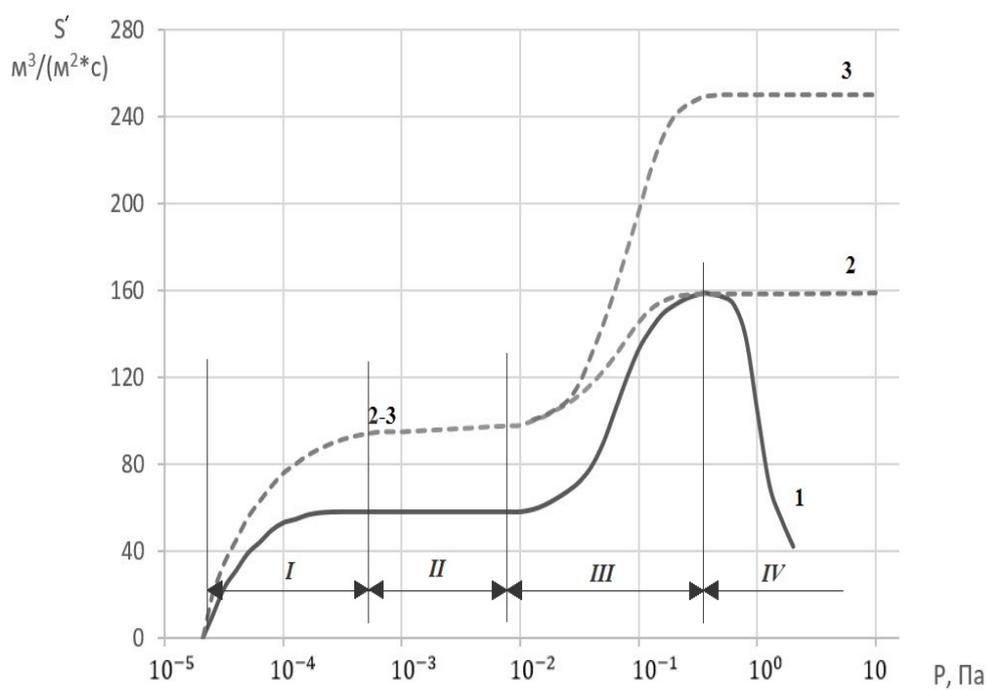


В.И. Иванов, Е.В. Соколова

КРИОВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.И. Иванов, Е.В. Соколова

КРИОВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 16.04.03
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры



Санкт-Петербург

2017

Иванов В.И., Соколова Е.В. Криовакуумные системы: Учебное пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2017. – 77 с.

Рецензенты:

Игнатов Ю.Я., к.т.н., ген.директор ООО «Адсорбционная техника»;

Малышев А.А., к.т.н., с.н.с, доцент кафедры ХТиВЭ

Изложены основы теории и конструктивные особенности криогенных средств создания вакуума. Приводятся характеристики теплозащитных экранов, применяемых в криовакуумных системах, и способы их термостатирования. Излагается методика расчета процесса охлаждения криогенных жидкостей путем вакуумирования. Дан пример расчета криоконденсационного вакуумного насоса.

Пособие предназначено для работы студентов направления магистратуры 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной и заочной форм обучения по дисциплинам «Криовакуумные системы» и «Вакуумные технологии в криогенной технике».



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Иванов В.И., Соколова Е.В., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КРИОГЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ.....	5
1.1 Газодинамические аспекты криогенной откачки газов.....	9
1.2 Быстрота откачки крионасоса.....	10
1.3 Коэффициент откачки и коэффициент захвата молекул газа криоповерхностью.....	15
1.4 Приближенный метод определения быстроты действия криовакуумного насоса сложной структуры.....	19
1.5 Конструктивные схемы криоконденсационных вакуумных насосов.....	21
1.6 Криoadсорбционные вакуумные насосы.....	30
1.7 Сорбционно – конденсационные насосы.....	37
1.8 Низкотемпературные диффузионные насосы.....	40
2. ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ЭКРАНЫ.....	43
2.1 Непроницаемые экраны.....	43
2.2 Экраны типа жалюзи.....	51
2.3 Системы термостатирования экранов.....	55
3. ОХЛАЖДЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПУТЕМ ВАКУУМИРОВАНИЯ.....	59
3.1 Метод вакуумирования парового пространства над зеркалом жидкости.....	59
3.2 Схемы систем охлаждения жидких криоагентов вакуумированием.....	59
3.3 Расчет процесса охлаждения жидких продуктов вакуумированием.....	62
4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КРИОВАКУУМНЫХ НАСОСОВ...	65
4.1 Расчет криоконденсационного вакуумного насоса наливного типа	65
4.2 Расчет методом Монте–Карло коэффициента захвата криопанелей.....	71
ЛИТЕРАТУРА.....	77

ВВЕДЕНИЕ

Без криогенных и вакуумных технологий немыслимо развитие современной науки и техники. Космонавтика, энергетика, электроника и многие другие отрасли нуждаются в вакуумных системах, обеспечивающих практически любую быстроту действия и необходимый вакуум при жестких требованиях к его чистоте. Решение проблемы было найдено в использовании криогеники для создания вакуума. Кривооткачка, по существу, объединяет три родственных способа: криосорбцию, криоконденсацию (десублимацию) и криозахват, как правило, сопутствующих друг другу.

Общим для них является то, что при взаимодействии молекул откачиваемого газа с поверхностями, охлажденными до криогенных температур, т.е. ниже 120 К, протекают процессы физической адсорбции, хемосорбции, конденсации, в результате которых свободные молекулы газов связываются на данных поверхностях.

Помимо использования криогеники, для создания вакуума широкое применение нашли криовакуумные системы, в которых охлаждение жидких криопродуктов осуществляется путем их вакуумирования.

Третья тема, рассматриваемая в данном учебном пособии, посвящена тепловым экранам в криовакуумных системах.

Пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения для всех форм обучения по дисциплинам «Кривовакуумные системы» и «Вакуумные технологии в криогенной технике».

1. КРИОГЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Криогенные методы получения вакуума нашли практическое применение лишь во второй половине XX столетия. Однако сами идеи, которые лежат в основе данных способов создания вакуума, были известны гораздо раньше. Так, ещё в 1825 году Дюма достиг разрежения, вытеснив воздух из сосуда водяным паром и затем сконденсировав последний, охладив сосуд. Таким образом, был реализован конденсационный принцип создания вакуума. В 1874 году Тайм и Дьюар использовали возрастающую адсорбцию газов активированным углем при его охлаждении для получения вакуума, осуществив тем самым второй принцип создания вакуума – адсорбционный. Развитие криогеники открывало широкие возможности перед этими методами получения вакуума.

Большой вклад в развитие криогенных конденсационных и адсорбционных методов получения высокого вакуума внесли сотрудники Харьковского физико – технического института. Создание в 1957 году под руководством Б.Г. Лазарева и Е.С. Боровика вакуумного насоса ВК – 4 [1], в котором впервые поверхность конденсации охлаждалась жидким водородом, было рождением новой области вакуумной техники – криоконденсационного метода создания вакуума.

В 1957 году в СССР был запущен первый искусственный спутник Земли, что открыло эру освоения космического пространства. Поскольку всесторонняя проверка и отладка космических аппаратов и его бортовых систем в наземных условиях позволяет существенно повысить их надежность, начинается интенсивное строительство установок, моделирующих условия космического пространства. В таких установках требовалось обеспечить весьма низкие давления (до $p < 10^{-8}$ Па) при больших газоотделениях, что делало необходимым разработку устройств откачки с огромной быстротой действия (до 10^5 м³/с). Требования техники имитации в наземных условиях космического пространства стали мощным фактором, определившим бурное развитие вакуумной техники в целом и криогенных методов откачки, в частности. Именно в это время начинают широко применяться встроенные криогенные конденсационные насосы, позволяющие успешно имитировать как «холод», так и вакуум космического пространства.

