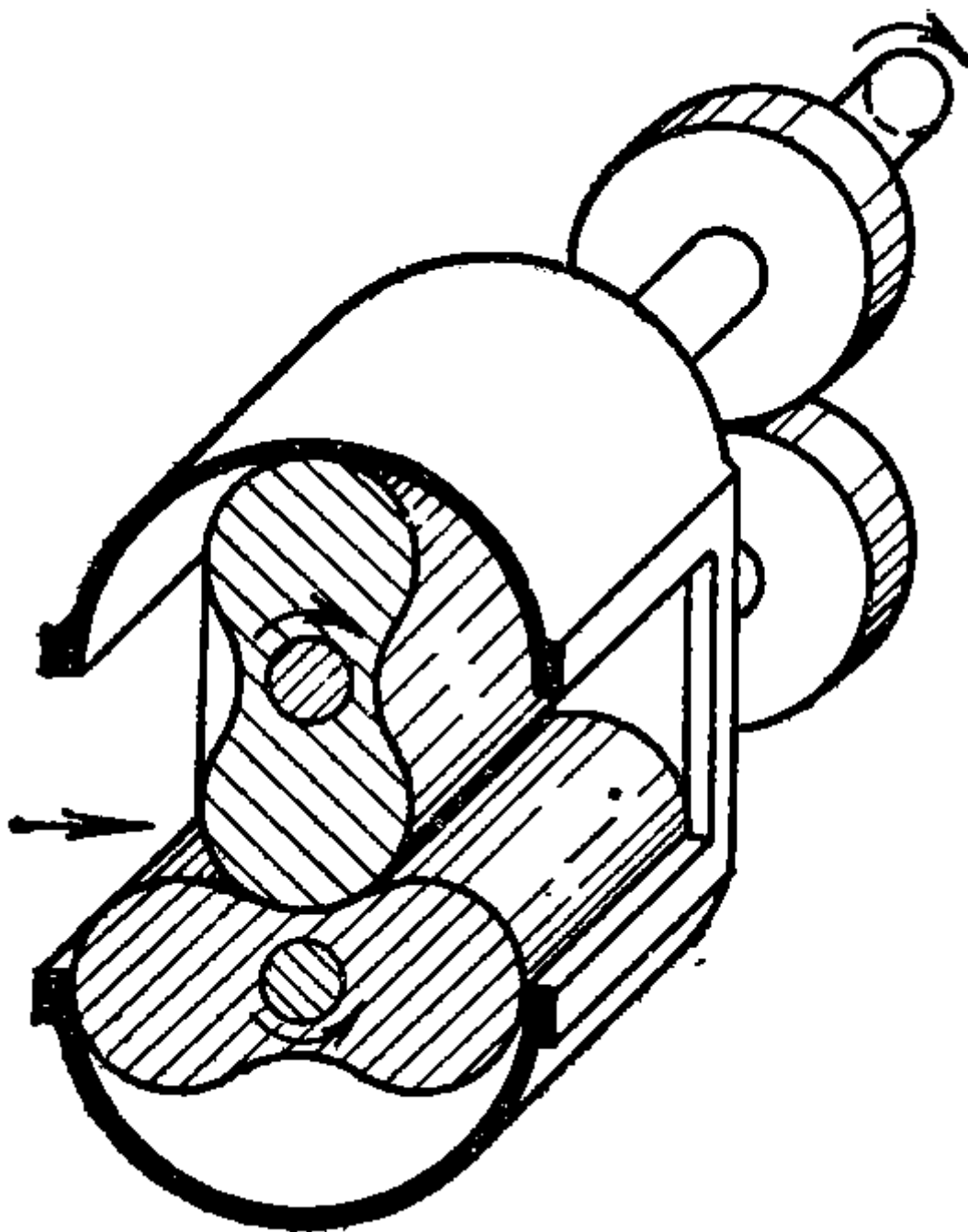


Рис. 43. Схема двухроторного вакуумного насоса [5, с. 112]

разделяющая объём насоса на две или три части, всё время перемещается, меняя положение соответствующих объёмов, что и позволяет перекачивать газ.

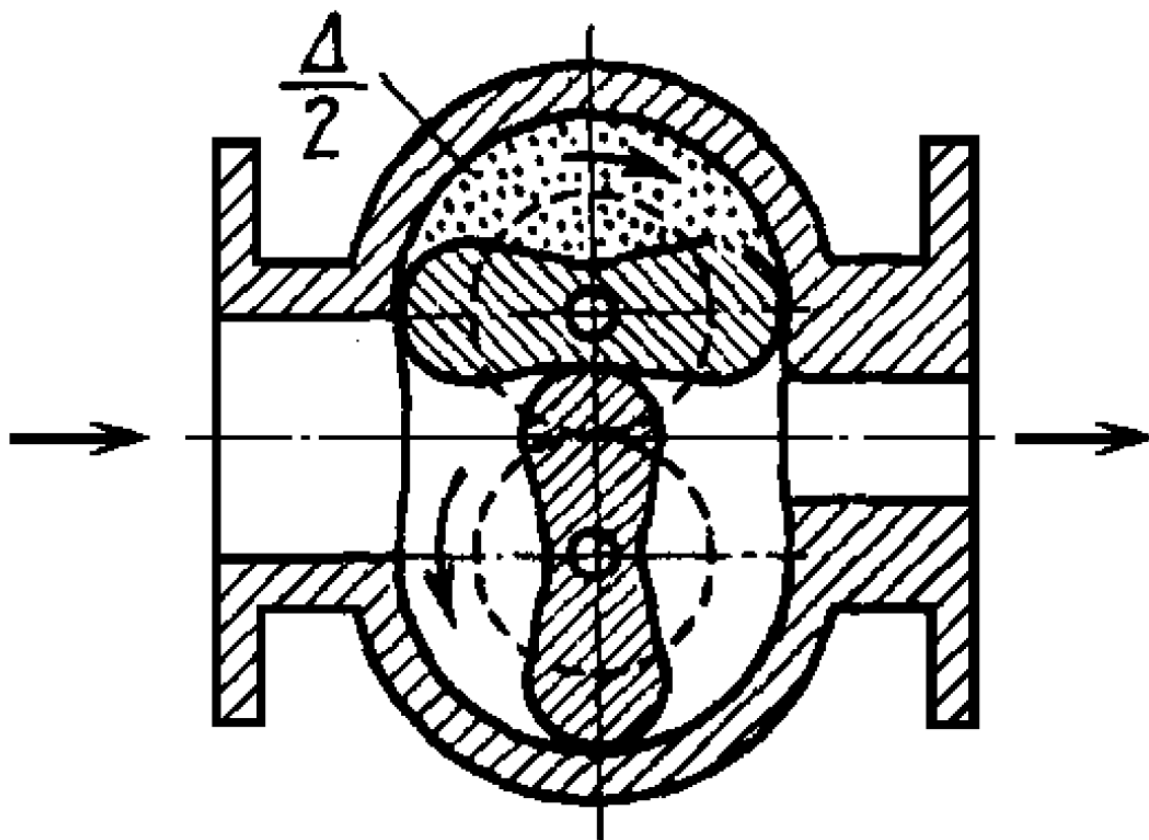


Рис. 44. Схема двухроторного насоса с лемнискатными профилями (насос Рутса) [7, с. 168]

Принцип работы этих насосов заимствован у давно известной воздуходувки Рутса, поэтому они носят такое же название. Этот принцип представлен на рис. 44. За один оборот валов каждый из роторов дважды перебрасывает объём газа, обозначенный точками, из откачиваемого объёма на выхлоп.

Более подробно работа насоса показана на рис. 45. Перекачка газа происходит слева направо объёмами, заключёнными между впадинами роторов и корпусом насоса (рис. 45а, 45д – в нижней части, рис. 45в – в верхней части). В перечисленных положениях объём насоса разделён на три части. В промежуточных положениях – верхний ротор

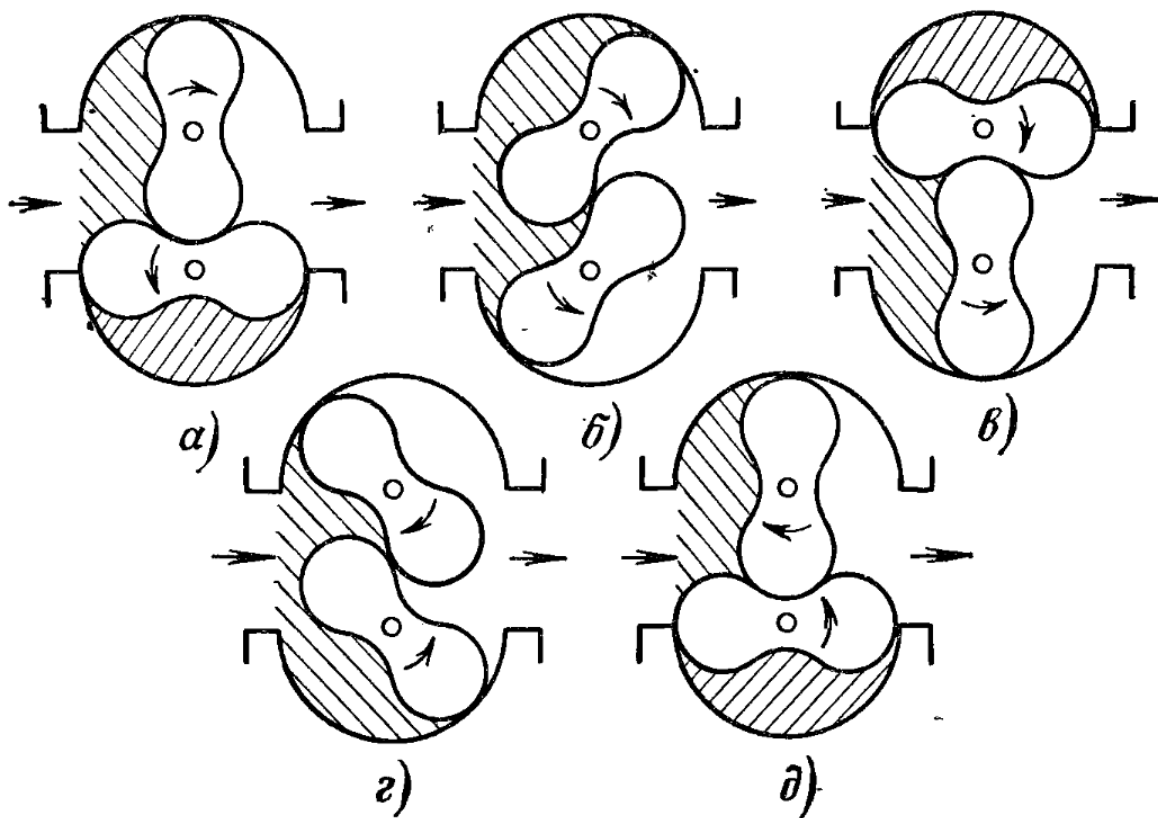


Рис. 45. Последовательные положения роторов при работе насоса Рутса [8, с. 109]

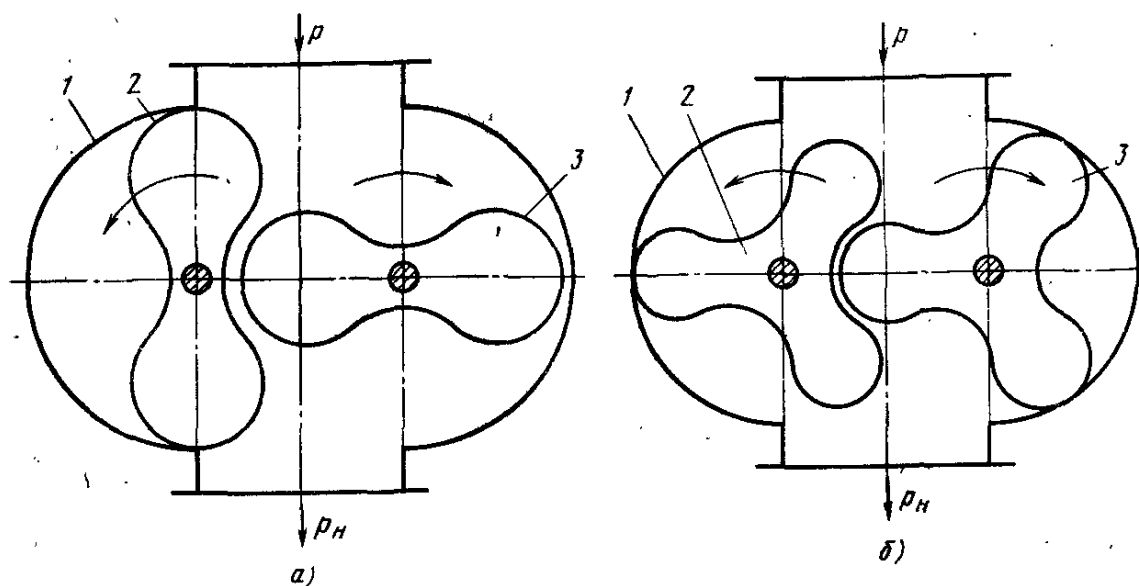


Рис. 46. Схемы двухроторных вакуумных насосов. 1 – корпус; 2, 3 – роторы [9, с. 232]

захватывает очередную порцию газа, а нижний выталкивает свою направо (рис. 45б) и наоборот, нижний – захватывает, а верхний – выталкивает (рис. 45г).

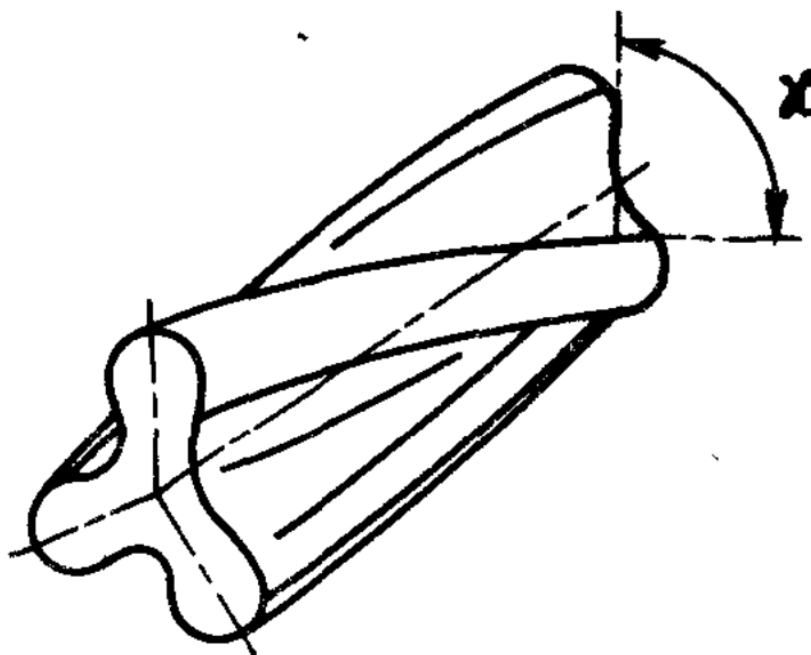


Рис. 47. Винтовой ротор двухроторного вакуумного насоса [9, с. 233]

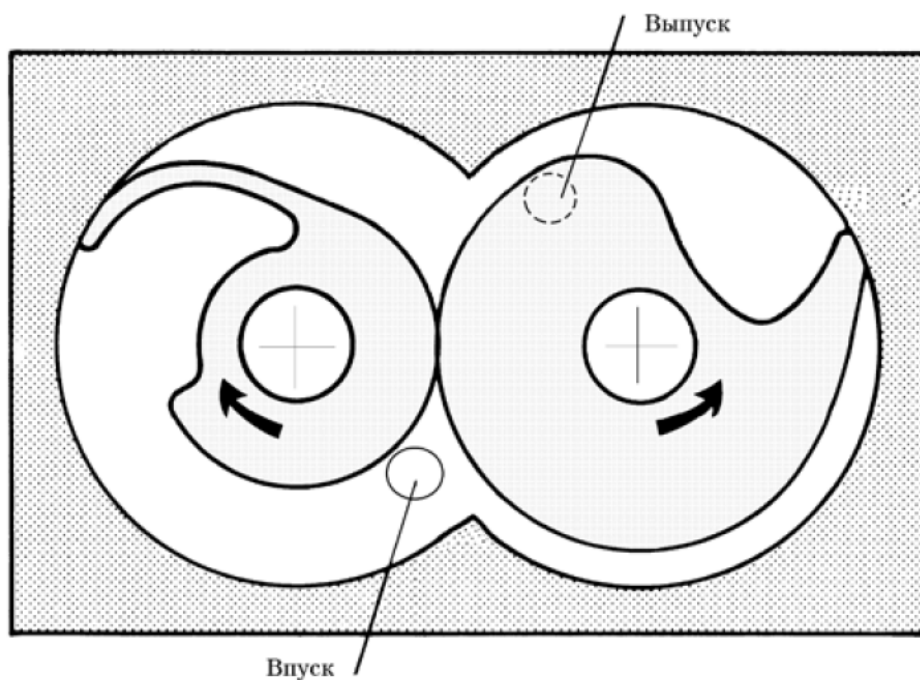


Рис. 48. Двухроторный кулачковый насос [7, с. 169]

Если считать рассмотренный вид насосов «двухлопастными» (по профилю), то нужно отметить, что бывают также «трёхлопастные» (рис. 46) и даже «четырёхлопастные». Двухроторные насосы бывают с прямыми роторами и винтовыми (рис. 47). Кроме этого бывают насосы с более сложными профилями, например – кулачковый (48).

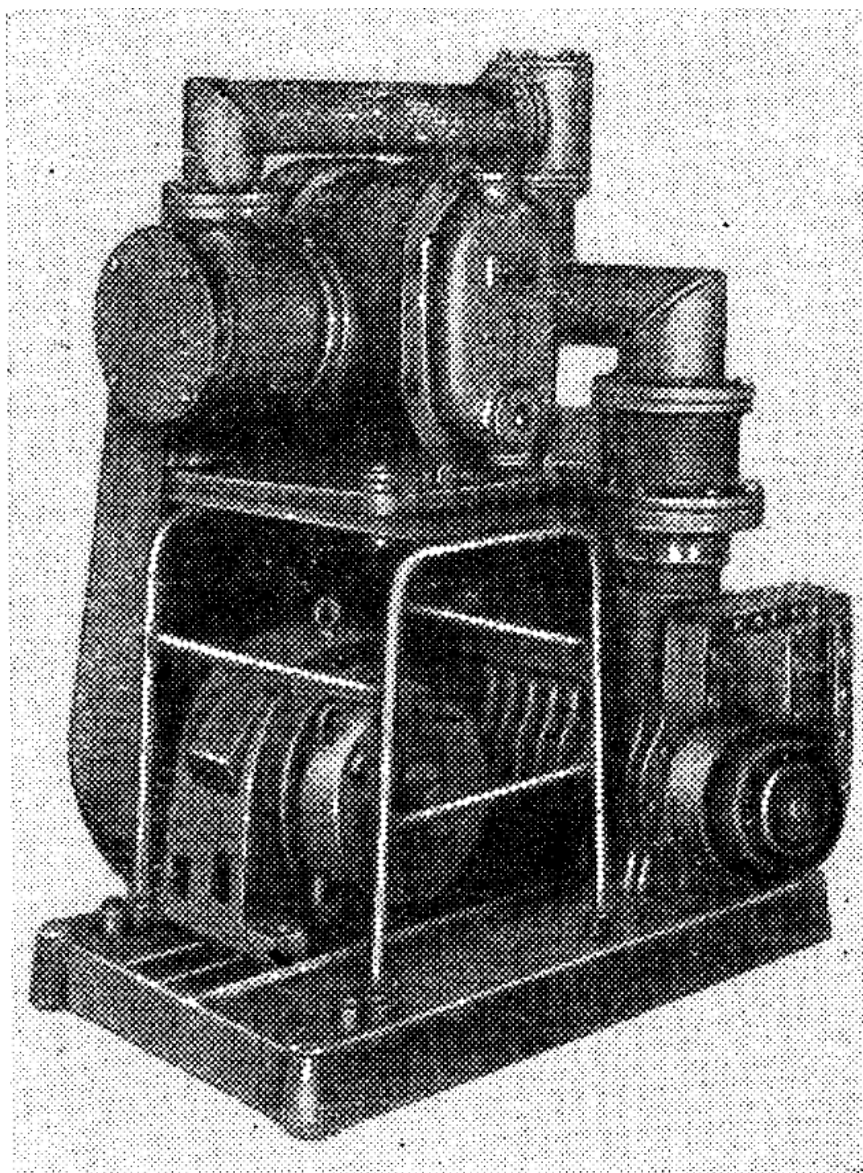


Рис. 49. Агрегат АВМ-50 на базе двухроторного насоса ДВН-50 (СССР)
[8, с. 115]

В двухроторных насосах отсутствуют трущиеся детали: роторы лишь соприкасаются своими лопастями. На самом деле в реальности между ними всегда существует небольшой зазор. Это позволяет



Рис. 50. Двухроторный агрегат НВД (форвакуумный насос+ насос Рутса) [<https://avacuum.ru/rus/pumps/28/g64/>]



Рис. 51. Насосы Рутса ZJ и ZJP [<https://avacuum.ru/rus/pumps/28/g475/>]



Рис. 52. Насос Рутса ZJL [<https://avacuum.ru/rus/pumps/28/g476/>]

использовать высокие скорости вращения. что способствует увеличению скорости откачки. Чаще всего в этих насосах не используется масляное уплотнение роторов, насосы работают «всухую». Наиболее оптимальный режим использования – работа этих насосов после форвакуумных насосов (то есть насосов предварительной откачки). Форвакуумные насосы откачивают систему от атмосферного давления до примерно границы низкого и среднего вакуума, а затем двухроторные насосы (вторая ступень) повышают вакуум, чаще всего – до остаточного давления $0,5 \text{ Па}$ ($\approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$). Двухроторный и форвакуумный насосы могут быть соединены в одном агрегате – рис. 49, и даже в одном агрегате-насосе – рис. 50.

Некоторые современные насосы Рутса представлены на рис. 51 – 52.

К недостаткам двухроторных насосов следует отнести не очень широкий диапазон действия и высокую шумность работы.

В окнах Медиа 4 – Медиа 9 представлена демонстрация работы вакуумного насоса Рутса.

Медиа 4:

Принцип работы двухлопастного нагнетателя Рутса

<https://www.youtube.com/watch?v=W7B8U2BEkUY>

Медиа 5:

Насосы Рутса серии OktaLine компании Pfeiffer Vacuum

https://www.youtube.com/watch?v=1knW_9R0j2E

Медиа 6:

Принцип работы вакуумного насоса Рутса

<https://www.youtube.com/watch?v=QgH-egvg4jI>

Медиа 7:

Принцип работы компрессора типа Рутса

<https://www.youtube.com/watch?v=cftfkWZlqkE>

Медиа 8:

Принцип работы вакуумного насоса сухого типа

https://www.youtube.com/watch?v=2x8i30m_ОМо

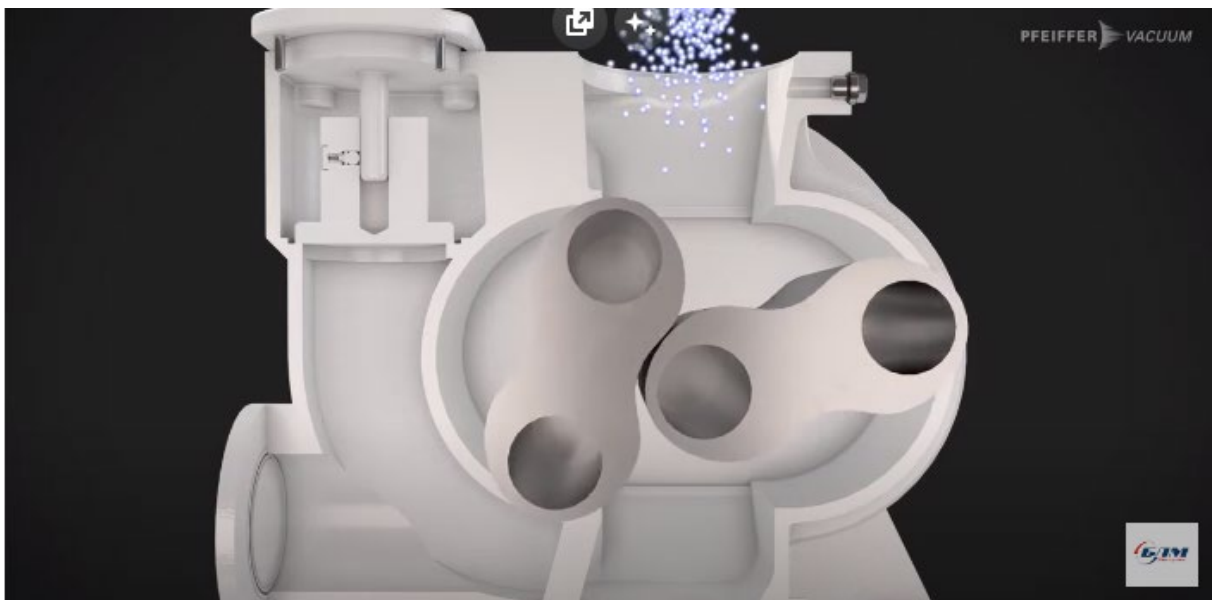
Медиа 9:

Вакуумные насосы C-VLR

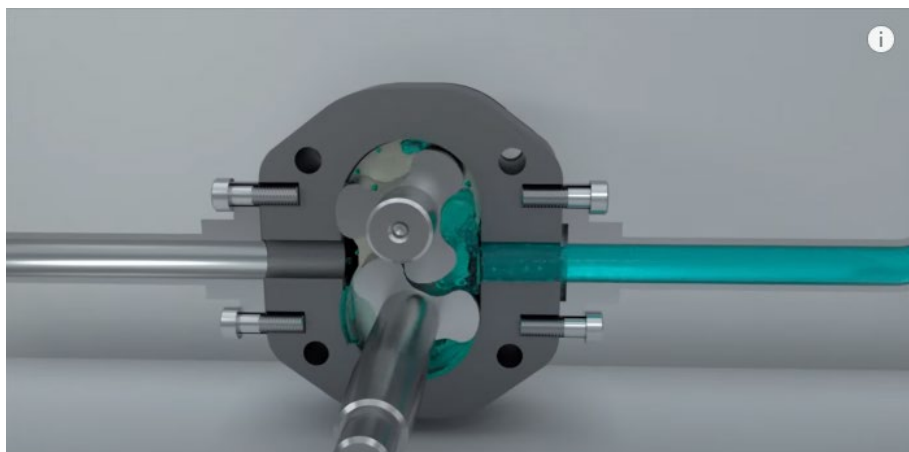
<https://www.youtube.com/watch?v=VBIjmbxGDQk>



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 4. Принцип работы двухлопастного нагнетателя Рутса



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 5. Насосы Рутса серии OctaLine компании Pfeiffer Vacuum



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 6. Принцип работы вакуумного насоса Рутса



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 7. Принцип работы компрессора типа Рутса



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 8. Принцип работы вакуумного насоса сухого типа



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 9. Вакуумные насосы C-VLR

v22 § 6. Пластинчато-роторные и пластинчато-статорные вакуумные насосы

Принципиальное устройство **пластинчато-роторного насоса** (ПРВН) сводится к следующему (рис. 53). В полости цилиндрического корпуса 7 эксцентрично вращается цилиндрический ротор 6 таким образом, что точка (в объёме – линия) их соприкосновения (на рисунке – вверху) всегда остаётся на одном месте, то есть ротор и статор не меняют своего положения. Чтобы представить устройство ротора, нужно мысленно взять металлический цилиндр и два диска того же диаметра. Цилиндр по оси разрезается на две части; ширина разреза равна ширине пластины 5. Две половинки цилиндра с торцов закрепляются дисками и получается цилиндр со сквозной прорезью сечением в виде вытянутого прямоугольника. На самом деле такой ротор изготавливается из цельного металлического цилиндра фрезерованием. В щель ротора вставляются с двух сторон две прямоугольные пластины 5 с закруглёнными краями, между которыми помещается пружина 1 (точнее – несколько пружин). Ротор насажен на вал, сообщающий ему вращательное движение. При вращении ротора (по стрелке) пластины 5 расходятся под действием пружин и за счёт центробежных сил, насколько это позволяет цилиндрический статор.

Таким образом, пластины делят внутреннее пространство насоса на два объёма – всасывания и сжатия. При вращении ротора по стрелке полости будут менять свои размеры.

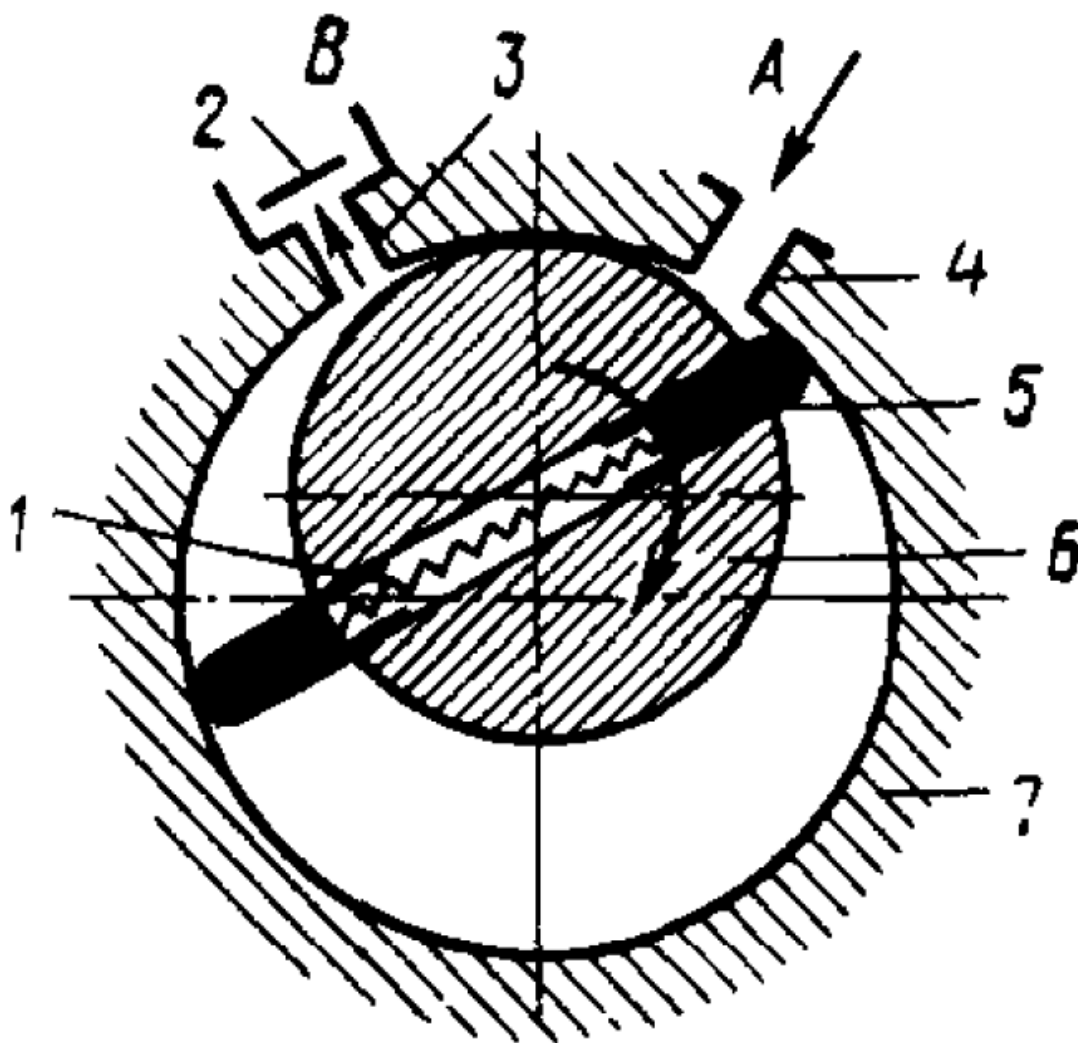


Рис. 53. Устройство пластинчато-роторного насоса. 1 – пружина; 2 – клапан; 3 – выхлопной патрубок; 4 – впускной патрубок; 5 – пластины; 6 – ротор; 7 – цилиндрический корпус [7, с. 165]

Работа насоса показана на рис. 54. В рабочем состоянии статор полностью погружён в ванну с вакуумным маслом, которое служит для вакуумного уплотнения и смазки. Вначале масло заполняет все

полости насоса; затем при работе газ заполняет внутренние полости и масло вытесняет.

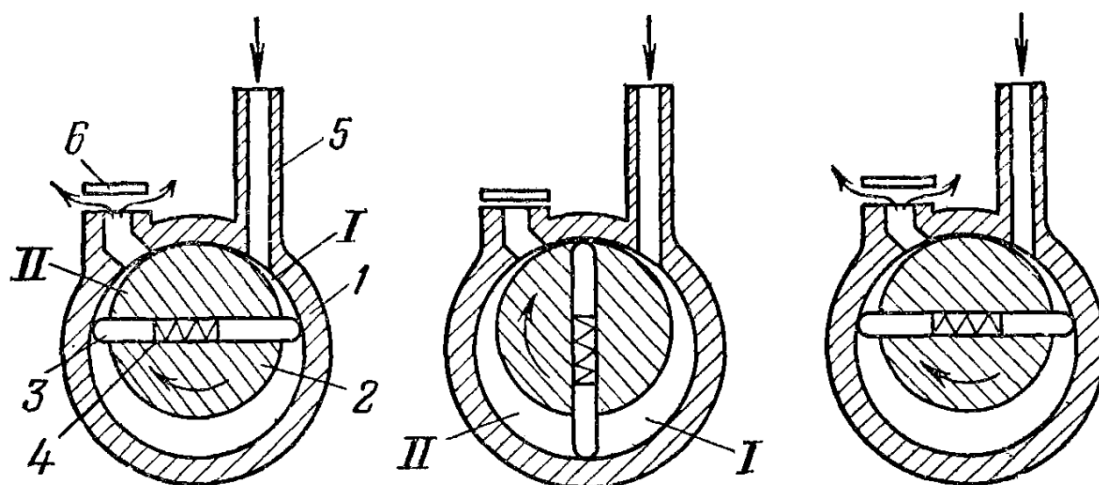


Рис. 54. Принцип действия пластинчато-роторного насоса. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентричный ротор; 3 – пластины; 4 – пружина; 5 – впускной патрубок; 6 – клапан; I – полость всасывания; II – полость сжатия [5, с. 94]

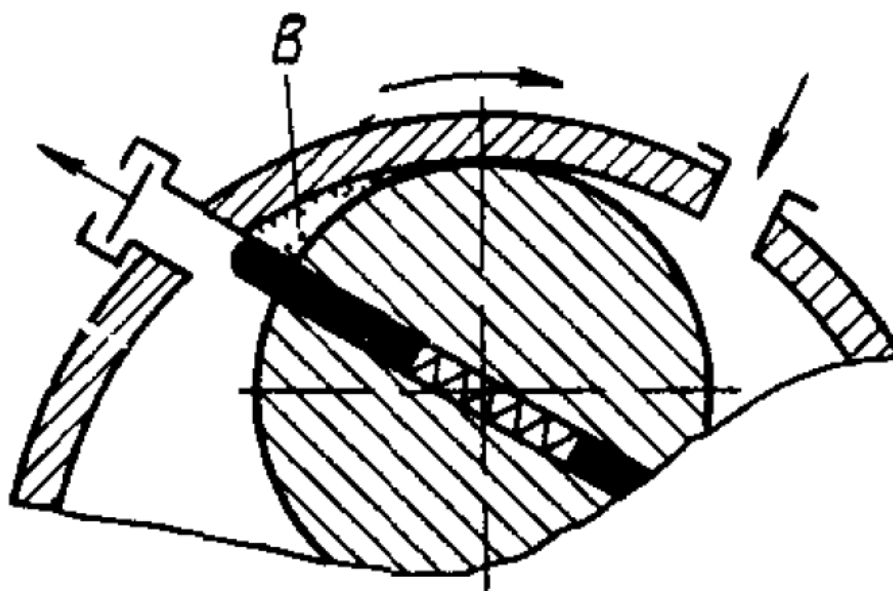


Рис. 55. Вредное пространство пластинчато-роторного насоса [7, с. 165]

В исходном положении (рис. 54) пластины расположены горизонтально и делят внутреннее пространство на три части: правую (всасывающая полость), левую (выхлоп) и нижнюю (полость сжатия). При вращении по стрелке правая полость расширяется и засасывает откачиваемый газ (и превращается в правую полость на среднем рисунке), левая полость уменьшается почти до нуля и выбрасывает газ через выпускной клапан 6. Нижняя полость уменьшается (сжатие газа) и превращается в левую полость на среднем рисунке.

На среднем рисунке (рис. 54) имеется две полости. Левая полость всасывания вскоре отсекается от патрубка 5 и становится нижней полостью правого рисунка. Правая полость сжатия уменьшается в размерах и выбрасывает газ наружу через клапан 6. Положение пластин на левом и правом рисунке (рис. 54) совершенно идентично, и все процессы повторяются вновь.

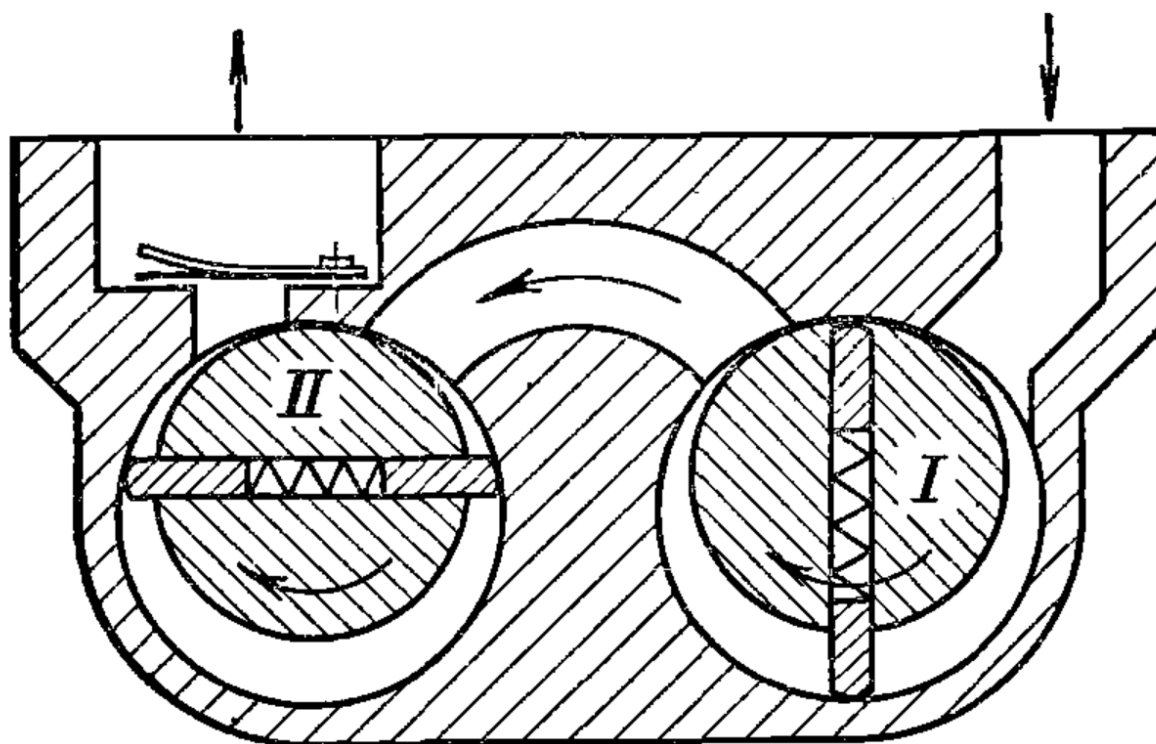


Рис. 56. Схема действия двухступенчатого насоса с масляным уплотнением. I – ротор первой ступени; II – ротор второй ступени [5, с. 98]

Необходимо заметить, что при работе насоса образуется так называемое вредное пространство В (рис. 55), которое отрицательно влияет на производительность насоса и величину предельного остаточного давления. В маслопогружаемых насосах это пространство обычно заполнено маслом.

Для получения остаточных давлений ниже 10^{-1} Па ($1 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$) насосы делают двухступенчатыми (рис. 56). Выпускное давление второй ступени (форвакуум) является впускным для первой ступени, на входе которой и можно получить средний вакуум (вход этой ступени подключён к откачиваемому объёму).

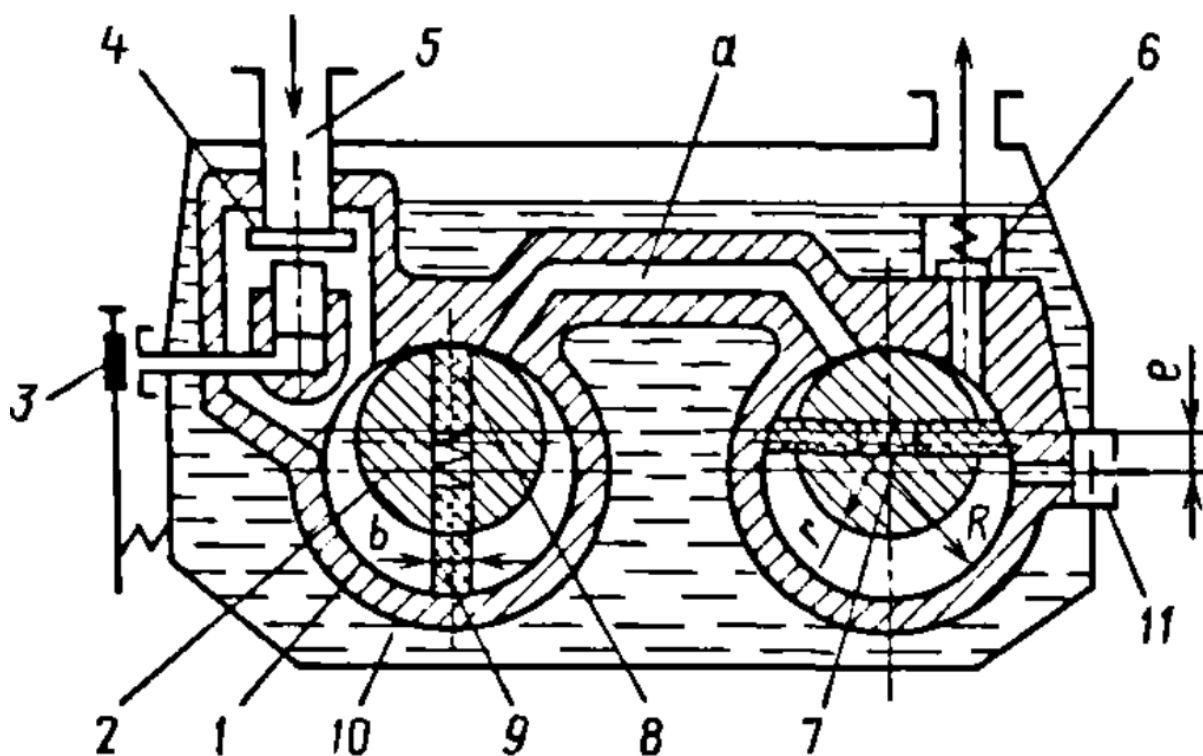


Рис. 57. Устройство РВН с масляным уплотнением. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор первой ступени; 3 – клапан; 4 – сетчатый фильтр; 5 – входной патрубок; 6 – клапан; 7 – пружина; 8, 9 – пластины; 10 – вакуумное масло [4, с. 340]

В маслопогружаемых двухступенчатых РВН (рис. 57) в первой ступени (соединённой с откачиваемой камерой; на рисунке – слева) не

требуется смазка, так как просачивание газа через щели при таких разрежениях затруднено. Конструкция насоса обеспечивает непопадание масла в эту ступень, тогда как в форвакуумной ступени масло присутствует.

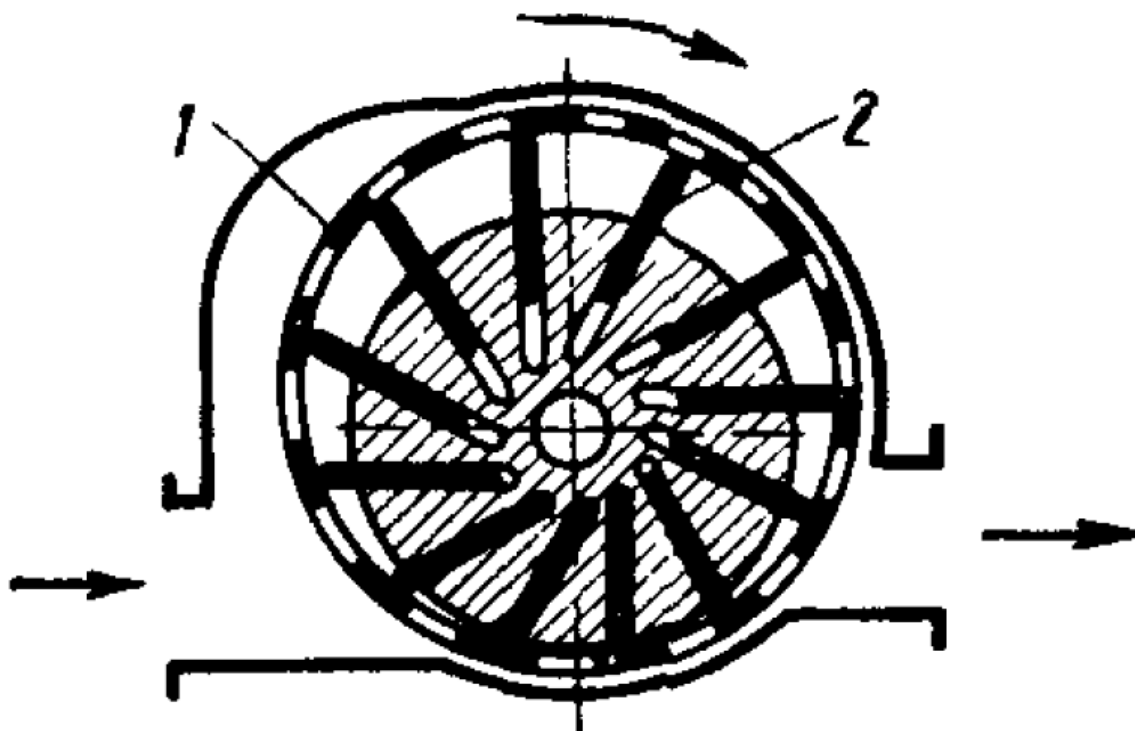


Рис. 58. Схема многопластинчатого роторного насоса (с наклонными пластинами). 1 – беговые кольца; 2 – пластины (в данном случае наклонные) [7, с. 166]

Описанная конструкция ротора с двумя радиальными пластинами является превалирующей, так как технологически такой ротор наиболее прост в изготовлении. Однако имеются схемы многопластинчатых РПВН с радиальными и наклонными пластинами (рис. 58) и глухими (то есть несквозными) пазами, в которых эти пластины ходят. Такие конструкции обладают высокой производительностью, с их помощью можно получить более высокий вакуум, но технологическое изготовление таких роторов очень сложное. В этих насосах отсутствует масло, и для снижения трения

используют так называемые беговые кольца (рис. 58) или пластины из антифрикционных материалов.