Отсутствие движущихся частей (кроме насосов на базе криогенных газовых машин) делает конструкции крионасосов простыми и надежными. Они не создают при работе вибрации, не возбуждают электрические и магнитные поля, не загрязняют откачиваемые объекты рабочим веществом (маслом, ртутью), т.е. обеспечивают «чистый» вакуум.

Кроме того, весьма важной характеристикой криогенных высоковакуумных насосов является низкий расход энергии на откачку. При быстроте действия более $1 \text{ м}^3/\text{с}$ они стоят вне конкуренции по этому показателю, что хорошо иллюстрирует рис.1.1.

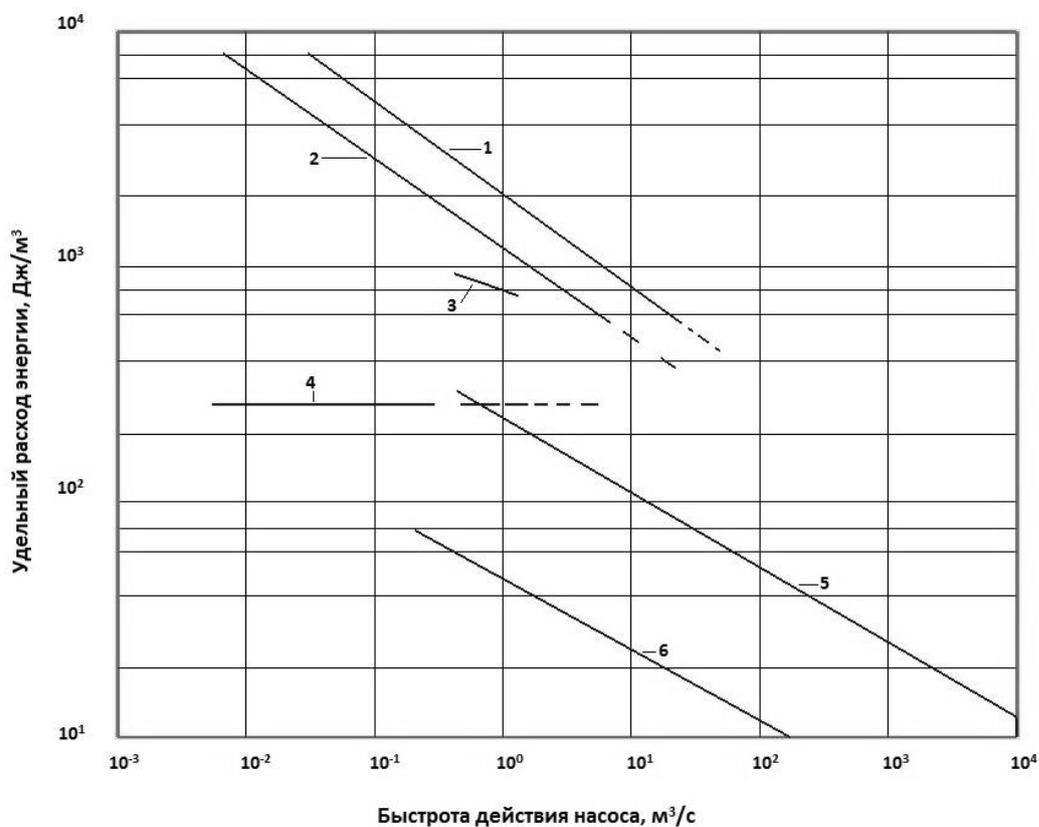


Рис.1.1 Зависимость расхода энергии на откачку 1 м^3 азота от быстроты действия высоковакуумного насоса:

- 1 – диффузионные насосы с охлаждаемыми ловушками; 2 – диффузионные насосы без ловушек; 3 – турбомолекулярные насосы; 4 – геттерно–ионные насосы; 5 – криоконденсационные насосы наливного типа, использующие жидкий гелий; 6 – криоконденсационные насосы на базе гелиевых рефрижераторных установок (4,5 К)

На рисунке приведены осредненные значения расхода энергии на откачку 1 м^3 азота для высоковакуумных насосов различного типа в зависимости от их быстроты действия. Следует

отметить, что данные по крионасосам (кривые 5 и 6) получены для случая, когда криопанель охлаждается жидким гелием. В ряде случаев достаточной температурой криопанели может быть 20 К, что уменьшает расход энергии на охлаждение, а следовательно, и на откачку примерно в 5 раз.

В настоящее время разработкой криогенных вакуумных насосов занимаются многие фирмы практически во всех развитых в техническом отношении странах. Весомый вклад в развитие этой области вакуумной техники внесли отечественные ученые и конструкторы. Вот лишь несколько примеров сказанному выше.

В период с 1970 по 1990 годы в НПО «Криогенмаш» разрабатывается целый ряд крупных криоконденсационных и высокоэффективных криoadсорбционных вакуумных насосов, включая насосы с быстротой действия 100 м³/с и более. Изготавливаются термобарокамеры большого объема для имитации космических условий.

В НПО «Сибкриотехника» выпускается целая серия компактных криовакуумных насосов на базе малогабаритных криогенных газовых машин.

Для создания и поддержания высокого и сверхвысокого вакуума в объектах различного назначения АОЗТ «Криогенные и вакуумные системы» («Криовакс», г. Санкт–Петербург) изготавливает ряд модификаций очень экономичных сверхвакуумных агрегатов с криогенными насосами наливного типа. Период между дозаливками гелия в них составляет около трех месяцев.

Все виды вакуумных насосов – это насосы поверхностного действия. Обязательным элементом таких насосов является поверхность, которая способна удерживать попадающие на неё молекулы газа. Таковую поверхность размещают в замкнутом объеме и часто называют сорбирующей независимо от того, каков физический механизм поглощения ею молекул: конденсация, адсорбция или хемосорбция.

В зависимости от давления откачиваемого газа различают крионасосы для низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума. В насосах может реализовываться какой–то один механизм поглощения газа: конденсация либо сорбция или сочетания их, как например, в насосе, схема которого показана на рис. 1.2. Криогенные элементы насоса помещаются в корпус насоса

1, имеющий температуру окружающей среды. Теплозащитный экран 2, криопанели 3 и 4 представляют ступени откачки. Откачиваемый газ, проходя через оптически плотную решетку типа жалюзи теплозащитного экрана, охлаждается и освобождается от паров и газов, которые десублимируются на поверхности с температурой около 80 К. Это первая ступень откачки, которая позволяет связывать пары H_2O , CO_2 и некоторые другие газы. Кроме того, теплозащитный экран 2 защищает более низкотемпературную конденсационную криопанель 3 от тепловых потоков со стороны вакуумной камеры и стенок корпуса насоса.

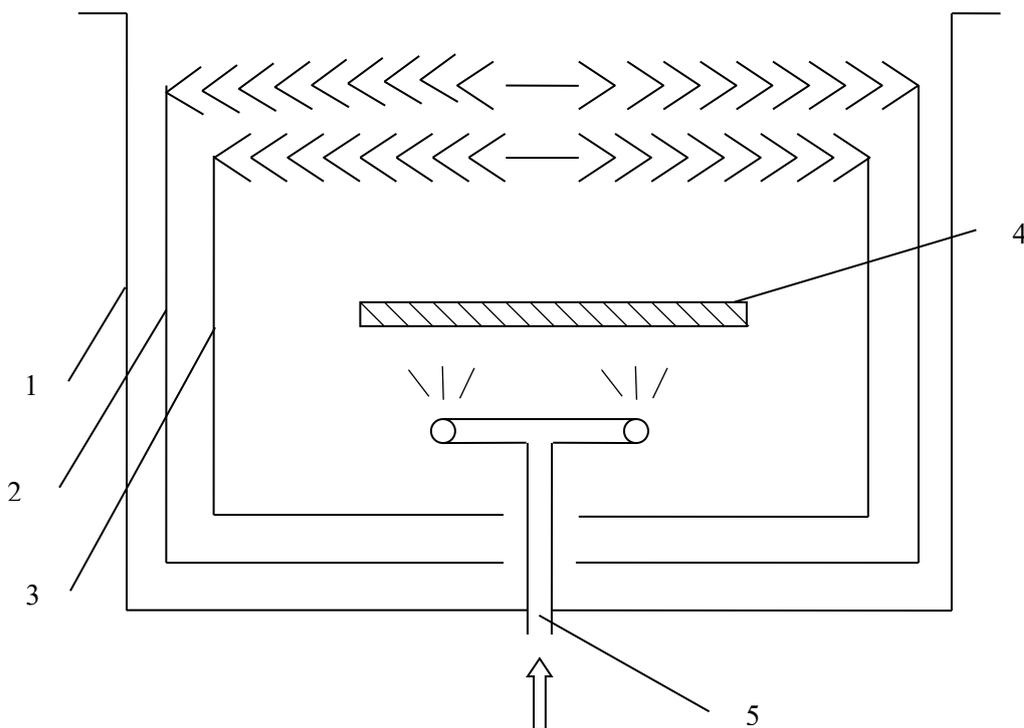


Рис.1.2 Схема комбинированного криовакуумного насоса:
 1 – корпус ($T \approx 300 \text{ K}$); 2 – теплозащитный экран ($T \approx 80 \text{ K}$);
 3 – криоконденсационная панель ($T < 20 \text{ K}$);
 4 – криoadсорбционная панель ($T < 20 \text{ K}$); 5 – вход газа адсорбента (CO_2 или Ar)

На конденсационной панели 3 десублимируются практически все газы, такие как N_2 , O_2 , CO , Ar и т.д., кроме Ne , H_2 и He . Это вторая конденсационная ступень откачки. Криопанель 3 экранирует самую низкотемпературную третью ступень откачки, которая поглощает трудноконденсируемые Ne , H_2 и He . Поглощение этих газов осуществляется адсорбцией либо на гранулах активного угля или цеолита, либо газом – сорбентом, например, CO_2 , Ar , H_2O ,

которые намораживаются на тыльной стороне криопанели 4 и являются сами эффективными адсорбентами.

Быстрое и широкое внедрение крионасосов в различные технологические процессы обусловлено целым рядом их достоинств указанных выше. Вместе с тем сравнительная простота устройства криовакуумных насосов позволяет достаточно легко интегрировать их в откачиваемый объект, что повышает общую эффективность последнего.

1.1. Газодинамические аспекты криогенной откачки газов

Размещение в каком-либо замкнутом пространстве криоповерхности уже само по себе вызывает нарушение равновесного состояния окружающей среды из-за появляющейся температурной неоднородности. Тем более размещение криоповерхности, на которой происходит поглощение газа, равнозначно введению в эту систему стока молекул. Поэтому совершенно очевидно, что сорбция газа на криоповерхности неизбежно ведет не только к нарушению максвелловского распределения молекул по скоростям, но и к возникновению анизотропности поля плотности газа в системе. Причем, чем интенсивнее криоповерхность отводит из окружающего его пространства молекулы, тем в большей степени нарастает указанное отклонение от равновесности.

Таким образом, на основе соотношения кинетической теории равновесного газа более или менее точно рассчитать быстроту откачки идеального крионасоса можно лишь в том случае, если криоповерхность не вносит заметного возмущения в максвелловское распределение молекул газа по скоростям. Это условие выполняется тогда, когда криоповерхность размещена в объекте, значительно превышающем ее по размерам, а давление настолько низкое, что столкновениями молекул газа между собой можно пренебречь. Увеличение размеров криоповерхности или повышение давления в объекте приводит к возникновению направленности потока в сторону криоповерхности. В первом случае это связано с направленным движением всей массы газа в сторону криоповерхности, а во втором – с появлением градиента давления и газодинамическим разгоном газа.

При работе крионасоса в переходном, а тем более вязкостном режимах течения газа криоповерхность ведет себя как выходное отверстие звукового сопла или как отверстие, разделяющее области высокого и низкого давлений. В этом случае, вследствие газодинамического разгона, скорость газового потока, набегающего на криоповерхность, может достичь местной скорости звука.

Особой спецификой отличается криооткачка газовых струй, истекающих из сопел. При высоких значениях числа Маха траектории движения молекул по существу представляют собой прямые лучи, расходящиеся от сопла. Появляется возможность использовать эту определенную направленность струй для повышения эффективности откачки.

1.2 Быстрота откачки крионасоса

Быстроту действия криовакуумного насоса можно представить соотношениями между следующими потоками молекул:

N_0 – число молекул, поступающих на криоповерхность за единицу времени;

N_1 – число молекул, отраженных криоповерхностью при столкновении с ней за единицу времени;

N_2 – число молекул, покидающих криоповерхность в результате испарения или десорбции ранее осевшего на ней газа за единицу времени.

Эффективность процессов, протекающих при криооткачке, характеризуется соответствующими коэффициентами. Коэффициент конденсации (сорбции):

$$\alpha_k = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \quad (1.1)$$

показывает, какая часть молекул задерживается на криоповерхности при первом контакте с ней.

Коэффициент испарения (десорбции) учитывает, что реальная интенсивность процесса обычно уступает идеальному случаю:

$$\alpha_u = \frac{N_2}{N_s}, \quad (1.2)$$

где N_s – максимальная интенсивность испарения с криповерхности при равновесном состоянии.

Коэффициент откачки позволяет учесть снижение интенсивности откачки как из-за отражения части молекул от криповерхности, так и от испарения:

$$\alpha = \frac{N_0 - N_1 - N_2}{N_0}. \quad (1.3)$$

Значения быстроты откачки криповерхностью при различных режимах течения откачиваемого газа могут быть рассчитаны, исходя из известных соотношений кинетической теории газов и газовой динамики.

В случае молекулярного режима и максвелловского распределения молекул по скоростям поток газа, поступающий на криповерхность равен [2]:

$$S_o = \frac{1}{4} \cdot Aw_a = 36,4 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (1.4)$$

где A – площадь поверхности;

w_a – средняя арифметическая скорость молекул;

T – температура откачиваемого газа;

M – молекулярная масса газа.

При этом на криповерхности будет конденсироваться поток:

$$S_1 = 36,4 \cdot \alpha_k \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (1.5)$$

и одновременно испаряться поток:

$$S_2' = 36,4 \cdot \alpha_u \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T_s}{M}}, \quad (1.6)$$

где T_s – температура конденсата.