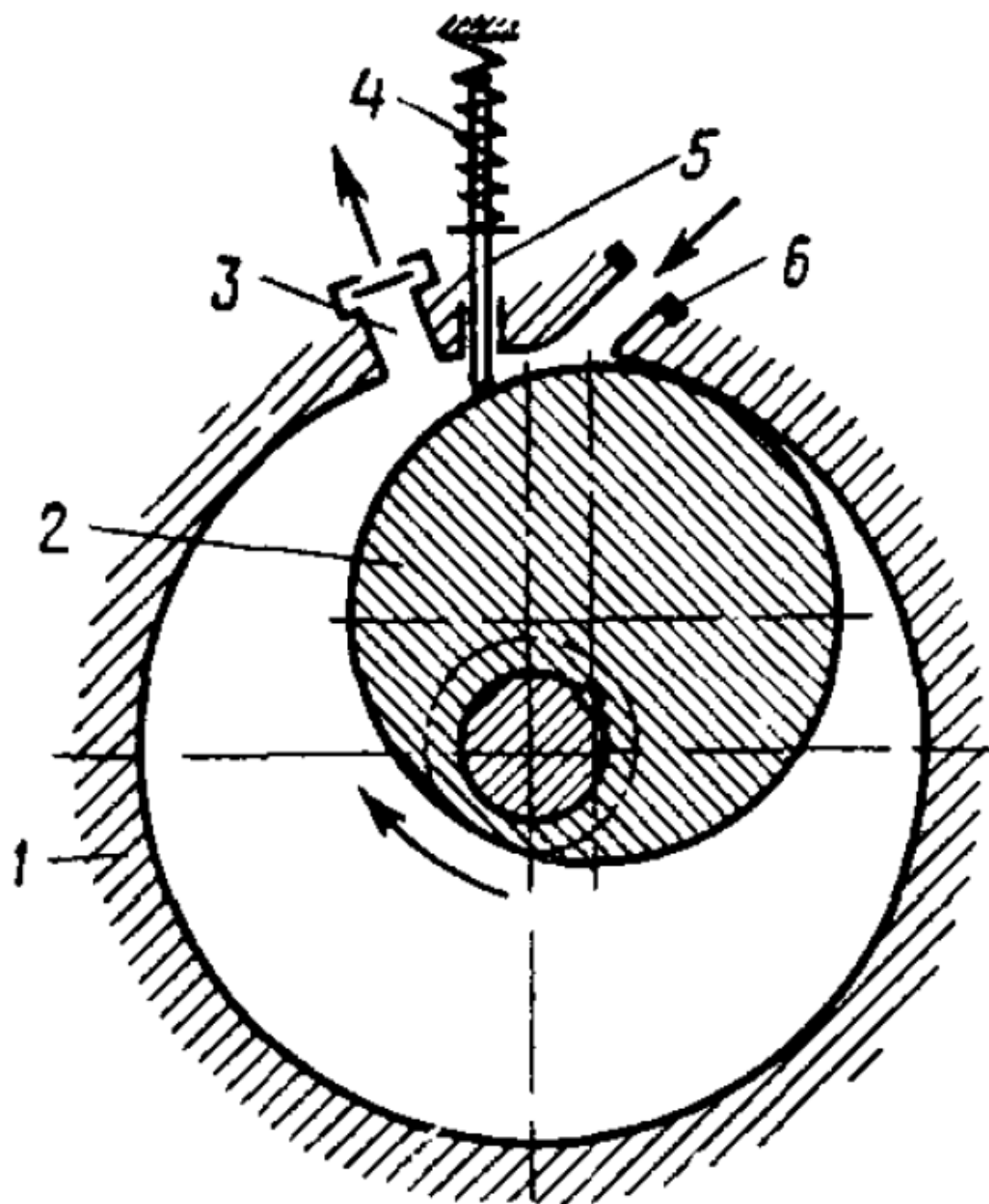


Рис. 59. Устройство пластинчато-статорного насоса. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор; 3 – выпускной патрубок с клапаном; 4 – пружина; 5 – пластина; 6 – входной патрубок [7, с. 166]

В пластинчато-статорных насосах (ПСВН), рис. 59, «катящийся» ротор 2 эксцентрично закреплён на центральном валу и касается статора 1 в одной точке (точнее, в объёмном представлении, – одной прямой линией). При вращении ротора эта точка будет описывать внутреннюю окружность статора. В верхней части корпуса (статора) изготовлена щель, подобная прорези в роторе ПРВН, в которую вставлена пластина 5, которая поджимается сверху прижимным устройством 4. По мере вращения ротора пластина будет ходить вверх – вниз и перекрывать внутреннее пространство насоса.

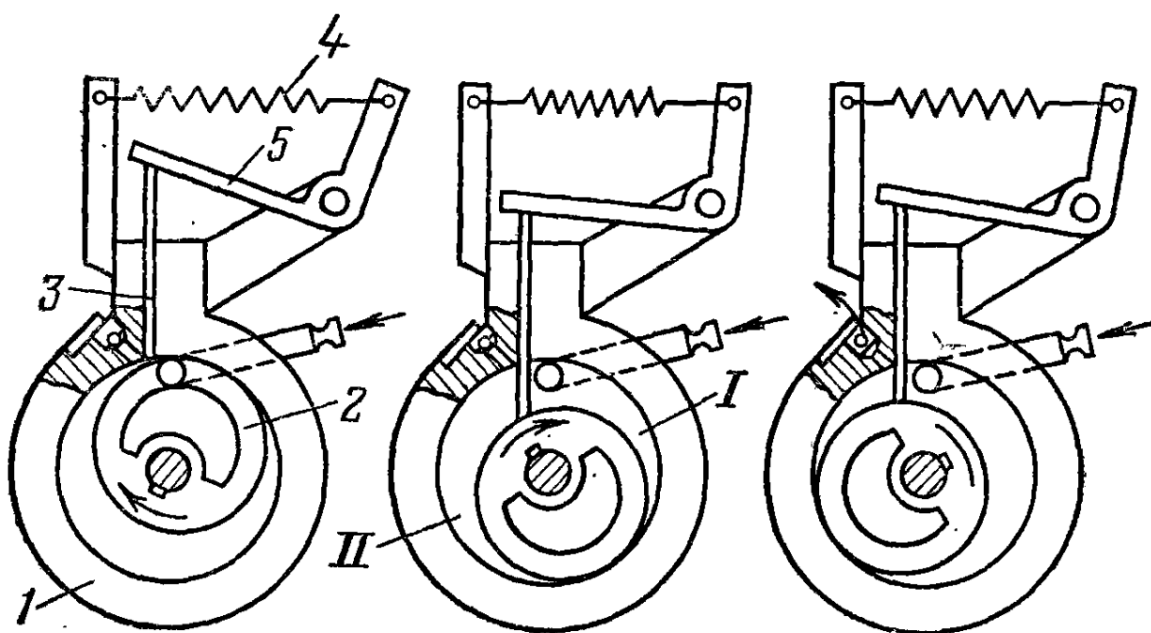


Рис. 60. Принцип действия пластинчато-статорного насоса. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор; 3 – пластина; 4 – пружина; 5 – рычаг нажимного механизма; I – полость всасывания; II – полость сжатия [5, с. 95]

Работа насоса показана на рис. 60. Всасывающий патрубок, показанный на левом рисунке стрелкой, вначале не имеет свободного объёма, но при вращении ротора по круговой стрелке такой объём появляется, причём он сразу отсекается движущейся вниз пластиной от остального пространства (средний рисунок). Далее этот объём расширяется до максимума (правый рисунок) и мы возвращаемся в исходное положение (левый рисунок).

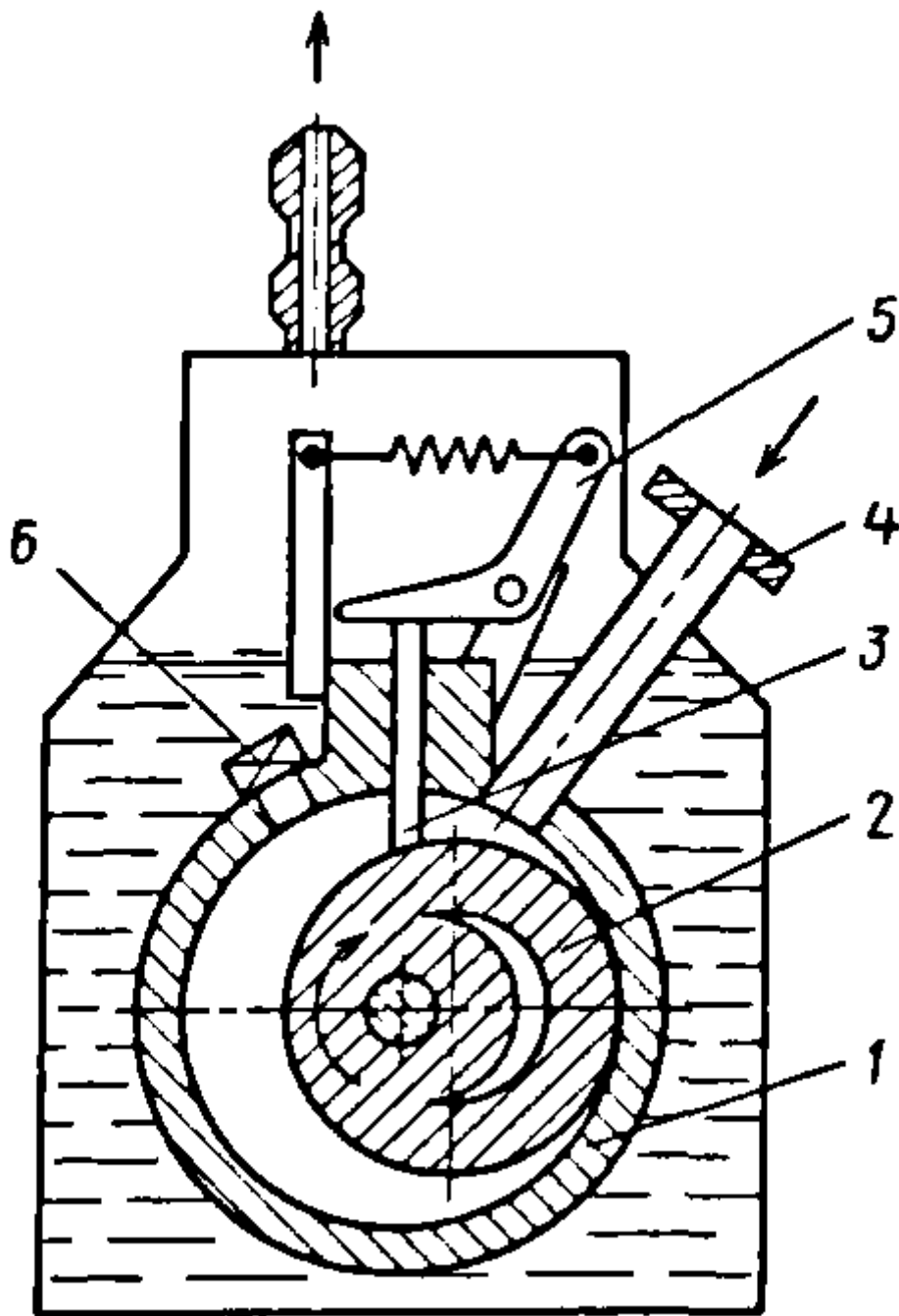


Рис. 61. Устройство ПСВН с масляным уплотнением. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор; 3 – пластина; 4 – входной патрубок; 5 – рычаг нажимного механизма; 6 – выпускной клапан [4, с. 340]

Одновременно с этим, по левую сторону пластины происходит сжатие и выброс газа. За исходное положение возьмём опять левый

рисунок. Всё серповидное пространство ниже ротора представляет собой объём сжатия, который соединён с выхлопным клапаном (он показан на правом рисунке стрелкой слева). При движении ротора по часовой стрелке этот объём уменьшается, то есть происходит сжатие газа (средний рисунок) с последующим выхлопом (правый рисунок).

Практическая реализация ПСВН чаще всего также маслопогружаемая (рис. 61).

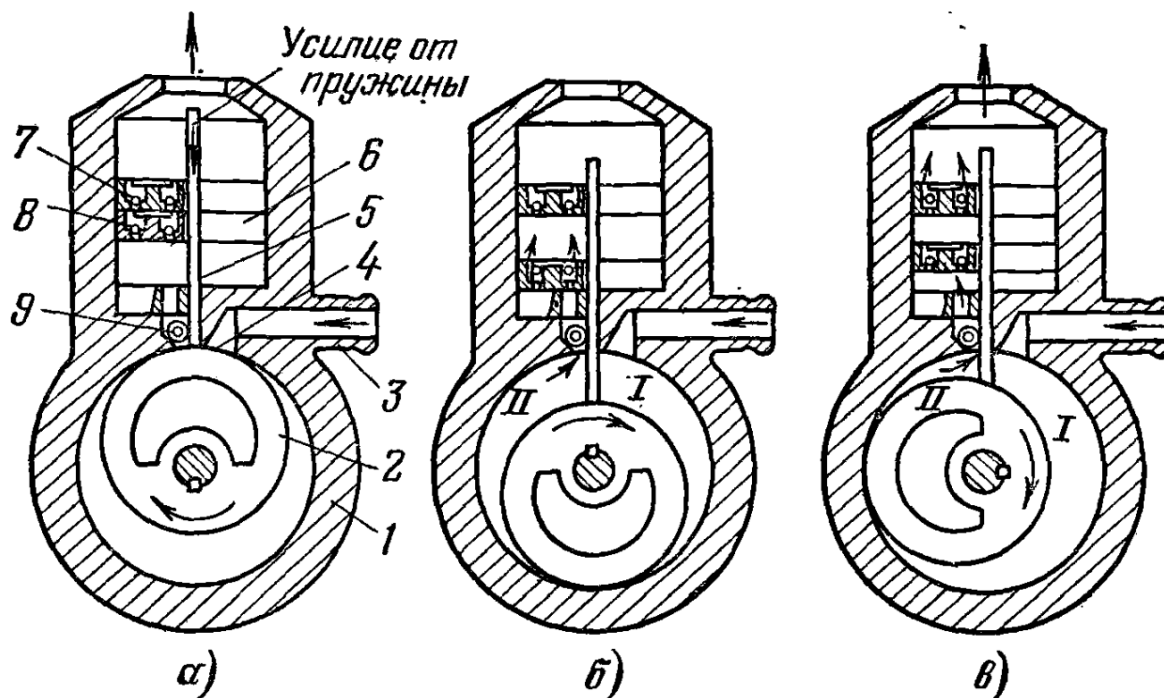


Рис. 62. Схема пластинчато-статорного насоса с пластиной в виде поршня. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор; 3 – входной патрубок; 4 – отверстие; 5 – пластина; 6 – поршень; 7 – выхлопной клапан; 8 – самодействующий клапан; 9 – ролик [8, с. 90]

Разновидностью ПСВН является **насос с пластиной в виде поршня** (рис. 62). Работа его в части всасывания и сжатия аналогична работе обычных ПСВН. Усовершенствования касаются выхлопа. К пластине 5, которая также поджимается сверху (на рисунке не показано), прикреплён поршень 6, имеющий клапан 8. Этот поршень повторяет движения пластины вверх-вниз в верхнем цилиндре. В последнем также закреплён неподвижный диск, имеющий щель для движения пластины и «свой» клапан 7. При возвратно-поступательном

движении пластины по направляющему ролику 9 (он не препятствует прохождению газа) поршень 6 может занимать крайне верхнее положение, примыкая к диску с клапаном 7, и крайне нижнее положение на дне цилиндра. Клапаны 7 и 8 могут пропускать газ вверх, то есть в сторону выхлопа, и препятствуют его прохождению назад, в полости насоса. В исходном положении (рис. 62а) в полости под поршнем имеется остаточный газ. При движении ротора по часовой стрелке пластина вместе с поршнем перемещается вниз, при этом в полости II происходит сжатие, а остаточный газ снизу поршня через клапан 8 переходит в образующуюся полость над поршнем (и под диском) – рис. 62б. При дальнейшем движении ротора (рис. 62в) происходит дальнейшее сжатие газа в II и переход его в пространство под поршнем, который теперь движется вверх. Одновременно газ, находящийся между поршнем и диском, выдавливается на выхлоп через клапан 7.

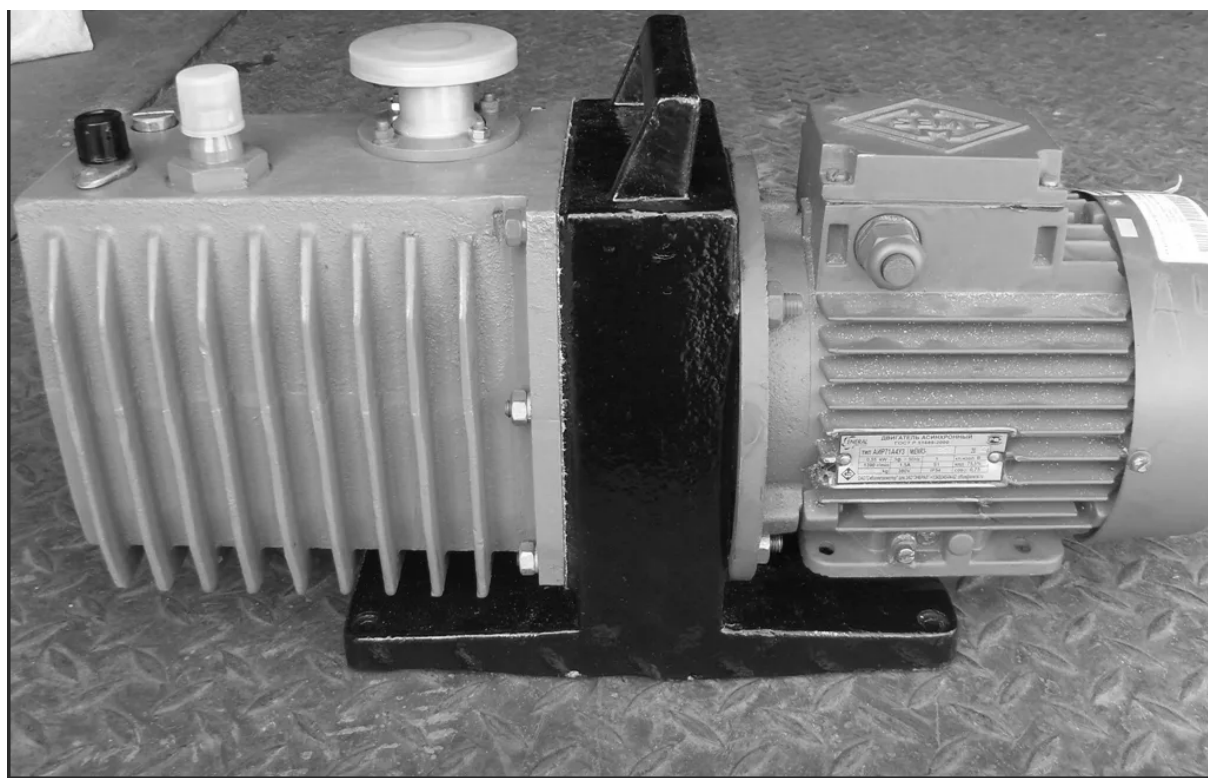


Рис. 63. Вакуумный пластинчато-роторный насос 2НВР-5ДМ (СССР)
[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fd2j6dbq0eux0bg.cloudfront.net%2Fimages%2F249215%2F1707551182.jpg&lr=192&pos=8&rpt=simage&source=serp&text=2HBP-6DM]



Рис. 64. Вакуумный насос Ампики 2НВР-6ДМА_PRO
[<https://www.ampika.ru/oborudovanie.html?id=13378>]

Фактически верхний цилиндр с диском и двумя клапанами представляет собой форвакуумную ступень, поэтому ПСВН с пластиной в виде поршня считается двухступенчатым.

Наибольшее распространение на практике получили двухступенчатые насосы ПРВН. Их использование в качестве форвакуумных при высоковакуумной откачке ограничено вредным воздействием паров вакуумного масла на глубину получаемого вакуума. Тем не менее они часто применяются в этой области.

При длительной работе масло в насосах сильно разогревается (до $50 - 70^{\circ}\text{C}$), но это является паспортной характеристикой. С помощью двухступенчатых ПРВН можно откачать системы до давления остаточных газов 10^{-1} Па ($1 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$).

На рис. 63 представлен широко применявшийся в СССР двухступенчатый пластинчато-роторный насос 2НВР-5ДМ, а на рис. 64 – современный насос 2НВР-6ДМА_PRO.

В окнах Медиа 10 и Медиа 11 представлена демонстрация работы вакуумного пластинчато-роторного насоса.

Медиа 10:

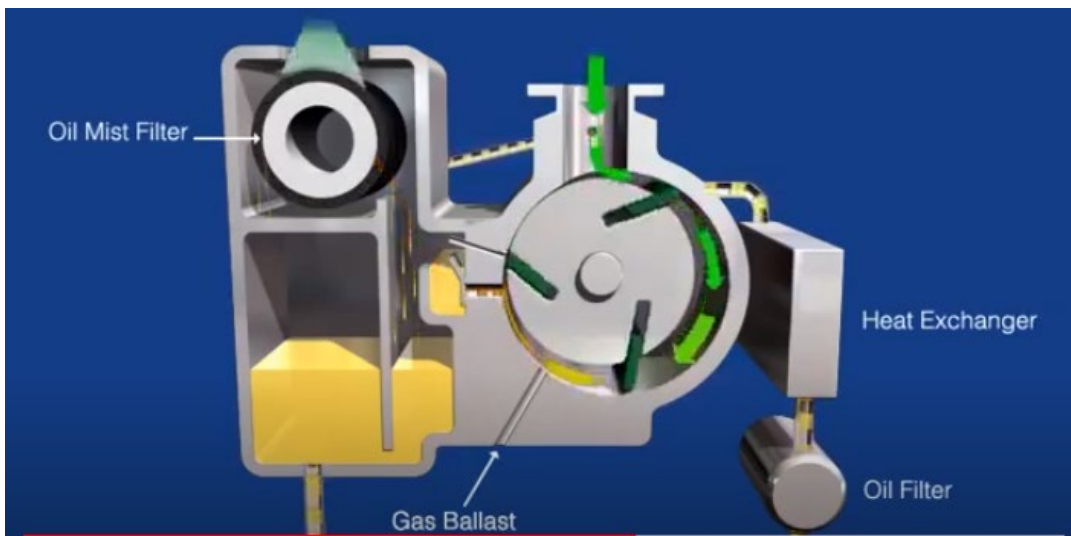
Принцип работы пластинчато-роторного насоса

<https://www.youtube.com/watch?v=OJ-JfXfkTL8>

Медиа 11:

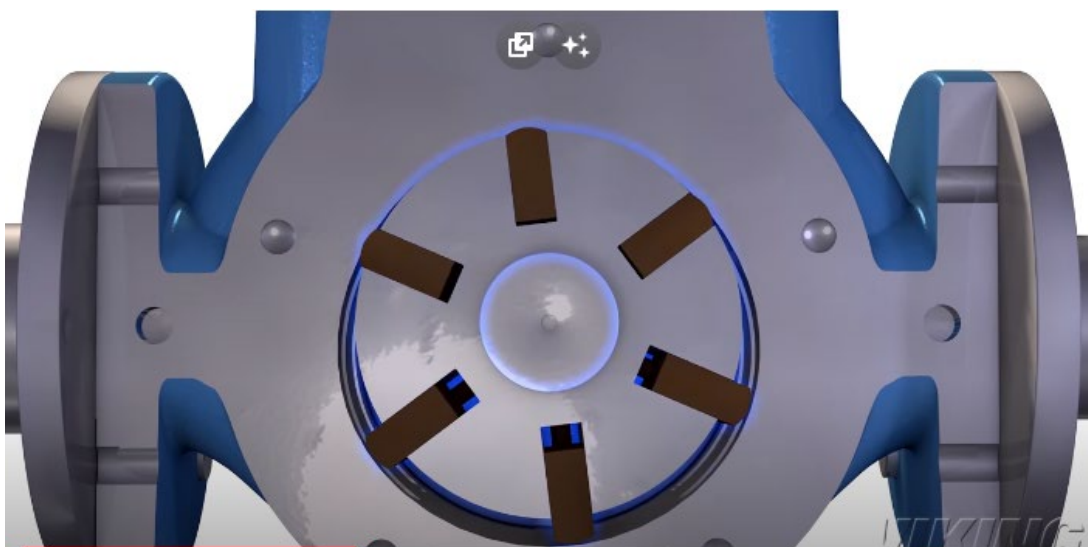
Как работает пластинчато-роторный насос

https://www.youtube.com/watch?v=IxIio2r_bQE



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 10. Принцип работы пластинчато-роторного насоса



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 11. Как работает пластинчато-роторный насос

v23 § 7. Плунжерные (золотниковые) вакуумные насосы

Устройство **плунжерных** (плунжер – длинный поршень) или **золотниковых** (золотник – распределитель газа) насосов напоминает таковое у пластинчато-статорных насосов (рис. 65). Здесь также имеется ротор, эксцентрично жёстко насаженный на центральный вал.

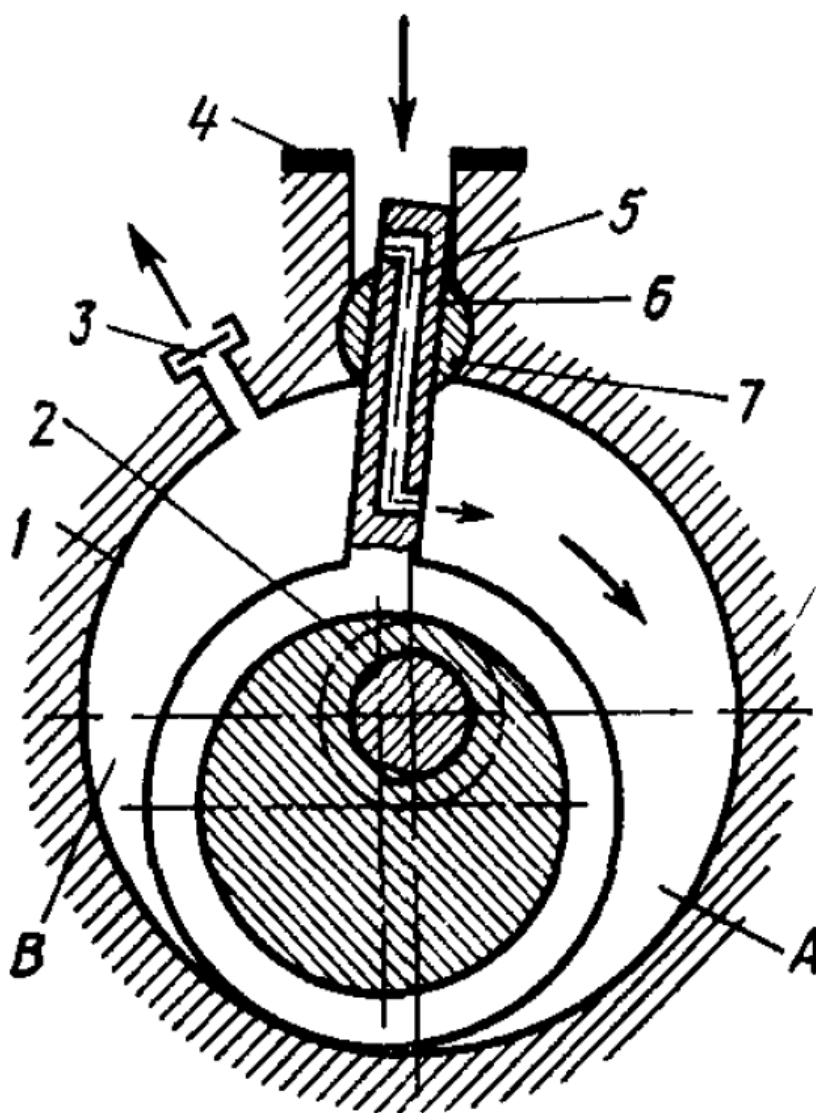


Рис. 65. Схемы устройства плунжерного (золотникового) насоса. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор; 3 – выхлопной патрубок с обратным клапаном; 4 – входной патрубок; 5 – канал золотника; 6 – плунжер; 7 – шарнир [7, с. 166]

Однако ротор не касается поверхности статора, а заключён в цилиндрическую оболочку (в сечении имеющую вид кольца), внутри которой он может свободно вращаться. К этому кольцу прикреплён плунжер 6, имеющий канал 5 и выполняющий роль золотника. Плунжер проходит через отверстие шарнира 7, по которому он может ходить вверх-вниз. Кроме того, он, вместе с шарниром, может качаться относительно оси самого шарнира.

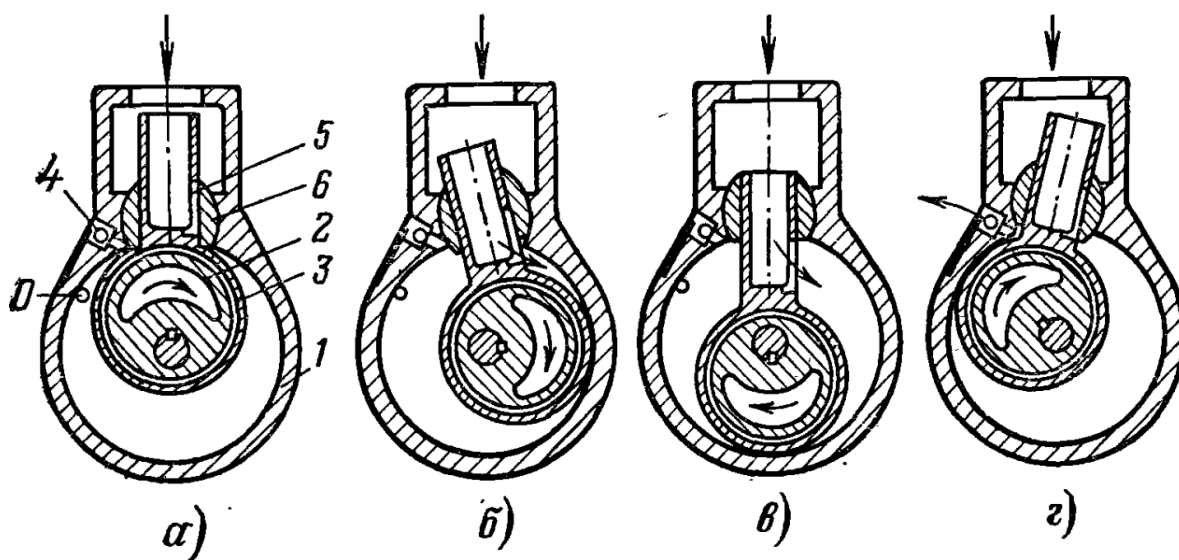


Рис. 66. Принцип работы плунжерного (золотникового) насоса. 1 – цилиндрический корпус; 2 – эксцентрический ротор; 3 – плунжер; 4 – выхлопной клапан; 5 – окно; 6 – направляющая в шарнире [5, с. 96]

Работа насоса происходит следующим образом (рис. 66). Ротор при своём вращении приводит в движение кольцо плунжера 3, которое заставляет сам плунжер качаться в шарнире и совершать движения вверх-вниз. При возвратно-поступательном движении плунжера окно 5 может быть либо перекрыто (рис. 66а и 66г) или открыто на внутреннюю полость насоса (рис. 66б и 66в). Через золотник происходит всасывание откачиваемого газа. При дальнейшем движении ротора происходит сжатие газа и выброс его через клапан 4.

Насос работает в масляной ванне (то есть он маслопогружаемый). Диапазон рабочих давлений $2 \cdot 10^4 \div 6,7 \text{ Па}$ для одноступенчатого, и $2 \cdot 10^4 \div 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ для двухступенчатого насоса.

На рис. 67 и 68 представлены некоторые плунжерные насосы.



Рис. 67. Одноступенчатый плунжерный (золотниковый) насос Н
[<https://avacuum.ru/rus/pumps/115/g468/>]



Рис. 68. Двухступенчатый плунжерный (золотниковый) насос 2Н
[<https://avacuum.ru/rus/pumps/115/g469/>]

v24 § 8. Мембранные (диафрагменные) вакуумные насосы

Основным рабочим элементом мембранных (диафрагменных) вакуумных насосов является эластичная диафрагма, которая разделяет вакуумную камеру насоса (с входным и выходным патрубком) и механическую часть этого насоса. Через диафрагму в вакуумную камеру передаются все необходимые движения, требующиеся для перекачки. Такое разделение позволяет сделать откачку безмасляной,

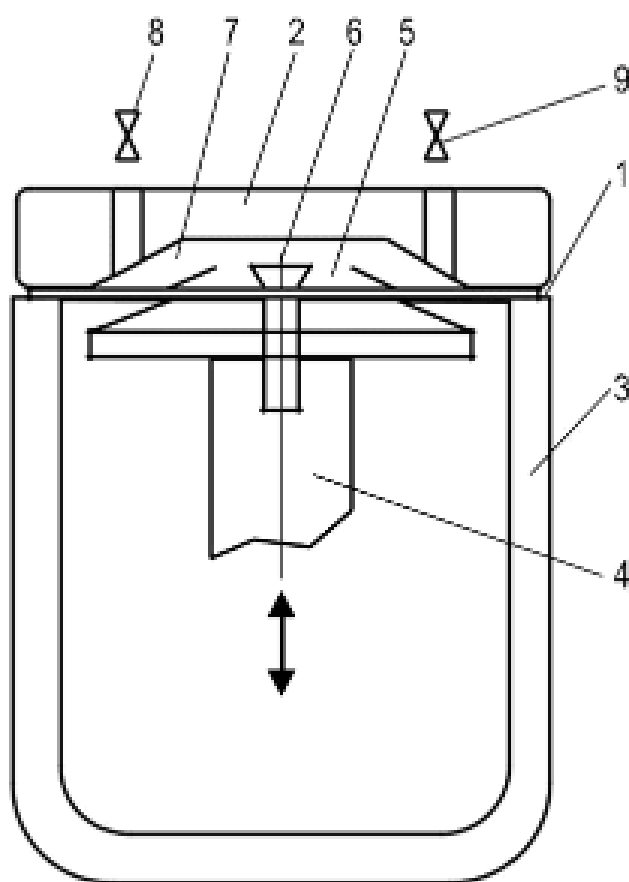


Рис. 69. Принципиальная конструкция мембранных насосов. 1 – эластичная диафрагма; 2 – головка; 3 – корпус; 4 – шатун; 5 – грибовый толкатель; 6 – винт; 7 – вакуумная камера; 8 – всасывающий клапан; 9 – выхлопной клапан

[https://take-line.ru/catalog/vakuumnoe_oborudovanie/vakuumnye_nasosy/membrannye_nasosy/]

что важно в плане получения хорошего вакуума. Однако, при этом к материалу мембраны предъявляются очень высокие требования по эластичности, стойкости в вакууме, вакуумной плотности, износостойкости. Материалом мембран служат специальные резины, полимерные материалы, иногда металлы. Как правило, рабочие диафрагмы приходится довольно часто менять.

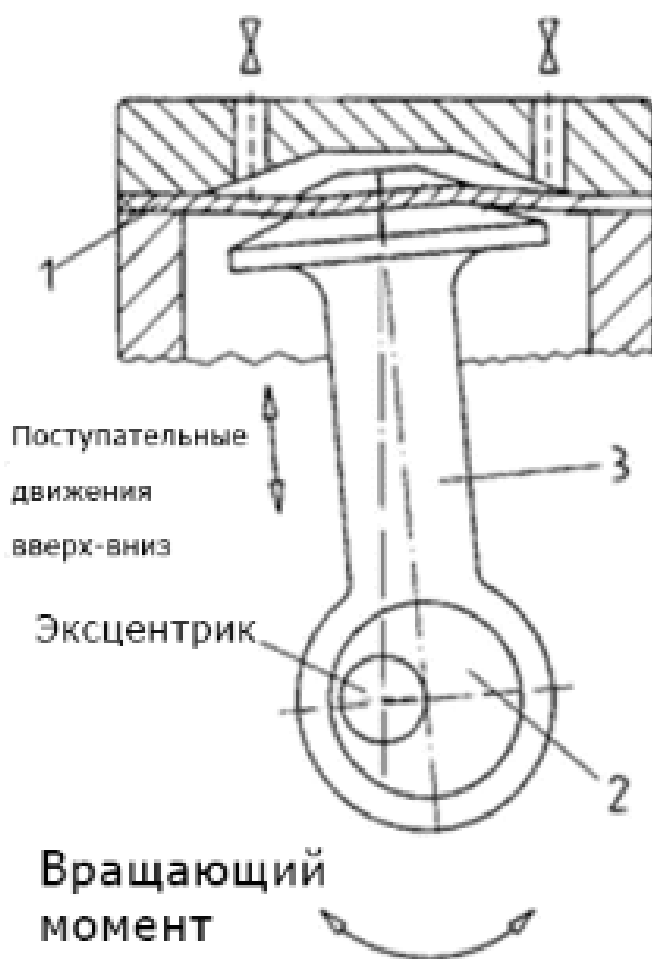


Рис. 70. Схема работы мембранных вакуумных насосов с эксцентриковым приводом. 1 – эластичная диафрагма; 2 – эксцентрик; 3 – шатун
[https://take-line.ru/catalog/vakuumnoe_oborudovanie/vakuumnye_nasosy/membrannye_nasosy/]

Принципиальная схема работы мембранных насосов представлена на рис. 69. Эластичная диафрагма 1 разделяет вакуумную

камеру 7 и рабочее пространство насоса. В последнем расположен шток 4, который периодически перемещается вверх-вниз и на котором закреплён грибовый толкатель 5, к верхней части которого винтом 6 прикреплена диафрагма 1. При движении диафрагмы вниз в камеру 7 через клапан 8 засасывается газ из откачиваемого объёма; при движении вверх этот газ выбрасывается через клапан 9. Описанная схема – простейшая и используется редко.

На рис. 70 показана схема работы мембранных вакуумных насосов с эксцентриковым приводом, которые широко используются. Принцип работы остаётся прежним, но шток заменяется шатуном 3, который от эксцентрикового привода 2 может перемещаться вверх-вниз, одновременно качаясь в плоскости рисунка. Грибовый толкатель шатуна 3 жёстко с мембраной 1 не соединён, но заставляет

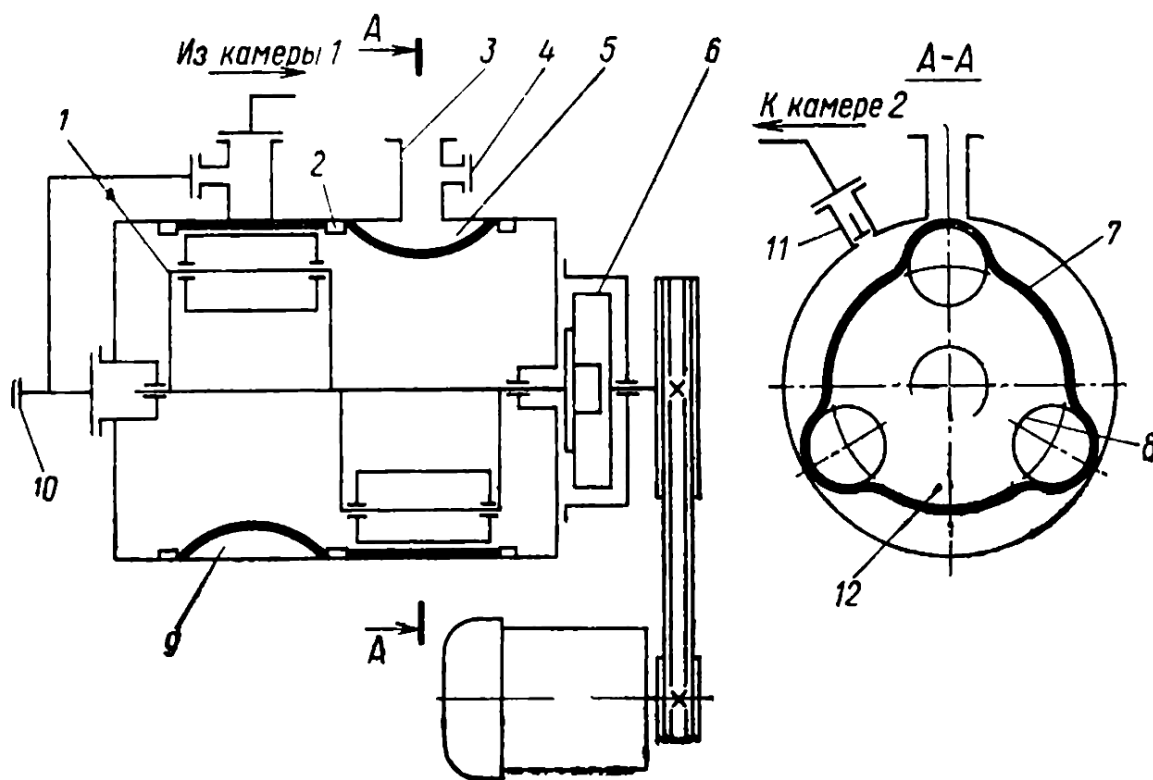


Рис. 71. Схема механического вакуумного насоса с деформируемой камерой. 1 – турникет; 2 – прижимное кольцо; 3 – впускное отверстие; 4 – патрубок для манометрического преобразователя; 5, 9 – рабочие камеры, 6 – привод; 7 – эластичная камера; 8 – ролик; 10 – патрубок для крана напуска атмосферы; 11 – выпускной клапан; 12 – собственный объем насоса [5, с. 110]

её изгибаться так, чтобы она как бы перегоняла газ от всасывающего клапана к выхлопному. При этом дно верхней крышки имеет соответствующий рельеф.

Предельный вакуум, который можно получить насосом в многоступенчатом исполнении – $50 \text{ Па} = 0,5 \text{ Торр}$.

На рис. 71 приведена схема механического вакуумного насоса с деформируемой камерой. Насос состоит из двух ступеней, правая ступень с рабочей камерой 5 откачивает газ из вакуумируемого объёма через впускное отверстие 3 и выбрасывает его через клапан 11. Далее откачанный газ поступает в левую ступень с рабочей камерой 9 (ступени соединены между собой внешним трубопроводом). Рабочие камеры 5 и 9 образованы гибкой кольцевой мембраной 7 (изготавливается чаще всего из полиуретана), которая в свободном состоянии прогибается внутрь насоса (как это показано на правой ступени вверху и на левой ступени внизу). В центральной части насоса находится механическая часть, которая состоит из турникета 1, вращающегося на центральном валу. На турникете располагаются свободно вращающиеся ролики 8 (по три на каждой ступени), которые при вращении поджимают мембрану к внутренней цилиндрической поверхности корпуса (см. рис. 71, сечение А – А). Работа ступеней видна на сечении А – А: при вращении роликов 8 по часовой стрелке образуются три полости, которые перегоняют газ из всасывающего патрубка 3 в выхлопной 11. Аналогично работает правая ступень. Когда в камерах 5 и 9 создаётся разрежение, атмосферный воздух, который может находиться в камере насоса 12, будет прижимать мембрану 7 к корпусу насоса, что сведёт откачивающий эффект к нулю. Чтобы этого не происходило, в насосе предусмотрена возможность дополнительной одновременной откачки камеры 12 при работе левой ступени. (Давление в откачиваемом сосуде не должно превышать давление в камере 12 более чем на $5 \cdot 10^3 \text{ Па}$).

Предельное остаточное давление насосов с деформируемой камерой составляет обычно 10^{-1} Па и определяется, главным образом, парами воды. Насосы часто используют, когда требуется так называемая безмасляная откачка. Существенным недостатком насоса является малый период эксплуатации до ремонта (500—1000 ч) из-за быстрого износа полимерной мембраны 7.



Рис. 72. Мембранный насос MVP
[<https://avacuum.ru/rus/pumps/74/g287/>]



Рис. 73. Мембранный вакуумный насос Leybold DIVAC 0.8 T
[<https://vacuum-market.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/membrannye/leybold-divac-0-8-t/>]

На рис. 72 и 73 представлены некоторые промышленные мембранные насосы.

v25 § 9. Винтовые вакуумные насосы

Винтовые насосы, давно использующиеся для перекачки жидкостей и вязких сред, адаптированы под задачи вакуумной техники с соответствующими конструктивными изменениями.

Принцип действия винтовых вакуумных насосов представлен на рис. 74. Два винта вращаются в разные стороны (на рисунке левый винт – по часовой стрелке, правый – против часовой стрелки) с высокой скоростью (до 6000 оборотов в минуту). Шаг винтов – убывающий, что обеспечивает постепенное сжатие газ, который движется вдоль осей винтов от всасывающего патрубка к выхлопному. В насосе достигается высокая степень сжатия.



Рис. 74. Винтовой вакуумный насос Принцип действия
[<https://primelab.com/blog/vintovye-vakuumnye-nasosy.html>]



Рис. 75. Винтовой вакуумный насос Elmo Rietschle
[<https://blms.ru/vintovye-nasosy>]

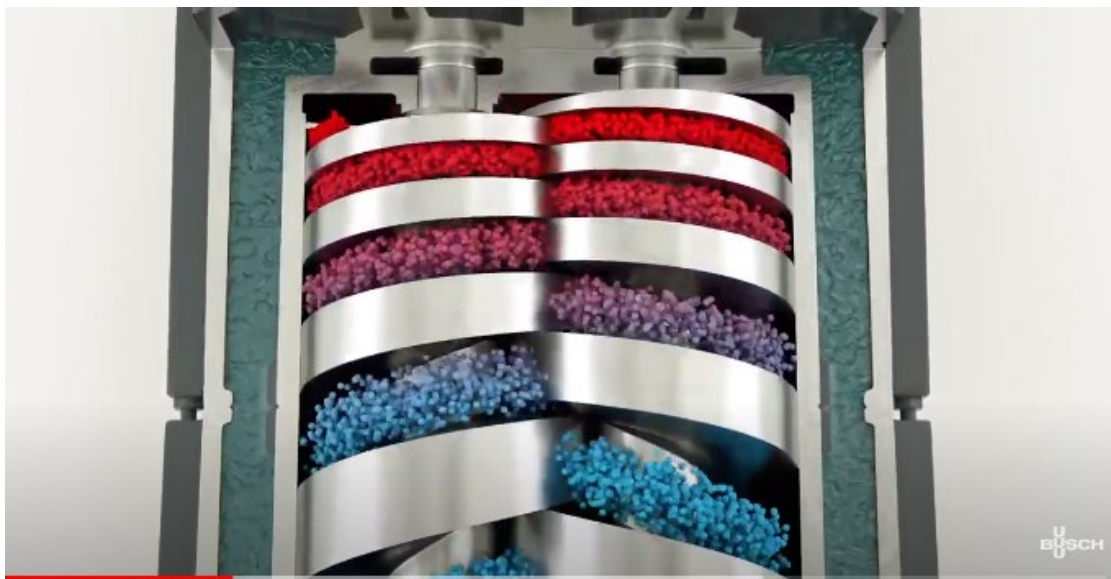


Рис. 76. Винтовой насос Pfeiffer Vacuum [https://blms.ru/vintovye-nasosy]

Из-за высокой скорости и сильного сжатия на выходе насоса создается область высокой температуры (до 300 °C), в то время как на входном патрубке температура остается низкой.

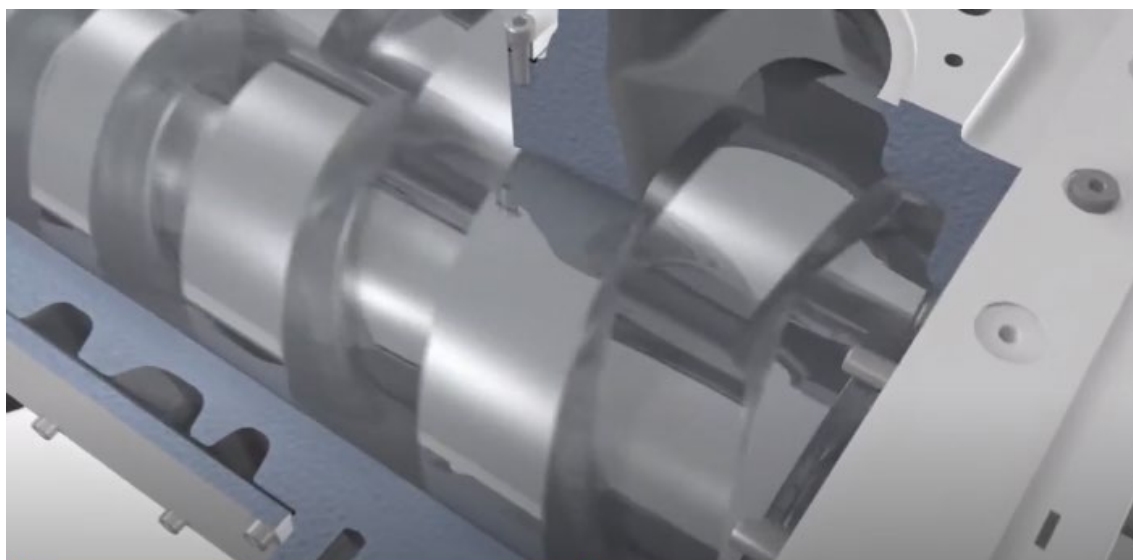
Предельное давление составляет, как правило, от $10 \text{ Па} \approx 0,1 \text{ Torr}$ до $10^{-1} \text{ Па} \approx 10^{-3} \text{ Torr}$.

На рис. 75 – 76 представлены некоторые винтовые вакуумные насосы.



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 12. Винтовые вакуумные насосы серии COBRA NC



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 13. DRYVAC Винтовой вакуумный насос

В окнах Медиа 12 и Медиа 13 представлена демонстрация работы вакуумного винтового насоса.

Медиа 12:

Винтовые вакуумные насосы серии COBRA NC

<https://www.youtube.com/watch?v=VCPsqNjvjIc>

Медиа 13:

DRYVAC Винтовой вакуумный насос

<https://www.youtube.com/watch?v=StNIZ5k4vAQ&t=6s>

v26 § 10. Турбомолекулярные насосы

Молекулярной откачкой называется удаление молекул газа механическим способом при помощи движущихся элементов конструкции насоса. Турбомолекулярная откачка берёт своё начало от молекулярного насоса Геде (1913 г.) – рис. 77.