Следует учесть, что S_1 – это объемный расход газа при давлении p_o и температуре T_o в объекте откачки, в то время как S_2' – это объемный расход при температуре конденсата T_s и соответствующем этой температуре давлении насыщения p_s . Чтобы можно было корректно сопоставить эти два объемных расхода, следует привести их к единым условиям, например, к параметрам в объекте откачки. Тогда:

$$S_2 = \frac{S_2' \cdot p_s}{T_s} \cdot \frac{T_o}{p_o} = 36,4 \cdot \alpha_u \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T_o}{M}} \cdot \frac{p_s}{p_o} \sqrt{\frac{T_o}{T_s}}. \quad (1.7)$$

С учетом 1.5 и 1.7 скорость откачки газа из объекта в молекулярном режиме составит:

$$S_m = S_1 - S_2 = 36,4 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T_o}{M}} \cdot \left(\alpha_k - \alpha_u \cdot \frac{p_s}{p_o} \sqrt{\frac{T_o}{T_s}} \right). \quad (1.8)$$

При значительном перенасыщении, когда $p_o \gg p_s$, доминирующим является процесс конденсации, а испарением можно пренебречь. В этом случае S_m практически не зависит от давления откачиваемого газа. Лишь тогда, когда давление в объекте p_o приближается к величине давления насыщения p_s и с учетом тепловой транспирации, т.е. $p_o \rightarrow p_s \cdot \sqrt{T/T_s}$, откачка газа криоповерхностью падает. В равновесном состоянии скорость конденсации становится равной скорости испарения, а результирующая скорость откачки падает до нуля. В этом случае коэффициенты α_k и α_u равны между собой. Полагая, что при наличии перенасыщения равенство коэффициентов α_k и α_u не нарушается, уравнение 1.8 можно представить в ином виде:

$$S_m = 36,4 \cdot A \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{T_o}{M}} \cdot \left(1 - \frac{p_s}{p_o} \sqrt{\frac{T_o}{T_s}} \right), \quad (1.9)$$

где α – коэффициент откачки, который более обобщенно, чем коэффициенты α_k и α_u характеризует эффективность процесса криооткачки.

Как указывалось выше, уравнение 1.9 может быть использовано для расчета быстроты действия крионасоса лишь в том случае, если криоповерхность не вносит заметного возмущения максвелловского распределения молекул газа по скоростям.

При откачке в вязкостном режиме течения газа газодинамический разгон может реализоваться в полной мере. При равенстве коэффициента откачки единице, т.е., когда будет отсутствовать обратный поток с поверхности, она становится адекватной выходному отверстию звукового сопла. В этом предельном случае поток перед криоповерхностью действительно может достичь местной скорости звука [3]:

$$\alpha_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_o T_o}{M}}, \quad (1.10)$$

а быстрота действия крионасоса составит:

$$S_b = A \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_o T_o}{M}}. \quad (1.11)$$

При этом статическое давление в потоке непосредственно перед криопанелью снизится до

$$p_{кр} = p_o \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (1.12)$$

а плотность газа до

$$\rho_{кр} = \rho_o \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (1.13)$$

В трех последних уравнениях T_o , p_o и ρ_o – соответственно температура, давление и плотность «заторможенного» потока, т.е. на удалении от криопанели;

R_o – универсальная газовая постоянная;

k – показатель адиабаты.

Тогда количество газа откачиваемого криоповоротностью составит:

$$G_g = \alpha \cdot A \cdot \alpha_{кр} \cdot \rho_{кр} = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_o T_o}{M}} \cdot \rho_o \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (1.14)$$

где $\alpha = 1$ – коэффициент откачки.

Учитывая, что

$$p_o \cdot S_g = G_g \cdot R T_o \Rightarrow S_g = G_g \cdot \frac{R T_o}{p_o}$$

можно записать уравнение для определения объемной скорости откачки в вязкостном режиме, приведенной к параметрам газа на удалении от криоповоротности, т.е. к T_o , p_o и ρ_o :

$$S_g = \alpha \cdot A \cdot \frac{R T_o}{p_o} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_o T_o}{M}} \cdot \rho_o \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (1.15)$$

где R – газовая постоянная откачиваемого газа.

Поскольку $\rho_o = \frac{P_o}{RT_o}$,

уравнение для скорости откачки объекта криопанелью в вязкостном режиме в окончательном виде будет:

$$S_g = \alpha \cdot A \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_o T_o}{M}} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (1.16)$$

Результаты экспериментального определения зависимости быстроты действия крионасоса от давления откачиваемого газа перед криопанелью представлены на рис.1.3 (кривая 1). В данном случае криопанель, охлаждаемая жидким азотом ($T_s = 78$ К), откачивала диоксид углерода, имеющий температуру $T_o = 300$ К.

График зависимости S от p можно разбить на четыре участка. На участке I реализуется молекулярный режим при малом перенасыщении откачиваемого газа, т.е. когда давление газа p сопоставимо по величине с упругостью пара p_s при температуре T_s . По мере роста перенасыщения быстрота откачки увеличивается, пока не достигает предела для молекулярного режима. На участке II быстрота откачки остается постоянной, поскольку при большом перенасыщении

$$\frac{p_s}{p_o} \cong 0 \text{ и } S_m = const \text{ (см.уравнение 1.9).}$$

Дальнейшее увеличение давления газа p_o приводит к трансформации молекулярного режима в вязкостный. Формируется ускоряющийся поток газа к криповерхности, в результате чего быстрота откачки вновь повышается (участок III), пока не достигает предела для вязкостного режима (уравнение 1.16).

С увеличением давления откачиваемого газа растет также тепловая нагрузка на криопанель, и ускоряется рост слоя конденсата на криопанели, который имеет заметное термическое сопротивление. В результате повышается температура поверхностного слоя конденсата и, как следствие, растет интенсивность обратного испарения с поверхности слоя конденсата, что приводит к резкому снижению быстроты откачки (участок IV).

На этом же рисунке показано изменение объема газа, набегавшего на криопанель за единицу времени, при переходе от молекулярного режима к вязкостному (кривая 2), для случая, когда все молекулы, попавшие на криопанель, задерживаются ею, что

соответствует коэффициенту откачки $\alpha = 1$. Данная зависимость рассчитана по уравнению 1.9 для молекулярного режима и по уравнению 1.11 – для вязкостного.

Из сопоставления экспериментальной кривой 1 и расчетной 2 следует, что реальный процесс криооткачки CO_2 при указанных выше условиях характеризовался коэффициентом откачки $\alpha \cong 0,6$.

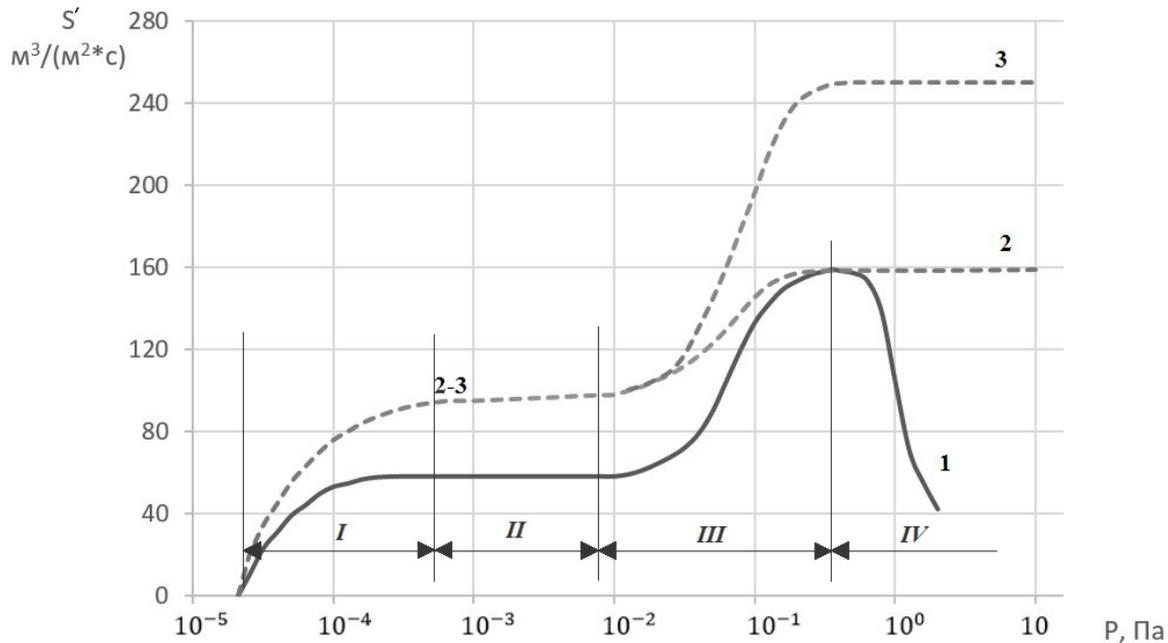


Рис.1.3 Зависимость удельной быстроты действия крионасоса от давления откачиваемого газа

Расчет процесса криооткачки в молекулярном режиме достаточно прост, если известен коэффициент откачки. Это объясняется тем, что определенное количество газа занимает одинаковый объем и у криопанели и на удалении от нее.