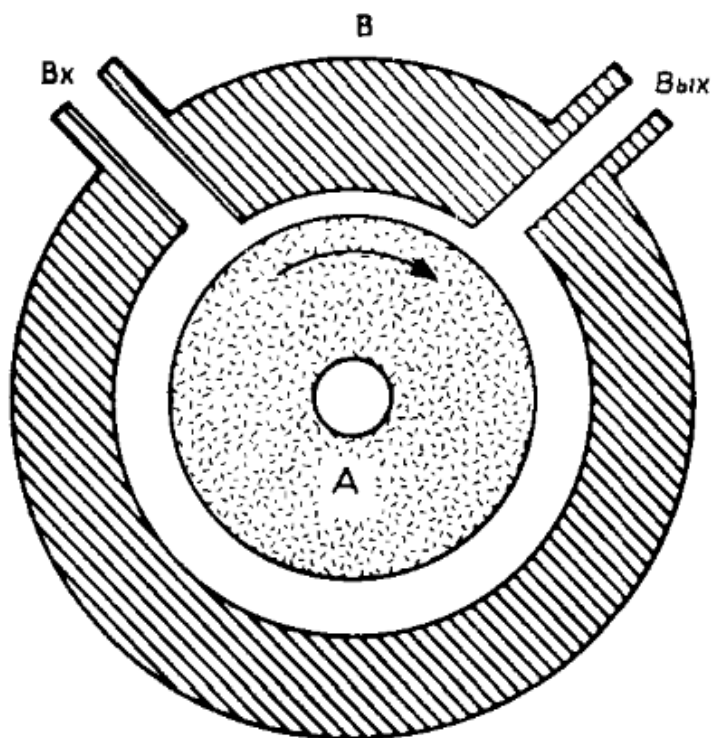


Рис. 77. Принцип действия молекулярного насоса Геде. А – ротор; В – статор [10, с. 104]

Насос Геде работает в области среднего и высокого вакуума и состоит из корпуса В с цилиндрической полостью (статора), с входным и выходным патрубком, и концентрического ротора А, вращающегося с очень большой скоростью. В отличие от пластинчато-статорного насоса, кроме концентричности ротора, входное и выходное пространство насоса не разделены пластиной, хотя верхняя часть статора ближе подходит к ротору (см. рис. 77). Вероятность того, что молекулы газа, проникающие во входное отверстие, ударятся о поверхность ротора, довольно значительна. Как известно, при ударе о твёрдую поверхность молекула газа адсорбируется на ней, а через короткое время – десорбируется. Но за это время молекула перенесётся ротором на некоторое расстояние по направлению откачки и, десорбиравшись, приобретёт большую дополнительную составляющую своей скорости, направленную к выходному отверстию. Эта составляющая значительно больше обычной скорости

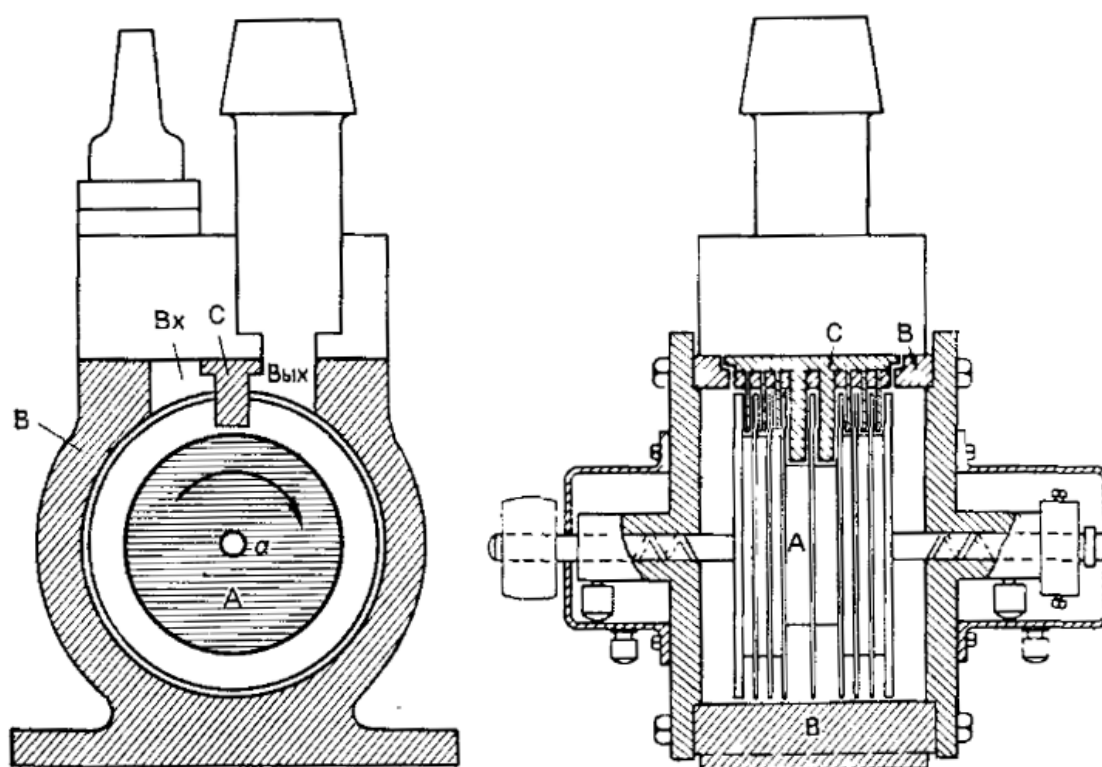


Рис. 78. Устройство молекулярного насоса Геде. А – ротор; В – статор; С – перегородка [10, с. 104]

теплового движения. Таким образом, молекулы из разреженного откачиваемого пространства постепенно перекачиваются к выходному отверстию. В области этого отверстия существует значительная вероятность того, что молекулы вылетят в выходное отверстие и покинут насос.

Конструкция насоса Геде показана на рис. 78. Поверхность, захватывающая молекулы, не должна ограничиваться поверхностью цилиндрического ротора; в реальном насосе ротор представляет собой цилиндр, снабжённый несколькими глубокими желобками и на откачку работает вся их поверхность. Верхняя перегородка С (неподвижная) повторяет профиль желобков с некоторым зазором. Существует вероятность проникновения молекул назад во входную область через эти зазоры, но она не высокая.

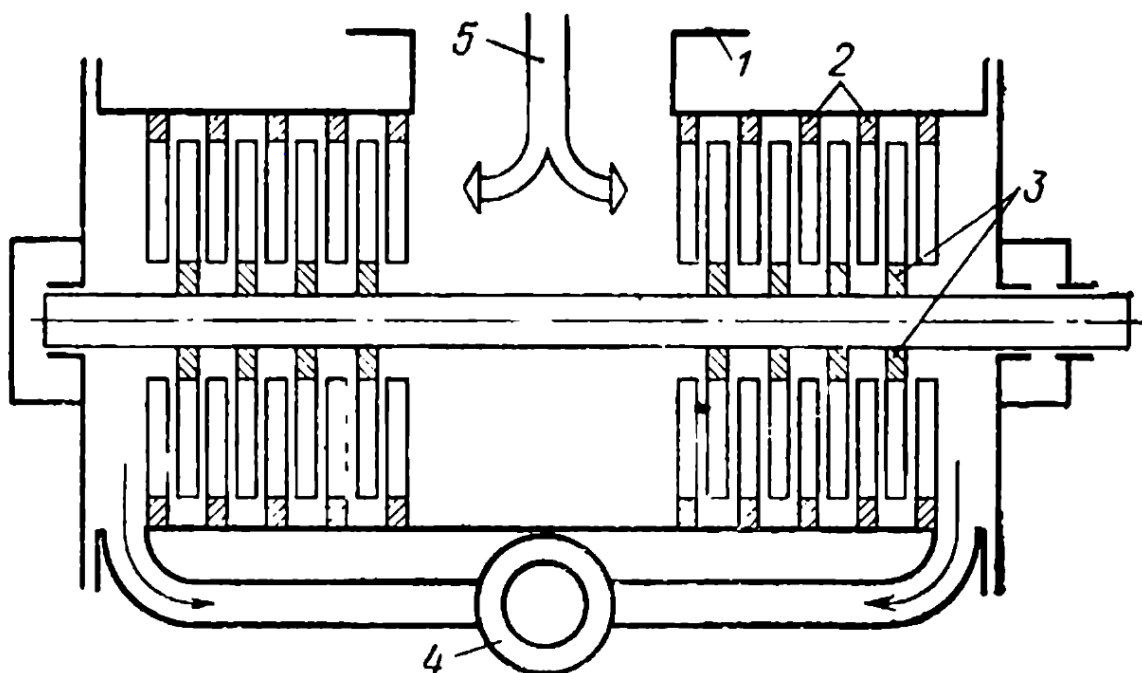


Рис. 79. Схема турбомолекулярного насоса. 1 – корпус; 2 – статорные диски; 3 – роторные диски; 4 – выпускной патрубок; 5 – впускной патрубок [5, с. 130]

В турбомолекулярных насосах (Баккер, 1958 г.) – рис. 79 значительно увеличена производительность за счёт изменения способа воздействия движущихся конструктивных элементов (дисков) на молекулы разреженного газа и перехода режима течения газа из

молекулярного в турбомолекулярный. Турбулентность как раз и вносят диски специальной конструкции, вращающиеся с очень большими скоростями. Диски 2 и 3 имеют специальные прорези, которые способствуют откачке не в центробежном направлении, как в молекулярных насосах, а параллельно оси центрального вала, то есть

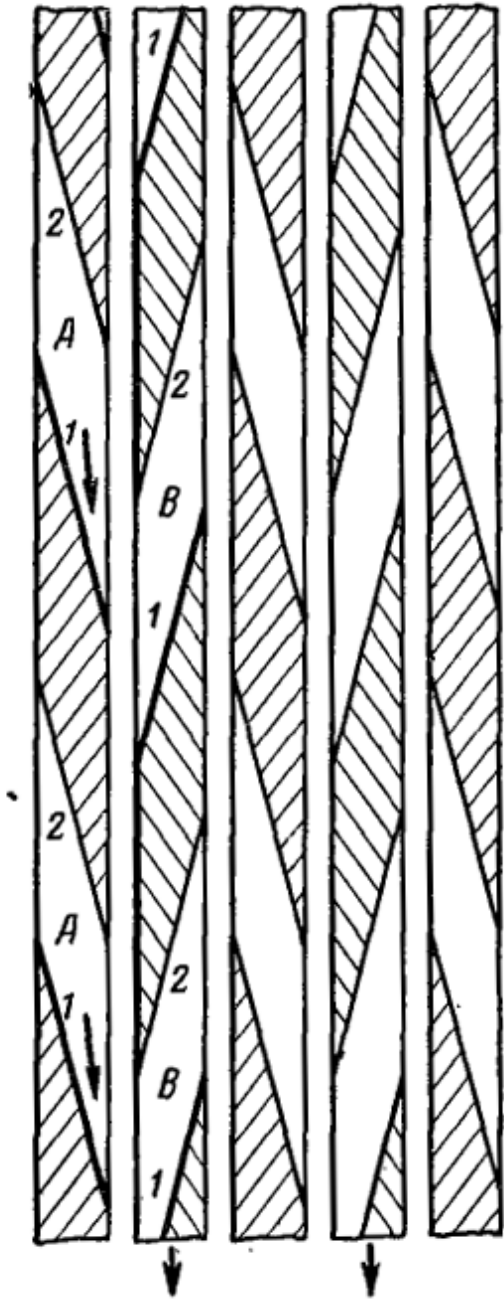


Рис. 80. Роторные и статорные диски с пазами (вид по радиусу, перпендикулярному плоскости рисунка 79) [5, с. 131]

перпендикулярно поверхности дисков. В насосе (рис. 79) показаны неподвижные статорные диски 2 (по пять с каждой стороны), которые крепятся к корпусу насоса (для удобства монтажа их разрезают на две части), и роторные диски 3 (по четыре с каждой стороны), которые закреплены на валу и вращаются вместе с ним. Между дисками имеется зазор около 1 мм. На рисунке прорези на дисках (они будут рассмотрены ниже) расположены так, что диски правой стороны откачивают газ направо, а левые диски – налево, как это показано раздваивающейся стрелкой во входном патрубке 5. Оба потока откачанных газов собираются внизу, как это показано стрелками, и удаляются из насоса через патрубок 4.

На рис. 80 показаны прорези в рабочих дисках. Они фрезеруются под углом ($40-15^\circ$) к поверхности диска от центра в радиальном направлении (в строго радиальном или под некоторым углом). Тогда в сечении плоскости рисунка (см. рис. 79) видны поверхности этих прорезей, если, конечно, сама прорезь попадает в сечение, – незаштрихованная часть дисков. Если бы на рис. 79 было изображено не сечение, а разрез (в этом случае корпус берётся в разрезе, а вал с дисками – без разреза), то на месте вала, который будет не виден, мы видели бы прорези диска, уходящие к его центру (или – к валу). Мы получили бы вид, напоминающий рис. 80. А на рис. 80 представлено сечение в плоскости, параллельной плоскости рисунка 79, и отстоящей от неё на величину, несколько меньшую радиуса дисков.

Из рис. 80 видно, что статорные диски А и роторные В (внизу стрелками показано их движение) чередуются, и прорези на них расположены **зеркально** друг к другу. Изображённая на рис. 80 конфигурация способствует потоку молекул слева направо. Рассмотрим, например, левый статорный диск, верхнюю прорезь. Допустим, молекула проходит эту прорезь слева направо под углом (вероятность этого достаточно высока). Направления траекторий при этом могут быть разными, но усреднённый вектор для многих таких молекул будет параллелен плоскости прорези. Если прошедшая молекула попадает в прорезь соседнего роторного диска, то поверхность 1 этого диска будет «убегать» от молекулы, а поверхность 2 не сможет её «нагнать», и молекула с большей вероятностью сместится направо. Если же молекула, пролетев паз статорного диска, встретит на своём пути сплошную поверхность роторного диска, то она

отразится от этой поверхности под острым углом и попадёт на сплошную поверхность статорного диска и опять начнет смещаться в общем направлении слева направо.

Теперь рассмотрим случай, когда молекула движется в направлении справа налево (вероятность этого также существует). Допустим, она пролетает паз среднего статорного диска и встречает на своём пути паз соседнего роторного диска (например – верхний паз на рисунке). Тогда с поверхностью 1 эта молекула не столкнётся, а поверхность 2 отразит её назад.

Таким образом, прохождение молекул слева направо гораздо более вероятно (примерно в 10 – 40 раз).

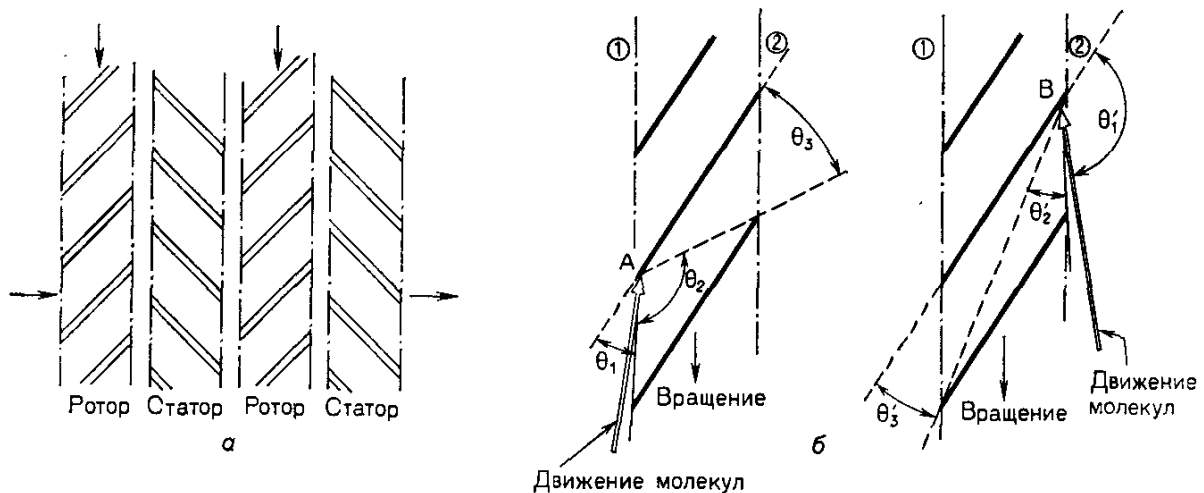


Рис. 81. Схемы работы турбомолекулярного насоса. а) – расположение лопаток; б) – принцип действия [10, с. 106]

Более строгое описание дано в [10, с. 106] – рис. 81. «Рассматривая усредненный поток молекул газа, движущихся в направлении вращающихся лопаток, можно видеть, что их средние относительные скорости будут составлять с направлением вращения довольно острый угол, и они будут ударяться о кромку лопатки, как показано на рисунке. В предположении диффузного механизма рассеяния отраженных частиц молекулы, отраженные в пределах угла θ_1 (со стороны 1), будут возвращаться в область 1, тогда как все молекулы, отраженные в пределах угла θ_3 , будут попадать в область 2. Молекулы, отразившиеся в пределах угла θ_2 , могут оказаться как по

ту, так и по другую сторону лопаток. В аналогичных ситуациях оказываются и молекулы, сталкивающиеся с лопаткой со стороны 2 (углы θ_1' , θ_2' , θ_3' соответственно). Вероятность того, что молекулы перейдут с одной стороны лопатки ротора на другую, зависит от соотношения углов, и, как видно из рисунка, вероятность переноса молекул в область 2 намного выше вероятности обратного процесса».

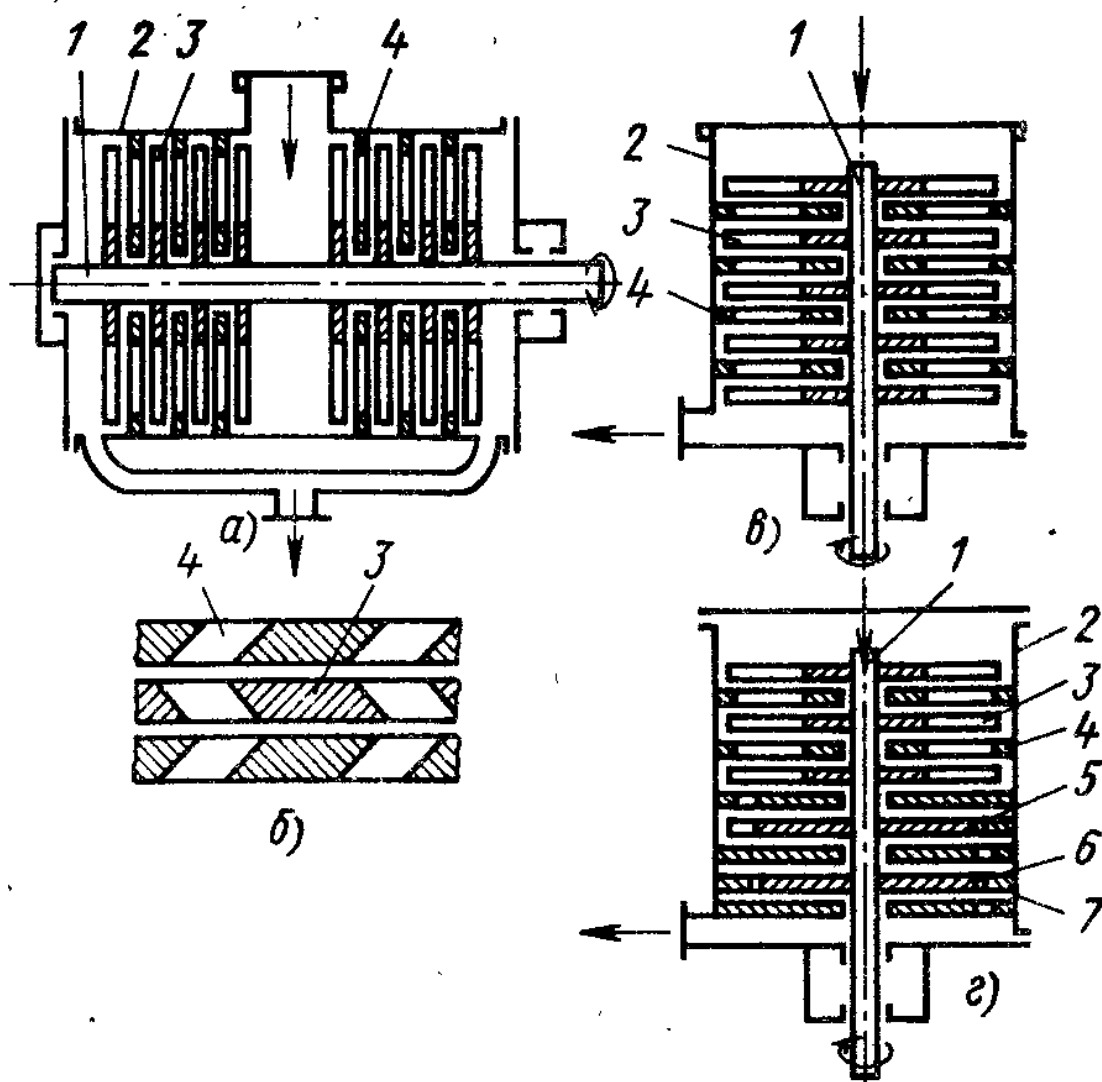


Рис. 82. Конструктивные схемы турбомолекулярных насосов. а) – конструкция с горизонтальным валом; б) – поперечное сечение дисков с прорезями; в) – конструкция с вертикальным валом; г) – двойной молекулярный и турбомолекулярный насос. 1 – вал; 2 – корпус; 3 – роторные диски; 4 – статорные диски; 5 – молекулярная ступень; 6 – рабочий вращающийся диск; 7 – спрофилированные статорные элементы [4, с. 269]

Как видно из этого описания, рабочие поверхности могут быть изготовлены не из цельных дисков фрезерованием, а набраны из наклонных радиальных лопаток.

Самым ответственным узлом насоса являются подшипники, в которых вращается вал, так как скорость вращения может достигать нескольких десятков тысяч об/мин. Чтобы уменьшить вредное влияние этого фактора, применяется конструкция с вертикальным расположением вала (рис. 82в). В качестве опоры ротора здесь может быть использована магнитная подвеска или газовые подшипники.

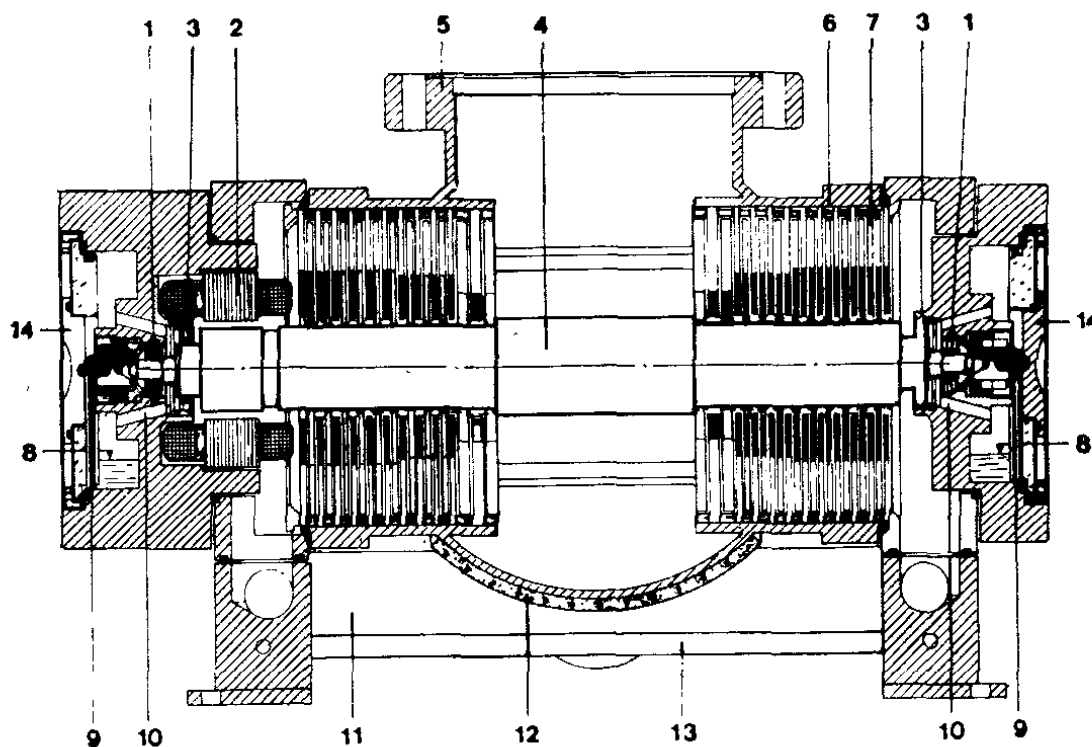


Рис. 83. Турбомолекулярный насос фирмы Balzers High Vacuum Ltd. 1 – подшипники; 2 – двигатель; 3 – лабиринтное уплотнение; 4 – вал ротора; 5 – фланец для подсоединения к вакуумной системе; 6 – лопатки ротора; 7 – лопатки статора; 8 – резервуар с маслом; 9 – подача масла в подшипники; 10 – слив масла; 11 – выход (форвакуум); 12 – нагреватель; 13 – водяное охлаждение; 14 – уплотнительная крышка [10, с. 107]

Как правило, турбомолекулярные насосы требуют предварительной откачки до форвакуума ($1,0-10^{-1}$ Па) и могут

достигать при откачке сверхвысокого вакуума. Эти две ступени могут быть объединены в одном насосе (рис. 82г). Двухступенчатый насос с горизонтальным расположением вала приведён на рис. 83. На рис. 84 показан насос с вертикальным расположением вала. Сблокированный молекулярный и турбомолекулярный насос с газовыми подшипниками представлен на рис. 85.

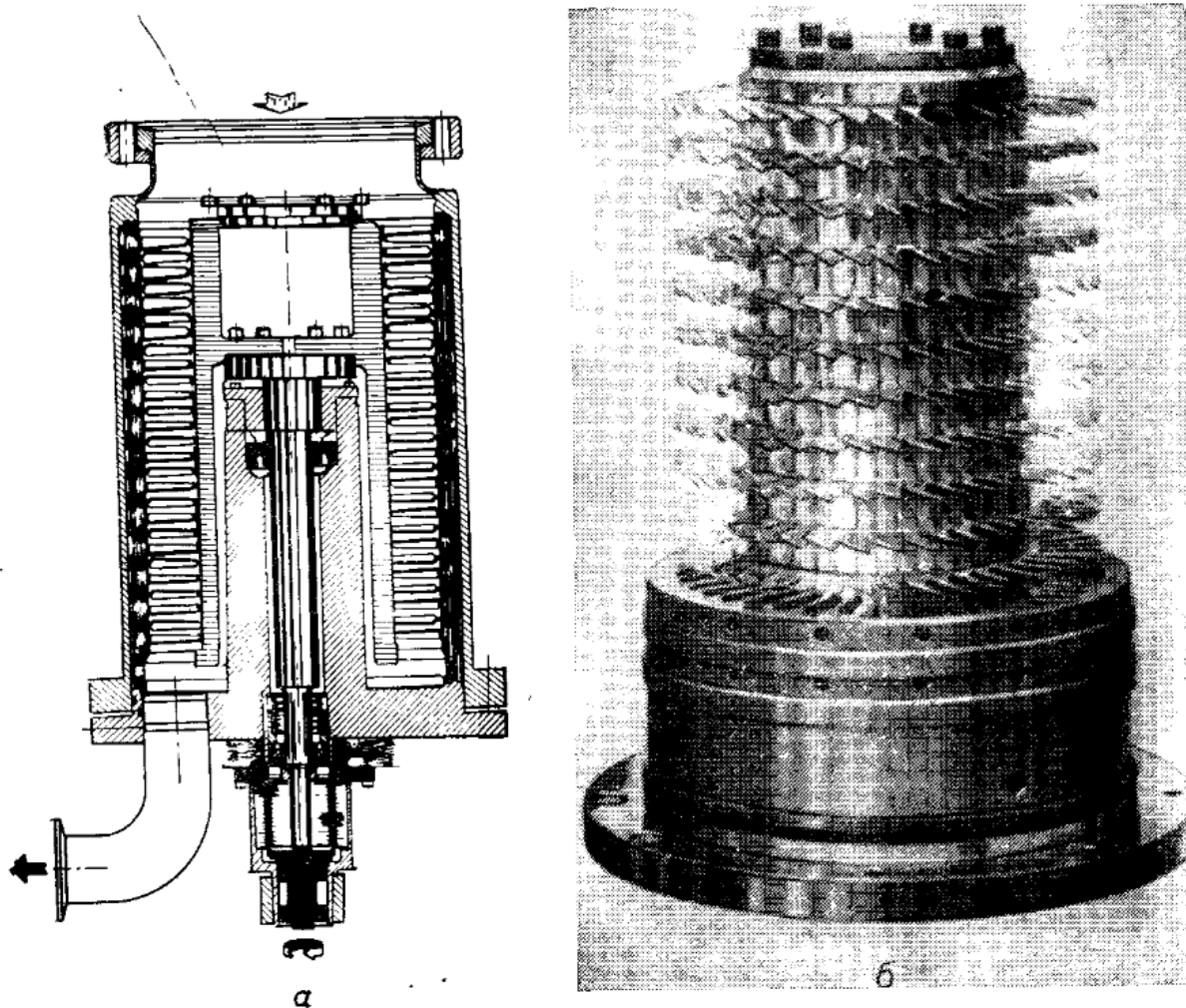


Рис. 84. Вертикальный турбомолекулярный насос фирмы Leybold-Heraeus [10, с. 109]

Турбомолекулярные насосы в настоящее время являются самыми мощными средствами высокомолекулярной откачки и находят широкое применение во многих областях, несмотря на высокую стоимость. К преимуществам этих насосов относится возможность получения сверхвысокого вакуума, строго безмаслянная откачка,

бесшумность, малая селективность газов при откачке, возможность откачки лёгких и неконденсирующихся газов (таких как H_2 , He, Ne). Остаточное давление у небольших насосов составляет $10^{-7} - 10^{-8} \text{ Па} \approx 10^{-9} - 10^{-10} \text{ Торр}$, у крупных – до $10^{-9} \text{ Па} \approx 10^{-11} \text{ Торр}$.

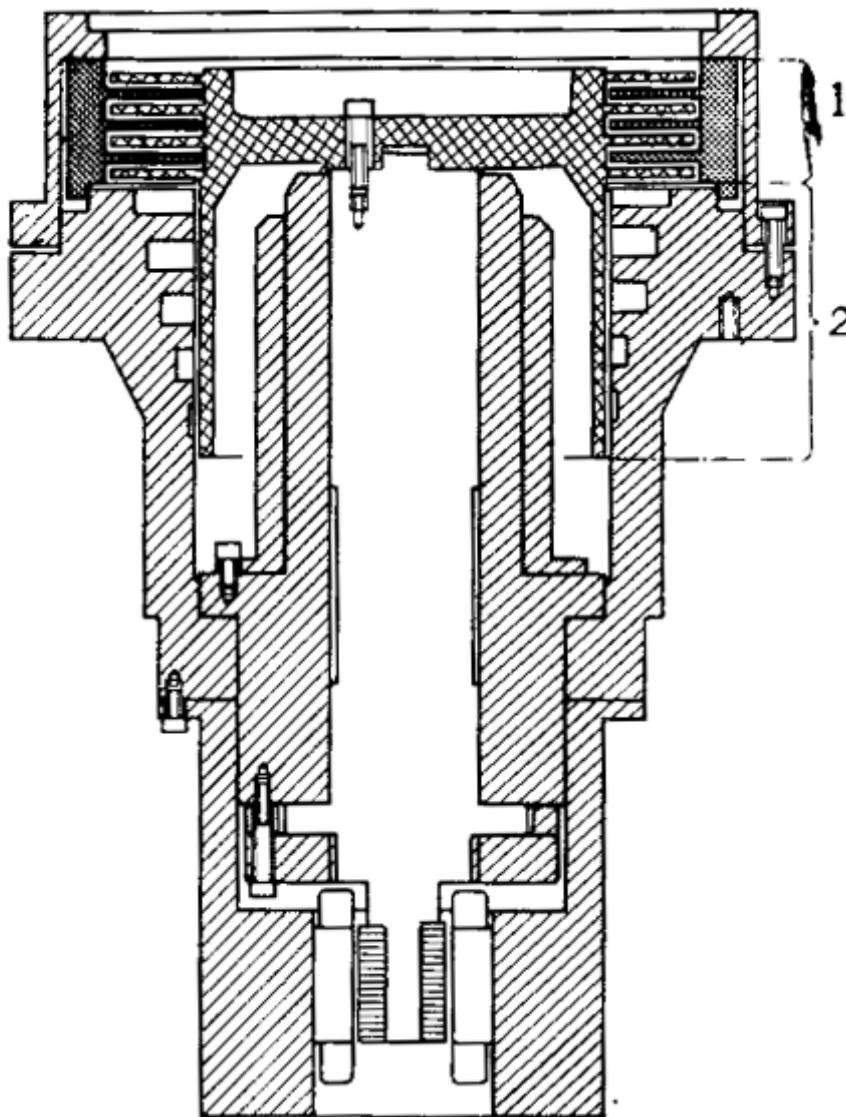


Рис. 85. Сблокированные молекулярный и турбомолекулярный насосы [10, с. 110]

На рис. 86 – 91 представлены некоторые современные турбомолекулярные насосы.



Рис. 86. Турбомолекулярный насос КУКУ FF-100/150Е
[<https://www.zencoplasma.ru/node/1180>]



Рис. 87. Турбомолекулярный насос ТМН-150/63
[<http://www.spbizmerit.ru/turbomolekulyarnyi-nasos-tmn-150-63.html>]



Рис. 88. Насос высоковакуумный турбомолекулярный TURBOVAC MAG W 300 iP на магнитном подвесе
[<https://vacma.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/turbomolekulyarnye/turbomolekulyarnyy-nasos-turbovac-mag-w-300-ip/>]



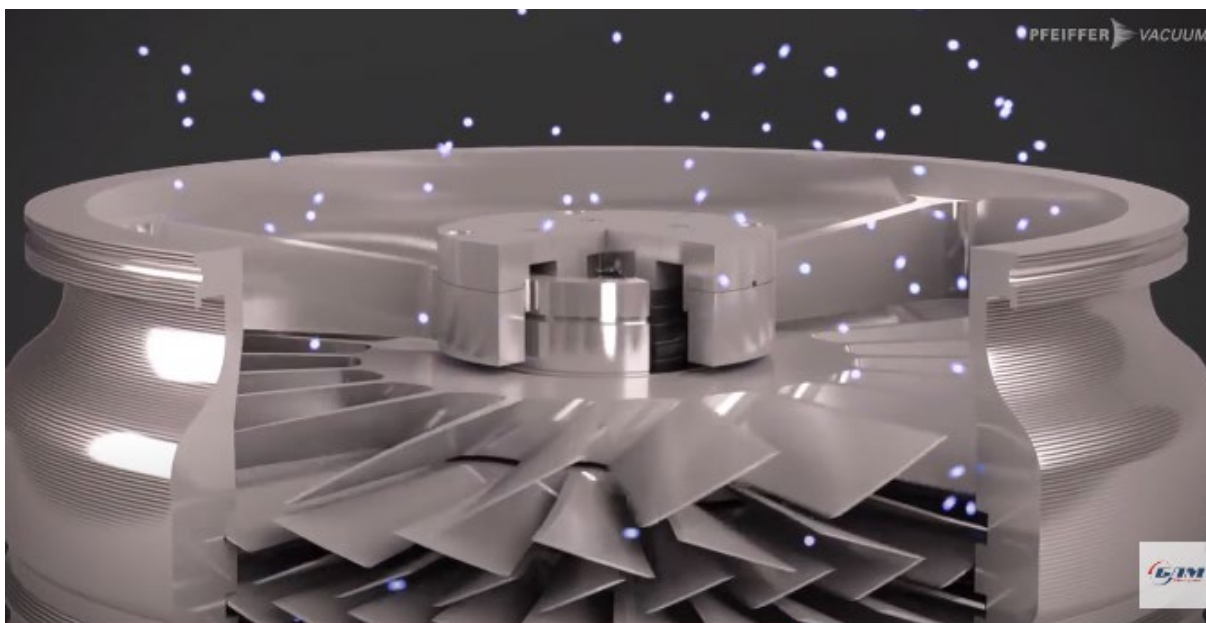
Рис. 89. Турбомолекулярный вакуумный насос EBARA EMT390M-BAS
[<https://erstvak.com/product/turbomolekulyarnyy-vakuumnyy-nasos-ebara-emt390m-bas/>]



Рис. 90. Турбина молекулярного насоса (Владимирский центр механической обработки – ВЦМО г. Владимир) [<https://vcmo33.ru>]



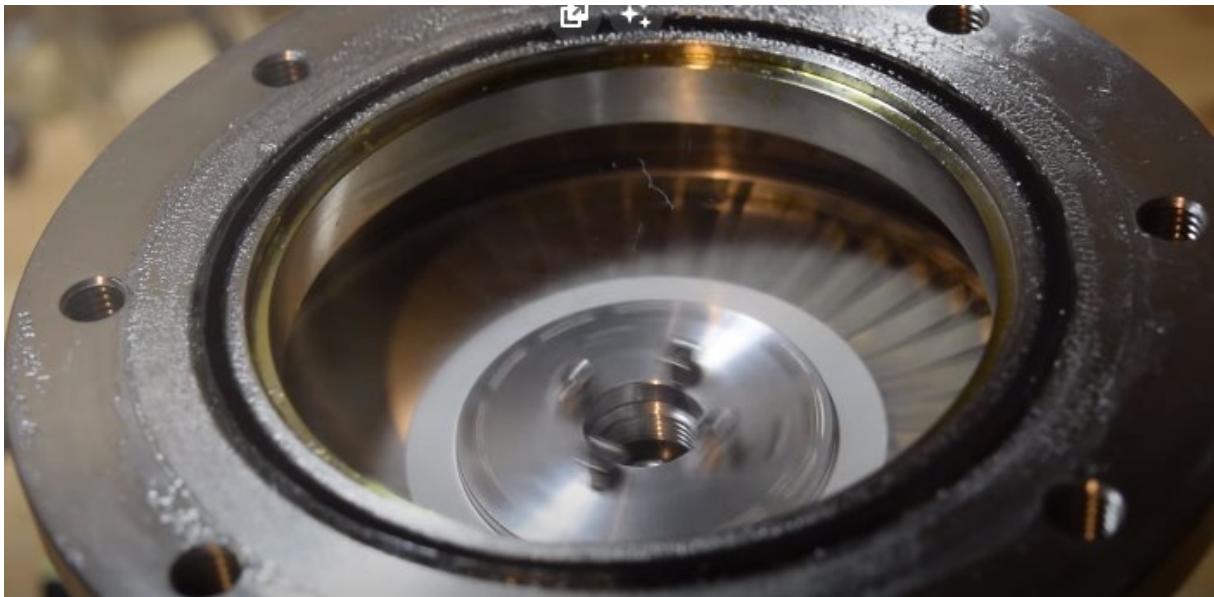
Рис. 91. Комплекс вакуумный турбомолекулярный КВТ-050 (Владимирский центр механической обработки – ВЦМО г. Владимир) [<https://vcmo33.ru/pumps/kvt-151>]



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 14. Принцип работы турбомолекулярных насосов HiRace



Откройте в папке Animation файл:
Медиа 15. Принцип работы турбомолекулярных насосов Edwards



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 16. Как работают турбомолекулярные насосы

В окнах Медиа 14 – Медиа 17 представлена демонстрация работы вакуумного турбомолекулярного насоса.

Медиа 14:

Принцип работы турбомолекулярных насосов HiPace

https://www.youtube.com/watch?v=U1mwpRb_C1c

Медиа 15:

Принцип работы турбомолекулярных насосов Edwards

<https://www.youtube.com/watch?v=8gNDDItrlBc>

Медиа 16:

Как работают турбомолекулярные насосы

<https://www.youtube.com/watch?v=A0v3tNCLqkA>

v27 Глава 4. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. СТРУЙНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

v28 § 1. Жидкостно-струйные насосы

Принцип действия жидкостно-струйных насосов сводится к следующему (рис. 92). В насосе предварительно создаётся средний вакуум. Если по трубке в эту систему подаётся нагретый пар под сравнительно высоким давлением, который вбрасывается в камеру насоса через сопло, то образуется сильная струя пара со скоростью околосвуковой или сверхзвуковой, которая расширяется, как показано на рисунке. При этом расширении весь внутренний диаметр насоса перекрывается. Высокоскоростная струя пара захватывает молекулы газа (по различным механизмам) и переносит их в приёмную камеру. Поскольку струя перекрывает диаметр насоса, перенос газа в обратном направлении затруднён.

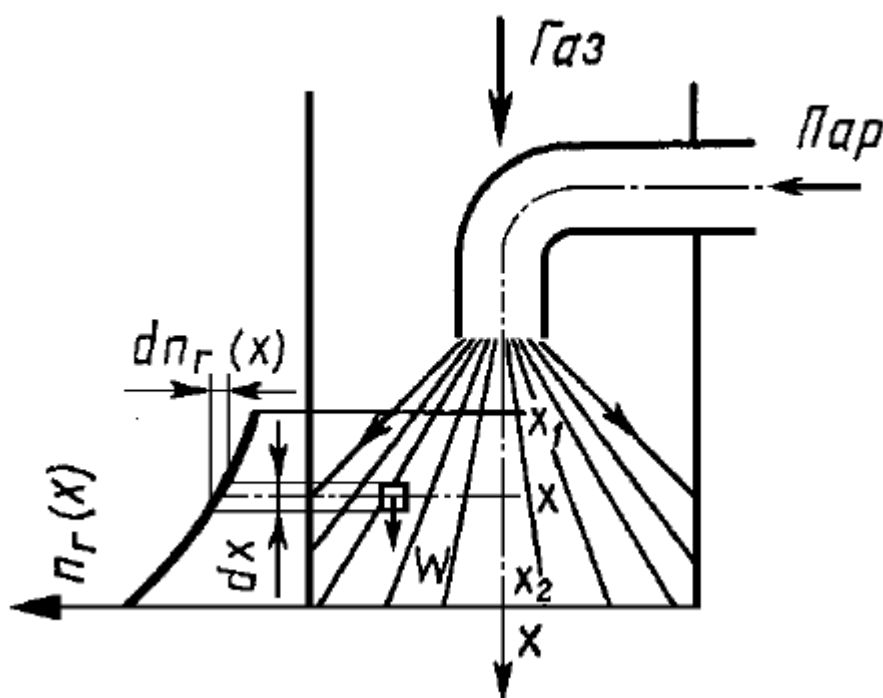


Рис. 92. Схема пароструйной откачки. Сопло диффузионного насоса [7, с. 181]

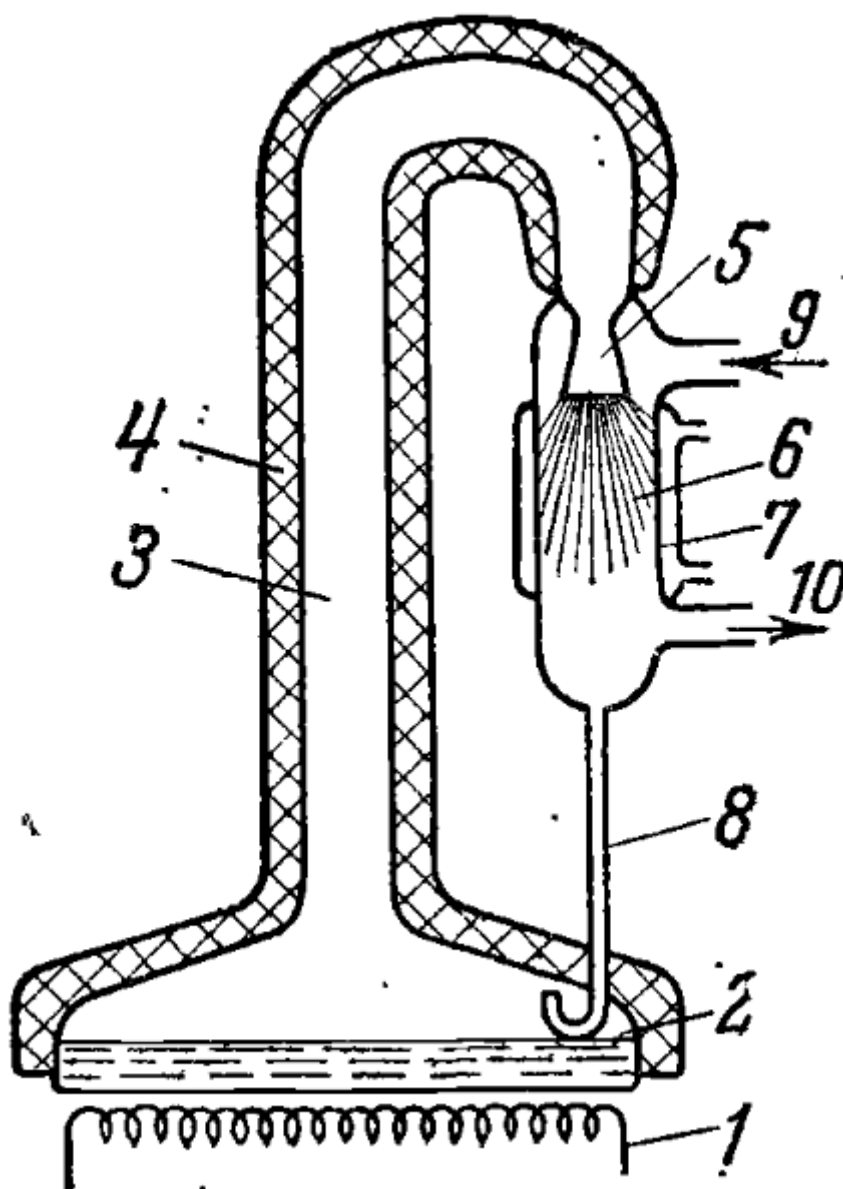


Рис. 93. Принципиальная схема пароструйного вакуумного насоса. 1 – нагреватель; 2 – кипятильник; 3 – паропроводящая труба; 4 – теплоизоляция; 5 – сопло; 6 – рабочая камера насоса; 7 – холодильник; 8 – трубка для стока конденсата в холодильник; 9 – вход откачиваемого газа; 10 – выход газа [8, с. 123]

Вместо нагретого пара может использоваться просто быстрая струя жидкости; такой насос менее производителен, но может качать от атмосферы. Таким образом, струйные вакуумные насосы подразделяются на **жидкостно-** и **пароструйные**. Теоретически ещё

возможны газоструйные насосы, но практического значения они не имеют.

Пароструйные насосы подразделяются на **пароэжекторные, бустерные** и **диффузионные**. Области действия этих насосов:

1. Эжекторные $10^5 \div 1 \text{ Па}$ ($760 \div 10^{-2} \text{ Торр}$)
2. Бустерные $10 \div 10^{-2} \text{ Па}$ ($10^{-1} \div 10^{-4} \text{ Торр}$)
3. Диффузионные 10^{-2} Па (ниже 10^{-4} Торр)

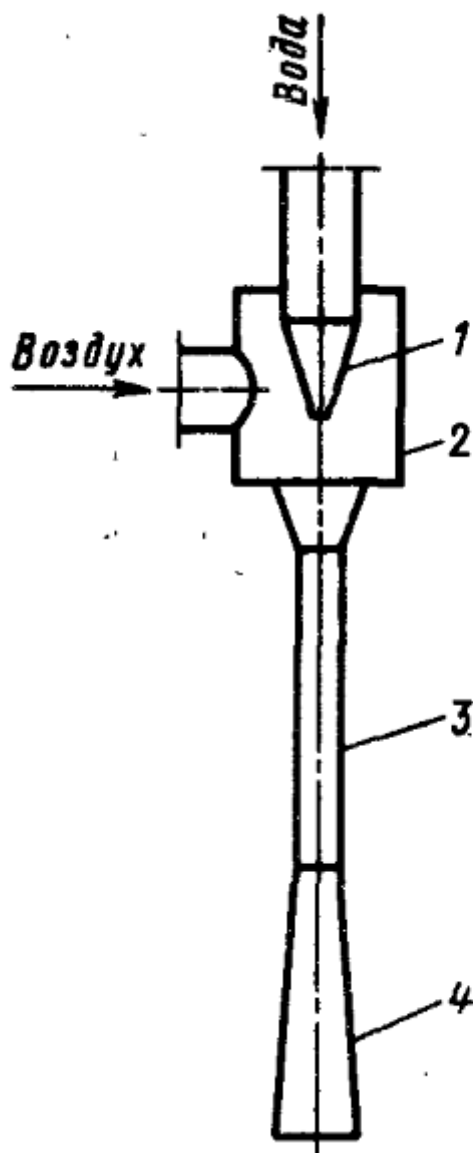


Рис. 94. Принципиальная схема жидкостно-струйного насоса. 1 – сопло; 2 – приёмная камера; 3 – камера смешения; 4 – диффузор. [9, с. 298]

Рассмотрим принцип действия струйных насосов на примере насоса пароструйного (рис. 93). Внутреннее пространство насоса, 3, 5, 6, – откачиваются форвакуумным (предварительным) насосом, который, как правило, действует и в процессе высоковакуумной откачки. Рабочая жидкость (вакуумное масло или ртуть) нагревается в кипятильнике 2 нагревателем 1, испаряется и поступает по теплоизолированному паропроводу 3 в сопло 5, из которого с большой скоростью выбрасывается в рабочую камеру 6 (так как там имеет место предварительный вакуум). Газ из откачиваемой камеры поступает в

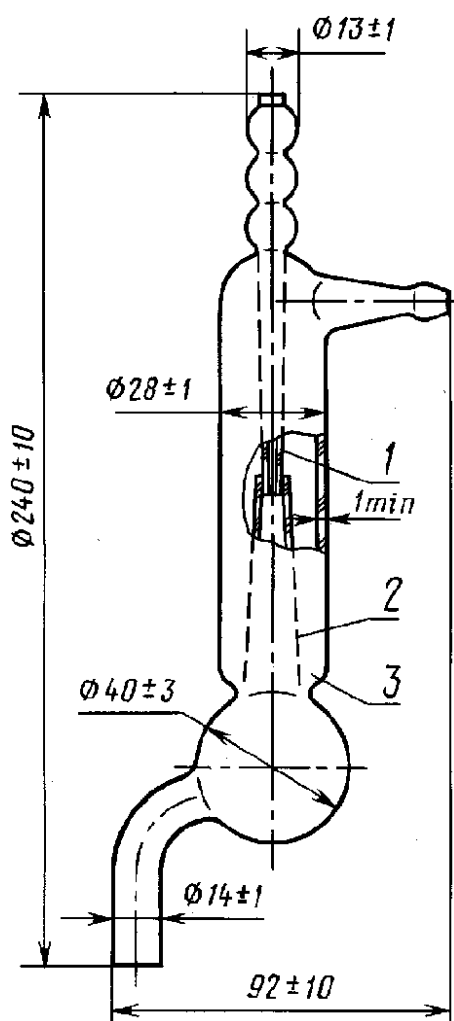


Рис. 95. Схема лабораторного водоструйного вакуумного насоса
[\[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.dokipedia.ru%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdoc_files%2F532%2F606%2F7%2Ffiles%2Fimage569.png&lr=192&pos=28&rpt=simage&source=serp&text=стеклянный%20водоструйный%20насос%20лабораторный%20\]](https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.dokipedia.ru%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdoc_files%2F532%2F606%2F7%2Ffiles%2Fimage569.png&lr=192&pos=28&rpt=simage&source=serp&text=стеклянный%20водоструйный%20насос%20лабораторный%20)

рабочую камеру 6 через патрубок 9 и увлекается струёй пара в нижнюю часть рабочей камеры, где откачивается форвакуумным насосом через патрубок 10. Нижняя часть камеры 6 охлаждается водяным холодильником 7, и на её стенках конденсируется пар масла, который затем стекает по трубке 8 в кипятильник 2. Таким образом, осуществляется циркуляция рабочей жидкости в насосе.



Рис. 96. Лабораторный водоструйный вакуумный насос [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fspb.5drops.ru%2Fupload%2Fiblock%2F2b5%2F2b50d481a547e0439bcb899272d781f9.jpg&lr=192&pos=2&rpt=simage&source=serp&text=стеклянный%20водоструйный%20насос%20лабораторный%20]

В отличие от этого, в **жидкостно-струйных** насосах нагревания рабочей жидкости не происходит, хотя общий принцип действия сохраняется. Чаще всего применяются водоструйные насосы, что позволяет использовать обычную водопроводную воду. Схема такого насоса представлена на рис. 94. Вода под напором поступает через сопло 1 в приёмную камеру 2. Скорость струи такова, что она вызывает

турбулентность в газе, находящемся в этой камере, за счёт чего, а также в силу вязкостного трения, он увлекается струёй и попадает в камеру смешения 3. В результате давление откачиваемого газа в камере 3 больше, чем в камере 2. В расширяющейся насадке, – диффузоре 4, за счёт эффекта откачки давление газа становится ещё больше.

Схема лабораторного стеклянного водоструйного насоса дана на рис. 95. Сужающееся сопло 1 с небольшим зазором входит в узкую камеру смешения 2. Струя водопроводной воды поступает сверху и, расширяясь в камере 2, захватывает молекулы газа через зазор. Откачиваемый объём соединяется с рабочей камерой 3 вакуумным шлангом через горизонтальный верхний патрубок. Внешний вид насоса показан на рис. 96. Насос имеет небольшие размеры и может входить в состав лабораторных установок органического синтеза.

v29 § 2. Пароэжекторные насосы

Эжекторные насосы, так же, как и жидкостно-струйные, могут производить откачку систем от атмосферы, но при этом в них используется нагревание рабочей жидкости до парообразного состояния.

Схема работы эжекторного насоса представлена на рис. 97. Откачиваемый газ поступает в цилиндрический корпус сверху, через фланец 3. В нижней части корпуса находится рабочая жидкость, которая нагревается извне кипятильником 1. Над жидкостью находится конический колокол, отделяющий испарительное пространство. Жидкость испаряется и поступает в верхнюю часть колокола, в котором имеется боковой горизонтальный отвод, заканчивающийся эжектором 2. Эжектор представляет собой сверхзвуковое сопло системы Лавалья; через него струя пара с высокой скоростью попадает в камеру смешения 5, отмеченную на рисунке заштрихованной теплоизоляцией. В этой камере струя пара подхватывает молекулы газа из рабочего пространства насоса и переносит их в охлаждаемую водяным холодильником 6 камеру. Здесь пар конденсируется и перетекает по трубке 7 обратно в кипятильник. То есть осуществляется непрерывная циркуляция рабочей жидкости. Откачанный газ удаляется через патрубок 4.

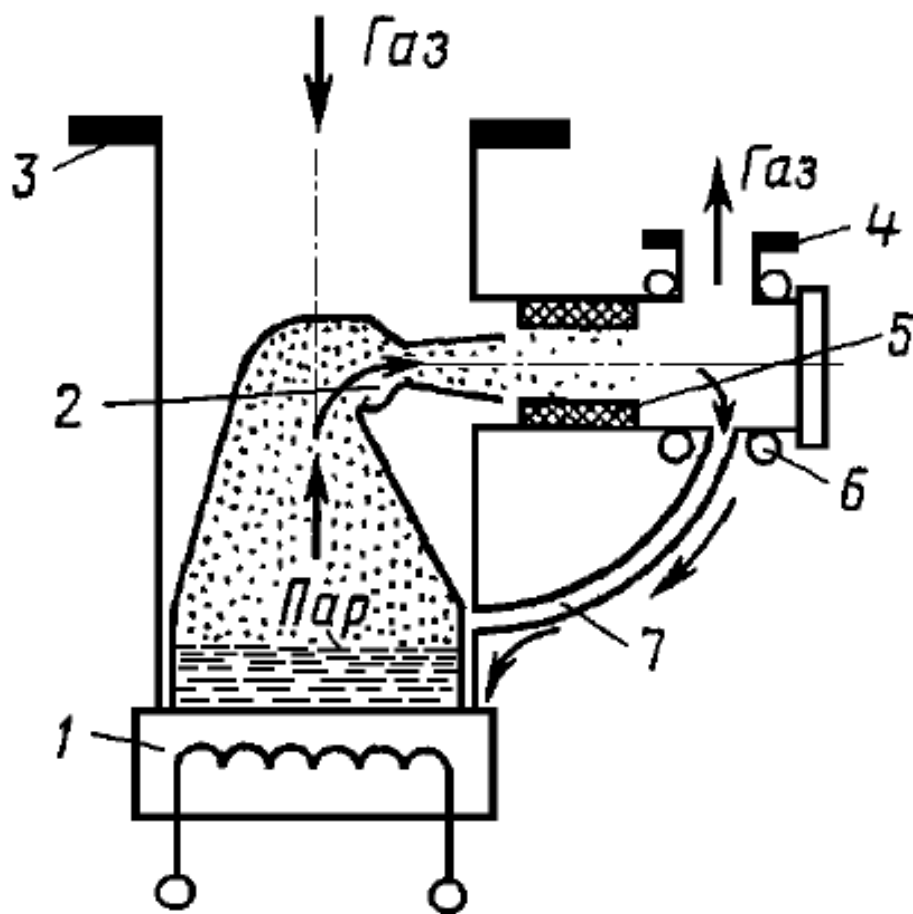


Рис. 97. Принципиальная схема эжекторного насоса. 1 – кипятильник; 2 – сверхзвуковое эжекторное сопло Лавалья; 3 – впускной фланец; 4 – выпускной фланец; 5 – камера смешения [7, с. 183]

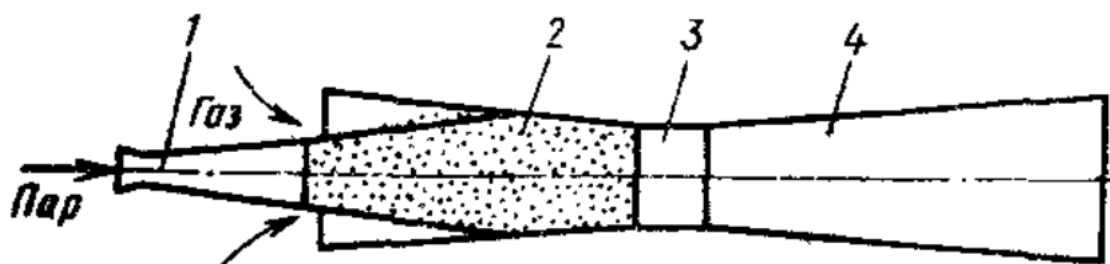


Рис. 98. Принципиальная схема эжектора. 1 – расширяющееся сопло; 2 – камера смешения; 3 – горловина эжектора; 4 – насадка-диффузор [9, с. 299]

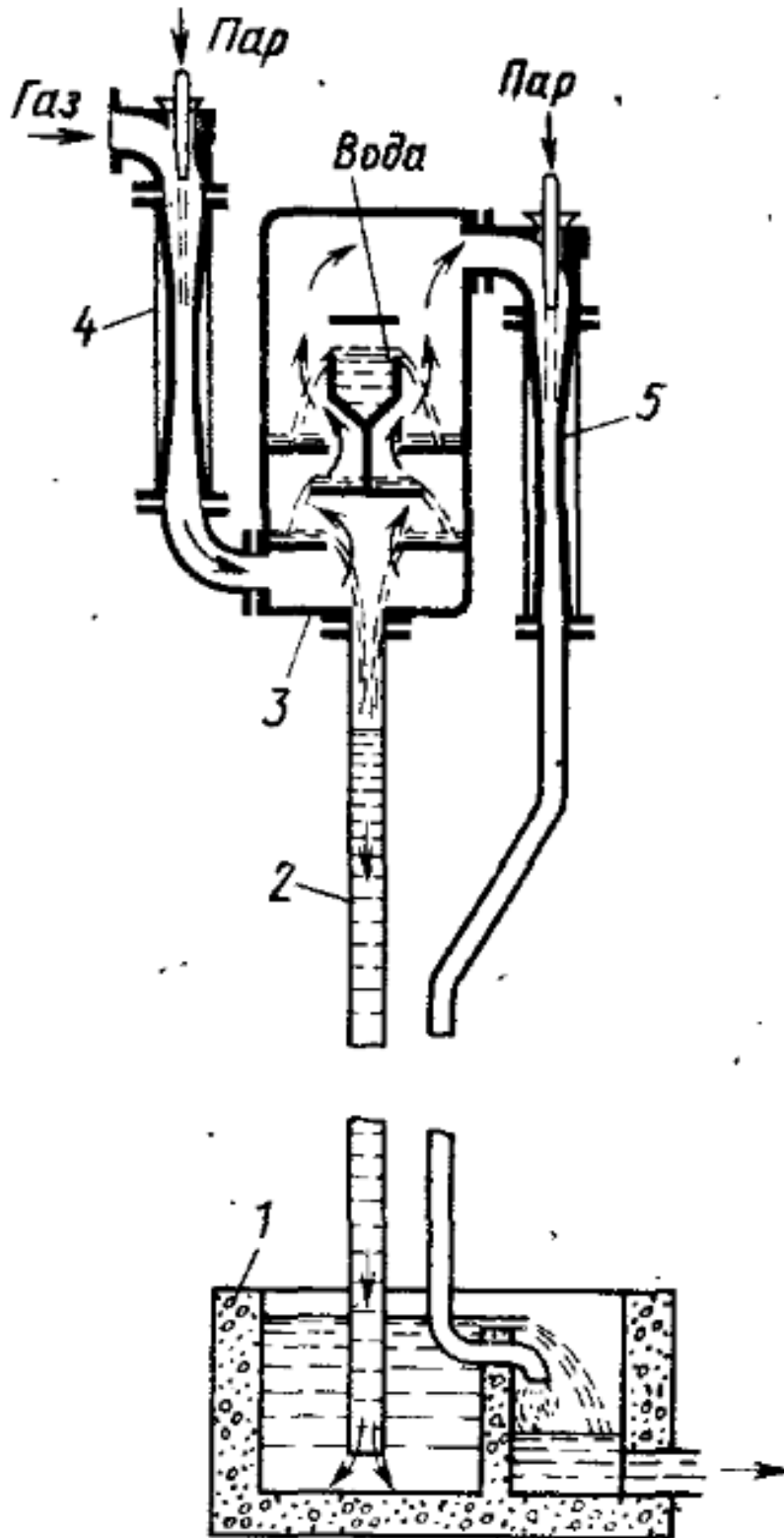


Рис. 99. Схема двухступенчатого пароводяного эжекторного насоса. 1 – дренажный колодец; 2 – сливная труба; 3 – конденсатор пара; 4 – эжекторная ступень; 5 – вторая эжекторная ступень [9, с. 299]

Принципиальная конструкция эжектора дана на рис. 98. Нагретый пар под своим давлением истекает через сопло 1 и попадает в камеру смешения 2. Сопло имеет расширяющуюся форму и такие конструктивные размеры, что при истечении пара достигаются сверхзвуковые скорости струи в турбулентном или ламинарном режиме. Струя перемешивается с молекулами газа в камере смешения (конфузоре) 2; газ поступает в эту камеру извне, как это показано на рисунке стрелками. Камера смешения к выходу сужается и переходит в горловину эжектора 3. Здесь скорость струи уменьшается до звуковой. Далее идёт расширяющийся диффузор 4, в котором происходит дальнейшее снижение скорости потока и увеличение давления откачанного газа.

Эжекторные насосы широко применяются в промышленности и кроме обычных размеров могут представлять собой грандиозные сооружения много метров высотой. В этом случае они могут применяться в металлургии (откачка разного рода печей), в химических производствах в различных установках по дистилляции, выпариванию, кристаллизации, сушки, фильтрации и многому другому.

Рассмотрим работу двухступенчатого пароводяного эжекторного насоса – рис. 99. Высота его составляет более 10 м. В качестве рабочей жидкости используется вода. Водяной пар поступает извне, где может быть побочным продуктом работы других узлов общей технологической схемы или производиться специально. По технологическим условиям каждая ступень эжектора может понижать давление в 10 раз. Если откачка ведётся от атмосферы 10^5 Па , то данный насос может обеспечить остаточное давление $\sim 10^3 \text{ Па}$. За первой эжекторной ступенью 4 ставится конденсатор 3, в котором из откачанной смеси конденсируется водяной пар. При этом разрежение в конденсаторе 3 повышается. Затем оставшийся газ откачивается второй ступенью 5. Сконденсированный пар по сливным трубам 2 сливается в дренажную систему 1, которая имеет гидрозатвор, что сохраняет разрежение в рабочих камерах насоса.

v30 § 3. Бустерные насосы

Бустерные насосы используют для быстрой откачки больших потоков газа, начальное давление которых (то есть – выпускное давление бустера) может составлять несколько сотен $Па$ (то есть несколько $Torr$). Бустеры могут повышать вакуум до значений $10 \div 10^{-2} Па$ ($10^{-1} \div 10^{-4} Torr$) – выпускное давление бустера.

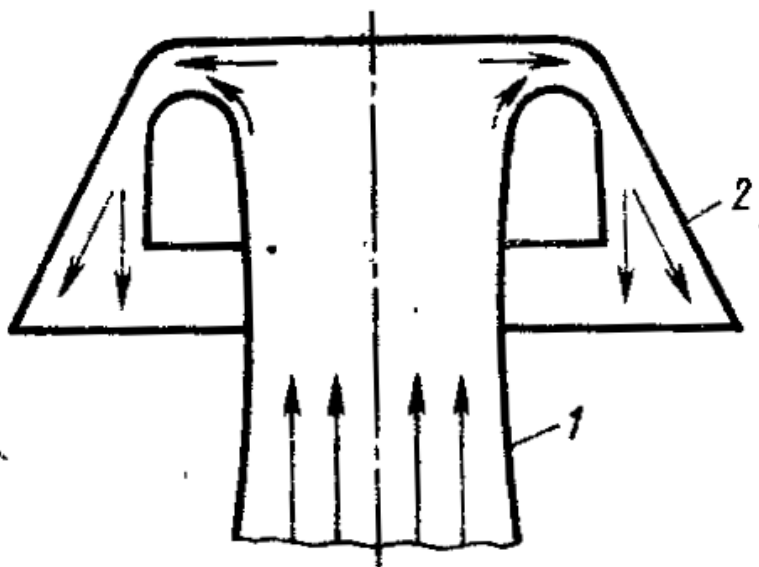


Рис. 100. Схема обращённого сопла зонтичного типа. 1 – подсопельник; 2 – зонт [9, с. 313]

Название «бустерные», то есть вспомогательные, возникло из-за их широкого применения на входе высоковакуумных диффузионных пароструйных насосов. Последние имеют довольно низкое выпускное давление (ориентировочно $1 \div 10 Па$ ($10^{-2} \div 10^{-1} Torr$)), и для их запуска требуется работа форвакуумных насосов (чаще всего – механических), которые качают от атмосферы. Как правило, диффузионные насосы работают длительное время, и, если форвакуум отключить, давление в их выпускной камере быстро возрастает, и они выходят из рабочего режима. Выходом из этой ситуации может служить или постоянная совместная работа форвакуумного насоса (что требует больших энергозатрат), или подключение на вход

диффузионного насоса бустера, который имеет гораздо большее выпускное давление. Таким образом, можно будет или вообще отключить механический насос, или включать его периодически на короткое время для понижения давления на входе бустера.

Разумеется, в настоящее время бустерные насосы используются не только для этого. Отметим, что для их работы также требуется форвакуумная откачка. Область их работы приходится на переходный режим течения газа от вязкостного до молекулярного.

Бустерные насосы являются многоступенчатыми агрегатами, имеющими эжекторные ступени и ступени со специальными соплами, которые также применяются в высоковакуумных насосах. Чаще всего в качестве таких сопел выступают **обращённые сопла зонтичного типа** (рис. 100). Пар поступает по паропроводящей трубе (аналогичной конусу на рис. 97) в подсопельник 1, где меняет своё направление на 180° , проходит через сужение и расширяется в кольцевом пространстве под зонтом с увеличением скорости до сверхзвуковой.

Выходная ступень бустерного насоса – эжекторная с диффузором (рис. 101), которая обеспечивает насосу высокое выпускное давление.

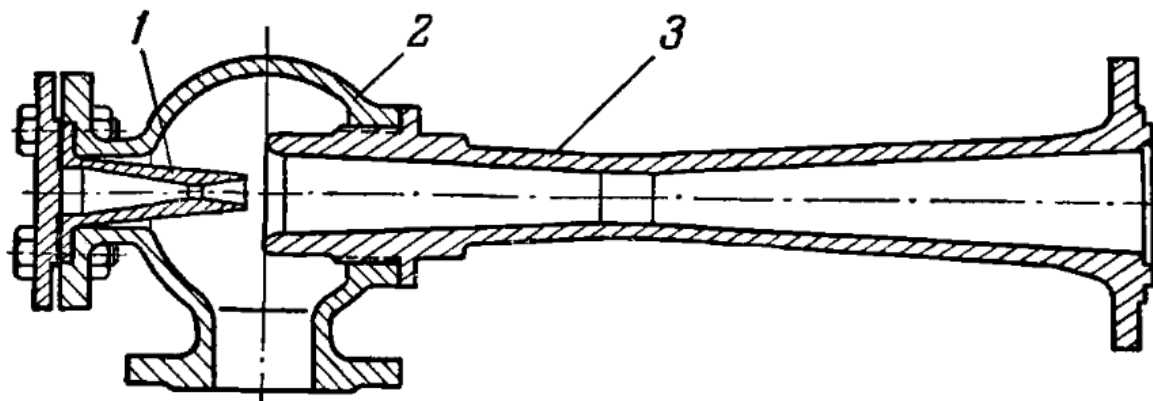


Рис. 101. Устройство эжекторной ступени. 1 – сопло; 2 – приёмная камера; 3 – камера смешения и диффузор [8, с. 131]

Схема четырёхступенчатого паромасляного бустерного насоса приведена на рис. 102. Корпус насоса 3 – водоохлаждаемый (внешний змеевик). В нём находятся три ступени с зонтичными соплами. Откачиваемый газ поступает сверху через фланец 1; выхлоп

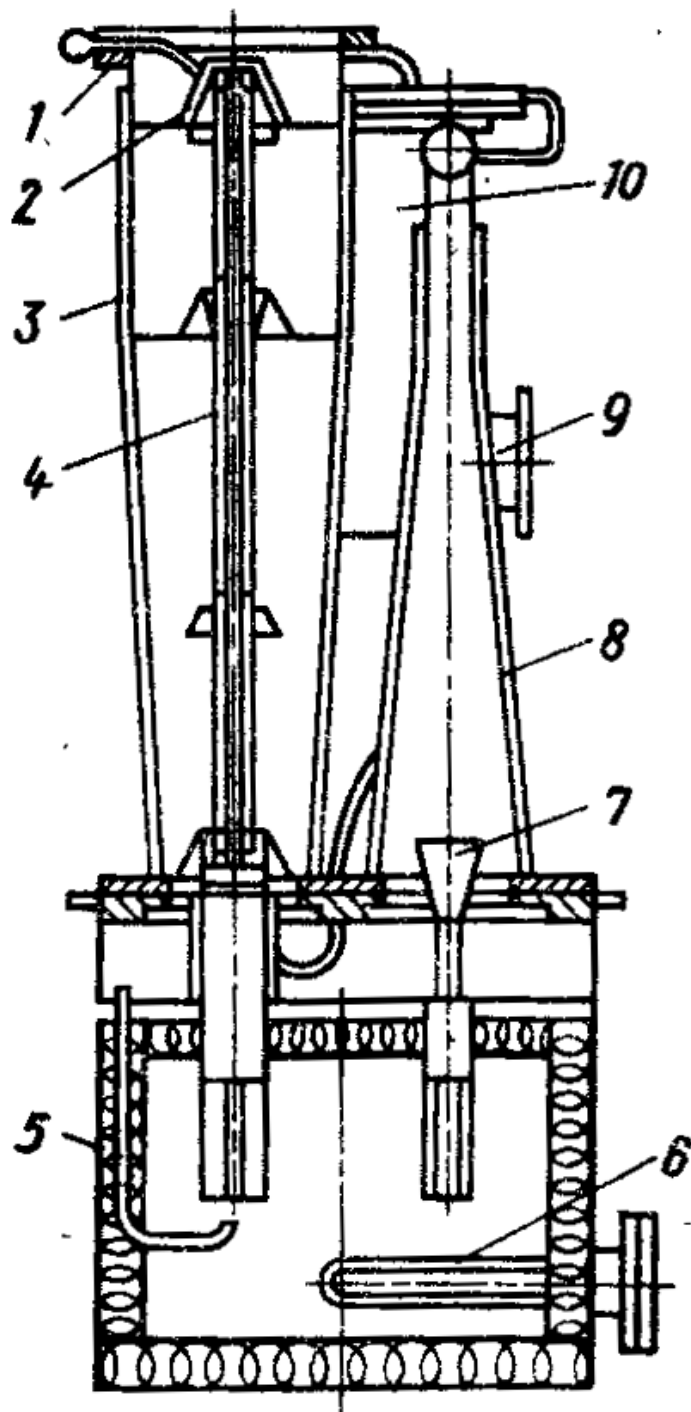


Рис. 102. Схема паромаслянного бустерного насоса. 1 – впускной фланец; 2 – маслоотражатель; 3 – корпус; 4 – паропровод; 5 – кипятивник; 6 – теплоэлектронагреватель (ТЭН); 7 – сопло; 8 – конфузор (камера смешения); 9 – выпускной фланец; 10 – выходная ловушка [9, с. 313]



Рис. 103. Бустерный паромасляный насос 2НВВМ-630P/18000
[<https://vacuum-market.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/busternye-paromaslyanye/2nvbm-630r-18000/>]

осуществляется через фланец 9. Из кипяtilьника 5 со сменным нагревательным элементом 6 на ступени идут два паропровода: один – на три зонтичные ступени – 4, и один – на эжекторную ступень. Над верхней зонтичной ступенью стоит маслоотражатель 2, препятствующий проникновению паров масла в откачиваемый объём (задерживает до 95% паров). Эжекторная ступень состоит из сопла 7 и конфузора 8. Ловушка 10 также предназначена для задержания паров масла.

На рис. 103 показан один из современных бустерных насосов.

v31 § 4. Диффузионные насосы

Эти насосы являются одними из основных агрегатов получения высокого вакуума.

Так же, как в эжекторных и бустерных, в **диффузионных пароструйных насосах** используется эффект захвата молекул откачиваемого газа жидкостной или паровой струёй, однако механизм этого захвата может быть разным. На рис. 104 показаны три режима увлечения газа струёй жидкости или пара: **турбулентный**, **вязкостный** и **диффузионный**.

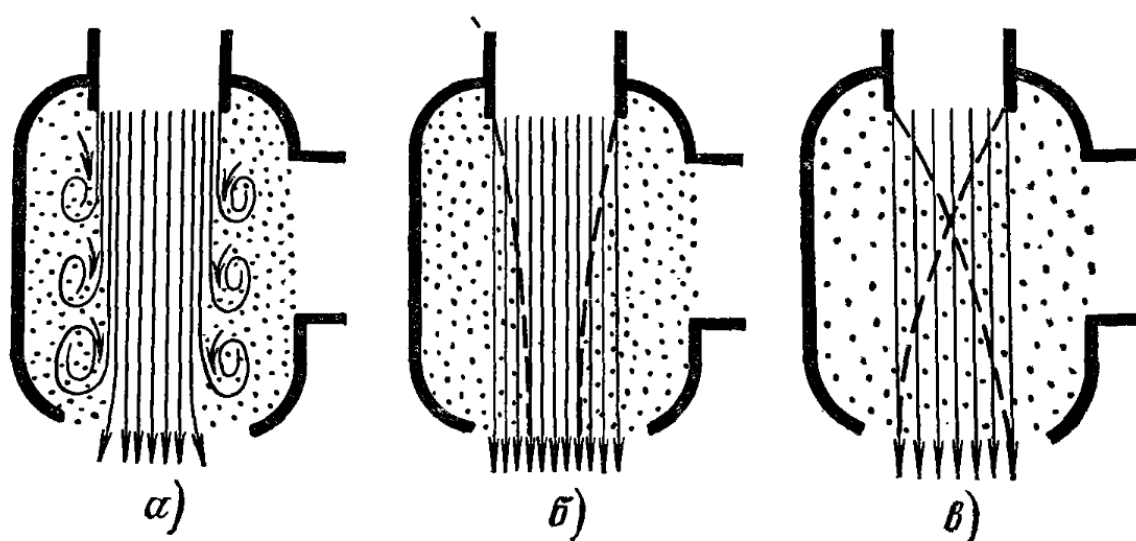


Рис. 104. Режимы увлечения газа паровой струёй: а) турбулентный; б) вязкостный; в) диффузионный [8, с. 124]

Турбулентный режим (рис. 104а) имеет место при большом давлении откачиваемого газа $10^5 \div 10^3 \text{ Па}$ ($760 \div 10 \text{ Торр}$) и очень плотной струе (жидкостной или плотного пара). Газ перемешивается с вихреобразно движущейся струёй и увлекается ей.

Вязкостный режим (рис. 104б) наступает при гораздо бóльших разрежениях $10^3 \div 10^{-1} \text{ Па}$ ($10 \div 10^{-3} \text{ Торр}$), когда скорость истечения пара намеренно уменьшается и режим его течения постепенно переходит от турбулентного к **ламинарному**. Захват газа струёй при этом происходит за счёт вязкостного взаимодействия и, в небольшой

степени, – за счёт диффузии. Доля диффузии условно показана на рисунке штриховыми линиями.

Диффузионный режим (рис. 104в) присущ вакууму $<10^{-2} \text{ Па}$ ($<10^{-4} \text{ Торр}$) и требует меньшей плотности струи пара. Длина свободного пробега молекул становится соизмеримой с размерами вакуумной камеры. Диффузия газа в эту ламинарную струю происходит по естественным причинам, – из-за разности концентраций газа (точнее – из-за градиента химического потенциала). Попав в струю пара, молекулы газа сталкиваются с молекулами пара и приобретают преимущественный дополнительный вектор движения в сторону откачки. По мере улучшения вакуума доля вязкостного захвата уменьшается и при высоком вакууме (10^{-2} Па (10^{-4} Торр)) режим становится полностью диффузионным: на рисунке доля диффузии, условно показанная штриховой линией, увеличивается. Наряду с этим происходит и «обратная» диффузия в струю со стороны форвакуумной камеры, однако практически все эти молекулы уносятся струёй пара. Некоторые проблемы могут возникать при откачке лёгких газов, таких, как водород.

Эжекторные насосы охватывают турбулентную область при давлениях $3,5 \cdot 10^2 \div 1,33 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ($260 \div 10 \text{ Торр}$) и вязкостную $\sim 10^3 \div 1 \text{ Па}$ ($10 \div 10^{-2} \text{ Торр}$).

Бустерные насосы работают в вязкостном режиме при повышенной доле диффузии при давлениях $10 \div 10^{-1} \text{ Па}$ ($10^{-1} \div 10^{-3} \text{ Торр}$).

Диффузионные насосы работают в диффузионном режиме при давлениях $<10^{-2} \text{ Па}$ ($<10^{-4} \text{ Торр}$)

Работа и конструкция диффузионных насосов во многом также определяется рабочими жидкостями. К ним предъявляются следующие основные требования.

1. Низкое давление насыщенного пара.
2. Однородность состава.
3. Термическая стабильность.
4. Термоокислительная устойчивость.
5. Химическая инертность к материалам конструкции насоса.
6. Малая удельная теплота парообразования.

7. Малое газопоглощение.

Основными рабочими жидкостями насосов являются **ртуть, минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кремнийорганические соединения.**

Ртуть имеет ряд преимуществ и два недостатка: высокое давление насыщенных паров (10^{-1} Па (10^{-3} Торр)) и высокую токсичность. Последнее обстоятельство привело к почти полному отказу от ртутных насосов. Тем не менее, они применяются для откачки систем, содержащих ртуть, и во многих специфических случаях.

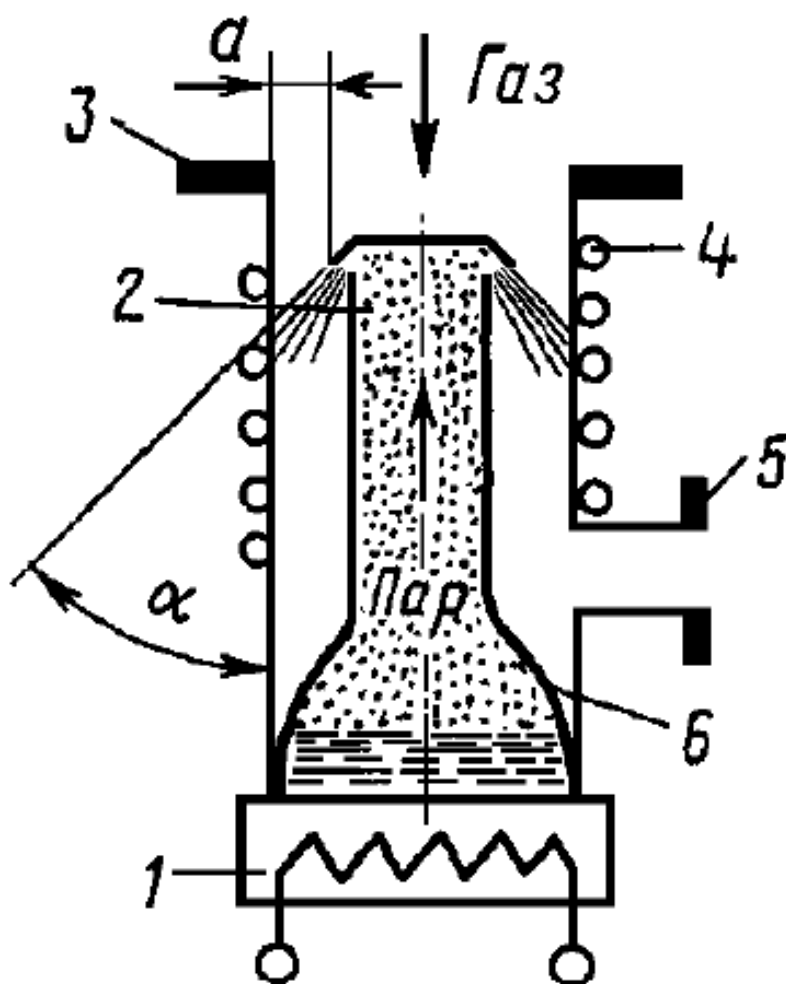


Рис. 105. Принципиальная схема диффузионного насоса. 1 – кипятыльник; 2 – диффузионное сопло; 3 – впускной патрубок; 4 – холодильник; 5 – выпускной патрубок; 6 – паропровод [7, с. 184]

Минеральные масла имеют низкое давление насыщенных паров, но легко окисляются при попадании воздуха в вакуумную систему. Их невысокая стоимость сделала их наиболее употребимыми в диффузионной откачке. Однако это породило и большую проблему из-за возможного попадания паров масла в высоковакуумные и сверхвысоковакуумные системы (так называемая **проблема безмаслянной откачки**). Решением этой проблемы является установка в вакуумные системы **вакуумных ловушек** (см. следующий параграф).

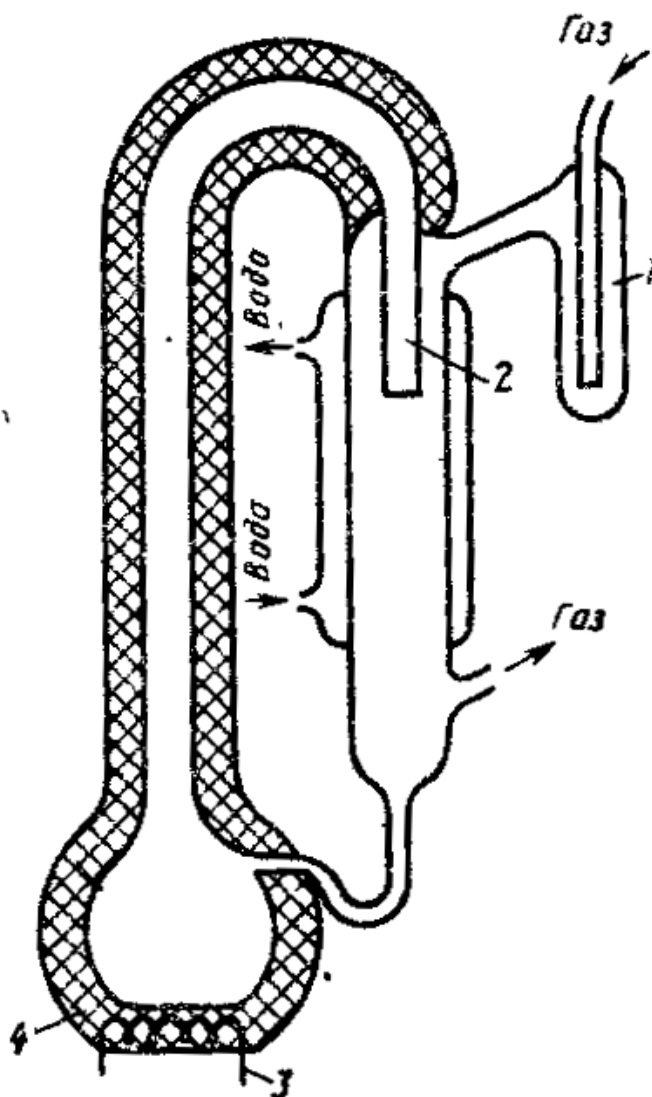


Рис. 106. Одноступенчатый стеклянный парортутный насос. 1 – ловушка; 2 – сопло; 3 – нагреватель; 4 – теплоизоляция [9, с. 318]

Эфиры по своим параметрам примерно соответствуют минеральным маслам, но обладают малой термической и окислительной стойкостью и подвержены вредному воздействию воды.

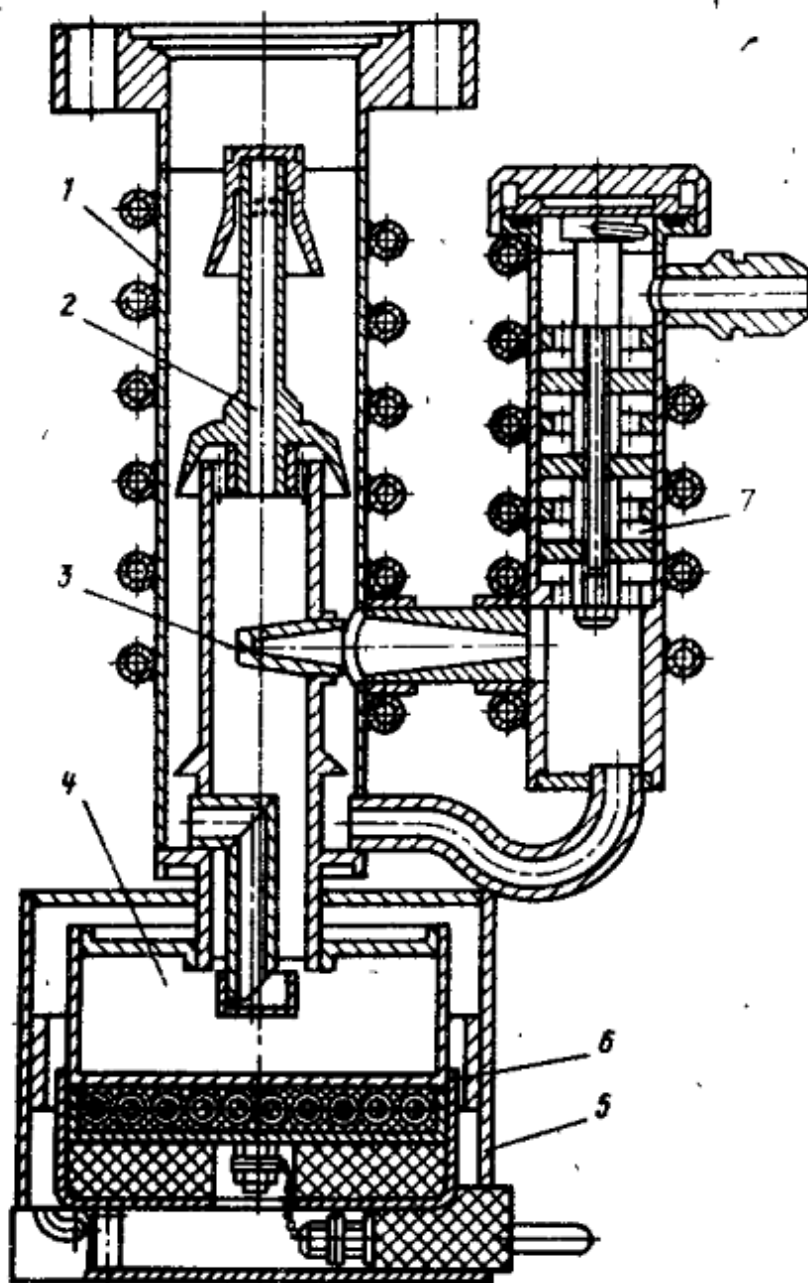


Рис. 107. Трёхступенчатый малогабаритный ртутный насос Н-50Р. 1 – корпус; 2 – паропровод; 3 – эжектор; 4 – кипяtilьник; 5 – теплоизоляционный кожух; 6 – нагреватель; 7 – ловушка для паров ртути [9, с. 319]

Кремнийорганические масла обладают высокой термической и окислительной стойкостью, но очень дороги.

Принципиальная схема диффузионного насоса представлена на рис. 105. В цилиндрический корпус залито масло, нагреваемое

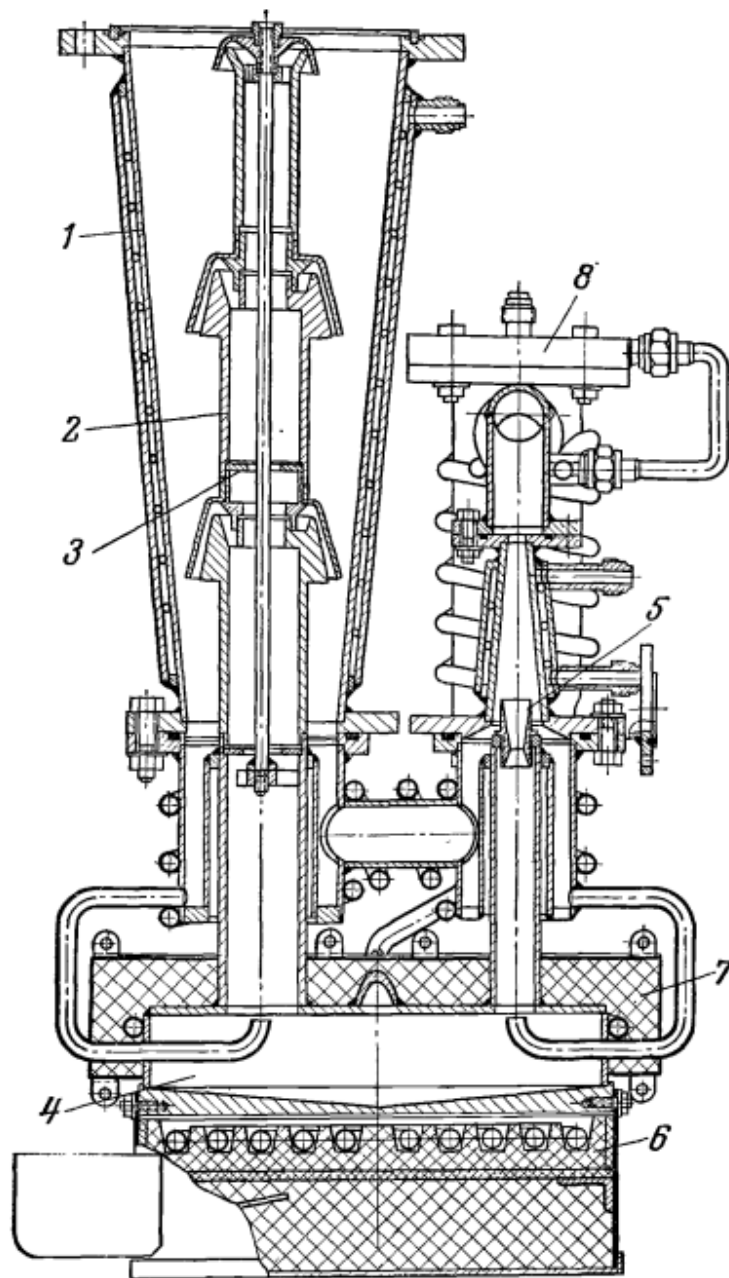


Рис. 108. Парортутный насос Н-5СР. 1 – корпус; 2 – паропровод; 3 – дросселирующая шайба; 4 – кипятыльник; 5 – эжекторная ступень; 6 – электронагреватель; 7 – теплоизоляция; 8 – ловушка для паров ртути [8, с. 134]

внешним кипятильником 1. Над маслом размещён колоколообразный паропровод 6, по которому поднимается пар и истекает через обратное сопло зонтичного типа 2. Газ из откачиваемой системы поступает через фланец 3, захватывается струёй пара и выходит через патрубок 5. В нижней части корпуса происходит охлаждение и конденсация масла, которое стекает назад в испаритель.

Специфика работы ртутных насосов определяется особыми свойствами этой рабочей жидкости. Это диктует особенности конструкции и эксплуатации насосов. Ртуть – однородная жидкость, химически агрессивная ко многим конструкционным материалам, таким, как металлы (образование амальгамы).

На рис. 106 показан простейший стеклянный лабораторный ртутный насос с цилиндрическим соплом 2. Ртутный насос обязательно должен быть снабжён ловушкой 1 для паров ртути. Насос полностью герметичен, но опасен в эксплуатации из-за возможности повреждения стекла. На рис. 107 представлен малогабаритный трёхступенчатый ртутный насос Н-50Р, снабжённый на выходе эжекторной ступени 3 мощной ловушкой 7 для паров ртути. Более мощный ртутный насос Н-5СР с высокой скоростью откачки, также трёхступенчатый, показан на рис. 108. Так как давление насыщенных паров ртути при комнатной температуре сравнительно велико – 10^{-1} Па (10^{-3} Торр), для вымораживания паров ртути ловушка должна охлаждаться жидким азотом; при этом условии можно получить сверхвысокий вакуум до $10^{-8} - 10^{-10}$ Па ($10^{-12} - 10^{-12}$ Торр). Одним из важных достоинств ртутных насосов является их чистота, они не загрязняют откачиваемый объём, например, продуктами разложения вакуумного масла. Они используются в масс-спектрометрах, сверхвысоковакуумных системах термоядерных установок и т. д.

И всё же высокая токсичность именно паров ртути ограничивает применение ртутных насосов. Малейшая разгерметизация установки может привести к тяжёлым последствиям. Поэтому, где только это возможно, парортутные насосы заменяют на паромасляные. При этом возникает проблема безмасляной откачки, которую можно решить с помощью всё тех же вакуумных ловушек, охлаждаемых жидким азотом. Кроме этого, имеются другие типы высоковакуумных насосов,

не использующих масло, например, рассматривавшиеся уже турбомолекулярные.

Схема двухступенчатого паромасляного насоса показана на рис. 109. Перед выхлопным фланцем стоит небольшой эжектор, с помощью которого можно получить более высокое выпускное давление. Пройдя через эжектор, масляная струя конденсируется и стекает обратно в испаритель.

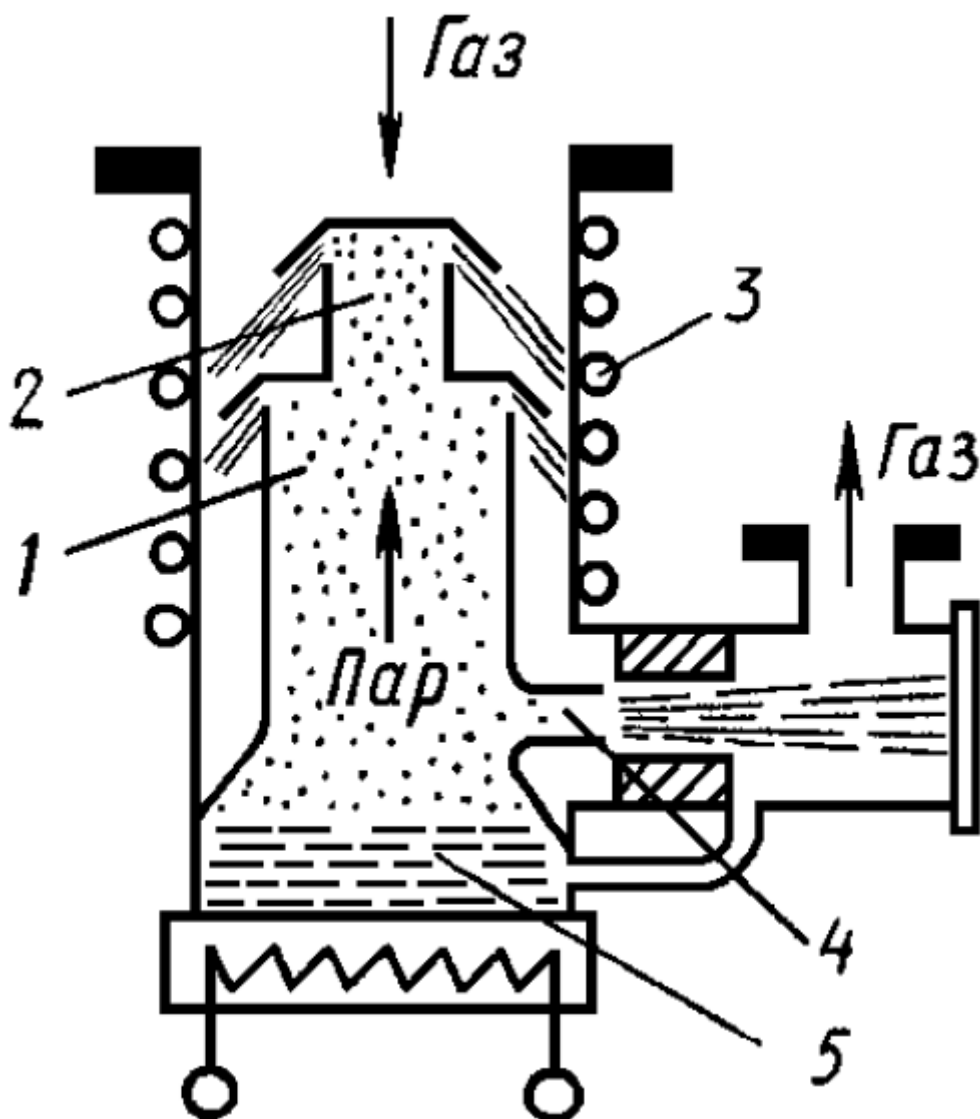


Рис. 109. Принципиальная схема многоступенчатого пароструйного насоса. 1 – первая диффузионная ступень; 2 – вторая диффузионная ступень; 3 – эжекторная ступень [7, с. 188]

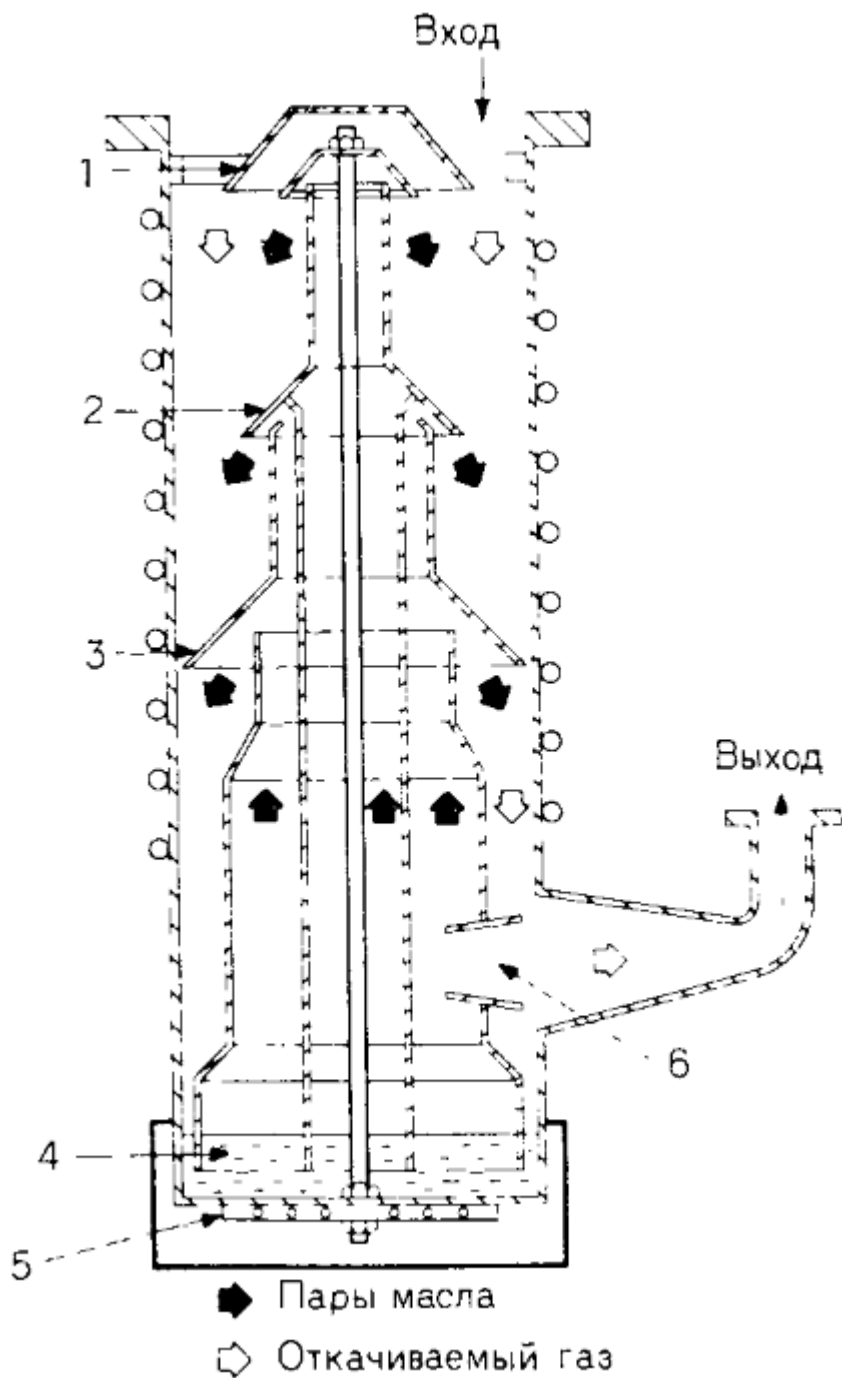


Рис. 110. Трёхступенчатый диффузионный насос. 1 – сопло I ступени; 2 – сопло II ступени; 3 – сопло III ступени; 4 – рабочая жидкость; 5 – нагреватель; 6 – эжектор [10, с. 95]

Трёхступенчатый паромасляный диффузионный насос представлен на рис. 110. Если в откачиваемую камеру не поступают какие-то заметные порции газа, процесс откачки становится

стационарным: микронатекания через вакуумные неплотности, гажение со стенок камеры и других конструкций, выделение растворённого в масле газа, и другие натекания уравниваются откачкой на каждой из трёх ступеней и на эжекторе. При этом наиболее высокий вакуум в насосе устанавливается в районе 1-й ступени, в меньшей степени – в районе второй, и наименее глубокий – в районе третьей. Наиболее мощной по количеству откачиваемого газа является третья ступень, но конструкция первой ступени позволяет достичь более высокого вакуума (при прочих равных условиях).