Совсем иная картина при вязкостном режиме. При коэффициенте откачки $\alpha = 1$ плотность газа непосредственно у криопанели в 1,6 раза ниже, чем в камере, которая откачивается данной криопанелью (см.уравнение 1.13). В результате на рис.1.3 кривая 2 на участке IV показывает объем газа, поступающий на криопанель за единицу времени (быстроту действия крионасоса), который меньше объема газа удаляемого из объекта откачки за то же время (скорость откачки объекта). Скорость откачки объекта рассчитана по формуле 1.16 и на рис.1.3. изображена линией 3 на участке IV.

1.3 Коэффициент откачки и коэффициент захвата молекул газа криповерхностью

В каком бы режиме течения газа не велась откачка криповерхностью, эффективность процесса, прежде всего, зависит от величины коэффициента откачки. Сложность его определения связана с тем, что он зависит от температуры и рода откачиваемого газа, температуры криопанели, интенсивности теплового потока к криповерхности и многих других факторов. Этим объясняется ненадежность теоретических оценок его величины и то, что при расчетах криовакуумных насосов пользуются опытными данными, хотя и они часто противоречивы.

В таблице 1.1 приведены некоторые усредненные экспериментальные значения коэффициента откачки ряда газов криповерхностями [4].

Таблица 1.1
Усредненные значения коэффициента откачки

Средство откачки	Криоконденсационный насос								Адсорбционный насос
	77				293				
Температура газа, К									293
Температура поверхности, К	4,2	10	15	20	4,2	10	15	20	77
H ₂	0,6	–	0,5	0,4	0,5	0,1	–	–	$3,6 \cdot 10^{-5}$
H ₂ O	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	–	–	–
N ₂	1,0	1,0	0,96	0,84	0,65	0,65	0,62	0,61	$7 \cdot 10^{-3}$
Воздух	1,0	1,0	–	0,78	0,69	0,69	0,68	0,67	$2,7 \cdot 10^{-3}$
O ₂	1,0	1,0	1,0	1,0	–	–	–	0,86	–
CO ₂	1,0	1,0	1,0	1,0	–	0,76	0,67	0,64	1,0

Данные, приведенные в таблице 1.1, показывают, что для эффективной криогенной откачки газов необходимо охлаждать криповерхность до более низких температур, затрачивая дополнительную энергию. Но и в этом случае не всегда удается достичь высоких значений коэффициента откачки. Однако, если геометрия криповерхности такова, что отраженные при первом столкновении с ней молекулы газа вновь попадают на поглощающую поверхность, то эффективность откачки резко возрастает. Это объясняется тем, что отраженные молекулы, потеряв энергию при первом столкновении с криповерхностью,

при повторном столкновении поглощаются с вероятностью близкой к единице. Эффективность откачки таких криповерхностей со сложной геометрией характеризуется коэффициентом захвата γ , который численно равен отношению числа оставшихся молекул в рассматриваемой конструкции крионасоса к числу влетевших через её входное отверстие за то же время [5].

На рис.1.4 показана эффективность криповерхности, имеющей форму открытого цилиндра. Поглощающими являются все её внутренние поверхности. Особенно привлекательна такая конструкция криповерхности, когда мал по величине коэффициент откачки α . Из рис.1.4 также следует, что оптимальное соотношение глубины цилиндра к его диаметру не должно превышать 2–2,5, поскольку при изотропном распределении скоростей основная часть влетающих молекул сталкивается со стенкой цилиндра непосредственно у входа. Однако, если молекулы имеют доминирующее направление движения вдоль оси цилиндра, то увеличение отношения $L/D > 3$ будет давать положительный эффект.

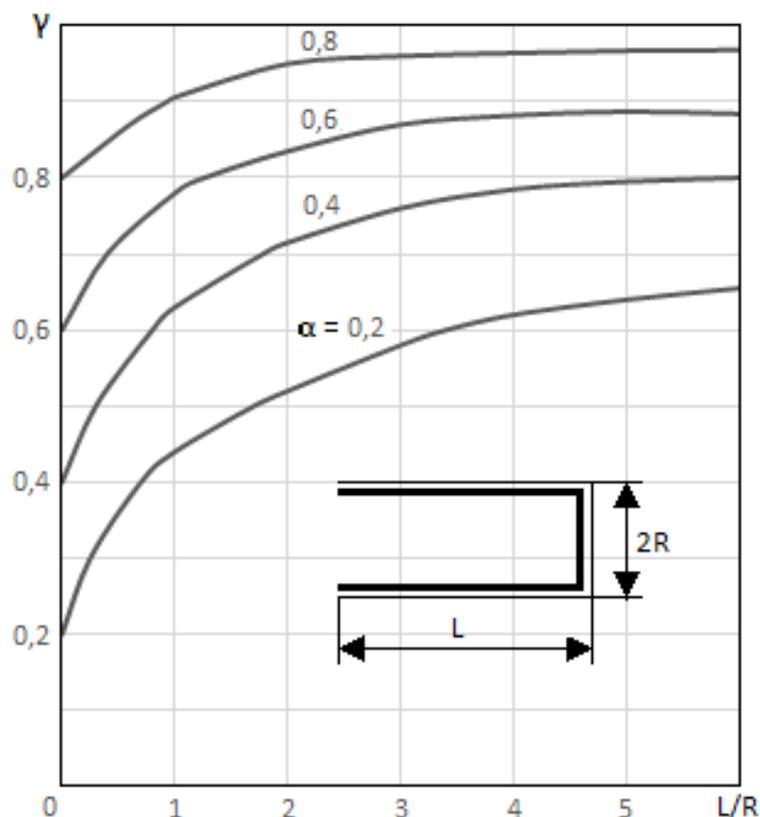


Рис.1.4 Коэффициент захвата криповерхности в виде цилиндрической ячейки при различных значениях коэффициента откачки. Распределение молекул изотропное

На рисунках 1.5 и 1.6 показано изменение коэффициента захвата конструкций в виде плоской поглощающей поверхности, установленной у дна цилиндра, вход в который перекрывает экран типа жалюзи проводимостью 0,15 или 0,25. Переменными величинами на этих графиках являются коэффициент откачки криоповерхности α и отношение размеров L/R . Определяющее влияние на эффективность крионасосов такой конструкции оказывает проводимость экранов, а поглощающую поверхность желательно располагать непосредственно за экраном.