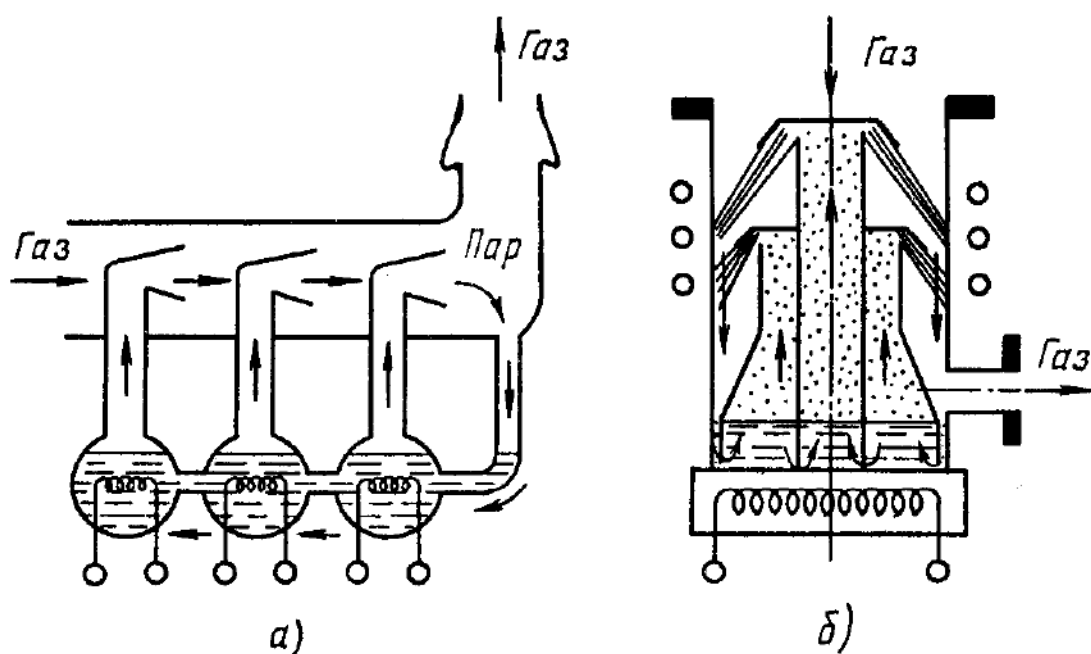


Рис. 111. Фракционирующие пароструйные насосы: а) стеклянный; б) металлический [7, с. 189]

Углеводородное вакуумное масло представляет собой смесь различных фракций, имеющих несколько разную температуру кипения и более тяжёлый или менее тяжёлый состав. Это свойство масел используется в так называемых **фракционирующих** (или разгоночных) диффузионных насосах. **Тяжёлые фракции** масла имеют бóльшую молекулярную массу, низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре и при рабочей температуре в насосе, и позволяют получить более низкое остаточное давление при работе

ступени за счёт этого, а также – – за счёт более **высокой скорости** струи. Плотность струи при этом сравнительно более низкая. Таким образом, эти фракции были бы более предпочтительны для работы первой ступени насоса (см. рис. 110). **Лёгкие фракции** масла имеют меньшую молярную массу, сравнительно высокое давление насыщенного пара при комнатной температуре (для нашего случая это несущественно) и при рабочей температуре в насосе, и позволяют получить более **высокую плотность** струи. То есть, эти фракции были бы более предпочтительны для работы третьей ступени насоса (см. рис. 110). **Промежуточные фракции** масла имеют промежуточные характеристики и более предпочтительны для работы второй ступени насоса (см. рис. 110).

Для работы фракционирующих насосов необходимы масла, которые можно разбить на несколько фракций в соответствии с количеством ступеней насоса (иногда даже для эжекторной ступени выделяется своя фракция или же используется имеющееся масло без фракционирования). Стандартные вакуумные масла соответствующих марок обладают такими свойствами.

Конструктивные изменения фракционирующих насосов сводятся к следующему.

На рис. 111а представлен трёхступенчатый паромасляный фракционирующий насос с тремя рабочими колбами и тремя нагревателями. Откачка производится слева тремя соплами соответственно. На выходе третьей ступени пар конденсируется и стекает вниз на уровень колб с маслом, и поступает сначала в третью ступень, затем – во вторую и первую. Переход от колбы к колбе осуществляется через трубки малого диаметра, поэтому, пока порция сконденсированного пара достигнет первой ступени, проходит некоторое время. За это время происходит выпаривание масла последовательно в третьей и второй ступени, причём сначала испаряются преимущественно лёгкие фракции, и, в итоге, в первой ступени оказывается более тяжёлая фракция, чем в третьей (и, в меньшей степени – во второй). То же самое касается и второй ступени по отношению к третьей. Таким образом, осуществляется необходимое фракционирование.

В металлическом двухступенчатом фракционирующем насосе (рис. 111б) роль разделителя пространств с разными фракциями

выполняет нижняя часть вертикального цилиндрического паропровода первой ступени, которая имеет небольшой зазор с дном насоса, что препятствует быстрому перемешиванию масла.

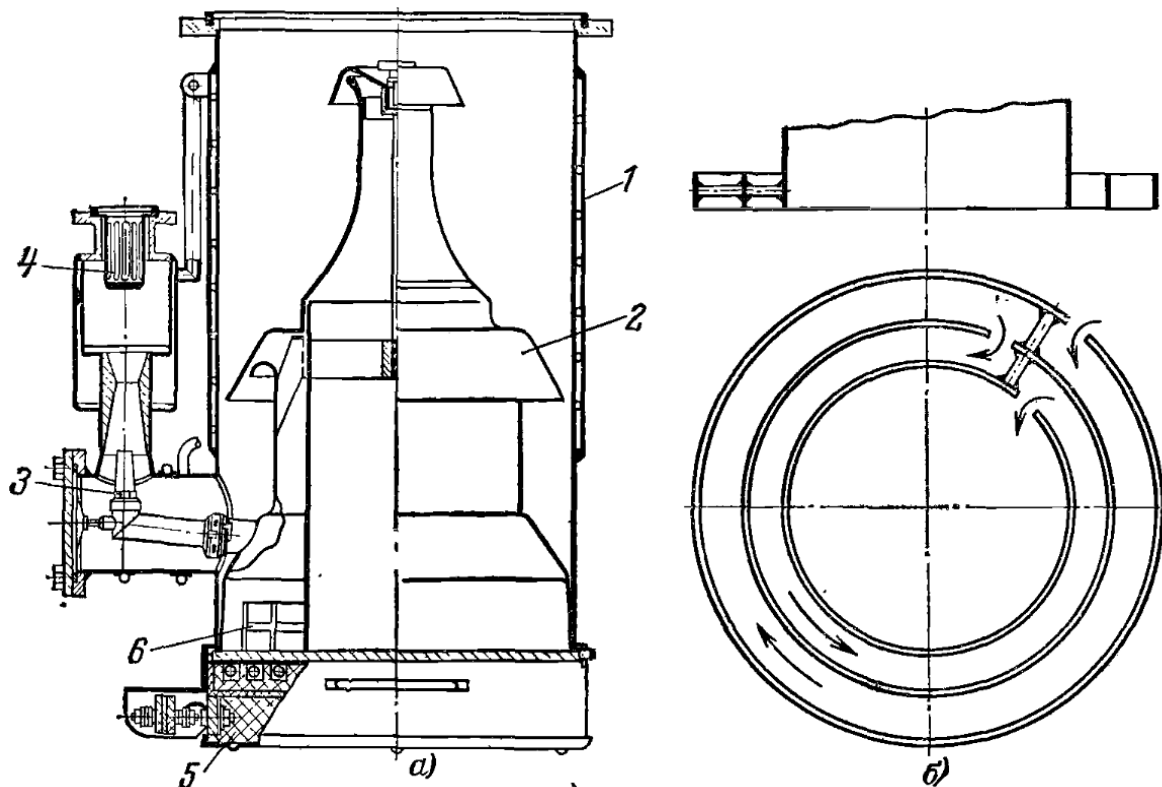


Рис. 112. Паромасляный насос Н-5Т (а) и устройство и действие лабиринтных колец для фракционирования масла (б). 1 – корпус; 2 – паропровод; 3 – эжекторная ступень; 4 – ловушка для паров масла; 5 – электронагреватель; 6 – лабиринтные кольца [8, с. 137]

Гораздо более лучшее фракционирование можно получить в металлических насосах с лабиринтными кольцами (рис. 112). Эти кольца представляют собой ленту высотой немного выше уровня жидкого масла, свёрнутые, как показано на рис. 112б (вид сверху). Пары масла конденсируются на вертикальных стенках корпуса и стекают во внешнее кольцо лабиринта. Чтобы попасть во внутреннее кольцо и центральную часть, масло должно пройти сравнительно большой путь, всё время при этом испаряясь. Таким образом осуществляется фракционирование. Паропроводы соответствующих

ступеней располагаются над рёбрами ленты лабиринта. Устройство аналогичного фракционирующего насоса показано на рис. 113.

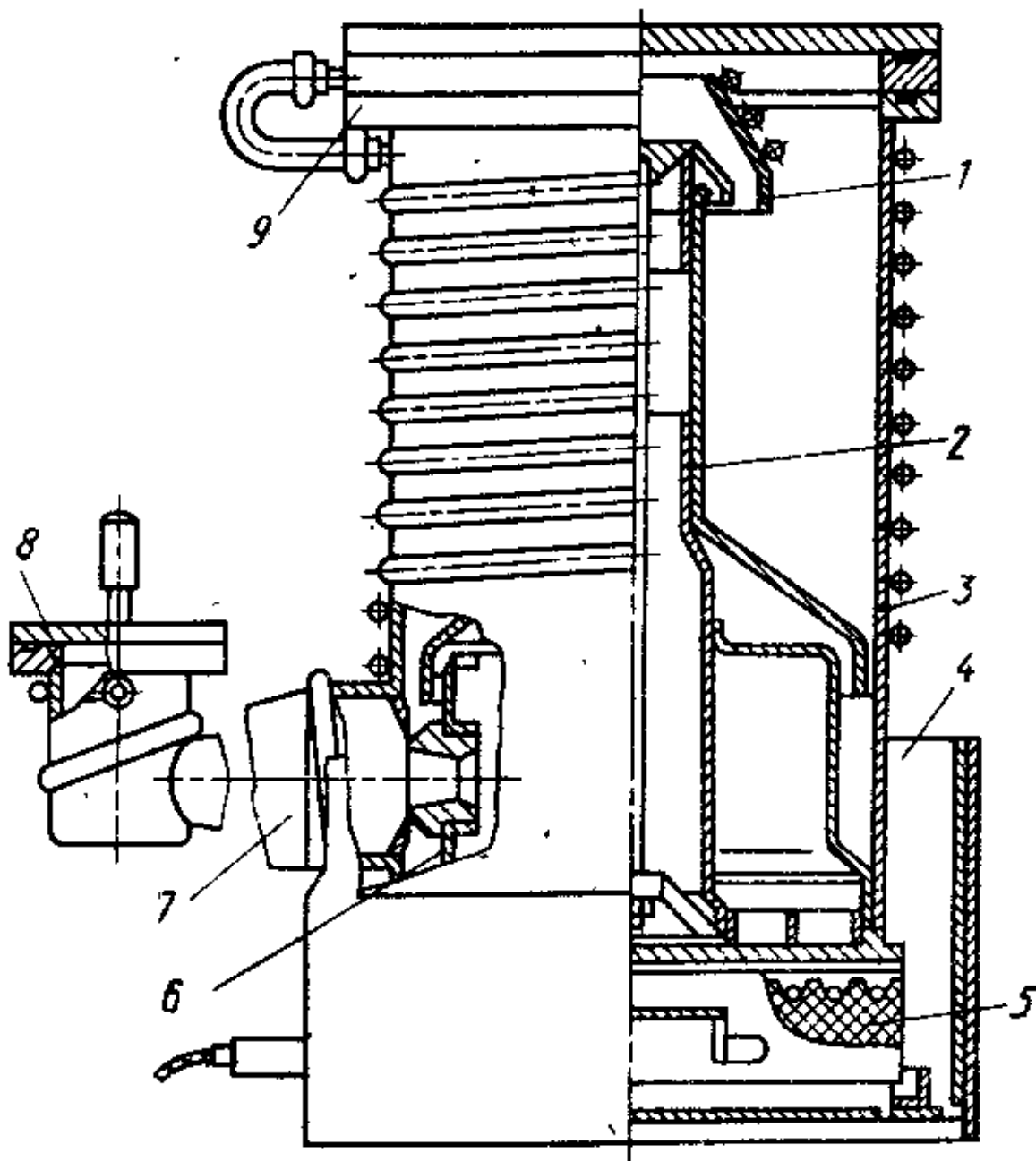


Рис. 113. Схема паромасляного фракционирующего диффузионного насоса. 1 – маслоотражатель; 2 – паропровод; 3 – корпус; 4 – защитный кожух; 5 – электронагреватель; 6 – эжекторное сопло; 7 – конфузور (камера смешения) эжектора; 8 – выпускной фланец; 9 – впускной фланец [9, с. 317]

Лабиринтные кольца в предыдущем описании, как уже указывалось, представляют собой свёрнутую металлическую ленту,

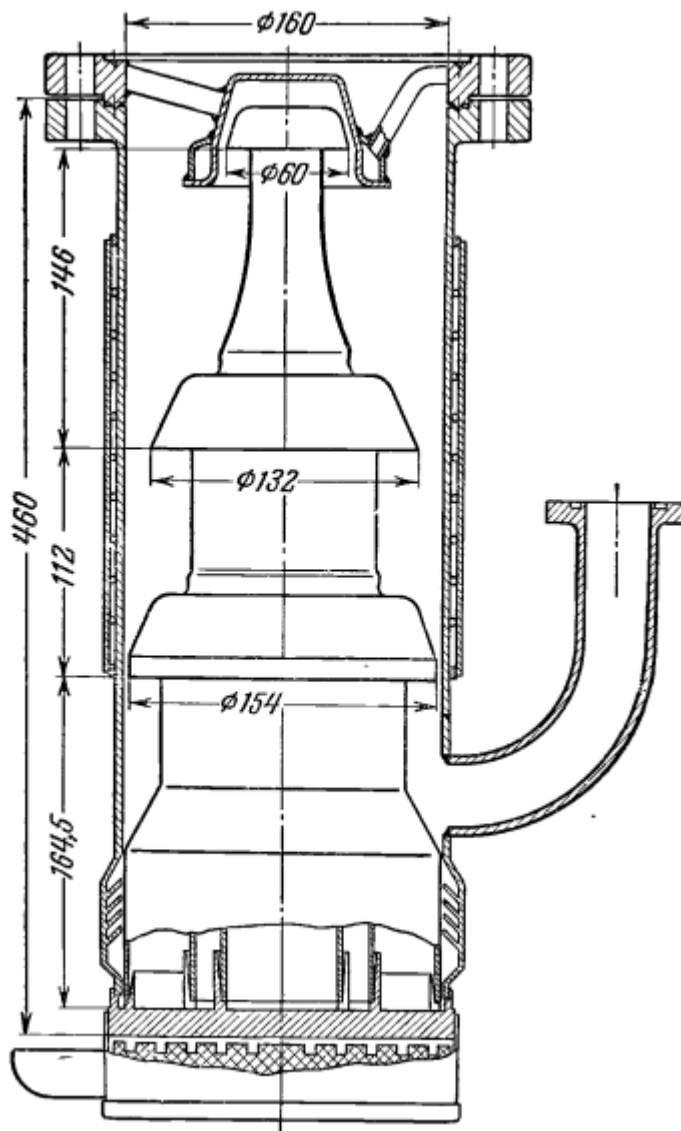


Рис. 114. Устройство сверхвысоковакуумного паромаслянного насоса Н-5СМ с улучшенным фракционированием и обезгаживанием масла [8, с. 139]

которая приваривается к днищу насоса в нескольких точках. При этом остаются зазоры, через которые масло перемешивается, что нежелательно. Однако это наиболее простое технологическое решение. В улучшенной конструкции фракционирования (рис. 114) лабиринтные кольца вырезаются непосредственно в днище корпуса (токарными операциями) и паропроводы ступеней плотно вставляются

в эти кольца, так как их стенки выполнены под небольшим наклоном (то есть – конусообразны). Нижняя часть насоса не охлаждается и температура в горячей зоне составляет 140°C , это способствует лучшему обезгаживанию масла. Помимо этого, лучшее обезгаживание достигается тем, что конденсат в нижней части насоса стекает по специальной винтовой канавке, вырезанной в корпусе ниже выходного патрубка. С помощью насоса Н-5СМ на вакуумном масле ВМ-5 можно получить вакуум $1,33 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ (10^{-8} Торр) даже без вакуумной ловушки. Таким образом, он является сверхвысоковакуумным агрегатом.

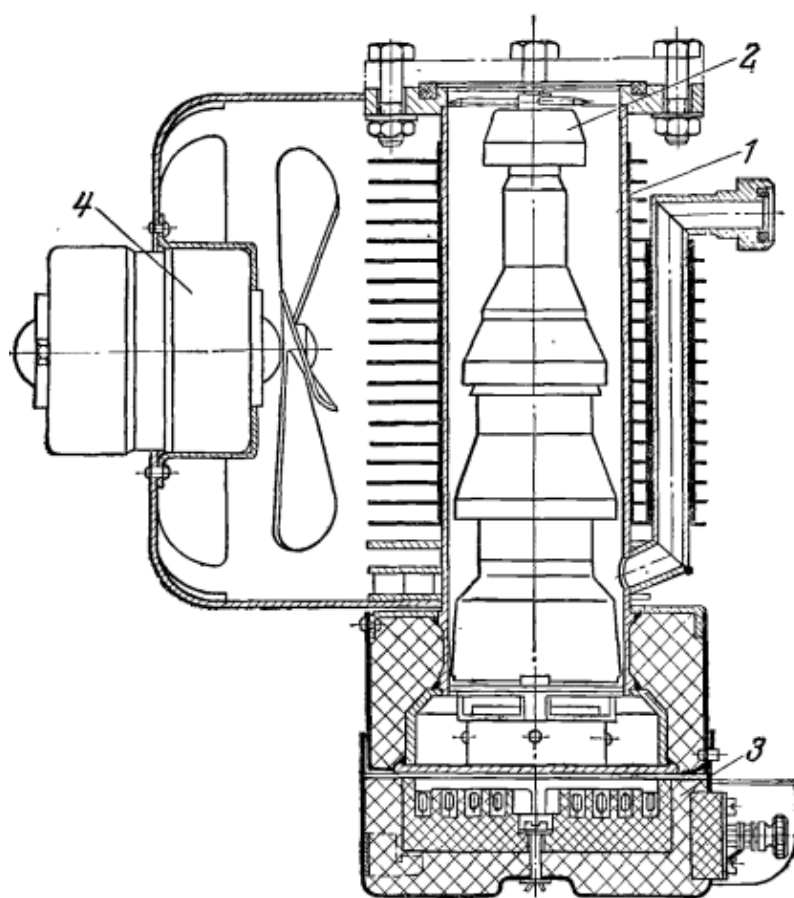


Рис. 115. Паромасляный насос НВД-40 с воздушным охлаждением. 1 – ребристый корпус; 2 – паропровод; 3 – нагреватель; 4 – вентилятор [8, с. 140]

В некоторых случаях эксплуатации вакуумных установок водяное охлаждение, которое присутствовало во всех, рассмотренных

ранее, конструкциях металлических насосов, затруднительно. Поэтому существуют насосы с воздушным охлаждением. С их помощью нельзя получить предельных значений вакуума, присущих пароструйной откачке, но для решения ряда конкретных задач они вполне пригодны. Конструкция такого насоса показана на рис. 115.

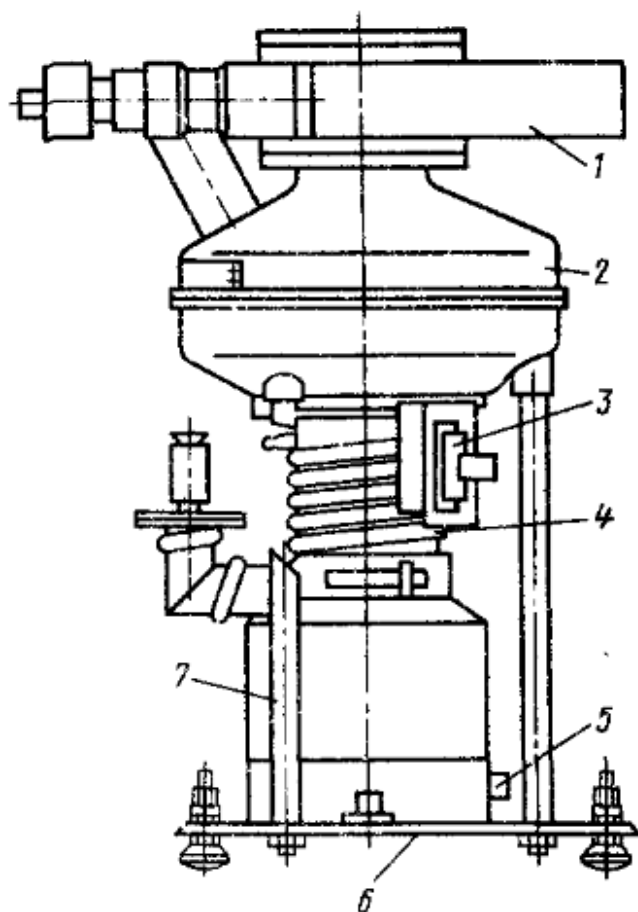


Рис. 116. Паромасляный высоковакуумный агрегат типа АВДМ. 1 – затвор; 2 – азотная ловушка; 3 – электрический разъём; 4 – диффузионный насос; 5 – термореле; 6 – плата; 7 – стойка [9, с. 330]

Чаще всего диффузионные паромасляные насосы выпускаются в виде уже готовых агрегатов, сочетающих в себе не только сам насос, но и металлическую высоковакуумную ловушку и высоковакуумный затвор (часто – механического действия). С помощью последнего можно отсекалть вакуумную камеру от системы откачки. Один из таких агрегатов показан на рис. 116.

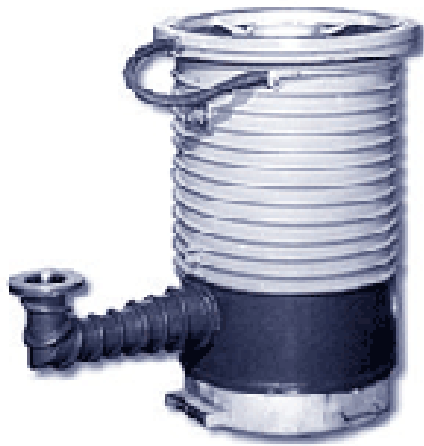


Рис. 117. Высоковакуумный диффузионный паромасляный насос НВДС-100
[<https://mnkom.ru/product/vysokovakuumnyj-diffuzionnyj-paromaslyanyj-nasos-nvds-100/>]



Рис. 118. Диффузионный высоковакуумный насос НВДМ-100
[<https://vacma.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/vysokovakuumnye-nasosy/diffuzionnye/nvdm/nvdm-100/>]

На рис. 117 и 118 приведены примеры современных диффузионных паромасляных насосов.

v32 § 5. Вакуумные ловушки

Для защиты откачиваемых вакуумных камер от проникновения в них паров рабочих жидкостей, таких, как вакуумные масла, ртуть, в вакуумных системах используются **вакуумные ловушки**. Кроме этого, они могут служить для защиты от паров других вакуумных материалов: смазок, вакуумной резины и других источников загрязнения. С одной стороны, они должны хорошо защищать системы от загрязняющих паров, с другой стороны – не препятствовать быстроте откачки, и это два противоположных требования.

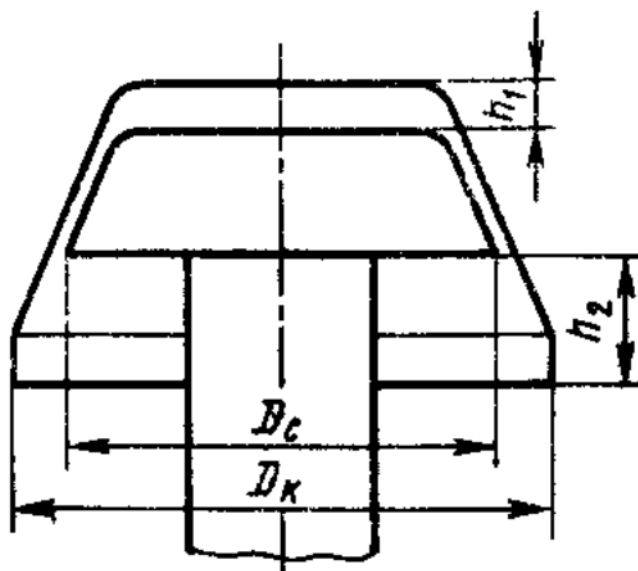


Рис. 119. Колпачковый маслоотражатель [9, с. 332]

Механические ловушки. Простейшими ловушками являются колпачковые отражатели (рис. 119), которые располагаются над верхним соплом пароструйного насоса и ограничивает струю по кольцу. При этом колокол колпачка опущен ниже колпачкового отражателя первой ступени. Колпачки часто бывают водоохлаждаемыми (рис. 120). Они уменьшают обратный поток газов в 20 – 30 раз.

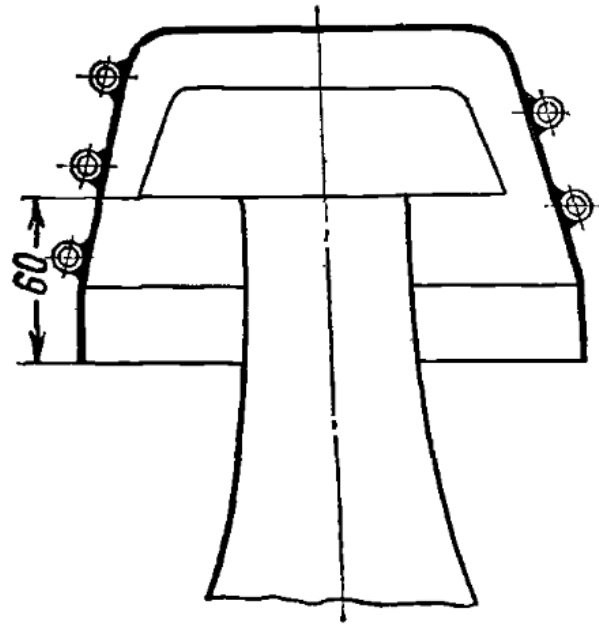


Рис. 120. Водоохлаждаемый колпачок, помещённый над верхним соплом пароструйного насоса [8, с. 170]

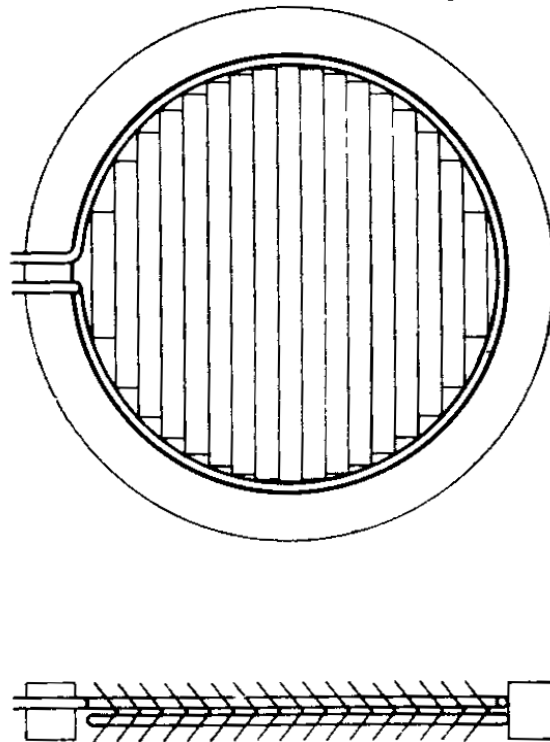


Рис. 121. Угловый (шевронный) отражатель паров, охлаждаемый водой [10, с. 97]

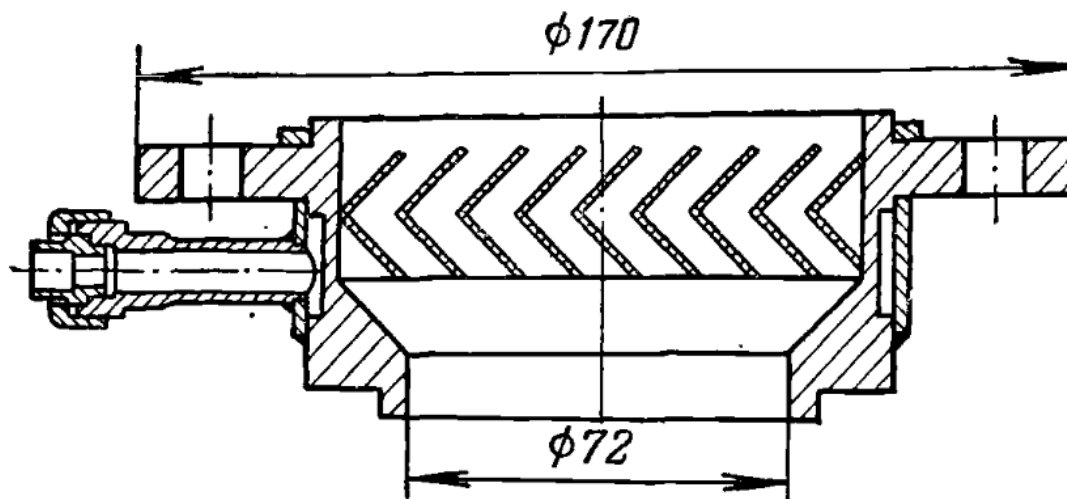


Рис. 122. Водоохлаждаемая механическая ловушка шевронного типа [8, с. 170]

Одновременно с колпачками могут устанавливаться в верхней части насосов механические ловушки шевронного типа, конструкция которых показана на рис. 121. Уголки-шевроны полностью перекрывают просвет в верхней части насоса так, что молекула газа в условиях больших длин свободного пробега не могут избежать столкновения с материалом ловушки. Более подробно такая ловушка представлена на рис. 122.

Ловушки с хладагентом являются значительно более мощными. Конструктивно они выполнены таким образом, что вакуумпровод, так или иначе охлаждаемый, не допускает свободного пролёта молекулы без столкновения с элементами конструкции. В качестве хладагента лучше всего использовать жидкий азот с температурой -196°C . Для температуры около -70°C можно использовать сухой лёд (твёрдую углекислоту) в ацетоне, спирте, эфире или трихлорэтилене.

На рис. 123 показаны стеклянные азотные ловушки, применяемые в стеклянных высоковакуумных установках. На рис. 123а – погружаемая в сосуд Дьюара с жидким азотом, на остальных рисунках – заполняемые ловушки. Последние опорожняются по мере испарения азота. Ловушки (рис. 123б и 123в) несколько нерациональны, так как их внешняя стенка не контактирует с хладагентом. Этому недостатка лишена ловушка рис. 123г.

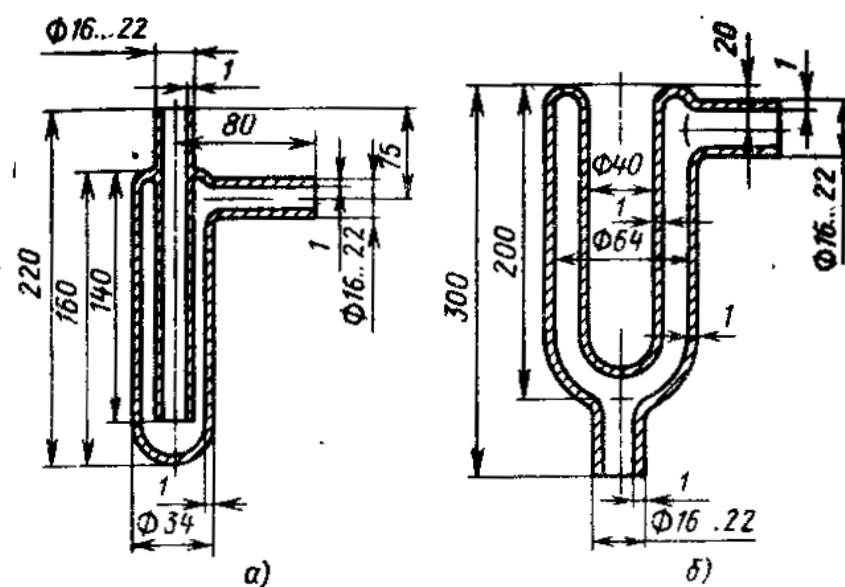


Рис. 123а-б. Стекланные низкотемпературные ловушки: а) ловушка, погружаемая во внешний сосуд Дьюара; б) конструкция, представляющая собой сосуд Дьюара [9, с. 333]

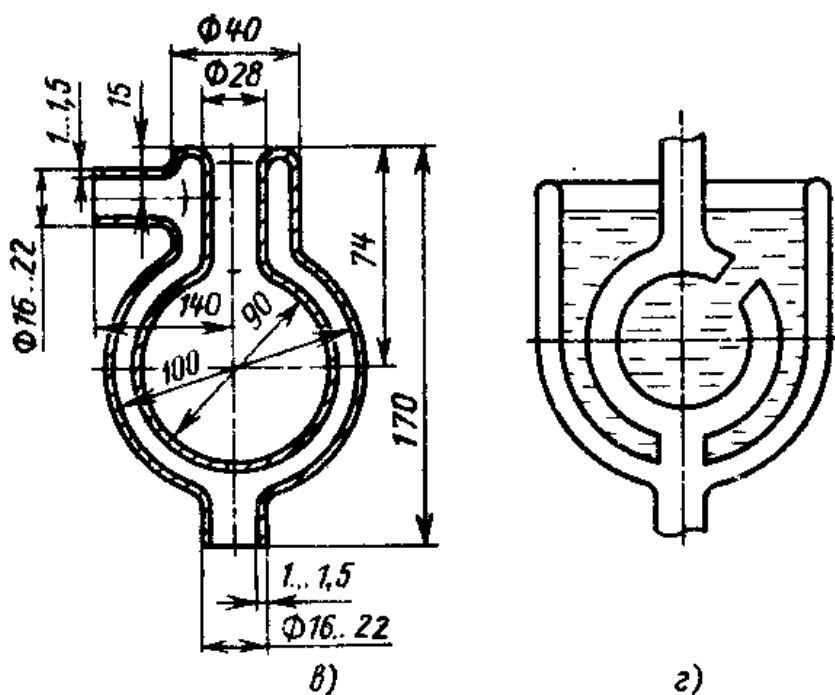


Рис. 123в-г. Стекланные низкотемпературные ловушки: в) и г) конструкции, представляющая собой сосуд Дьюара [9, с. 333]

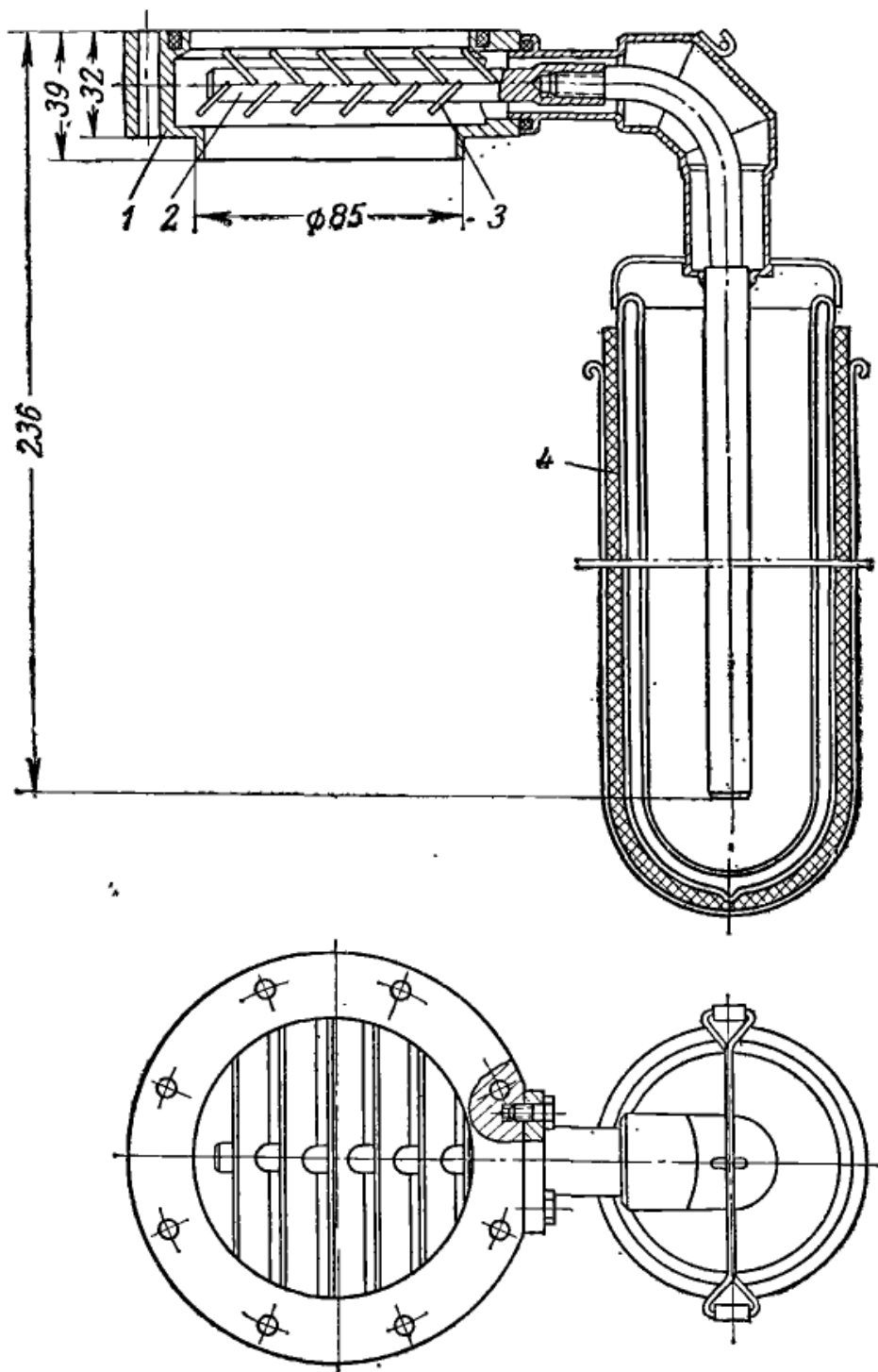


Рис. 124. Жалюзийная азотная ловушка. 1 – корпус; 2 – медный хладопровод; 3 – медные защитные элементы; 4 – сосуд Дьюара [8, с. 173]

Жалюзийная азотная ловушка, снабжённая хладопроводом из медного стержня, показана на рис. 124. Последний под изгибом

выходит за пределы вакуумной системы и может быть погружён в сосуд Дьюара.

Но наиболее употребимы в металлических вакуумных системах заливные азотные ловушки – рис. 125 (см. также рис. 116).

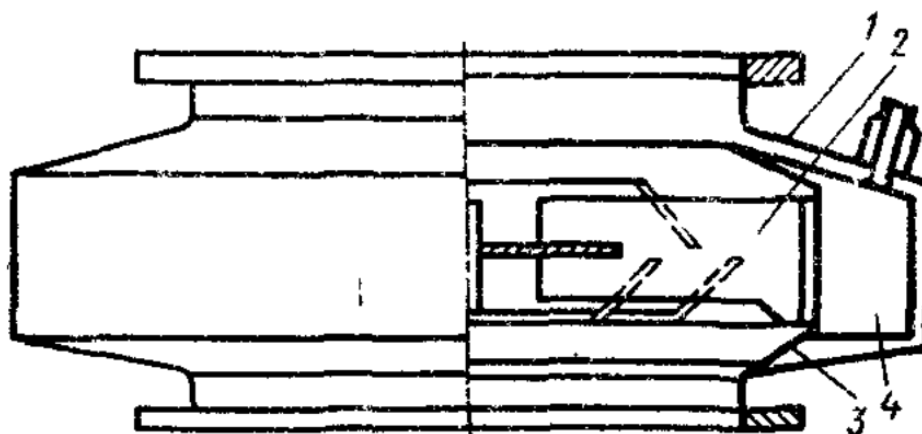


Рис. 125. Металлическая заливная азотная ловушка. 1 – корпус; 2 – вымораживающее устройство; 3 – экран; 4 – резервуар [9, с. 335]

Термоэлектрические ловушки – рис. 126, – работают на принципе термоэлектрического охлаждения полупроводников при прохождении через них электрического тока (эффект Пельтье).

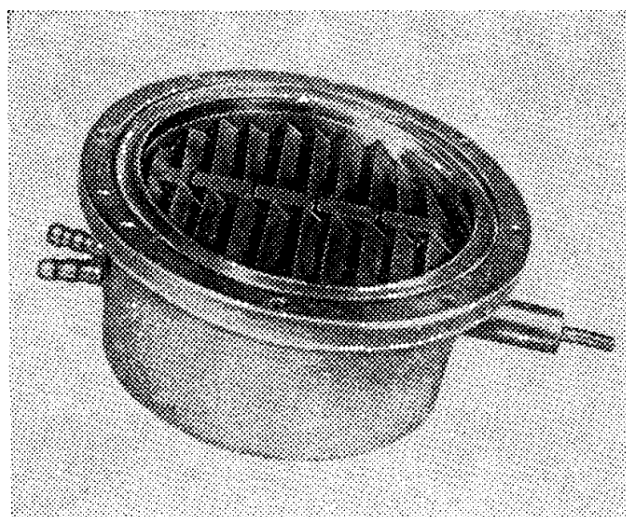


Рис. 126. Высоковакуумная ловушка с термоэлектрическим охлаждением [8, с. 174]

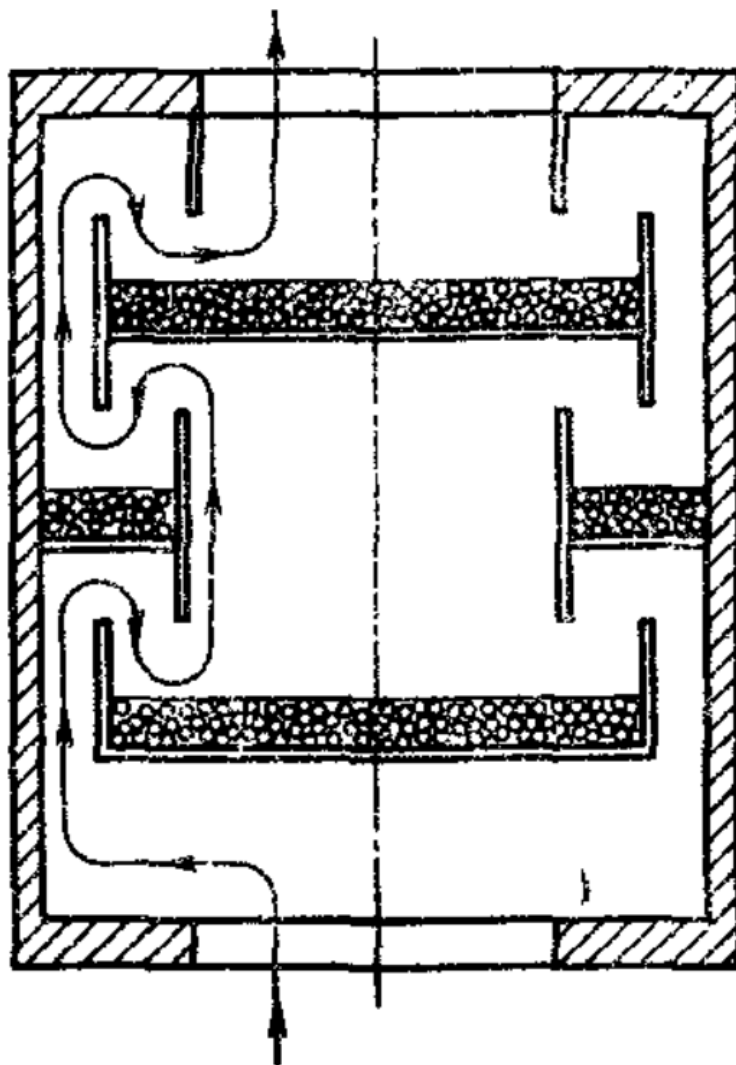


Рис. 127. Сорбционная ловушка [9, с. 336]

Адсорбционные ловушки (рис. 127) также широко распространены в вакуумной технике. Конструкция их также предусматривает полное перекрытие просвета вакуумпровода, а пролетающие молекулы сорбируются специальными адсорбентами – цеолитами, активированным оксидом алюминия, активированным углем и т. д. Недостатком таких ловушек является необходимость периодической регенерации с прокаливанием.

Существуют также **электрические ловушки**, но они используются редко.

В окнах Медиа 17 и Медиа 18 представлена демонстрация работы диффузионных паромасляных насосов.

Медиа 17:

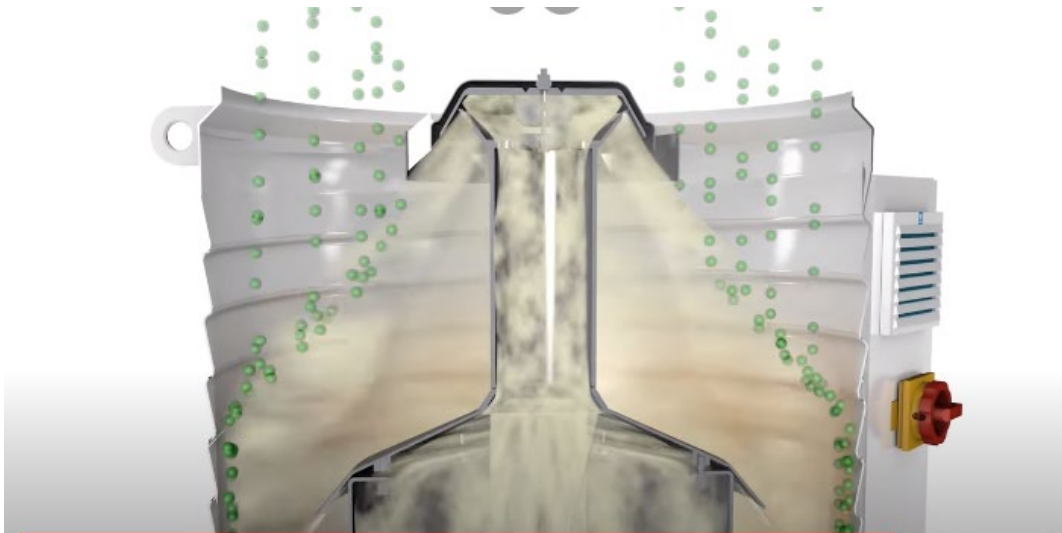
Принцип работы диффузионных паромасляных насосов

<https://www.youtube.com/watch?v=KNsM1pbbvOo>

Медиа 18:

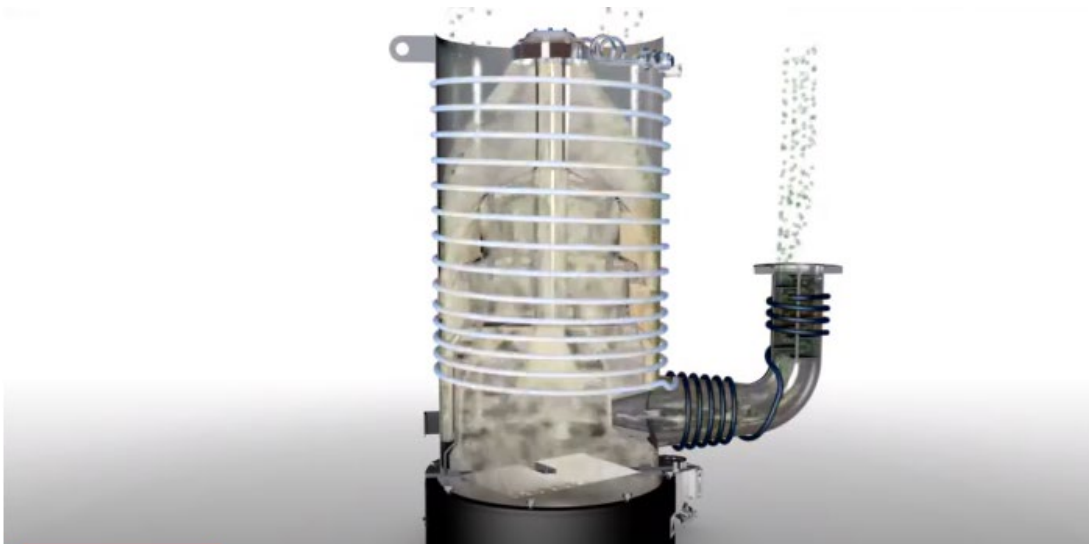
Диффузионные паромасляные насосы

<https://www.youtube.com/watch?v=ubno1kNtxIQ>



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 17. Принцип работы диффузионных паромасляных насосов



Откройте в папке Animation файл:

Медиа 18. Диффузионные паромасляные насосы

в33 Глава 5. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

в34 § 1. Геттерная откачка. Испарители

Хорошо известно, что многие металлы и другие материалы, способны поглощать значительные количества газов. Основной механизм такого захвата – хемосорбция. При этом часто происходит образование твёрдых растворов. Это относится к химически активным газам; инертные газы могут поглощаться только в ионизированном состоянии. Материалы, способные поглощать значительные количества газов, называются **геттерами**.

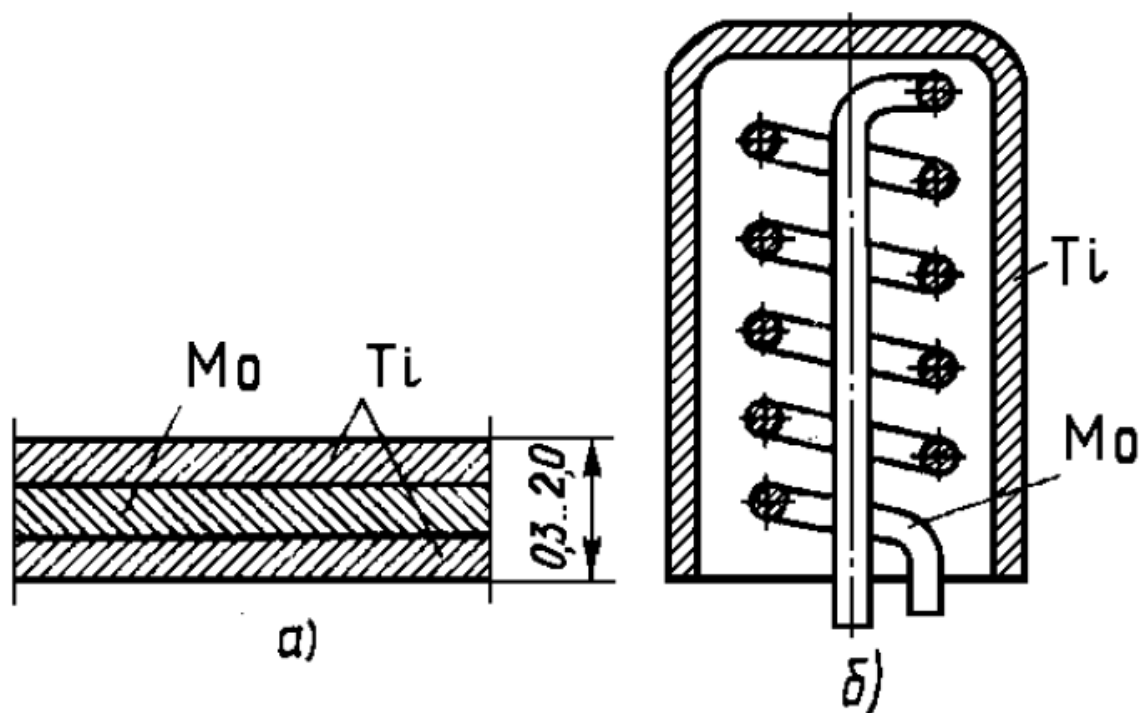


Рис. 128. Конструкции электротермических испарителей: а) – прямонакальный, б - подогреваемый [7, с. 203]

Чтобы реализовать технологически значимые средства откачки на основе геттеров, их в большинстве случаев необходимо распылять в условиях предварительно созданного вакуума. **Испарители**

металлов входят как составные части в конструкции многих геттерных насосов различных типов. При этом геттер должен иметь высокое давление насыщенного пара при температуре испарения, и низкое – при температуре конденсации.

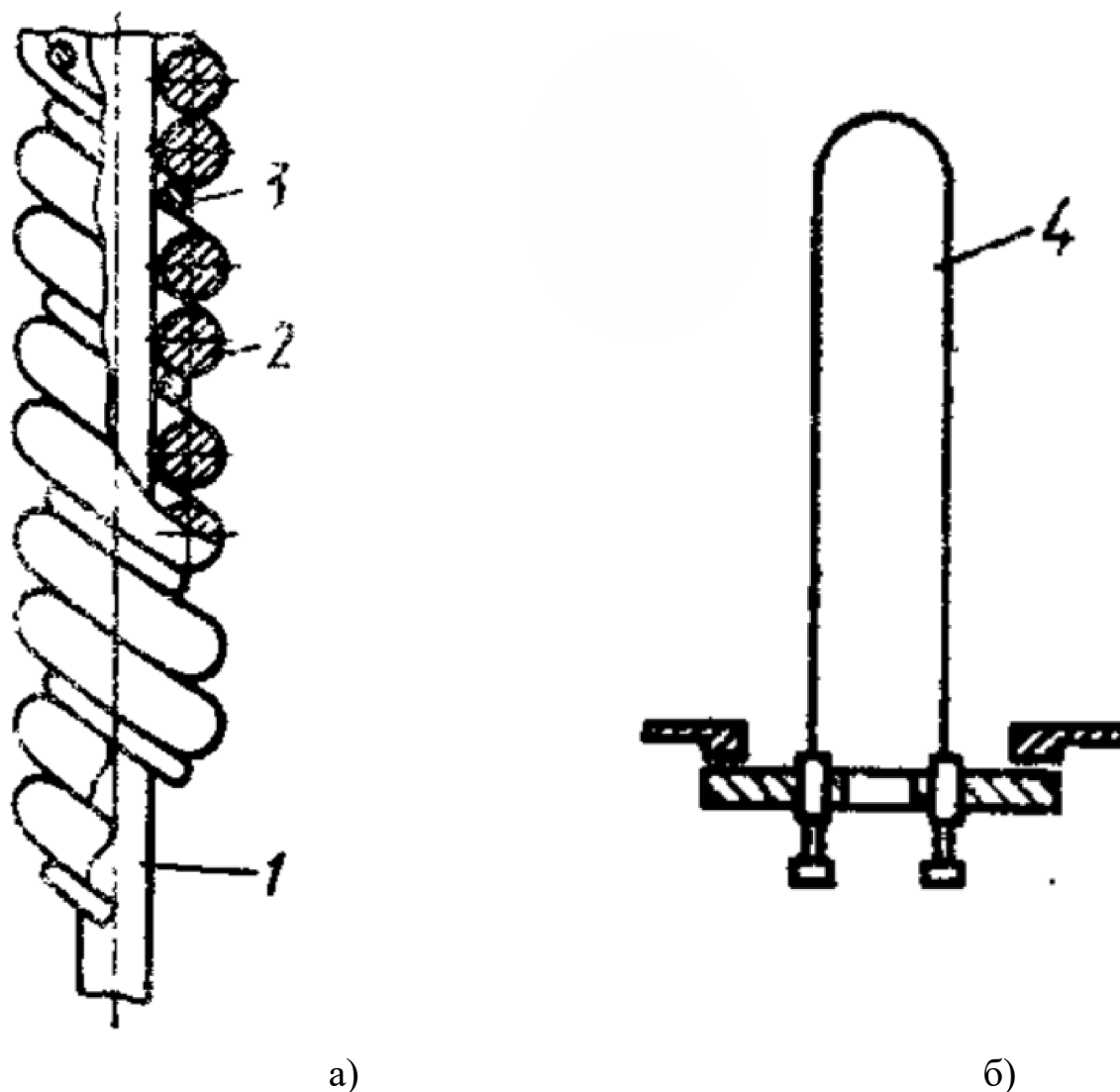


Рис. 129. Твердофазные испарители. а) – прямонакальный; б) – биметаллический. 1 – держатель; 2 – геттер; 3 – нагреватель; 4 – биметаллический испаритель [9, с. 245]

Наиболее употребимым геттером, отвечающим практически всем требованиям, является **титан**. Иногда, в лабораторных установках, используется Ва; высокой хемосорбционной способностью обладают также Са, Мо, Nb, W, Fe, Zr, Cr, но они применяются ограниченно.

По своей сорбционной активности газы располагаются в ряд: $O_2 > C_2H_2 > C_2H_4 > CO > H_2 > N_2$. Геттерные насосы характеризуют по наименее активному N_2 . Наилучший вакуум, который можно получить геттерной откачкой, составляет $10^{-6} \div 10^{-12} \text{ Па}$ ($10^{-8} \div 10^{-14} \text{ Торр}$).

В испарительных геттерных насосах титан может нагреваться до $1373 - 1673 \text{ К}$.

Рассмотрим наиболее распространённые конструкции испарителей.

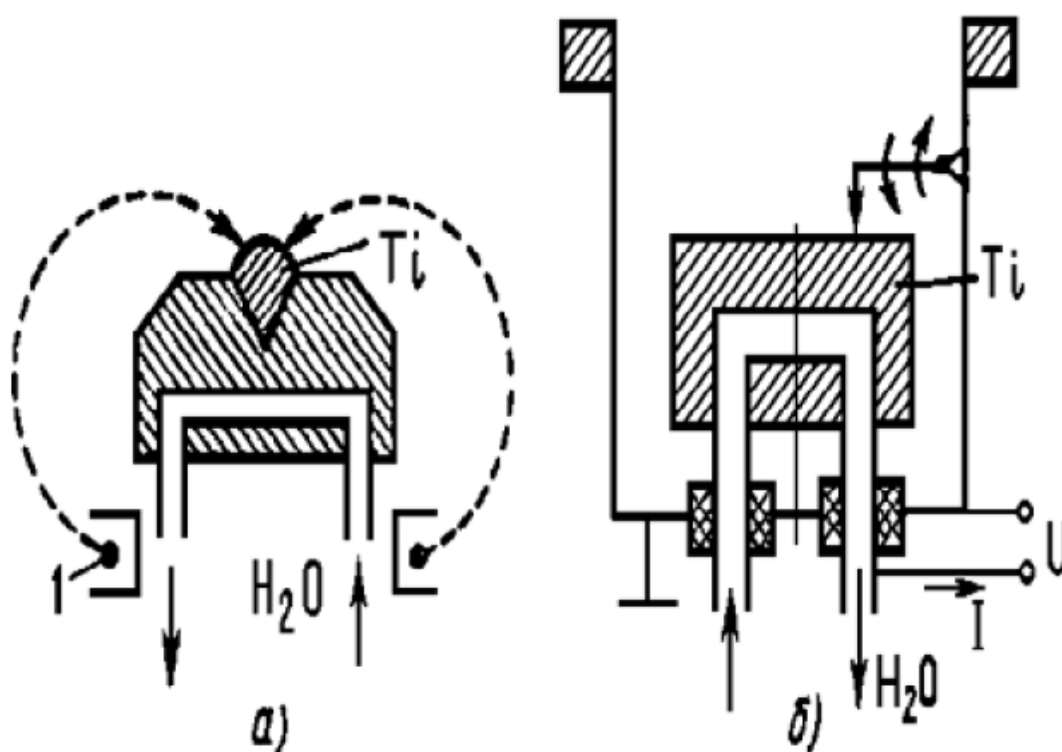


Рис. 130. Конструкции электронно-ионных испарителей: а) – электронно-лучевой, б) - дуговой [7, с. 204]

Конструкция прямонакальных испарителей (рис. 128а и 129а) ясна из рисунков: геттер находится в контакте с нагревателем. В подогреваемом испарителе (рис. 128б) такого контакта нет, зато геттер сменяемый. Нагревание при этом осуществляется за счёт излучения. В

электронно-лучевом испарителе (рис. 130а) вольфрамовый катод электронной пушки 1 находится в поперечном магнитном поле вне зоны испарения геттера. Напряжение между пушкой и мишенью – несколько тысяч вольт. Основание мишени – водоохлаждаемое.

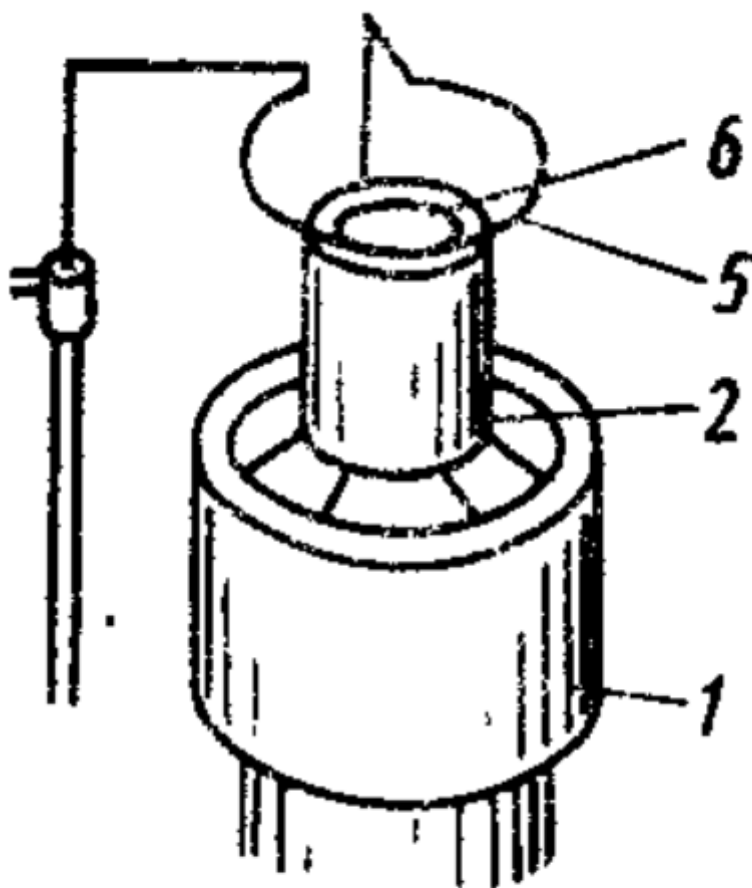


Рис. 131. Жидкофазный испаритель. 1 – держатель; 2 – геттер; 5 – катод; 6 – расплав [9, с. 245]

Дуговой испаритель представлен на рис. 130б. Между охлаждаемым водой титановым катодом и подводящим электродом возникает дуга постоянного тока плотностью 10^6 A/cm^2 . При этом катодное пятно хаотически перемещается по поверхности катода, что позволяет ему испаряться равномерно. Дуга горит в парах испаряемого геттера и сохраняется в условиях сверхвысокого вакуума. Ток дуги достигает 100 – 180 А.

Жидкофазный испаритель показан на рис. 131. При той же скорости испарения геттера они нагреваются значительно меньше и не требуют принудительного охлаждения.

§ 2. Испарительные геттерные насосы

Испарительные геттерные насосы служат для **хемосорбционной откачки**. Геттер осаждается на какую-то подложку и хемосорбирует газы. Новые порции геттера продолжают осаждаться и откачивают новые количества газа. При этом прежний хемосорбированный газ как бы «замуровывается». Геттерные насосы этого типа очень плохо откачивают инертные газы и углеводороды. Как правило, их откачивают вспомогательными насосами, например, диффузионными паромасляными. Остаточное давление испарительных геттерных насосов составляет $10^{-6} \div 10^{-8}$ Па ($10^{-8} \div 10^{-10}$ Торр).

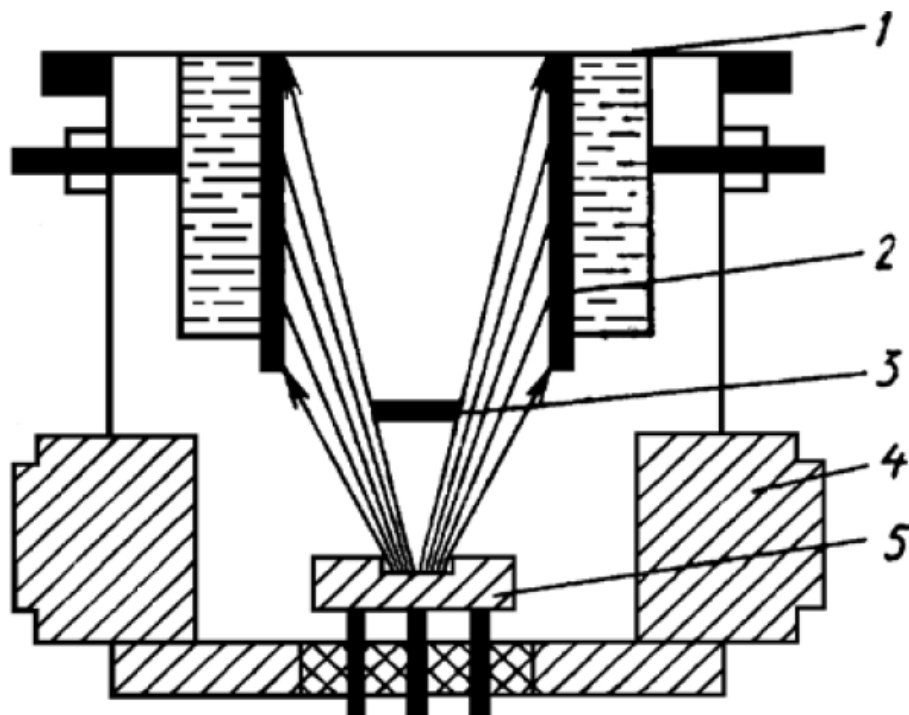


Рис. 132. Испарительный насос. 1 – фланец; 2 – экраны осаждения; 3 – экран; 4 – корпус; 5 – испаритель [7, с. 204]

Насосы требуют периодического удаления напылённых плёнок геттера, когда они становятся слишком толстыми.

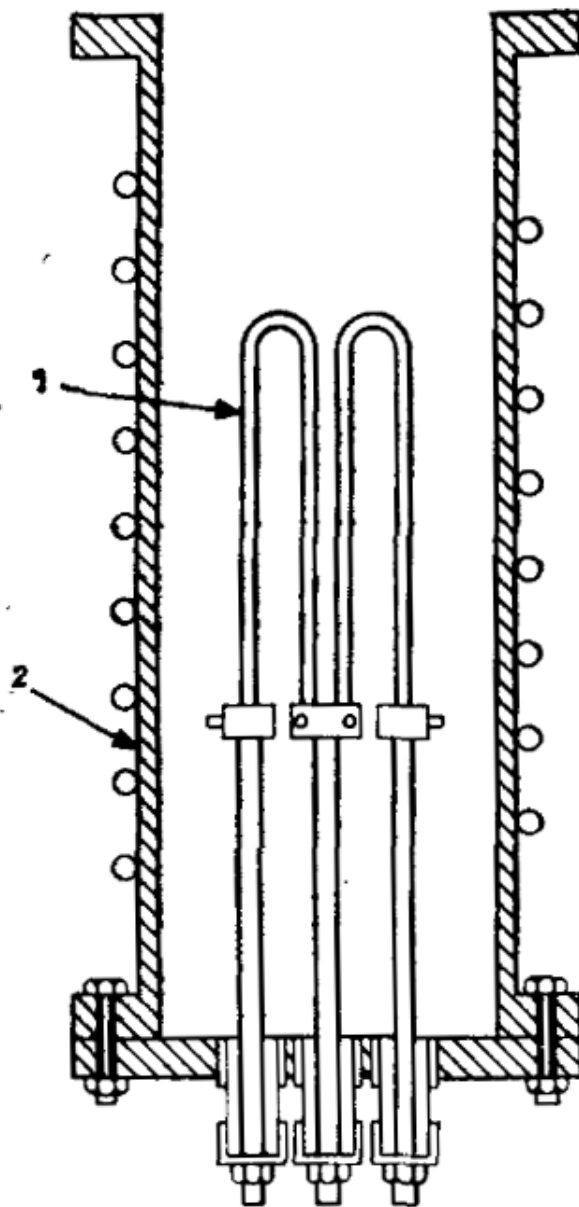


Рис. 133. Титановый сублимационный насос. 1 – титановый испаритель; 2 – корпус, охлаждаемый водой [10, с. 132]

Общая схема испарительного геттерного насоса представлена на рис. 132. Атомы геттера испаряются в испарителе 5 и вылетают веером, осаждаясь на экранах 2, где и происходит хемосорбция газов. Экран 3

ограничивает «веер» распыления и препятствует попаданию молекул геттера в откачиваемый объём. Экраны 2 должны охлаждаться водой.

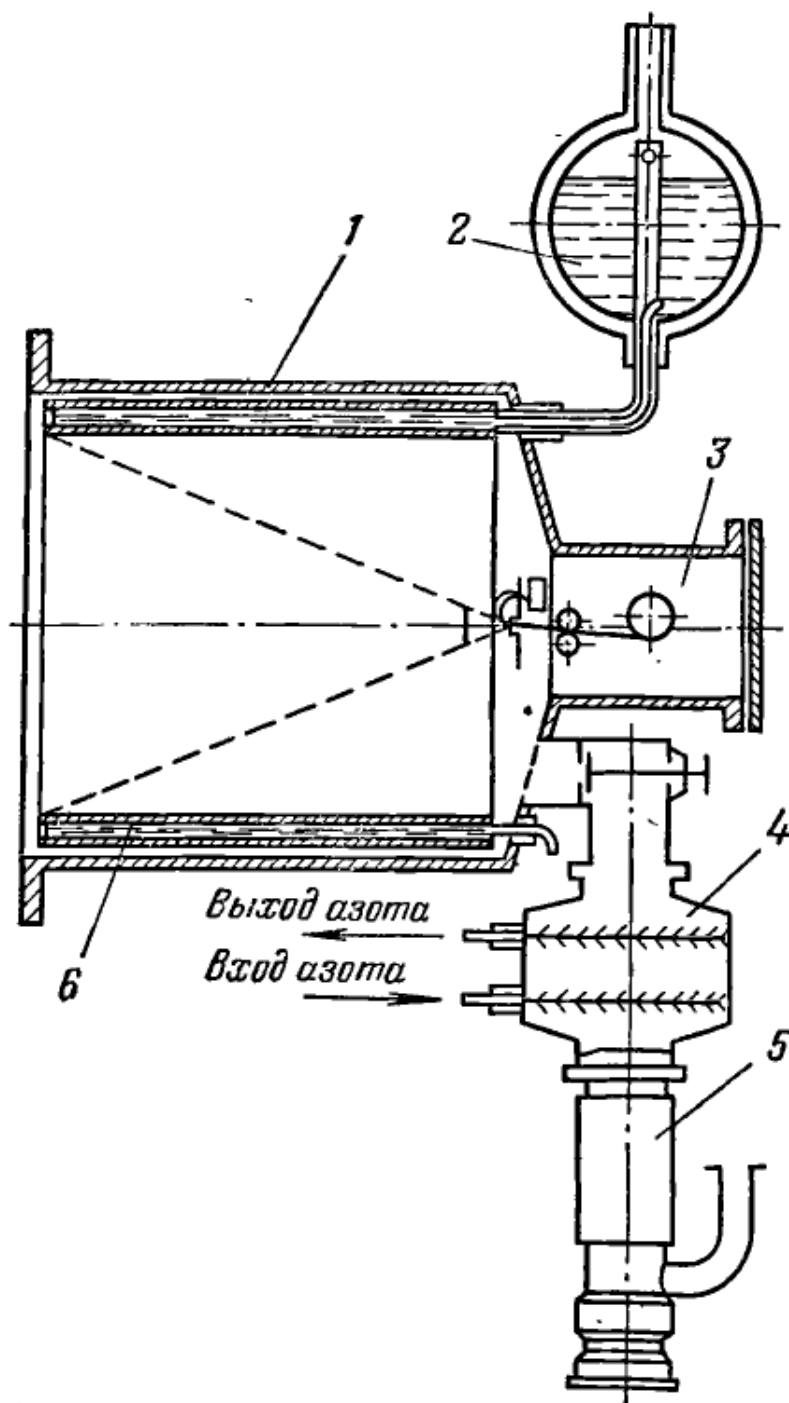


Рис. 134. Схема высоковакуумного агрегата АВТО-20М. 1 – корпус; 2 – сосуд Дьюара с жидким азотом; 3 – испаритель титана; 4 – азотная ловушка; 5 – паромасляный насос Н-5С-М; 6 – охлаждаемый жидким азотом экран [8, с. 154]

Титановый сублимационный насос показан на рис. 133. Он представляет собой цилиндр, верхний фланец которого присоединяется к откачиваемому объёму, а на нижний фланец устанавливается заглушка, в которую вмонтированы электрические вводы. К последним крепятся сублиматоры из титана. Испаряемый при прохождении тока геттер осаждается на стенке корпуса, который охлаждается водой (возможно также охлаждение жидким азотом).

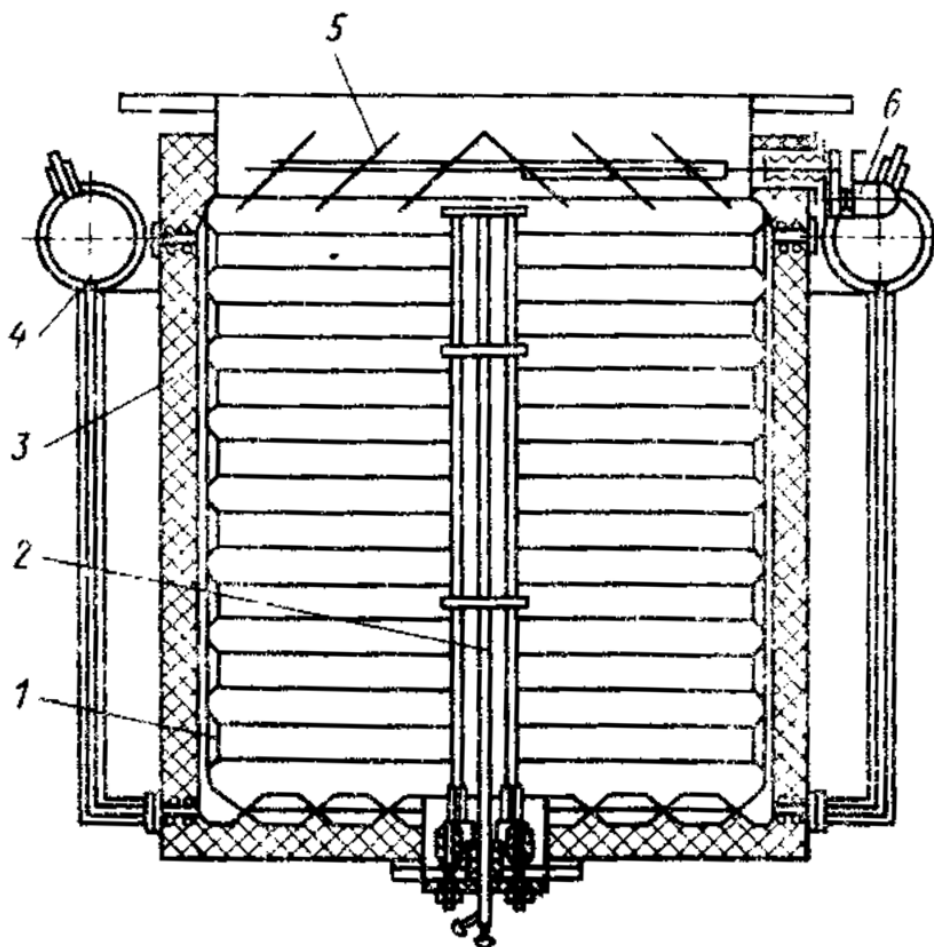


Рис. 135. Схема насоса НИБ-10. 1 – корпус; 2 – блок испарителей; 3 – теплоизолирующая оболочка; 4 – накопитель жидкого азота; 5 – поворотный экран-жалюзи; 6 – электромеханическое устройство поворота экрана-жалюзи [9, с. 350]

На рис. 134 представлен сверхвысоковакуумный титановый агрегат АВТО-20М. В нём используется электронно-лучевой

жидкофазный испаритель 3; в зону расплава которого периодически подаётся титановая проволока диаметром 1,5 мм. Напыление производится на экран 6, который может периодически извлекаться для замены. В процессе работы экран 6 охлаждается жидким азотом из сосуда 2. Для откачки инертных газов используется паромасляный насос 5. Остаточное давление агрегата – 10^{-10} Па (10^{-12} Торр).

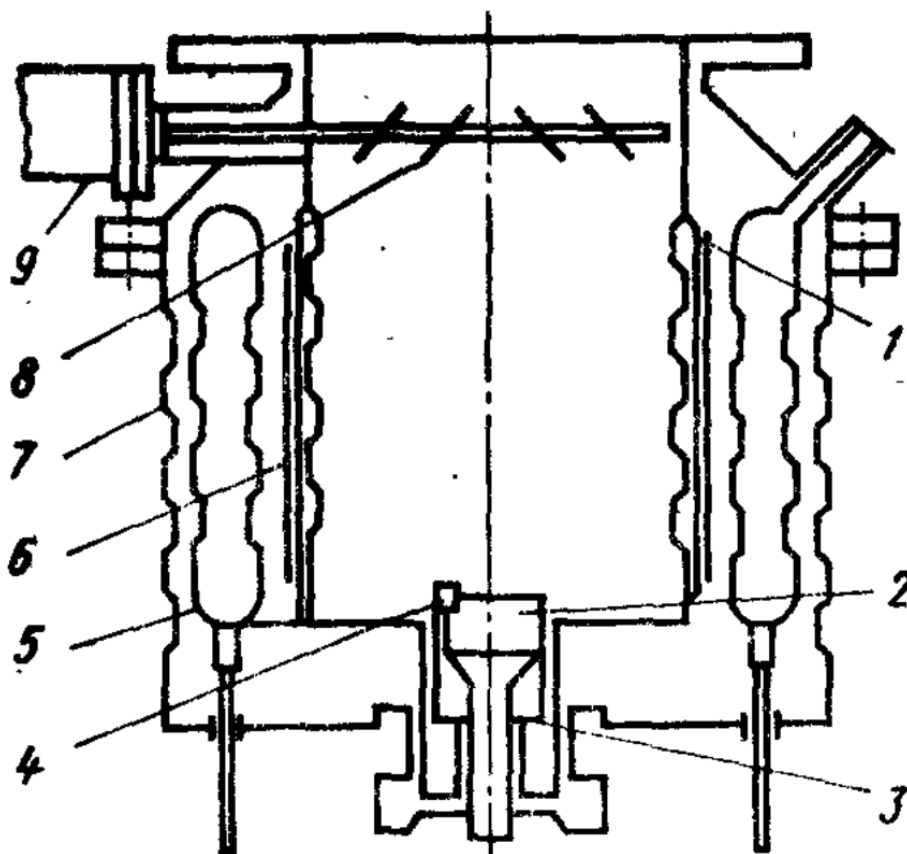


Рис. 136. Схема насосов типа НДМ. 1 – корпус; 2 – катод-испаритель; 3 – экран; 4 – поджигающее устройство; 5 – накопитель жидкого азота; 6 – резистивный нагреватель; 7 – наружный кожух; 8 – экран-жалюзи; 9 – электромеханический привод экрана [9, с. 354]

Насосы испарительные биметаллические НИБ (рис. 135) обладают высокой быстротой действия по водороду и применяются для его откачки в ускорительных и термоядерных установках. Блок испарителей 2 состоит из биметаллических (см. рис. 1296) титанолибденовых нитей. Двойной корпус может охлаждаться водой или жидким азотом. Жалюзи 5 прикрываются, когда идёт

испарение геттера. Наибольшее давление запуска насоса – 10^{-2} Па (10^{-4} Торр), остаточное давление – $5 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-9} \text{ Торр}$) при охлаждении водой и $5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-11} \text{ Торр}$) – при охлаждении жидким азотом.

Дуговые насосы НДМ (рис. 136) используются для сверхвысоковакуумной откачки ускорителей, термоядерных установок и другого специализированного оборудования. В них применяются дуговые испарители 2 с поджигающим устройством 4. Как и насос НИБ, этот насос имеет двойной охлаждаемый корпус и жалюзийную заслонку 8. Наибольшее остаточное давление – $1,3 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$ ($\sim 10^{-10} \text{ Торр}$).

§ 3. Геттерно-ионные насосы

Ионизированный газ гораздо более активен в плане сорбции и других видов взаимодействия с поглощающими подложками, чем обычные молекулы. Существуют достаточно простые способы ионизации газов, главным образом – за счёт β -излучения (бомбардировка электронами). Ионизированный газ значительно глубже проникает в материал геттера; кроме того, дополнительную скорость ионы могут приобрести за счёт действия соответствующих полей (например – электрических).

В предыдущем параграфе уже отмечалось, что испарительные геттерные насосы очень плохо откачивают инертные газы и лёгкие углеводороды; применение ионной геттерной откачки помогает решить эту проблему.

Схема действия ионной откачки показана на рис. 137. Газ, предварительно ионизированный в камере 1, ускоряется электродами 2, создающими электрическое поле соответствующей направленности напряжённостью U , и направляются к выходному патрубку, где могут поглощаться геттером или – нейтрализоваться и откачиваться форвакуумными насосами.

На рис. 138 представлен ионно-сорбционный насос с независимым распылением геттера. Электроны образуются на термокатоде 1 и летят к распылителю 4 и анодной сетке 2, между которыми приложено напряжение несколько сотен вольт. При этом

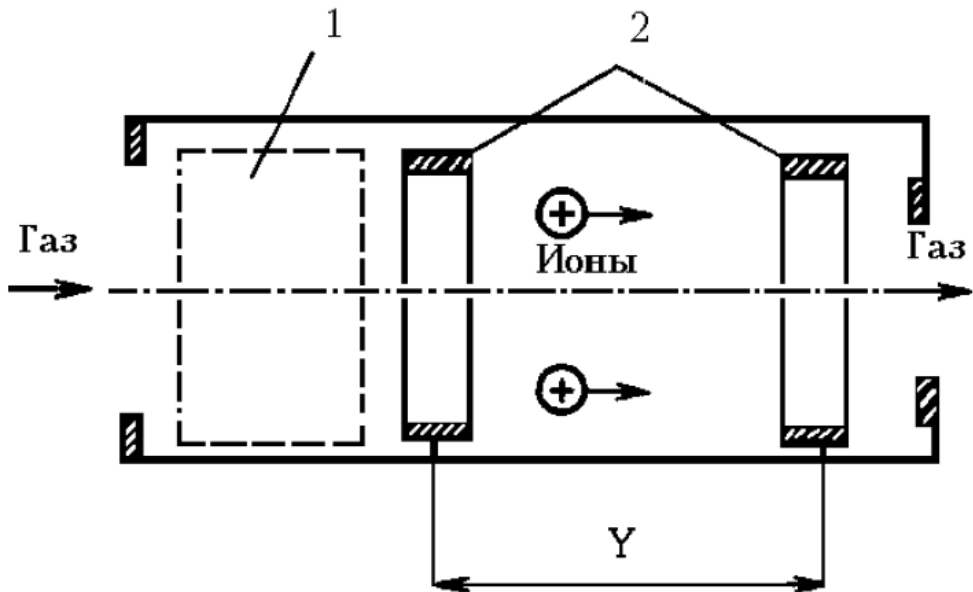


Рис. 137. Схема ионной откачки. 1 – пространство ионизации; 2 – ускоряющие электроды [7, с. 198]

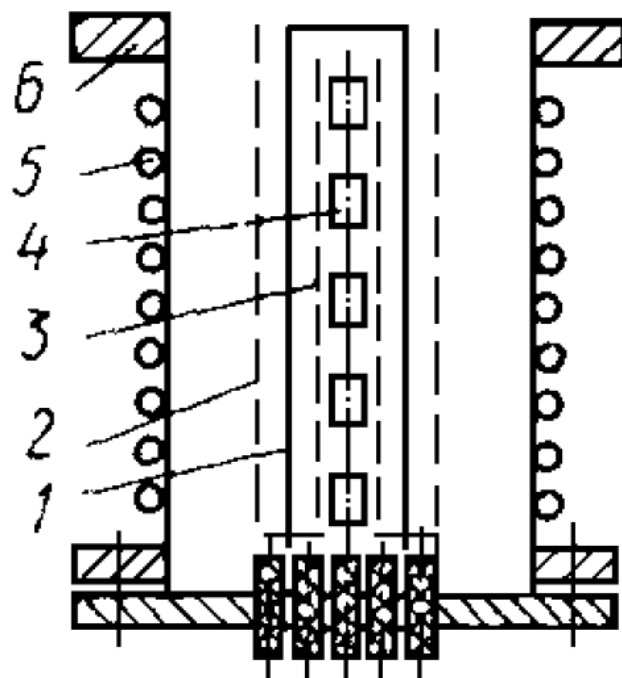


Рис. 138. Ионно-сорбционный насос с независимым распылением геттера. 1 – катод; 2 – ионизирующая анодная сетка; 3 – управляющая сетка; 4 – распылитель; 5 – холодильник; 6 – корпус [7, с. 219]

распылитель 4 разогревается и испаряет молекулы геттера. Электроны по пути к анодной сетке ионизируют газ. При выходе на рабочий режим катод может временно обратимо отравляться; для поддержания эмиссионного тока используется сетка 3.

Геттерно-ионные насосы ГИН (рис. 139) выполнены в виде двойного цилиндрического корпуса 4 и имеют прямоканальные биметаллические испарители 2. Корпус – предварительно прогреваемый и охлаждаемый в ходе работы. Ионизатор 1, испаритель 2 и анодная сетка 3 смонтированы на фланце 5, который в отдельном виде показан на рис. 140.

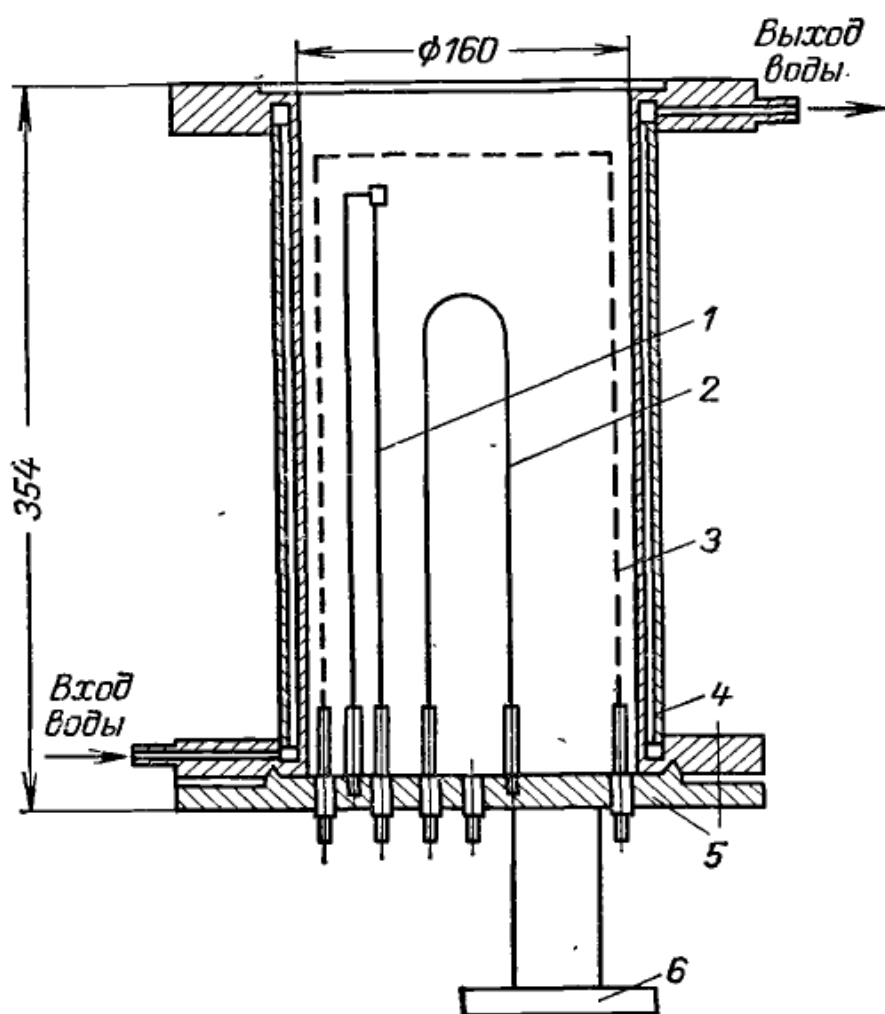


Рис. 139. Геттерно-ионный насос ГИН-05М1. 1 – вольфрамовый катод; 2 – испаритель титана; 3 – анод; 4 – корпус; 5 – фланец цоколя; 6 – патрубок для предварительной откачки [8, с. 151]

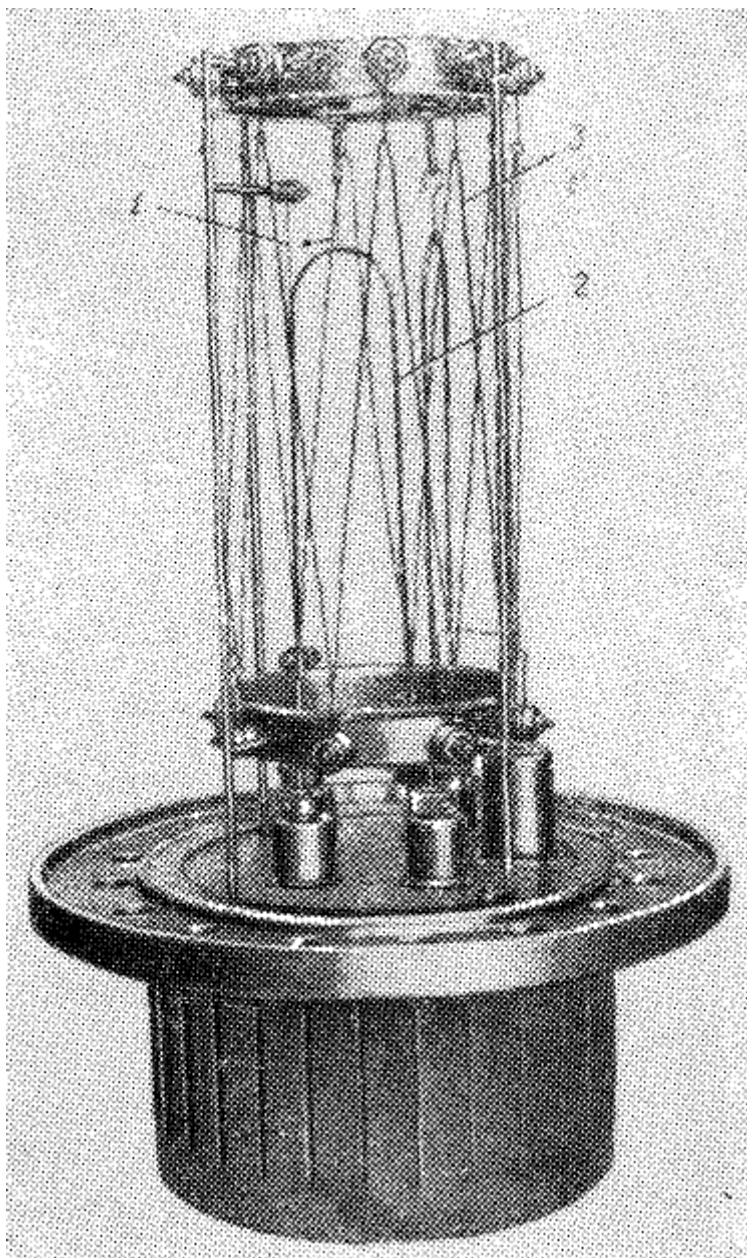


Рис. 140. Электродная схема насоса ГИН-05М1. 1 – катод; 2 – испаритель; 3 – анод [8, с. 152]

Анодная сетка 3 находится под потенциалом $1,2 \text{ кВ}$. На неё направляются электроны из ионизатора и совершают вокруг неё несколько колебаний, ионизируя газ. Геттер осаждается на охлаждаемую стенку корпуса и поглощает эти остаточные газы.

Остаточное давление насосов составляет примерно 10^{-7} Па ($\sim 10^{-9} \text{ Торр}$). Недостатком насосов является малый ресурс титановых испарителей (500 или 1500 часов, в зависимости от режима

работы), но они могут быть заменены. Также недостатком является чувствительность к разгерметизации.