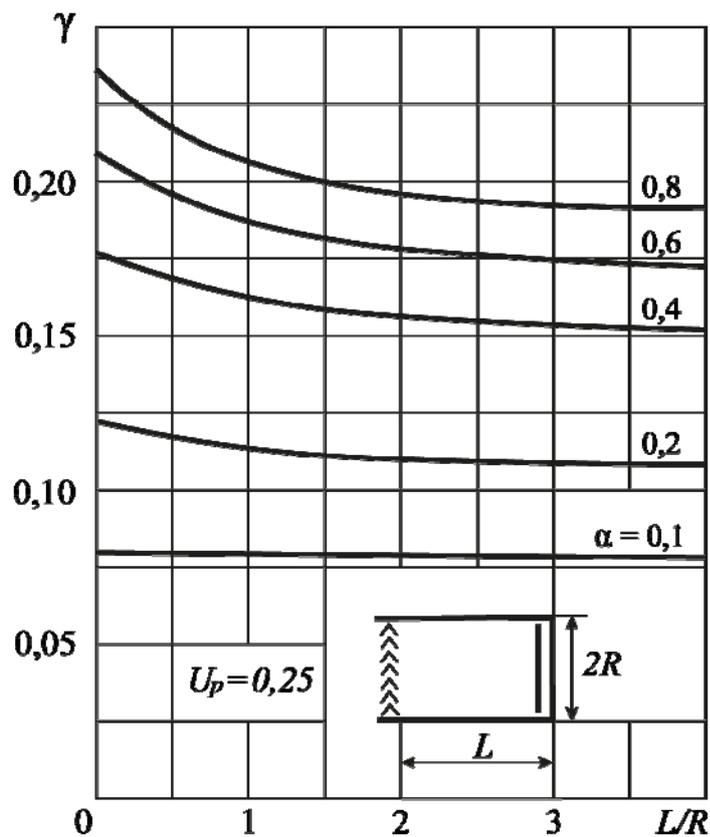


Рис.1.5 Коэффициент захвата криоповерхности в виде плоской поглощающей поверхности

На рисунке 1.7 приведена зависимость коэффициента захвата от α и L/R для криовакуумного насоса, образованного двумя концентрично расположенными цилиндрическими криоповерхностями. Для такой конструкции особенно сильно проявляется зависимость коэффициента захвата от глубины щелевого канала, имеющего входные отверстия в виде кольца между указанными выше цилиндрическими криоповерхностями.

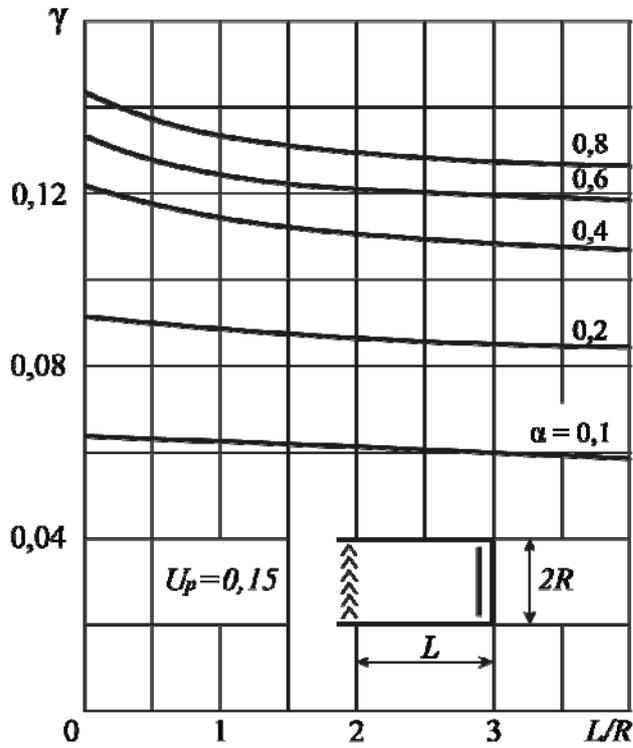


Рис.1.6 Коэффициент захвата криповерхности в виде плоской поглощающей поверхности

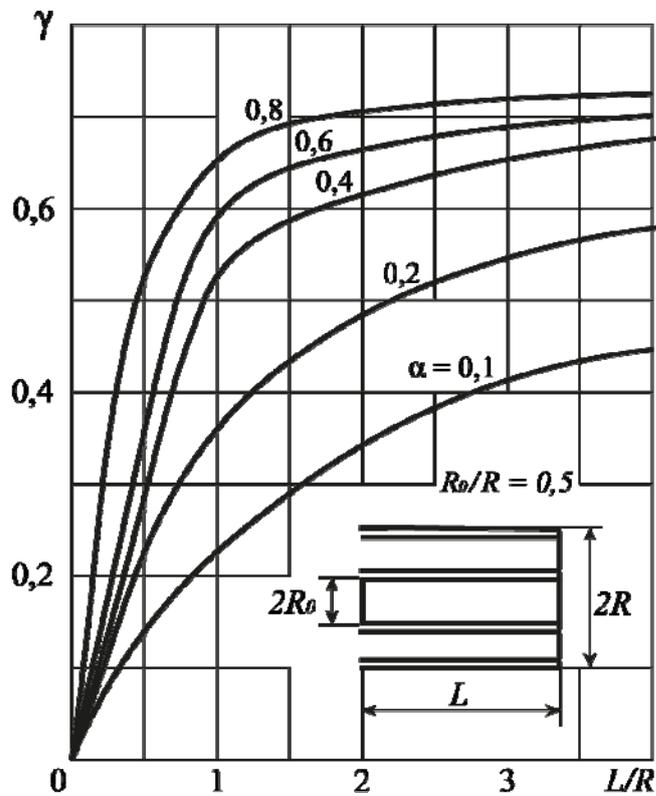


Рис.1.7 Коэффициент захвата криповерхности

1.4 Приближенный метод определения быстроты действия криовакуумного насоса сложной структуры

Достаточно точными методами расчета крионасосов сложной геометрии считаются метод Монте–Карло, метод угловых коэффициентов или интегрально – кинетический метод. Однако все эти методы требуют большого объема вычислений. На первом этапе проектирования крионасосов можно применять приближенный, но простой и универсальный метод, дающий приемлемую точность [5]. Он состоит в приведении кажущейся быстроты действия сорбирующей поверхности к входному отверстию насоса. Под кажущейся быстротой действия понимается величина:

$$\sum S_i F_i = 36,4 \sqrt{\frac{T}{M}} \sum \alpha_i F_i, \quad (1.17)$$

где T и M – температура и молекулярная масса откачиваемого газа; α_i и F_i – коэффициент откачки и площадь поверхности элементарной сорбирующей поверхности.

Суммирование ведется по всем сорбирующим поверхностям, составляющим структуру крионасоса.

С учетом проводимости входного отверстия в структуру насоса U_o его быстрота действия находится из основного уравнения вакуумной техники:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{U_o} + \frac{1}{\sum S_i F_i}, \quad (1.18)$$

или

$$S = \sum S_i F_i \left(1 + \frac{\sum S_i F_i}{36,4 F_o \sqrt{\frac{T}{M}}} \right)^{-1}, \quad (1.19)$$

где F_o – площадь входного отверстия в структуру насоса.

Рассмотрим применимость приближенного метода расчета на примере крионасоса, показанного на рис. 1.4. Этот насос имеет форму стакана с сорбирующими стенками. Примем диаметр стакана $d = 1$ м, глубину $l = 2,5$ м, коэффициент откачки $\alpha = 0,4$ м. Тогда

коэффициент захвата (см. рис.1.4) составит $\gamma = 0,8$. Откачиваемый газ – воздух при температуре $T=290$ К.

Быстрота действия данного насоса, рассчитанная по точной методике:

$$S' = 36,4 \gamma \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{T}{M}} = 36,4 \cdot 0,8 \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \sqrt{\frac{290}{29}} = 72,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Быстрота действия насоса, определенная по приближенной методике (уравнение 1.19):

– $F_o = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь входного отверстия в структуру;

– $F_1 = \pi dl$ – площадь поверхности обечайки;

– $F_2 = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поверхности днища;

– $S_o = 36,4 F_o \sqrt{\frac{T}{M}}$ – проводимость входного отверстия

структуры;

– $S_1 = S_2 = 36,4 \alpha \sqrt{\frac{T}{M}}$ – удельная быстрота действия

сорбирующих поверхностей (принято $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 0,4$).

$$S'' = \frac{36,4 \alpha \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\pi dl + \frac{\pi d^2}{4} \right)}{1 + \frac{36,4 \alpha \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\pi dl + \frac{\pi d^2}{4} \right)}{36,4 \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{T}{M}}}}$$

Подставив значения, получаем:

$$S'' = \frac{36,4 \cdot 0,4 \sqrt{\frac{290}{29}} \left(\pi \cdot 1 \cdot 2,5 + \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \right)}{1 + \frac{36,4 \cdot 0,4 \sqrt{\frac{290}{29}} \left(\pi \cdot 1 \cdot 2,5 + \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \right)}{36,4 \cdot \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \sqrt{\frac{290}{29}}}} = 73,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Как следует из приведенных выше расчетов, быстрота действия насоса, определенная по приближенной методике, лишь на 2% превышает точное значение.