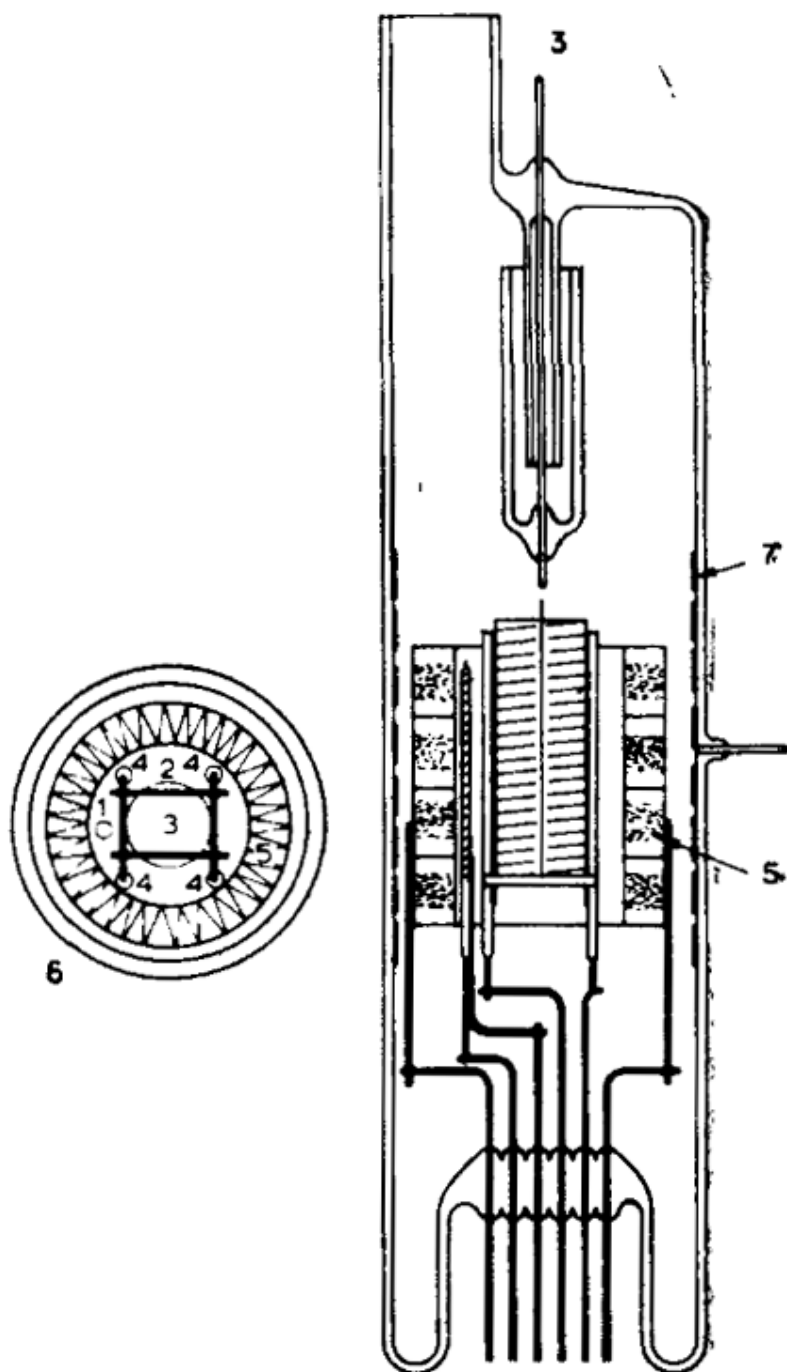


Рис. 141. Геттерный насос неиспарительного типа. 1 – катод; 2 – сетка (анод); 3 – коллектор ионов; 4 – нагреватели; 5 – геттер; 6 – стеклянный корпус; 7 – отражающее покрытие [10, с. 137]

Давно известно, что лампы ионизационных вакуумметров типа Байярда – Альперта обладают небольшим откачивающим действием, что обеспечено самой их конструкцией. То есть их можно классифицировать, как ионные насосы неиспарительного типа. Небольшое усовершенствование этих вакуумметров может превратить их в миниатюрные ионно-сорбционные насосы – рис. 141. Гильза геттера, представляющая собой ленту, с двух сторон покрытую сплавом Zr и Al, гофрируется и устанавливается вокруг анода вакуумметра. Аналогичные устройства используются и в отечественной промышленности – насосы НГ-0,1-1, НГ-1, НГ-1-2.

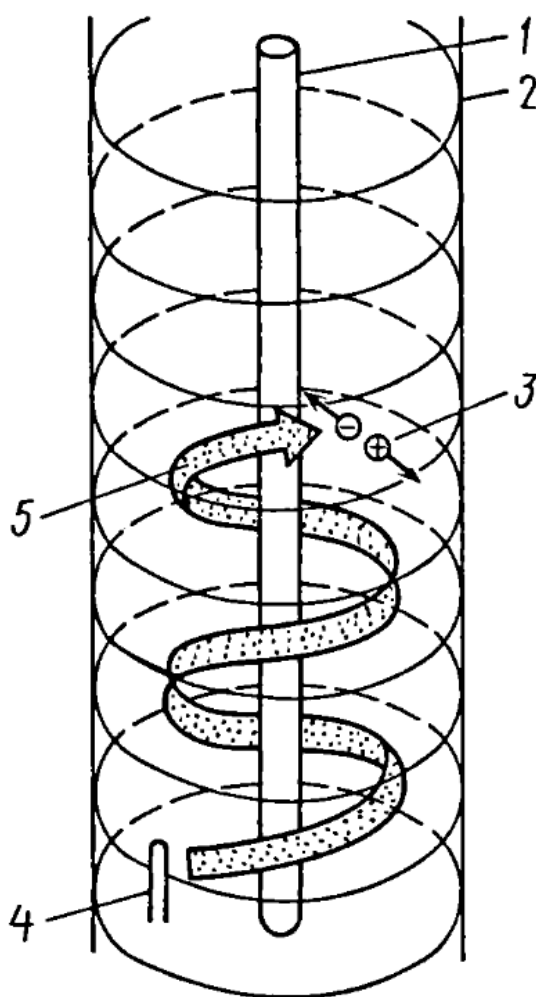


Рис. 142. Схема, поясняющая принцип действия орбитрона. 1 – стержневой анод; 2 – коллектор ионов; 3 – акт ударной ионизации газовой молекулы; 4 – катод; 5 – траектория электронного пучка [9, с. 486]

В настоящее время наиболее распространёнными среди ионно-геттерных являются насосы **орбитронные**. В них длина свободного пути ионизирующих электронов увеличена в несколько тысяч раз. При этом электроны как бы движутся в электростатическом поле между двумя concentрическими цилиндрами, причём внутренний цилиндр сведён к стержню небольшого диаметра или даже – проволоке (рис. 142). Внешний цилиндр заряжен отрицательно (катод), внутренний – положительно (анод). Разность потенциалов между ними – примерно 5 кВ . Реальные орбиты электронов (проекция на плоскость, перпендикулярную оси орбитронного насоса) представлены на рис. 143.

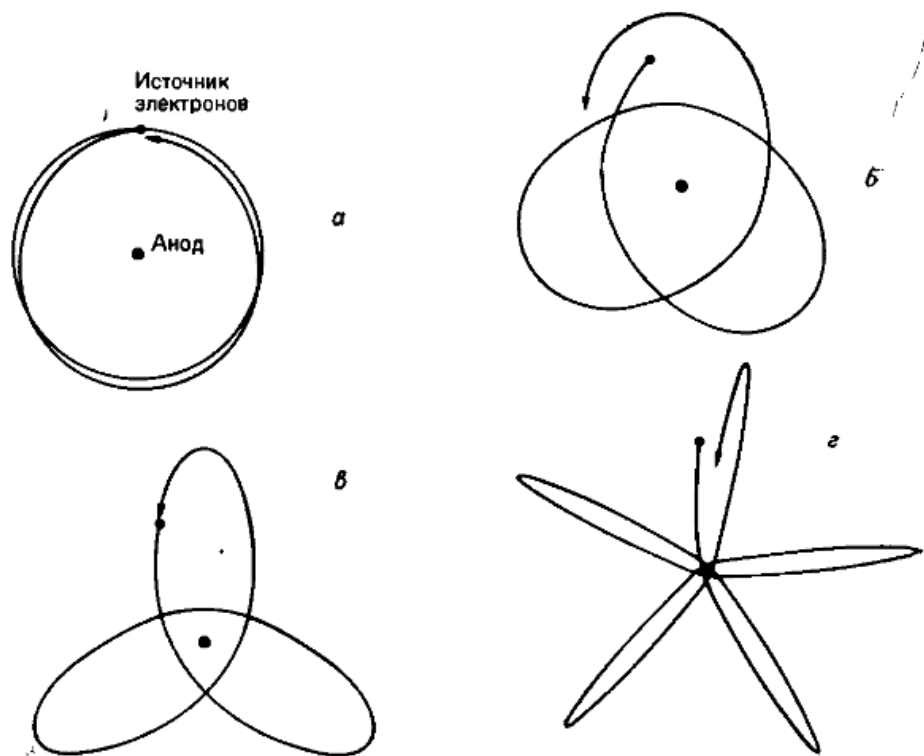


Рис. 143. Орбиты электронов, движущихся в электростатическом поле орбитронного насоса (проекция на плоскость) [10, с. 142]

Принципиальная конструкция орбитронного насоса показана на рис. 144. Анод 4 и коллектор ионов 3 расположены concentрично и составляют пространство ионизации. Электроны генерируются вольфрамовым катодом 5 и закручиваются специальным электродом 2. Ионизированный газ (положительные ионы) устремляется к

коллектору ионов 3 (как правило, это цилиндрический корпус насоса) и внедряются в него. На коллекторе 3 напыляется геттер, испускаемый с нагретого анода 4.

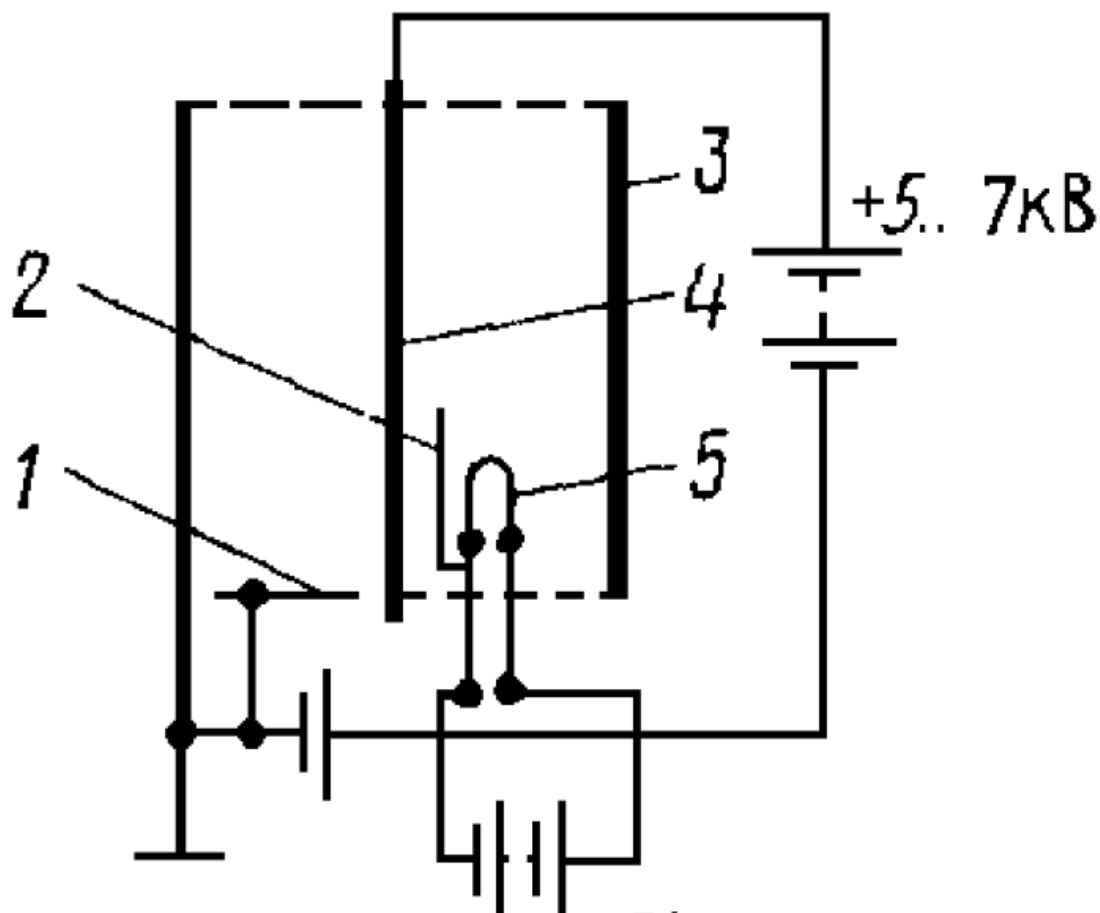


Рис. 144. Конструктивная схема орбитронного насоса. 1 – сетки; 2 – специальный электрод; 3 – коллектор ионов; 4 – анод; 5 – вольфрамовый катод [7, с. 219]

Типичная схема устройства орбитронных насосов показана на рис. 145 и 146. Катоды 2 (рис. 145 и 146) – небольшие и находятся на периферии пространства ионизации, так как эмиссия электронов не должна происходить по всему этому пространству. Токоввод катода 6 (рис. 146) одновременно служит экраном, препятствующим попаданию эмиттируемых электронов на анод 3 (рис. 146). Электроны закручиваются в симметричном цилиндрическом поле благодаря несимметричному расположению катода-эмиттера электронов (рис.

146) или наличием второго специального электрода (рис. 145). При работе насоса часть электронов бомбардирует геттеры (3 – рис. 145, и 4 – рис. 146) и разогревает их до температуры около 1160°C , что приводит к испарению титана. Корпус, на котором осаждается геттер, должен быть водоохлаждаемым – 1 на рис. 145.

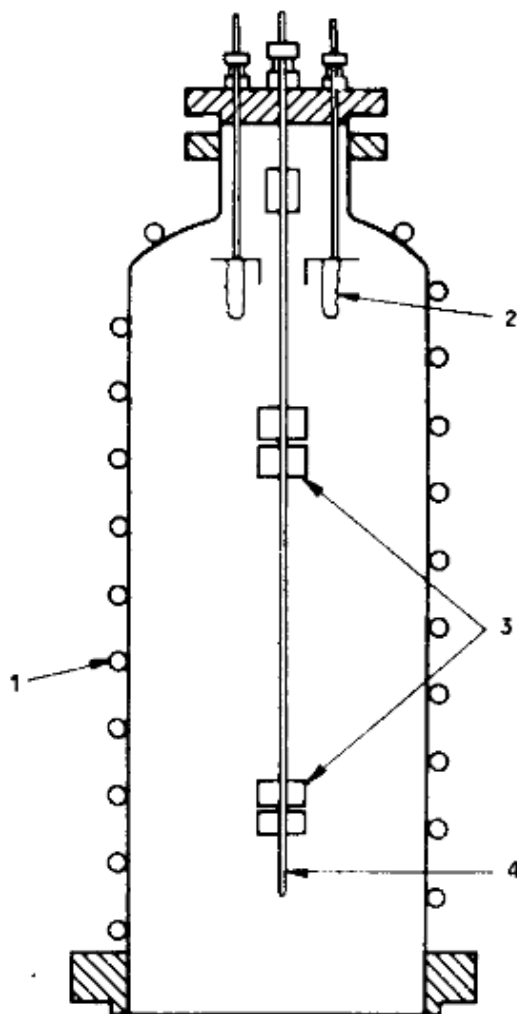


Рис. 145. Орбитронный насос. 1 – корпус, охлаждаемый водой; 2 – катод; 3 – геттер; 4 – вольфрамовый стержень [10, с. 142]

Откачивание активных газов происходит, как обычно в геттерно-ионных насосах – молекулы хемосорбируются напыляемыми плёнками титана; этот процесс лишь значительно более интенсивный. Поглощение инертных газов и лёгких углеводородов происходит по другому механизму. Молекулы этих газов ионизируются, разгоняются

до очень больших скоростей и ударяются в катод, проникая на большую глубину. Там они «замуровываются» вновь напыляемыми слоями титана. Тем не менее скорость откачки инертных газов составляет всего 1% от скорости откачки азота.

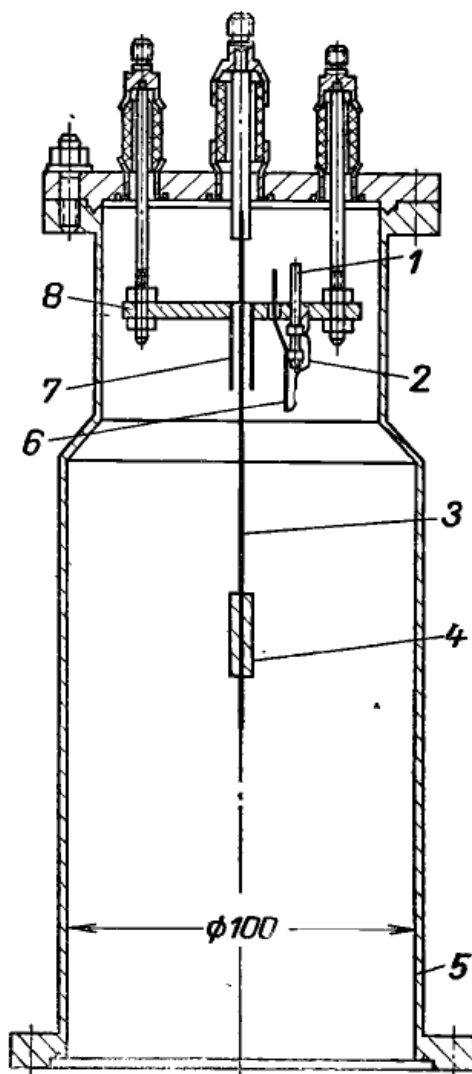


Рис. 146. Схема орбитронного геттерно-ионного насоса. 1 – изолятор; 2 – катод; 3 – анод; 4 – титановый цилиндр; 5 – корпус; 6 – экран-токоввод катода; 7 – экран анода; 8 – пластина [8, с. 155]

В орбитронном насосе (рис. 147) скорость откачки инертных газов значительно увеличена за счёт установления вокруг анода сеточного цилиндра, соединённого с катодом. Электроны перемещаются в ограниченном сеткой пространстве, а ионы свободно через неё проходят и больше ускоряются на пути в катоду.

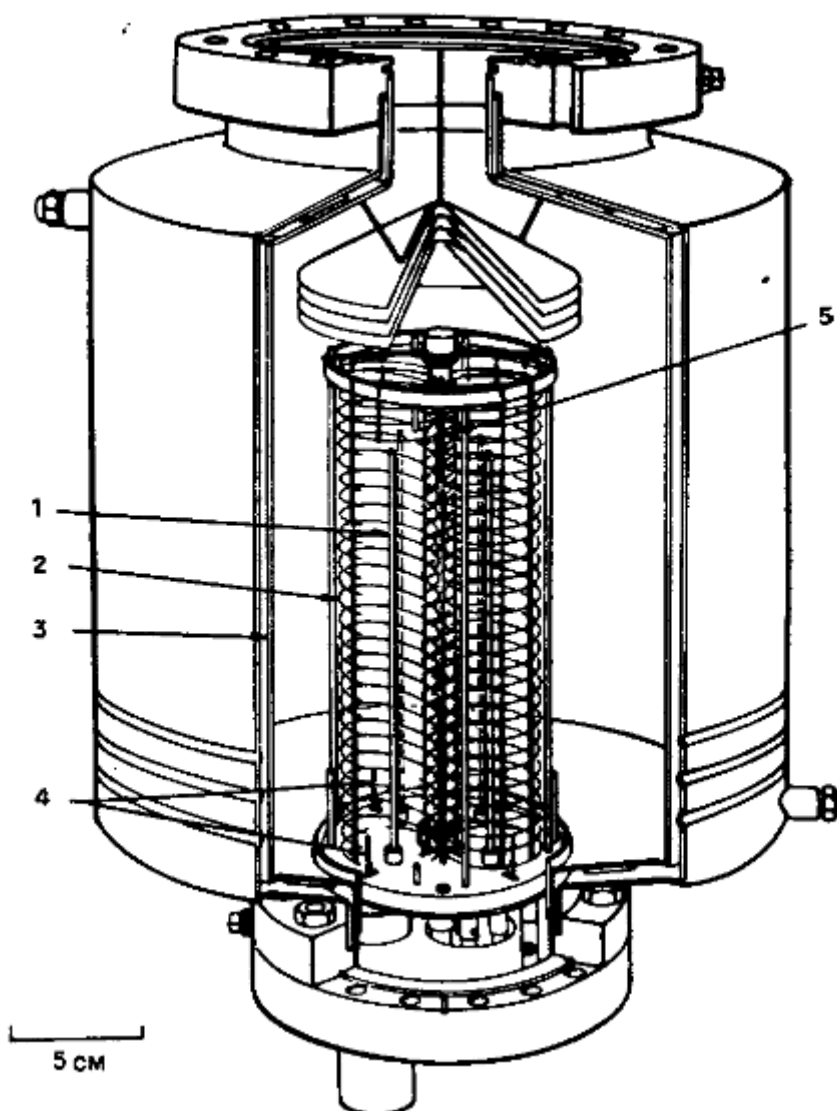


Рис. 147. Орбитронный насос. 1 –анод; 2 – сетка; 3 – коллектор; 4 – катоды; 5 – сублиматор [10, с. 144]

Обычно предельный вакуум, получаемый орбитронными насосами, составляет до 10^{-9} Па (10^{-11} Торр). Если в насос установить вкладыш, который охлаждается жидким азотом, предельное остаточное давление можно понизить до порядка 10^{-12} Па (10^{-14} Торр). Это реализовано в насосе СОН А-1 (сверхвысоковакуумный орбитронный насос) – рис. 149. Насос имеет две зоны сорбции: около половины испаряемого титана осаждается на внутренней поверхности медных колец 4, которые и охлаждаются

жидким азотом, остальная часть титана – на внутренней поверхности корпуса 5, охлаждаемого водой.

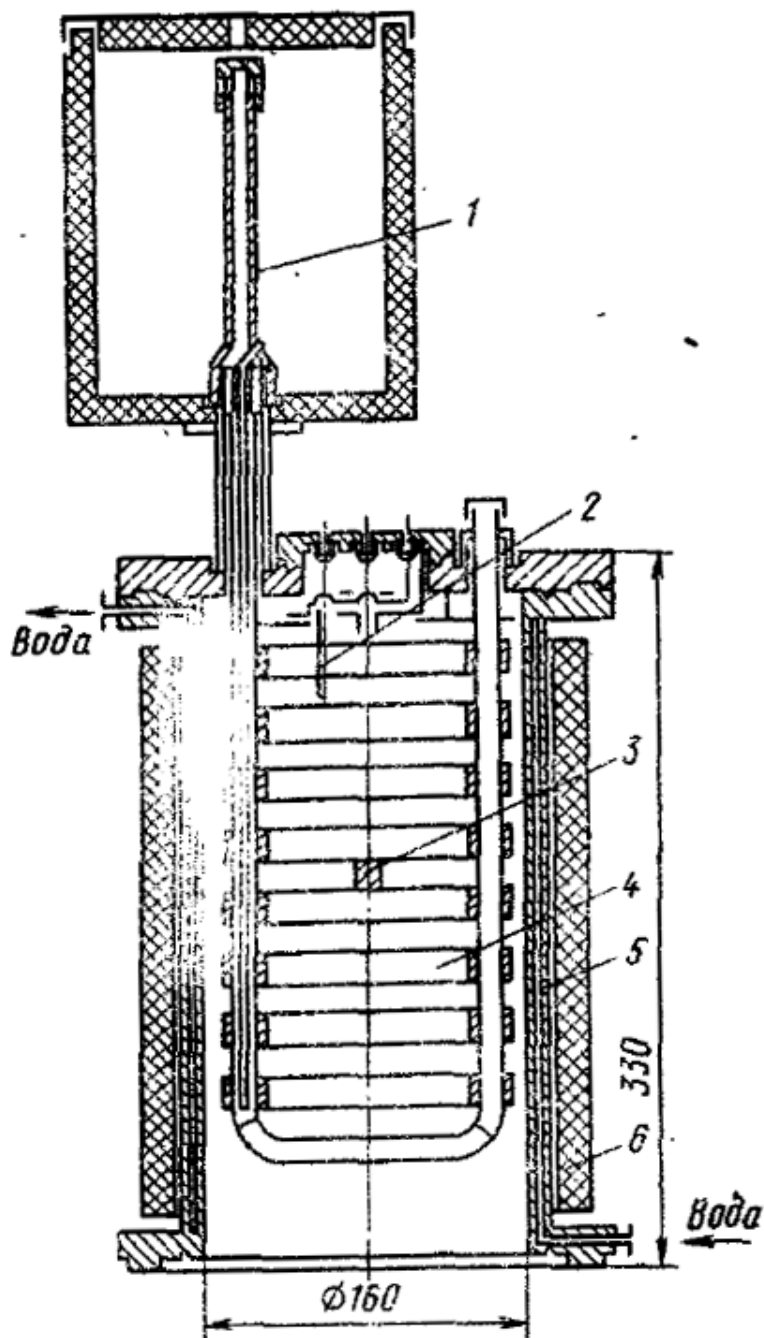


Рис. 148. Конструктивная схема насоса СОН-А-1. 1 – азотный питатель; 2 – нить накала; 3 – анод с титановой навеской; 4 – вкладыш с охлаждаемыми кольцами; 5 – корпус с водяной рубашкой; 6 – теплоизоляционный экран [9, с. 361]

Некоторые современные ионно-геттерные насосы представлены на рис. 149 и 150.



Рис. 149. Ионно-геттерный насос фирмы Kurt J. Lesker [<https://vacuum-group.ru/blog/vakuumnye-nasosy/ionno-getternyy-nasos-printsip-raboty/>]



Рис. 150. Ионно-геттерный насос фирмы Agilent [<https://vacuum-group.ru/blog/vakuumnye-nasosy/ionno-getternyy-nasos-printsip-raboty/>]

v37 § 4. Магнитные электроразрядные насосы

Существенным недостатком описанных в предыдущем параграфе геттерно-ионных насосов является наличие раскалённых элементов и, как следствие, – нагревание корпуса насоса и необходимость его охлаждения. Кроме этого, скорость распыления геттера и производительность откачки не зависят друг от друга, что ведёт к неконтролируемому расходу активного металла (титана) и необходимости частой его замены.

Эти недостатки во многом преодолены в **магнитных электроразрядных насосах** (сокращённо – магниторазрядных). По сути они являются геттерно-ионными насосами. Их отличие от испарительных насосов состоит в использовании газового разряда в магнитном поле и для распыления геттера, и для ионизации газа. При этом осуществляется саморегулирование скорости распыления. Газовый разряд происходит в скрещённых электрическом и магнитном полях.

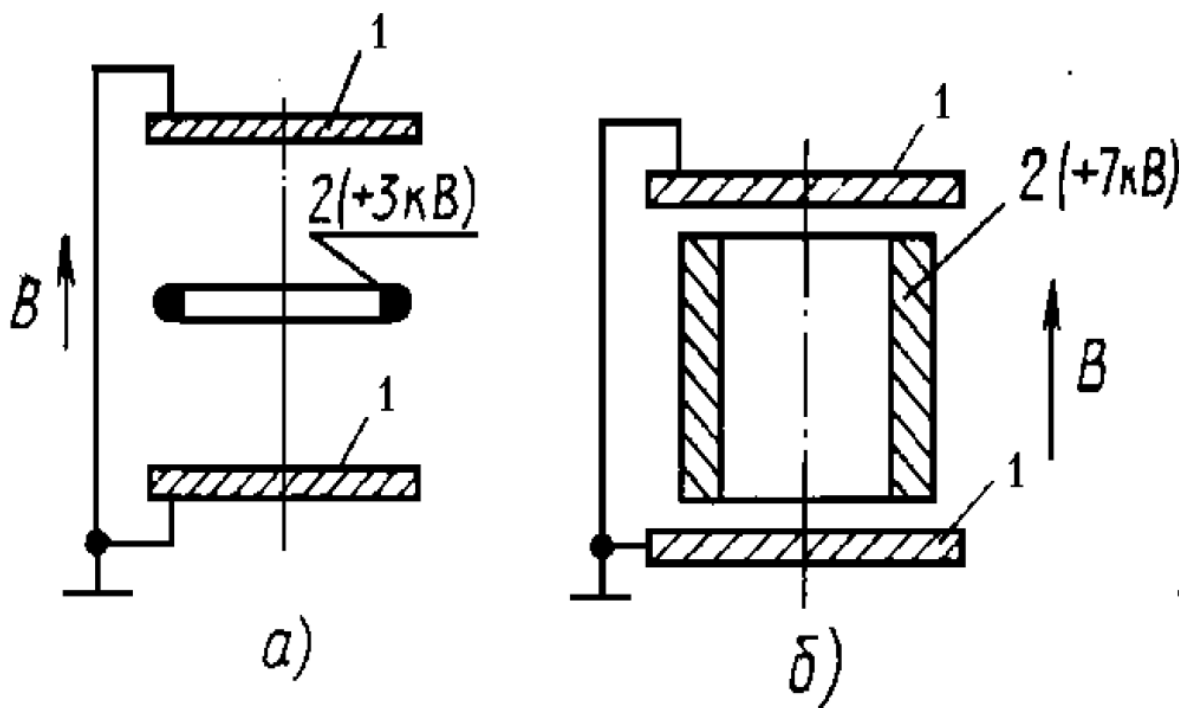


Рис. 151а-б. Конструктивные схемы магниторазрядных насосов; а) классическая схема; б) диодный насос. 1 – катоды; 2 – анод [7, с. 220]

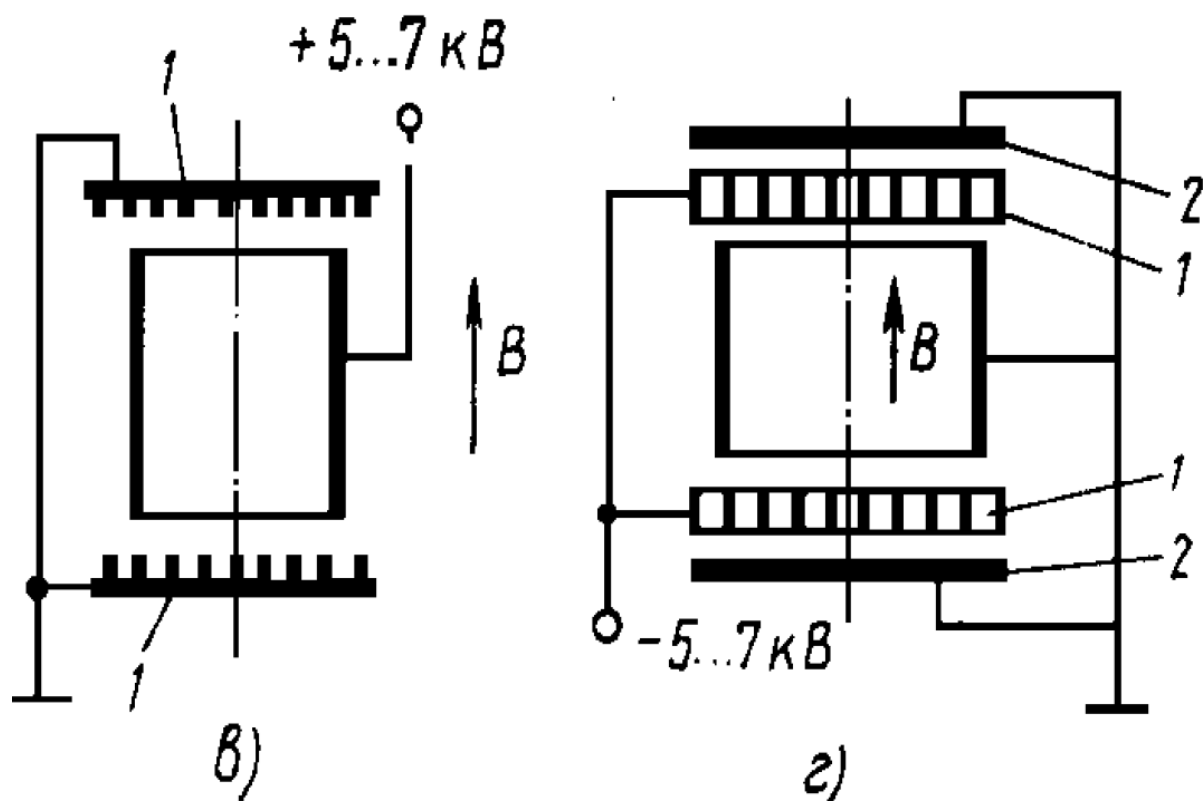


Рис. 151в-г. Конструктивные схемы магниторазрядных насосов; в) диодный магниторазрядный насос с ребристыми катодами; г) триодный насос. 1 – катоды; 2 – анод [7, с. 220]

Основные принципиальные схемы устройства магниторазрядных насосов представлены на рис. 151. Простейшая схема (рис. 151а) содержит два дисковых катода 1 и кольцевой проволочный анод 2, по оси которого направлено магнитное поле. Катоды и анод находятся под потенциалом $3 \div 7 \text{ кВ}$. Развитием этой схемы является **диодный магниторазрядный насос** (рис. 151б), где анодное кольцо заменено на цилиндр 2 (ячейка Пеннинга). Такой насос обладает большей производительностью. Более эффективное распыление геттера достигается в схемах **диодных магниторазрядных насосов с ребристыми катодами** (рис. 151в) и **триодных насосов** (рис. 151г) с сетчатым катодом 1. В последних двух схемах геттер испаряется с больших поверхностей при малых углах падения ионов. В схеме триодного насоса (рис. 151г) напыление производится и на цилиндрический корпус насоса (коллектор 2), который не

бомбардируется положительными ионами газа и «откачивает» обычным способом. Кроме рассмотренных существуют также схемы дифференциального ионного и магнетронного насосов [10, с. 149 – 150].

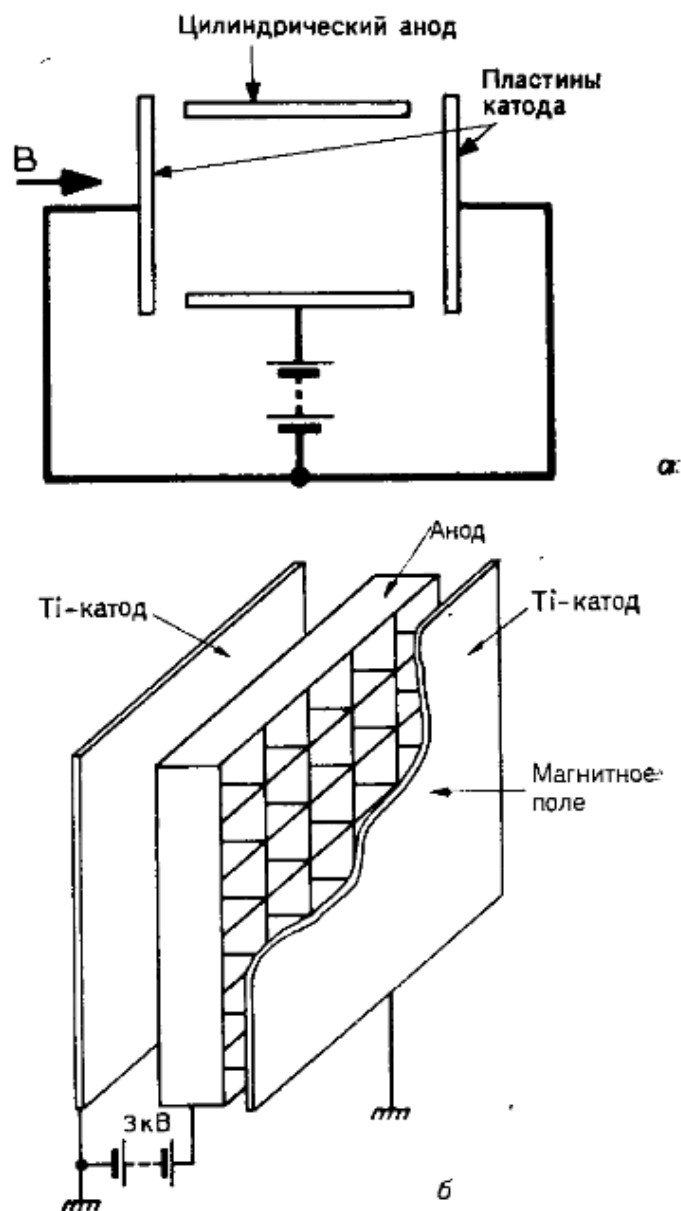


Рис. 152. Ионный насос с холодным катодом (б) на основе ячейки Пеннинга (а) [10, с. 145]

Рассмотрим более подробно устройство и работу диодного насоса (рис. 152). Принцип устройства основан на ячейке Пеннинга [11] – рис. 152а, которая состоит из двух катодных дисков,

располагающихся с торцов цилиндрического анода. Ось анода перпендикулярна поверхности катодов. Анод и катод находятся под разностью потенциалов несколько киловольт и под действием магнитного поля, напряжённость B которого направлена параллельно оси анода. Электроны образуются из-за бомбардировки ионами поверхности катода и вследствие самой ионизации газа. В ячейке Пеннинга они находятся как бы в электронной ловушке и осциллируют в потенциальной яме между катодами, представляя собой мощный источник дальнейшей ионизации газа. Возникает **тлеющий электрический разряд**, по которому магниторазрядные насосы называют ещё **насосами с холодным катодом**. Разряд возникает в очень широком диапазоне давлений вплоть до 10^{-10} Па (10^{-12} Торр).

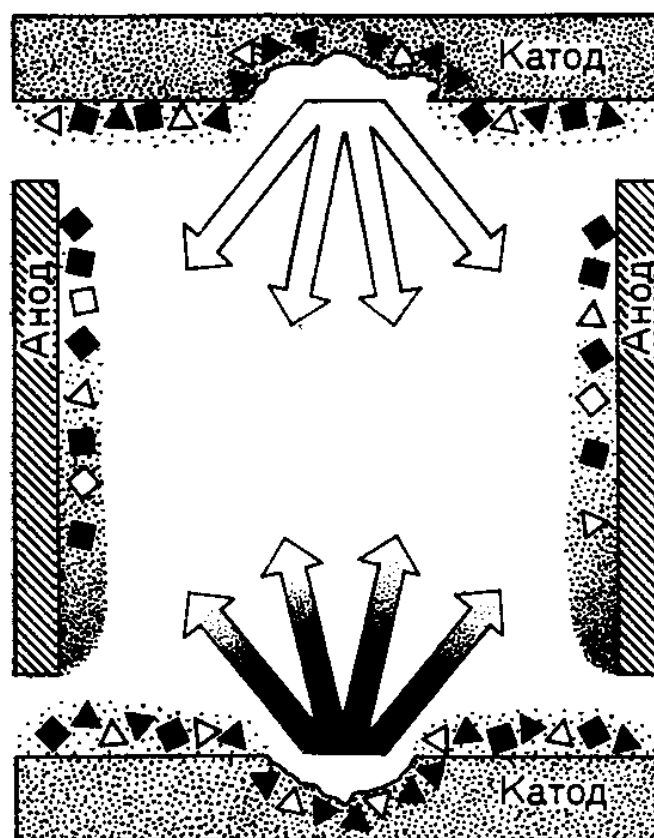


Рис. 153. Принцип действия электроразрядного насоса. Нейтральные частицы: ■ – химически активных газов; □ – инертных газов. Ионизированные молекулы: ▲ – химически активных газов; △ – инертных газов [10, с. 146]

В конструкцию диодного насоса заложен набор ячеек Пеннинга квадратного или прямоугольного сечения в виде своеобразных сот – рис 152б.

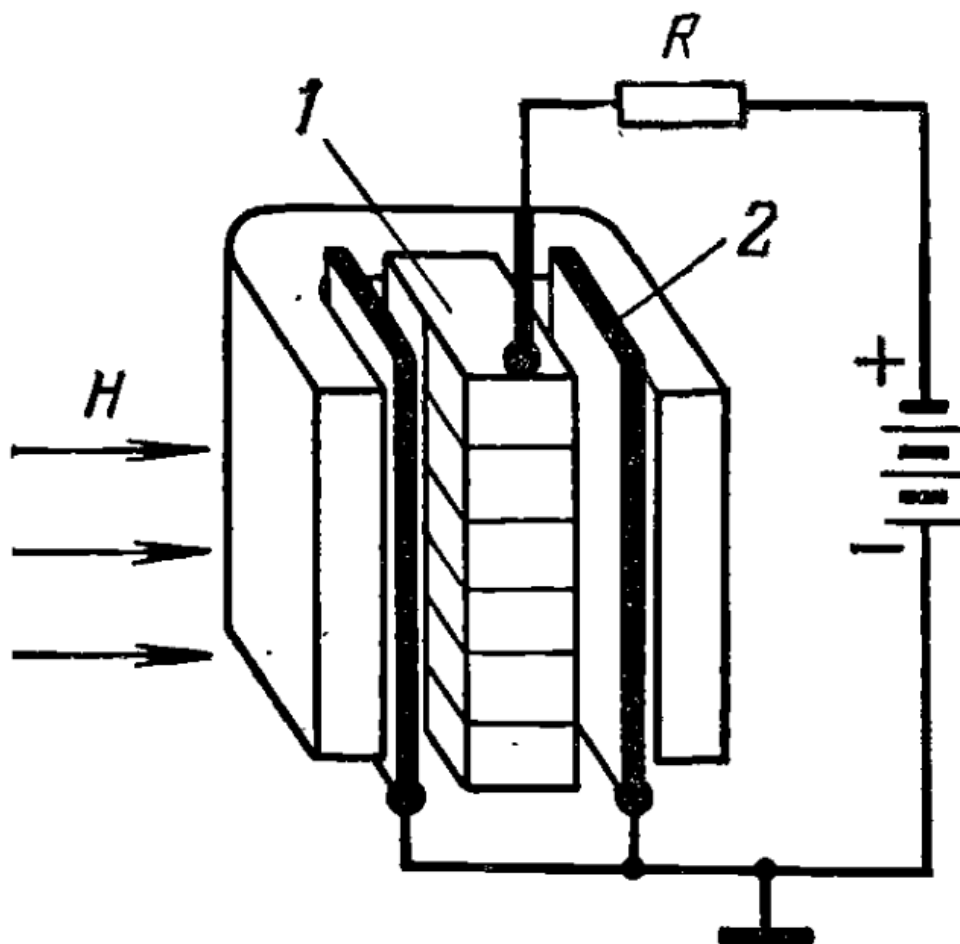


Рис. 154. Схема диодного магниторазрядного насоса с источником питания. 1 – анод; 2 – катод; R – балластное сопротивление; H – направление магнитного поля [8, с. 157]

Откачивающее действие насоса проиллюстрировано на рис. 153. В тлеющем разряде образуются ионы газов и бомбардируют катод, в результате чего активный металл из катода распыляется и покрывает стенки насоса, электроды, и другие элементы конструкции. При этом степень разрушения участков катода оказывается не одинаковой. На рис. 153 показаны виды молекул газа, адсорбируемых на поверхности геттера, и примерная плотность их распределения. Молекулы активных газов (■) адсорбируются или хемосорбируются на

поверхности титана. Ионы газов (\blacktriangle и \triangle) внедряются в поверхность и замуровываются вновь напыляемыми слоями металла. Последнему процессу противоположен процесс непрерывного испарения катодов с высвобождением захваченных молекул газа. Таким образом, откачивающим действием будут обладать только нераспыляемые участки катода. Инертные газы (\square) слабо откачиваются диодными насосами ($\sim 1\%$ от скорости откачки азота). Существуют также проблемы с откачкой водорода, так как его ионы слабо выбивают частицы металла из катода.

Более полная схема диодного магниторазрядного насоса показана на рис. 154. Ячеистый анод и катоды охвачены извне U-образным магнитом. В схеме питания имеется балластное сопротивление R , которое препятствует перерастанию тлеющего электрического разряда в дугу.

Большим преимуществом магниторазрядных насосов является возможность **авторегулирования скорости распыления катодов**. Чем больше давление в откачиваемой системе, тем больше ионов поступает на катод (ионный ток больше); при понижении давления распыление уменьшается (ионный ток меньше). Это приводит к очень большой экономии геттера и увеличивает ресурс насоса до нескольких десятков тысяч часов.



Рис. 155. Магнитная система насоса НЭМ-100 [8, с. 161]

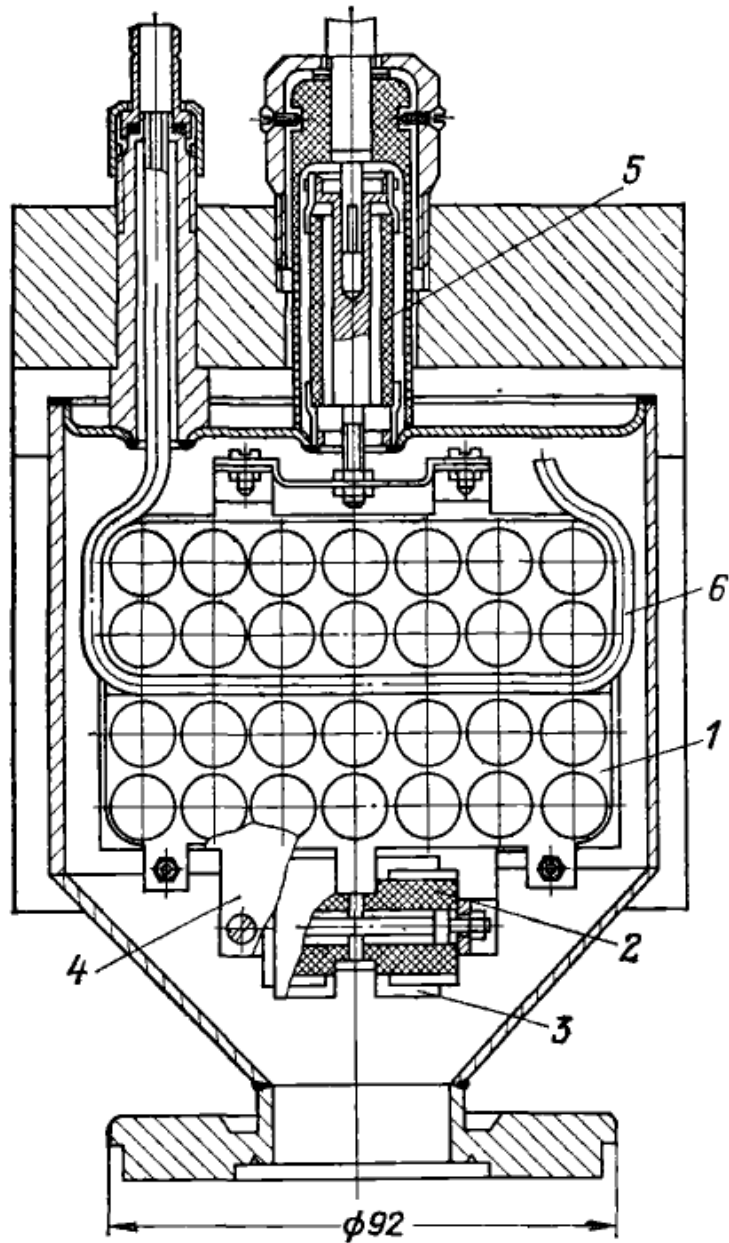
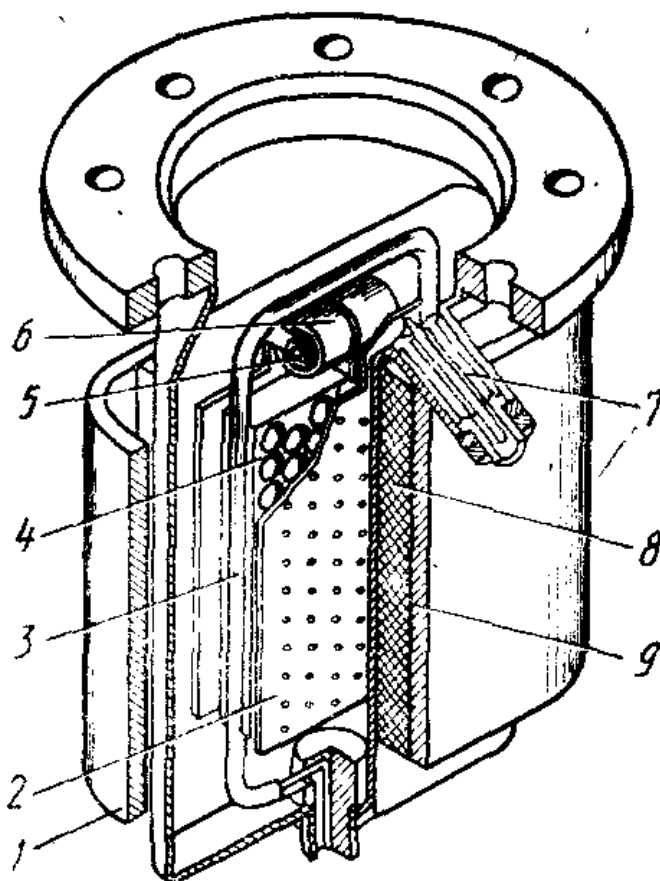


Рис. 156. Магнитный электроразрядный насос НОРД-10-1 с водоохлаждаемым анодом. 1 – медный анод; 2 – керамический изолятор; 3 – экран, защищающий изолятор от запыления титаном; 4 – катод; 5 – высоковольтный ввод; 6 – трубка водяного охлаждения [8, с. 162]

Быстрота действия насоса при сравнительно высоких давлениях мала, и это может привести к его перегреву. Поэтому верхний предел запуска насоса должен быть меньше 10^{-1} Па (10^{-3} Торр); нормальный режим работы наступает при давлении ниже 10^{-2} Па (10^{-4} Торр).

Рассмотрим некоторые магниторазрядные насосы. В СССР выпускалась серия обычных насосов типа НЭМ: НЭМ30, НЭМ100 и НЭМ300 (рис. 155). В них помещалось соответственно один, четыре и восемь анодно-катодных блоков. Магниты насоса (см. рис. 155) – съёмные. Предельное остаточное давление – около 10^{-7} Па (10^{-9} Торр).

Гораздо более высокое давление запуска выдерживают диодные насосы серии НОРД (насос охлаждаемый разрядный диодный) – рис. 156. Насос водоохлаждаемый. Давление запуска – около $6,5 \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$), длительная работа возможна при давлении меньше 10^{-1} Па (10^{-3} Торр). Предельное остаточное давление – около 10^{-7} Па (10^{-9} Торр).



4

Рис. 157. Насос НМДО-25. 1 – корпус; 2 – катод; 3 – трубка охлаждения; 4 – анод; 5 – изолятор; 6 – экран; 7 – токоввод; 8 – магнит; 9 – магнитопровод [9, с. 364]

Более современный насос серии НМДО (насос магниторазрядный диодный охлаждаемый) показан на рис. 157. Его особенностью является наличие отверстий в катодных пластинках, что увеличивает быстроту откачки инертных газов. Остаточное давление при охлаждении жидким азотом – около 10^{-8} Па (10^{-10} Торр).