1.5 Конструктивные схемы криоконденсационных вакуумных насосов

Достоинства криоконденсационных вакуумных насосов и некоторые конструктивные исполнения приведены в работе [4,6]. В данном разделе изложены специфические области применения данных насосов.

В последние годы появился целый ряд криовакуумных насосов, в которых криогенератором служат газовые криогенные машины. Важным вопросом при разработке таких насосов является выбор мощности криогенератора. Например, в камере для имитации взлета ракеты требуется в течение 4 – 6 мин снизить давление от атмосферного до 10^{-3} Па. Если откачку от атмосферного давления до $10^2 - 10^3$ Па можно быстро осуществить механическими вакуумными насосами, то дальнейшее быстрое снижение давления возможно практически только с помощью криоконденсационных насосов. Поскольку в процессе вакуумирования величина давления снижается на несколько порядков, то, следовательно, и тепловая нагрузка на конденсатор крионасоса также уменьшается примерно во столько же раз.

Очевидно, в данном случае не рационально использовать криогенератор, холодопроизводительность которого соответствовала бы максимальной тепловой нагрузке на конденсатор. Это связано с тем, что возможность регулирования холодопроизводительности ограничена в пределах нескольких десятков процентов, и поэтому в течение большей части времени работы насоса криогенератор использовался бы неэффективно.

Успешным решением задачи можно считать использование конденсаторов, обладающих большой теплоемкостью, в сочетании с маломощными криогенераторами. Большая теплоемкость конденсатора может быть обеспечена, например, если изготовить его из свинца, обладающего большей плотностью и в то же время сохраняющего сравнительно высокую теплоемкость при криогенных температурах.

На рис.1.8 показана вакуумная система, работающая на этом принципе. К откачиваемому объекту 1 через затвор 2 подсоединен

крионасос, состоящий из корпуса 3, конденсатора 4, криогенератора 5 и защитных экранов 6. В качестве криогенератора может быть использована либо газовая криогенная машина, либо водородный или гелиевый рефрижератор.

Для того чтобы эффективно использовать криогенератор в течение всей работы крионасоса, его холодопроизводительность выбрана значительно ниже тепловой нагрузки, которую необходимо отводить от конденсатора в начальный момент откачки. Работоспособность установки обеспечивается тем, что конденсатор обладает большой теплоемкостью. В подготовительный период он изолируется от откачиваемого объекта с помощью затвора 2 и в течение определенного времени охлаждается криогенератором небольшой мощности, аккумулируя его холодопроизводительность. При достаточном охлаждении теплоемкой массы конденсатора крионасос сообщается с откачиваемым объектом, и аккумулированная в течение длительного периода холодопроизводительность криогенератора расходуется в течение короткого промежутка времени. Теплоемкость конденсатора должна быть такой, чтобы вымораживание основной массы газа не вызывало бы чрезмерного повышения температуры свинца и обратной сублимации конденсата.

Рассмотренная установка снабжена рядом вспомогательных вакуумных насосов. Насос 7 служит для откачки изоляционного пространства между экраном и конденсатором; высоковакуумный насос 8 обеспечивает откачку из объекта 1 неконденсирующихся газов, а механический насос 9 осуществляет предварительное вакуумирование объекта от атмосферного давления до $10^2 - 10^3$ Па.

В тех случаях, когда крионасос работает в импульсном режиме, характерном для некоторых типов аэродинамических труб, и должен обеспечивать серию пусков без очистки криопанели от конденсата, более приемлемым может оказаться использование тонкостенных конденсаторов с сильно развитой поверхностью. Теплоаккумулирующей массой в данном случае будет сам конденсат в силу его высокого теплоемкости.

Широко используется криоконденсационный метод откачки в газодинамических установках: аэродинамических трубах с низкой плотностью газа, и камерах испытания ракетных двигателей, в системах аэродинамических молекулярных пучков и т.п. Для всех установок данного типа характерным является то, что при

расширении газа в сопле энергия неупорядоченного теплового движения его молекул трансформируется в энергию направленного течения.

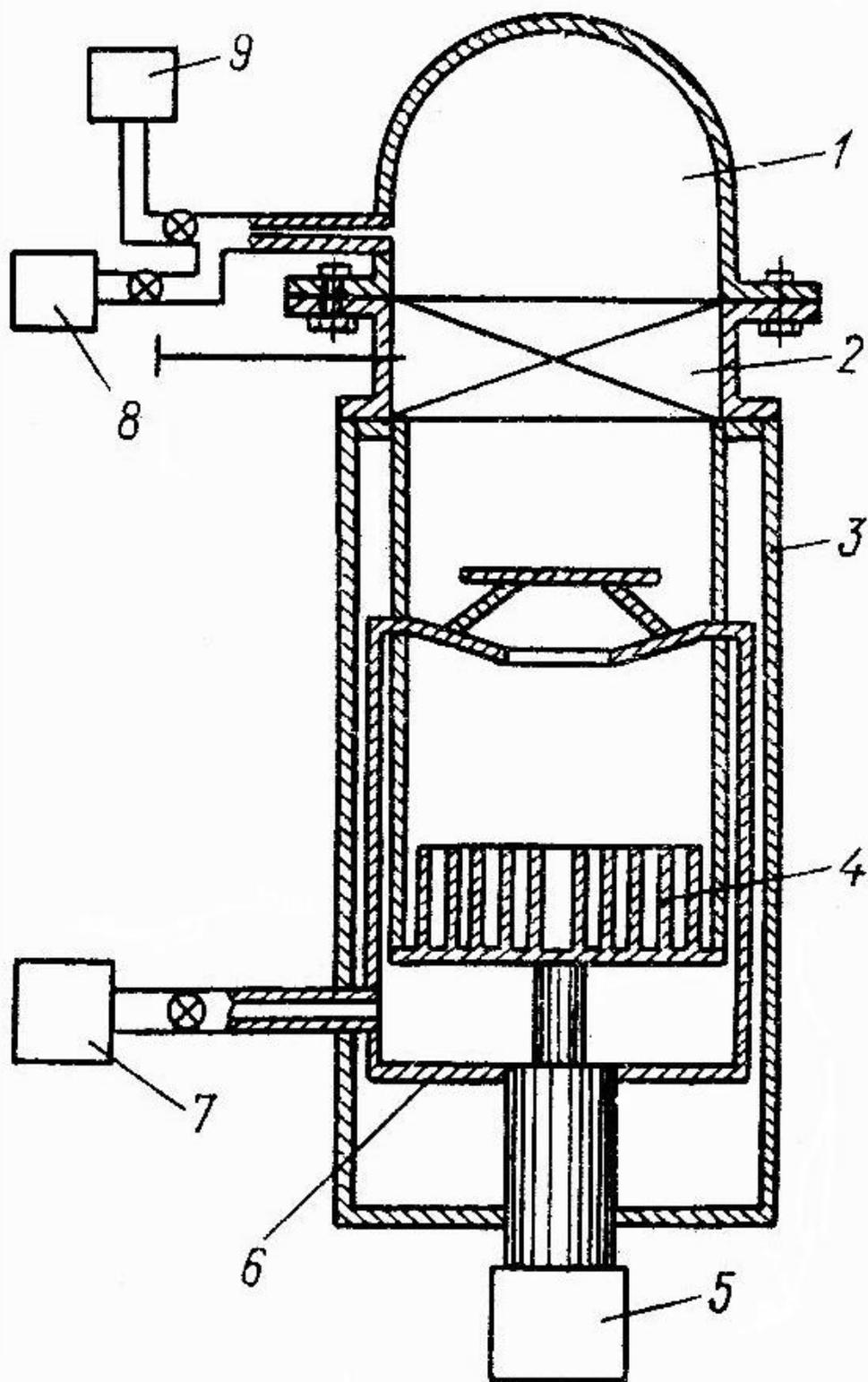


Рис.1.8 Крионасос с аккумуляцией холодопроизводительности криогенератора

При высоких числах Маха траектории движения молекул по существу представляет собой прямые лучи, расходящиеся от сопла. Это обстоятельство используется с целью повышения эффективности откачки. Для этого криопанели ячеистого типа располагают так, чтобы оси ячеек совпадали с траекториями движения молекул откачиваемого газа на данном участке камеры. Молекулы беспрепятственно влетают в глубь ячеек и конденсируются там с вероятностью, близкой к единице.