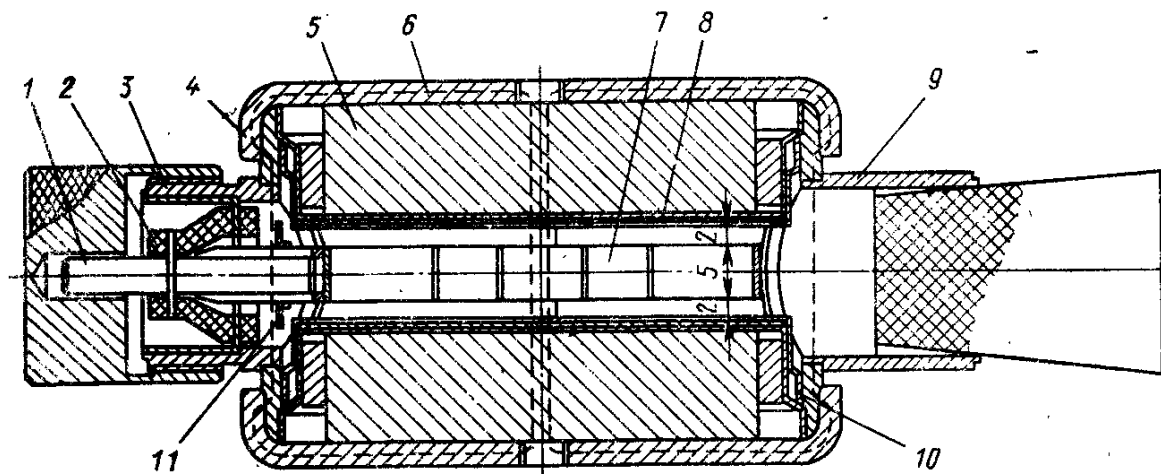


Рис. 158. Насос НМД-0,001; штриховая линия – магнитный поток. 1 – токоввод; 2 – изолятор; 3 – патрубкок высоковакуумного ввода; 4 – корпус; 5 – магнит; 6 – крышка; 7 – анод; 8 – катод; 9 – входной патрубкок; 10 – дополнительный катод; 11 – экран [9, с. 367]

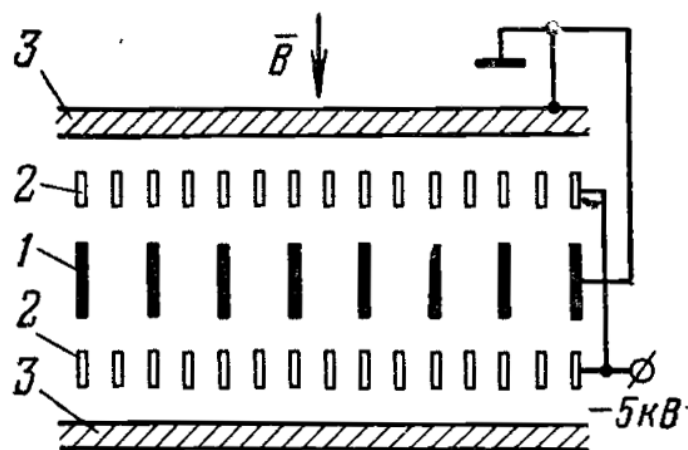


Рис. 159. Электродная схема триодного магниторазрядного насоса (например – насоса ТРИОН-150). 1 – анод; 2 – катоды; 3 – коллектор (корпус) [7, с. 163]

Диодные насосы малых размеров типа НМД (рис. 158) предназначены для откачки небольших вакуумных систем. Насосы не охлаждаемые. Некоторые их характеристики хуже, чем у обычных насосов.

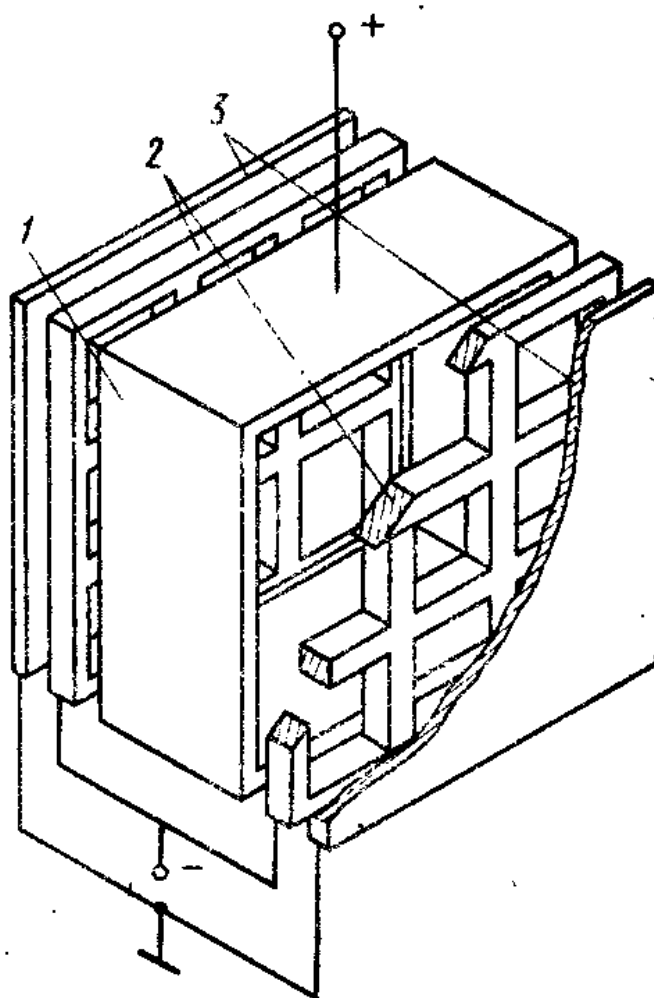


Рис. 160. Конструктивная схема электродной системы триодного магнитного электроразрядного насоса. 1 – анод; 2 – катоды; 3 – коллекторы [9, с. 366]

Сравнительно высокой быстротой действия по инертным газам обладают триодные магниторазрядные насосы, такие, как ТРИОН-150. Его электродная схема приведена на рис. 159 и 160. Остаточное давление – около 10^{-9} Па (10^{-11} Торр). Триодный насос типа НМТ (рис. 161) – специального назначения. Он не имеет фланцев и приваривается к откачиваемой системе. Применяется он в

электронных микроскопах, оже-спектрометрах и в другой аналитической аппаратуре.

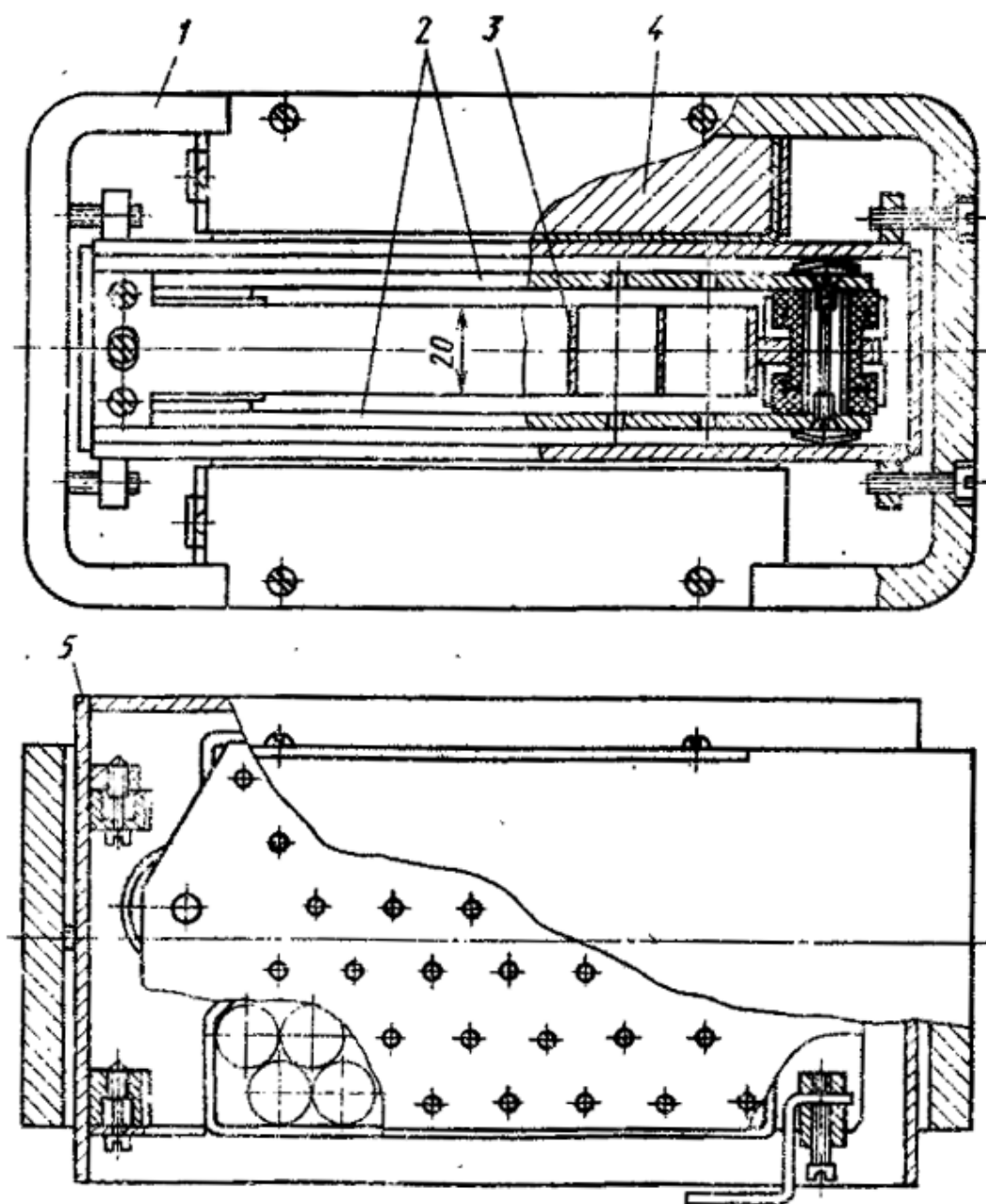


Рис. 161. Насос НМТ-0,025-1. 1 – магнитопровод; 2 – катод; 3 – анод; 4 – магнит; 5 – корпус [9, с. 368]

Некоторые современные магнеторазрядные насосы представлены на рис. 162 и 163.



Рис. 162. Промышленный магниторазрядный вакуумный насос Авакс 3L-50 (Россия)
[<https://value-official.org/catalog/vakuumnyj-nasos/avaks-3l-50/>]



Рис. 163. Магниторазрядный промышленный вакуумный насос VACOM Revion 75
[<https://vacuequipment.org/catalog/vakuumnye-nasosy/vacom-revion-75/>]

Необходимо также заметить, что существует много комбинированных насосов на основе геттерных, таких как ЭГИН-1,6/0,25; НВГМ-4; НВГМ-5; НМДИ-16/40; ПВИГ-250/630/9-019, и нераспыляемых геттерных. С ними можно ознакомиться [9, с. 371 – 377].

v38 Глава 6. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

v39 § 1. Основы криогенной откачки. Типы криогенных насосов

Криогенная откачка основана на способности газов сжижаться при низкой температуре и сильно понижать давление насыщенных паров. При этом значительно возрастает скорость адсорбции. При температуре кипения жидкого азота (77 K) давление паров воды составляет меньше 10^{-10} Па (10^{-12} Торр), а давление паров N_2 , O_2 , CO и др. сравнимо с атмосферным. При снижении температуры до точки кипения жидкого водорода (20 K) давление паров этих газов понижается до 10^{-6} Па (10^{-8} Торр). Только Ne , H_2 и He сохраняют ещё довольно высокое давление насыщенных паров. При температуре кипения жидкого гелия (4 K) можно получить сверхвысокий вакуум по всем газам, кроме водорода и гелия. Наиболее доступными температурами для криогенной откачки являются 77 K и 90 K (жидкий кислород). Водород не используется в силу

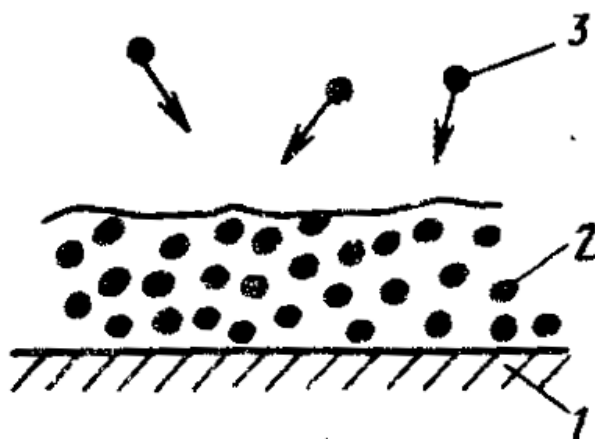


Рис. 164. Схемы работы крионасосов. Конденсационный насос.

1 – криопанель; 2, 5, 8 – откачанные молекулы (2 – конденсированные; 5 – адсорбированные; 8 – хемосорбированные); 3 – свободные молекулы; 4 – твердый сорбент; 6 – вспомогательный газ; 7 – частицы геттера [9, с. 378]

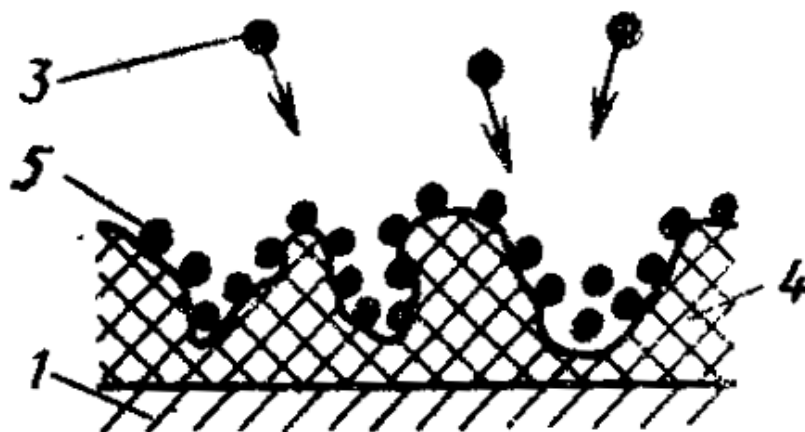


Рис. 165. Схемы работы крионасосов. Адсорбционный насос.
 1 – криопанель; 2, 5, 8 – откачанные молекулы (2 – конденсированные; 5 – адсорбированные; 8 – хемосорбированные); 3 – свободные молекулы; 4 – твёрдый сорбент; 6 – вспомогательный газ; 7 – частицы геттера [9, с. 378]

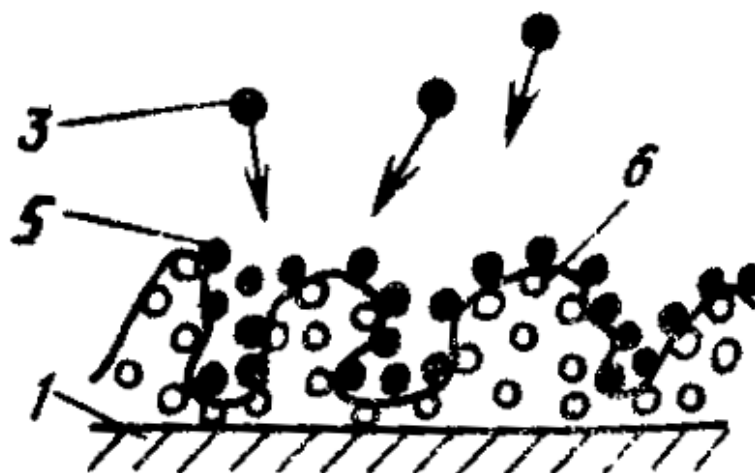


Рис. 166. Схемы работы крионасосов. Конденсационно-адсорбционный насос.
 1 – криопанель; 2, 5, 8 – откачанные молекулы (2 – конденсированные; 5 – адсорбированные; 8 – хемосорбированные); 3 – свободные молекулы; 4 – твёрдый сорбент; 6 – вспомогательный газ; 7 – частицы геттера [9, с. 378]

взрывоопасности; жидкий гелий очень дорог, но всё-таки используется, когда это необходимо.

Работа крионасосов основана на различных физико-химических процессах, протекающих при низких температурах.

Конденсационные насосы используют конденсацию газов на охлаждённых (до 20 K и ниже) металлических поверхностях – рис. 164.

В **адсорбционных насосах** используется адсорбция газов на твёрдых охлаждаемых сорбентах – рис. 165. Здесь требуется хороший тепловой контакт с поверхностью и чистота сорбентов. Наиболее часто применяется активированный уголь, цеолиты, силикагели, оксиды металлов. Физическая поверхность сорбентов может составлять $10^8\text{ см}^2/\text{г}$ и значительно превосходит их геометрические размеры.

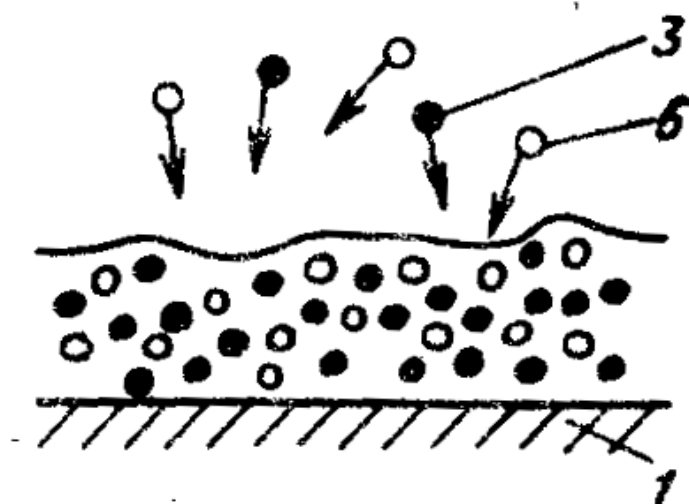


Рис. 167. Схемы работы крионасосов. Криозахватный насос.

1 – криопанель; 2, 5, 8 – откачанные молекулы (2 – конденсированные; 5 – адсорбированные; 8 – хемосорбированные); 3 – свободные молекулы; 4 – твёрдый сорбент; 6 – вспомогательный газ; 7 – частицы геттера [9, с. 378]

В работе **конденсационно-адсорбционных насосов** используются вспомогательные легко конденсирующиеся газы – рис. 166. Такими газами могут служить пары воды, диоксид углерода, диоксид серы, оксид азота, метилхлорид, тетрахлорид углерода, пары

спирта, ацетона, бензина, аргон, азот и другие газы. Добавляют их в крионасос после предварительной форвакуумной и высоковакуумной откачки.

Принцип действия **криозахватного насоса** основан на поглощении неконденсирующихся газов (таких, как водород) газами и парами легко конденсируемыми – рис. 167. При этом образуется конденсат с захваченными молекулами откачиваемых газов.

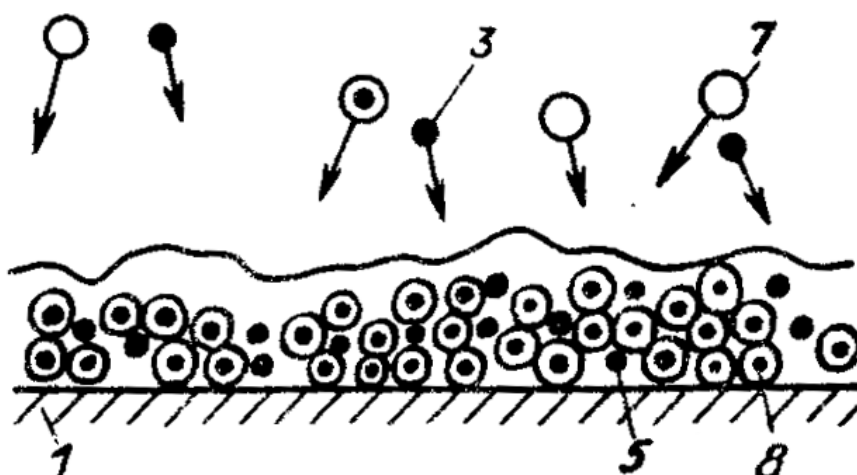


Рис. 168. Схемы работы крионасосов. Криогеттерный насос.

1 – криопанель; 2, 5, 8 – откачанные молекулы (2 – конденсированные; 5 – адсорбированные; 8 – хемосорбированные); 3 – свободные молекулы; 4 – твёрдый сорбент; 6 – вспомогательный газ; 7 – частицы геттера [9, с. 378]

В **криогеттерном насосе** на криопанель постоянно напыляется геттер (чаще всего титан), который на поверхности и в объёме адсорбирует и хемосорбирует откачиваемые газы – рис 168. Сорбционная ёмкость титановых геттеров при низкой температуре примерно в 3 раза больше, чем при обычной. Для работы таких насосов достаточно температуры $60 \div 80 \text{ K}$.

Самыми распространёнными являются конденсационные и адсорбционные насосы.

Устройство крионасосов всех видов сводится к одной общей схеме – рис. 169. Криопанель 1 является основным элементом насосов;

на ней и производится откачка. Она охлаждается до рабочих низких температур. Конструктивно она может иметь самую разную форму, как плоскую, так и в виде рёбер, змеевиков и т. п. Процессы, протекающие на криопанели – экзотермические, поэтому должен быть предусмотрен постоянный теплоотвод с её поверхности.

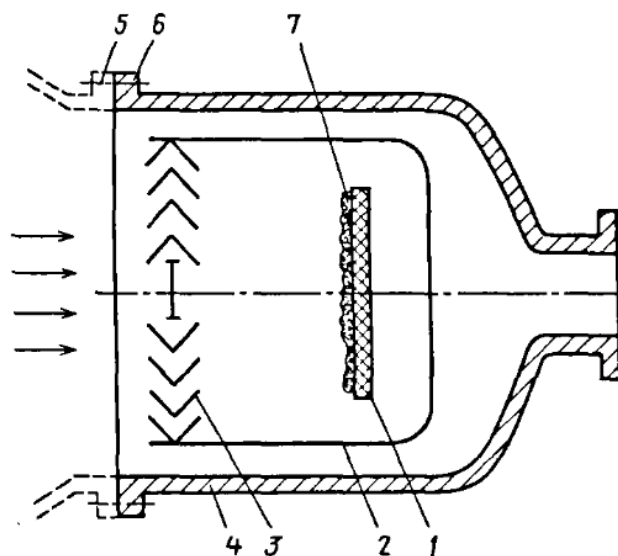


Рис. 169. Принципиальная схема крионасоса. 1 – криопанель; 2 – экран; 3 – жалюзи; 4 – корпус; 5 и 6 – фланцы камеры и насоса; 7 – конденсат (криоосадок) [4, с. 505]

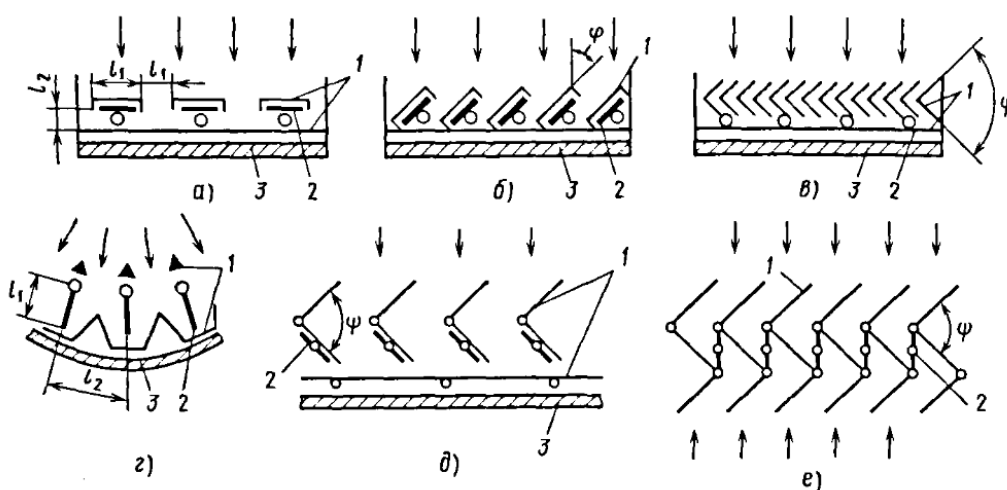


Рис. 170. Конструктивные схемы защитных экранов и криопанелей (стрелки соответствуют направлению откачки). 1 – экран; 2 – криопанель; 3 – корпус [4, с. 510]

Важнейшей деталью крионасосов является теплозащитный экран 2 между криопанелью 1 и корпусом 4. Он снижает тепловую нагрузку на криопанель, которая должна поддерживаться при рабочей низкой температуре. Конструкции криопанелей и экранов показаны на рис. 170.

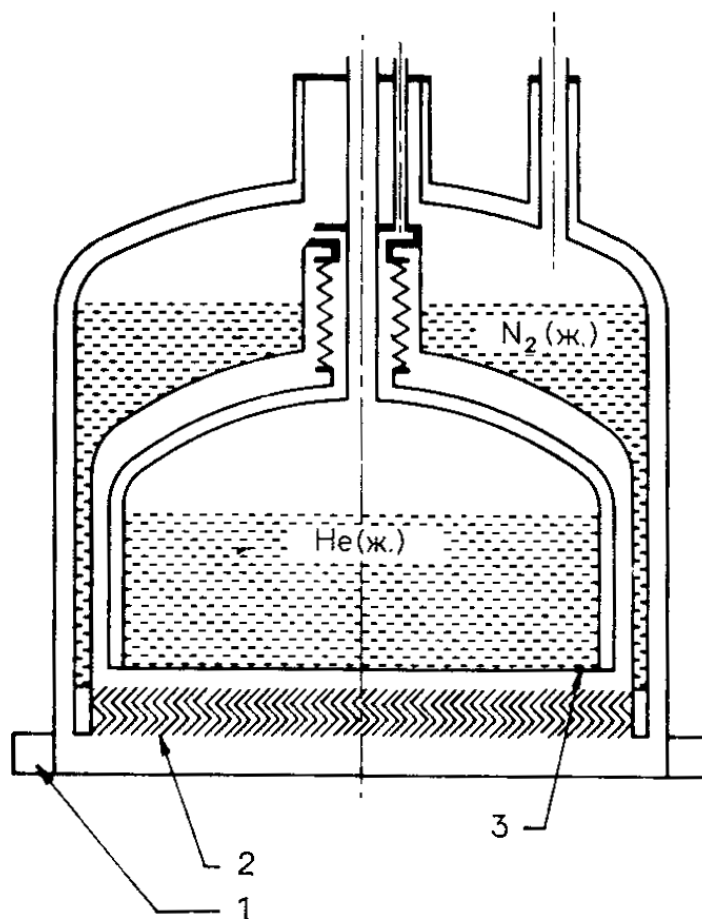


Рис. 171. Фланцевый наливной крионасос. 1 – соединительный фланец; 2 – шевронный отражатель; 3 – криопанель [10, с. 124]

Системы охлаждения могут быть самыми различными; одна из таких систем, наливного типа, представлена на рис. 171. Резервуар с жидким гелием помещён в резервуар с жидким азотом. Такая двойная защита криопанели 3 значительно повышает её производительность. К внутренним стенкам азотного резервуара прикреплён шевронный отражатель 2. Насосы, построенные по этой схеме, могут обеспечить предельное остаточное давление 10^{-11} Па (10^{-13} Торр).

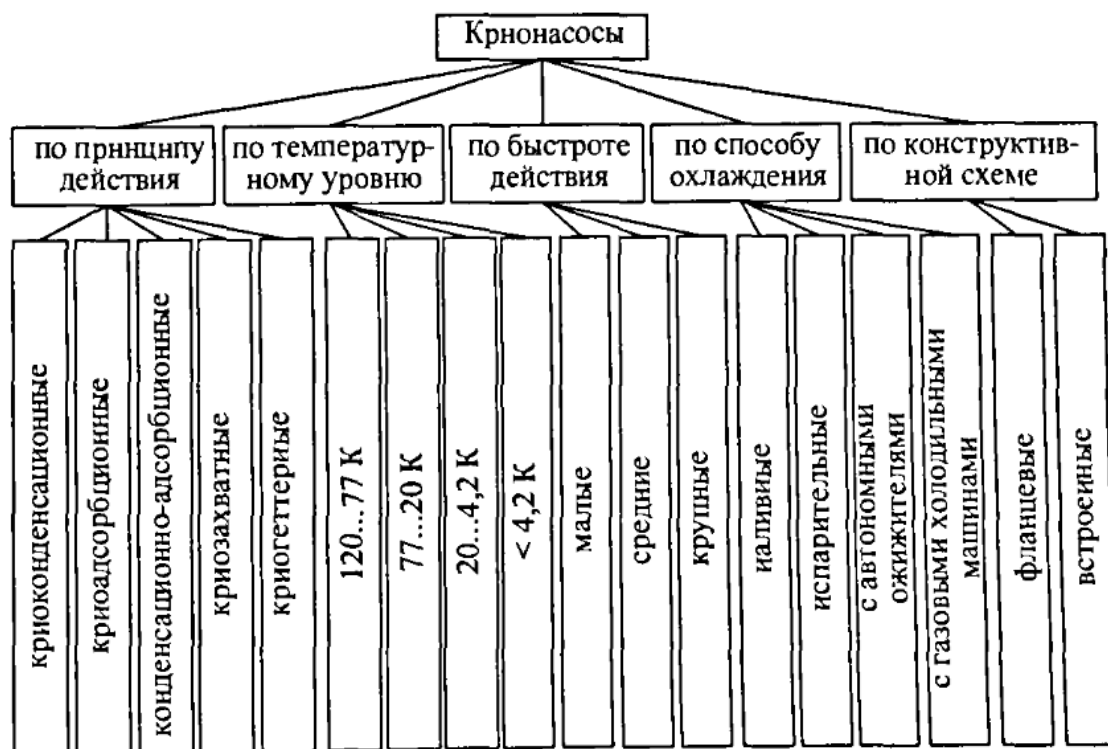


Рис. 172. Классификация крионасосов [4, с. 507]

Крионасосы могут быть классифицированы по многим признакам, не только по принципу действия, как это было рассмотрено выше. Классификация приведена на рис. 172.

40 § 2. Криоконденсационные насосы

Насосы этого типа подразделяются на высоковакуумные и низковакуумные.

В основе криоконденсационной откачки лежит, как уже отмечалось, конденсация газов на охлаждаемых поверхностях (криопанели). Эта откачка может происходить, если давление откачиваемого газа в вакуумируемой системе выше давления его насыщенных паров в насосе.

Криоконденсационные насосы заливного типа показаны на рис. 173а. Они имеют две камеры с низкотемпературным криоагентом 2 и – высокотемпературным 3. Экраны 1 защищают низкотемпературную камеру 2. В этих насосах часто камеру 2 покрывают адсорбентом для поглощения неконденсирующихся газов.

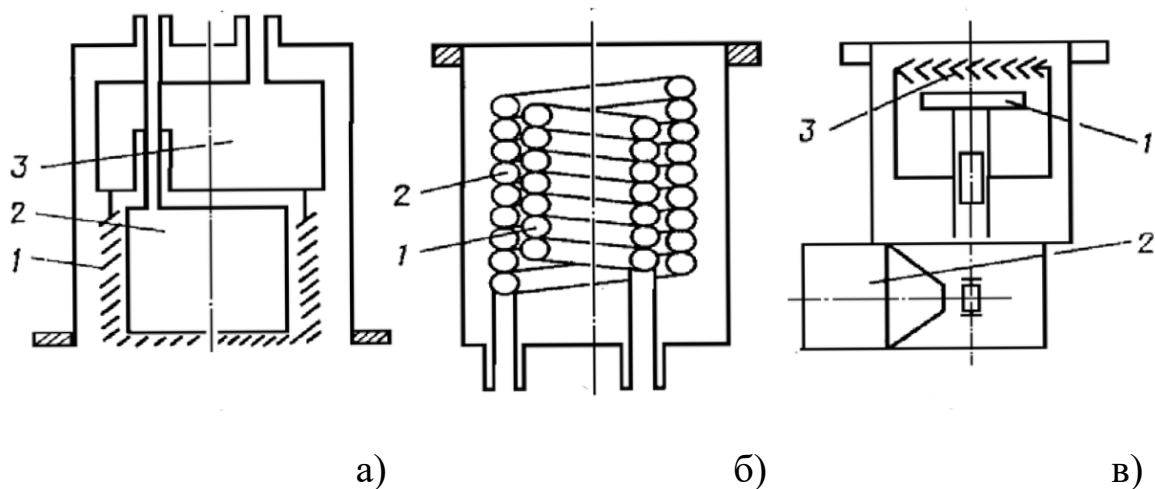


Рис. 173. Конструктивные схемы криоконденсационных насосов;
 а) заливного типа: 1 – экраны; 2 – полость с жидким гелием; 3 – полость с жидким азотом;
 б) испарительного типа: 1 – криопанель; 2 – внешний экран;
 в) с автономным криогенератором: 1 – криопанель; 2 – автономная газовая машина; 3 – экран [7, с. 215]

Криоконденсационные насосы испарительного типа (рис. 173б) имеют испарительные панели в виде змеевиков, по которым циркулируют пары хладагента. Внешний змеевик 2 защищает внутреннюю криопанель 1.

Криоконденсационные насосы с автономным криогенератором. Криопанель 1 охлаждается внешней автономной газовой машиной 2.

Низковакуумные криоконденсационные насосы предназначены для откачки от атмосферы до 1 Па (10^{-2} Торр) и имеют ряд преимуществ перед форвакуумными механическими насосами.

41 § 3. Криoadсорбционные насосы

Криoadсорбционная откачка осуществляется адсорбцией газов на охлаждаемых адсорбентах. Количество адсорбированного газа должно составлять значительную часть газа в объеме вакуумной системы, что обычно наблюдается при температурах адсорбирующих поверхностей ниже температуры кипения газа при атмосферном давлении [7, с. 208].

Основные конструктивные схемы показаны на рис. 174.

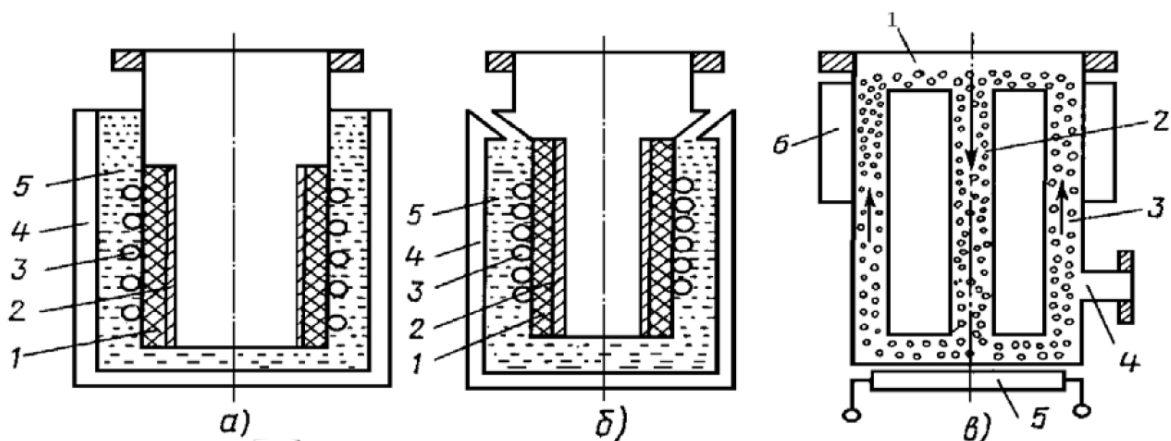


Рис. 174. Конструктивные схемы криoadсорбционных насосов; а) погружного типа; и б) заливного типа: 1 – адсорбент; 2 – металлический фильтр; 3 – нагреватель; 4 – сосуд Дьюара; 5 – хладагент; в) с движущимся адсорбентом: 1 – камера адсорбции; 2 – шлюз; 3 – шлюз; 4 – камера десорбции; 5 – хладагент; 6 – холодильник [7, с. 215]

Криoadсорбционные насосы погружного типа используются для получения низкого вакуума, а **криoadсорбционные насосы заливного типа** (рис. 174б) – для получения высокого вакуума. Основные элементы их устройства одинаковы. Адсорбент 1 (сетчатая штриховка) помещён внутрь пористого металлического фильтра 2, который защищает его от загрязнений и улучшает теплоотвод. Нагреватель 3 служит для регенерации адсорбента после его отработки. Криоагент 5 (например – жидкий азот) находится в сосуде Дьюара 4.

Криoadсорбционные насосы с движущимся адсорбентом (рис. 174в). Адсорбент циркулирует по замкнутому контуру, последовательно проходя камеру адсорбции 1, шлюз 2, нагреватель 3, камеру десорбции 4, шлюз 3, холодильник 6, и вновь попадает в камеру адсорбции 1.

Реальные конструкции насосов, как правило, представляют собой цилиндры с двумя патрубками; бóльший соединён с откачиваемой вакуумной камерой, а меньший служит для регенерации адсорбента. Криопанель с одной стороны омывается хладагентом, а с другой – контактирует с адсорбентом, имея развитую поверхность (см. рис. 175).

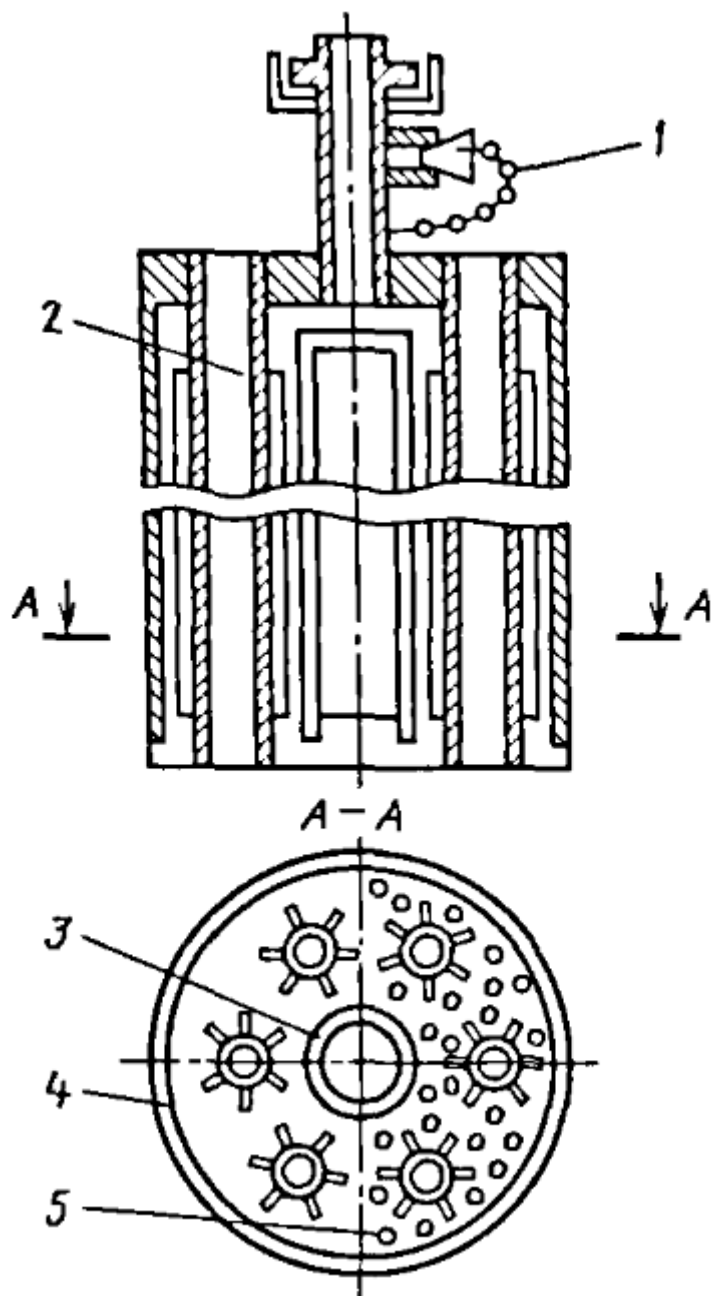


Рис. 175. Погружной адсорбционный насос с медными рёбрами. 1 – заглушка; 2 – дополнительные охлаждающие трубки; 3 – внутренний цилиндр для подвода газа; 4 – корпус; 5 – адсорбент [4, с. 514]

Температура адсорбента в адсорбционных насосах всегда выше температуры криоагента, в большинстве случаев – на $10-20\text{ K}$. Применение пористых теплозащитных экранов, изготовленных из медного порошка, позволяет снизить эту среднюю разность температур до нескольких кельвинов (рис. 176).

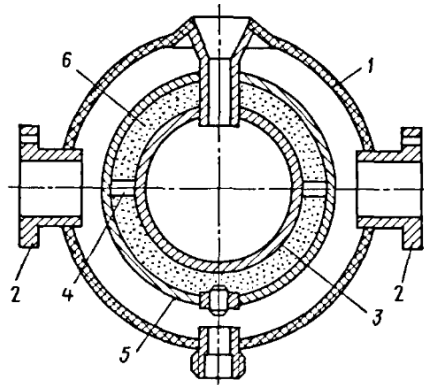


Рис. 176. Сферический криoadсорбционный насос. 1 – корпус; 2 – подсоединительные патрубки; 3 – резервуар для криогенной жидкости; 4 – экваториальное ребро; 5 – пористый экран; 6 – адсорбент [4, с. 514]

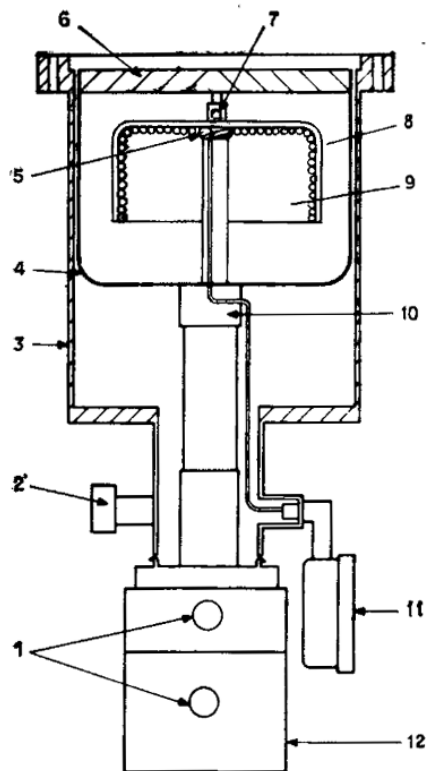


Рис. 177. Типичный малый крионасос. 1 – трубопроводы гелия; 2 – фланец для подсоединения форвакуумного насоса; 3 – корпус; 4 – теплозащитный экран; 5 – чувствительный элемент водородного термометра; 6 – теплозащитный экран типа «жалюзи»; 7 – вторичный контур охлаждения; 8 – криопанель; 9 – поверхность криопанели, покрытая активированным углем; 10 – первичный контур охлаждения; 11 – водородный термометр; 12 – привод [10, с. 128]

На рис. 177 показан малогабаритный адсорбционный крионасос, используемый в малых вакуумных установках.



Рис. 178. Криогенные насосы ICP250N
[<https://avacuum.ru/rus/pumps/cryopumps/g513/>]



Рис. 179. Криогенные насосы CP900LN
[<https://avacuum.ru/rus/pumps/cryopumps/g514/>]

Применение крионасосов обеспечивает безмаслянную откачку до высокого и сверхвысокого вакуума. Они бесшумны в работе и имеют неограниченный срок службы при правильной эксплуатации. Недостатком является необходимость периодической регенерации и высокая стоимость криоаппаратуры.

Некоторые современные крионасосы показаны на рис. 178 и 179.

v42 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрено такое важное для химии и химической технологии понятие, как вакуум. Освещены вопросы, касающиеся теоретического фундамента науки о вакууме – разделов молекулярной физики, раскрывающие законы распределения молекул по импульсам, скоростям и энергиям; основные положения теории вакуумной техники, касающиеся взаимодействия молекул между собой и с элементами вакуумных камер. Разобраны распределения Максвелла, Больцмана и Гиббса. Показан вывод основных соотношений вакуумной техники – средней скорости молекул, длин свободного пробега, частоты соударений со стенками камеры, обосновано понятие о степенях вакуума.

В издании достаточно подробно проанализированы средства создания вакуума. Рассмотрены устройство и принцип действия механических вакуумных насосов, струйных средств откачки, а также геттерных и крионасосов.

В планируемом к выпуску следующем учебном пособии будут рассмотрены средства измерения вакуума, измерение вакуума в потоке молекул и некоторые другие вопросы

Пособие закладывает у будущих специалистов базовые основы для успешного решения прикладных задач в области химии и химической технологии и предназначено для оказания помощи обучающимся в более продуктивном овладении знаниями и навыками для практической работы на производстве и в научных учреждениях.

v43 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чём состоит различие в подходах описания распределений молекул Максвелла, Больцмана и Гиббса?
2. Что такое средняя скорость движения молекул, среднеквадратичная скорость?
3. Чем определяется частота столкновений молекул?
4. Как определяется средняя частота бомбардировки поверхности молекулами?
5. Понятие степеней вакуума; какой критерий при этом используется?
6. Чем объяснить то, что коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности газа не зависят от давления в области низкого вакуума?
7. Определение понятия сверхвысокого вакуума.
8. Принцип действия молекулярных насосов.
9. Влияние рода откачиваемого газа на быстроту действия турбомолекулярного насоса.
10. Для чего используются вакуумные ловушки?
11. Различие между эжекторными и диффузионными пароструйными насосами.
12. Назначение фракционирующих устройств в пароструйных насосах.
13. Какие способы передачи тепла эффективны при высоком вакууме?
14. Режимы течения газа в вакуумных системах.
15. От чего зависит величина средней длины свободного пробега молекул газа?
16. Чем отличается физическая адсорбция от хемосорбции; почему при хемосорбции происходит образование только одного мономолекулярного слоя газа?
17. Чем отличаются закономерности растворимости газов в конструкционных и геттерных материалах?
18. В чём состоит принцип ионной откачки?
19. В каких случаях эффективно применение ионно-сорбционной откачки?
20. Почему геттерные насосы не откачивают инертные газы?

21. Какие материалы используются в качестве геттера в ионно-сорбционных насосах?

22. Какие способы распыления активного вещества используются в ионно-сорбционных насосах?

23. Как увеличить быстроту действия магниторазрядных насосов при откачке инертных газов?

24. В чём состоит саморегулирование скорости распыления катодов магниторазрядных насосов в зависимости от степени вакуума?

25. Какие хладоагенты применяются для охлаждения заливных криосорбционных насосов?

26. Чем определяется предельное давление криосорбционных насосов?

27. Какие типы адсорбентов находят применение в адсорбционных вакуумных насосах?

28. В чем заключается преимущество адсорбционных насосов перед конденсационными?

(При составлении некоторых вопросов использовано [7]).

у44 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Использованная литература:

1. Васильев А.М. Введение в статистическую физику. М: Высшая школа. 1980. 272 с.
2. Ерёмин Е.Н. Основы химической термодинамики. М.: Высшая школа. 1974. 344 с.
3. Лобко В.Н. Теоретические и экспериментальные аспекты обеспечения химических и химико-технологических процессов. Температура. Теория и метрология. Учебное пособие (электронное издание) / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых; Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 163 с.
4. Вакуумная техника. Справочник. 3-е изд. перераб. и доп. – Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М. Машиностроение. 2009. 590 с.
5. Основы вакуумной техники / А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Б.И. Королёв, В.И. Кузнецов. 2-е изд., перераб и доп. М: Энергоиздат. 1981. 432 с.
6. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники / Под ред. М. И. Меньшикова. М.: Мир, 1964. 715 с.
7. Розанов Л.Н. Вакуумная техника Изд. 3-е, перераб. и доп. М. ВШ. 2007. 401 с.
8. Основы вакуумной техники / Б.И. Королёв, В.И. Кузнецов, А.И. Пипко, В.Я. Плисковский. М: Энергия. 1975. 416 с.
9. Вакуумная техника. Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. – Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. М. Машиностроение. 1992. 472 с.
10. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума. М.: Мир, 1988. 368 с
11. Penning F.M. Philips Technology Review. V. 2. P. 201. 1937.

Дополнительная литература

1. Левин Г. Основы вакуумной техники. М.: Энергия. 1969. 272 с.
2. Вакуумная техника: учеб. пособие / А. А. Лебедев [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. 63 с.

3. Галеев И.Г., Ханнанов Р.Б. Теоретические основы вакуумной техники. Учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2015. 64 с.
4. Беркин А.Б., Василевский А.И. Физические основы вакуумной техники. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2014. 84 с.
5. Шешин Е.П. Основы вакуумной техники. ФФКЭ / МФТИ. 2001. 122 с.
6. Контор Е.И. Геттерные и ионно-геттерные насосы. М: Машиностроение. 1977. 64 с.
7. Попов М.М. Термометрия и калориметрия. Второе издание, полностью переработанное. М: Изд. Московского университета. 1954. 943 с.
8. Фролов Е.С. Турбомолекулярные вакуум-насосы. М.: Машиностроение, 1980. 119 с.
9. Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. М-Л, Энергия. 1965. 400 с.

Учебное электронное издание

ЛОБКО Владимир Николаевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вакуумная техника

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

*Изображение, размещенное на обложке издания, взято из открытых источников:
<https://vactime.net/articles/post/vakuum-kosmos-prostranstvo-i-vremya>*

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows 7/10; встроенный проигрыватель видеофайлов; Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Институт биологии и экологии
кафедра химии
lobko_vn@vlsu.ru