Конструкция такой системы показана на рис.1.9. В камере 1 размещены ячеистые криопанели 2, по виду напоминающие соты и представляющие собой алюминиевые пластины с приваренными к ним алюминиевыми ячейками. Размеры камеры невелики: около одного метра в диаметре и двух метров в длину. Тем не менее, импульсный выхлоп в нее за одну секунду 26 граммов паров воды вызвал повышения давления лишь до 0,5 Па, т.е. удалось обеспечить объемную быстроту откачки примерно в 6 000 м³/с.

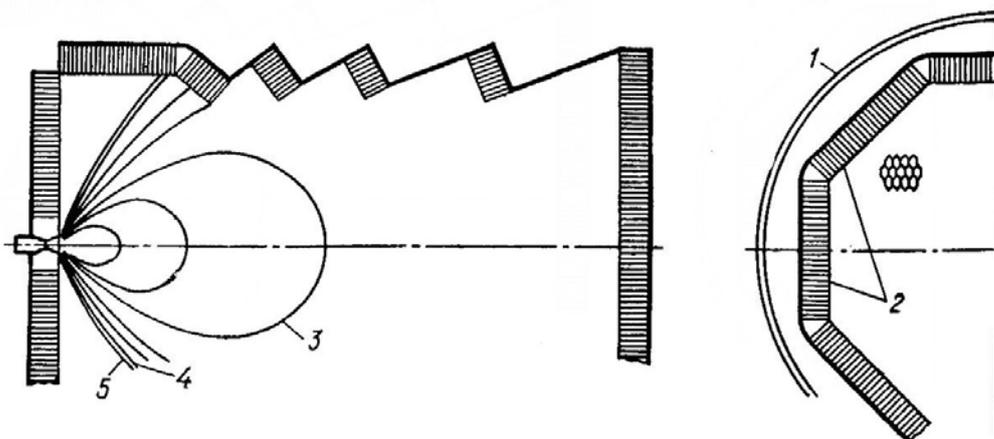


Рис.1.9 Схема крионасоса для откачки выхлопов ракетных двигателей

Рассмотренный тип установок весьма распространен, так как позволяет в полной мере использовать эффект направленности потока для увеличения быстроты действия крионасоса. Особенно это относится к тем газодинамическим системам, в которых рабочим веществом служат такие легкоконденсирующиеся газы и пары, как CO₂, NH₃ или H₂O, а для охлаждения криопанелей применяются дешевый и доступный криоагент – жидкий азот.

В ряде случаев криопанели, охлаждаемые до температуры 15 – 20 К, не защищают азотными экранами. Обычно рабочее давление в таких аппаратах не превышает 10⁻² Па, а массовый расход газа, например азота или воздуха, через сопло очень мал. Защитный

экран или предварительный охладитель газа в данном случае будет не только бесполезен, но даже вреден, так как незначительно снижая тепловую нагрузку на криопанели от конденсации рабочего газа, он в то же время намного снизит быстроту действия крионасоса, тормозя поток и лишая его направленности. Чтобы сохранить быстроту действия насоса на прежнем уровне, необходимо увеличивать габариты криопанелей и расход криоагента на их охлаждение. Кроме того, увеличение габаритов криопанелей ведет к увеличению теплопритоков к ним. Все это справедливо до определенного предела. Когда же требуется в аэродинамической трубе имитировать полет, скажем, со скоростью 6 – 8 км/с, то, чтобы иметь температуру торможения, отвечающую температуре торможения в условиях реального полета, газ перед соплом требуется разогреть до температуры выше 10 000 К. Понятно, что значительные количества столь раскаленного газа нельзя направлять непосредственно на криопанели, так как это потребует больших мощностей криогенераторов. Размещение же перед криопанелями азотных экранов, хотя и дает в данном случае положительный эффект, но, как указывалось выше, лишает возможности использовать эффект направленности струи.

Оригинальное решение задачи предлагают авторы [7]. Суть его понятна из рис.1.10. Ячейки или пластины конденсатора 2 размещаются параллельно направлению газового потока 1. Азотный экран 4, в данном случае не обязательно проницаемый для газа, располагают не перед криопанелью, а за ней. Направленный поток раскаленного газа свободно проходит между пластинами конденсатора и охлаждается на азотном экране. Отраженные от поверхности азотного экрана "остывшие" молекулы диффузно рассеиваются в обратном направлении, и большая их часть конденсируется на пластинах конденсатора.

Часто газовый поток представляет собой смесь газов. В таком случае конденсатор может быть двухступенчатым. Отраженные от азотного экрана молекулы попадают вначале на пластины первой ступени конденсатора, имеющие температуру, например 20 К, а те, что не конденсируются при этой температуре (водород), захватываются пластинами второй ступени 6, имеющими более низкую температуру.

Обширную область применения криогенных вакуумных насосов представляют установки моделирования тепловых режимов

космических аппаратов и окружающей их среды. Поскольку методы масштабного моделирования не всегда приемлемы, особое значение приобретают всесторонние исследования тепловых режимов космических аппаратов в натуральную величину. Для этих целей строятся огромные камеры объемом в $10^3 - 10^5 \text{ м}^3$ [8].

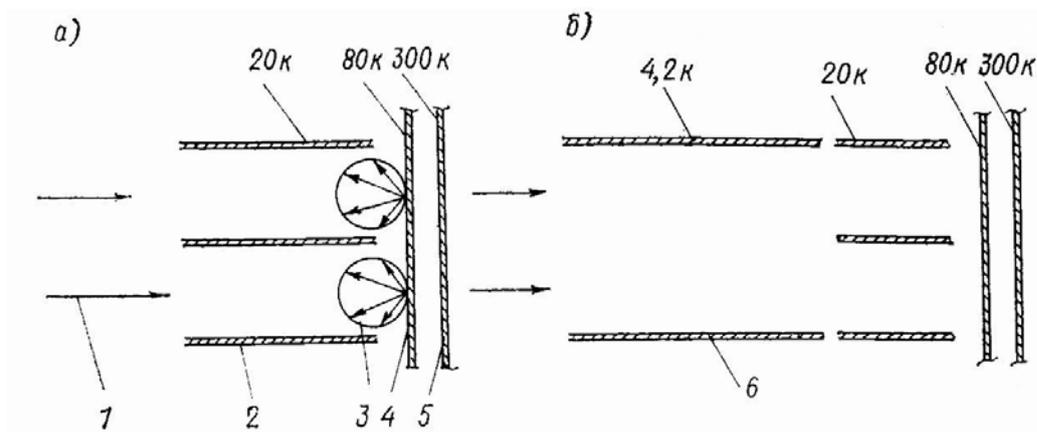


Рис.1.10 Схемы крионасосов для откачки направленного потока газа

Одним из наиболее важных параметров космического окружения, который должен создаваться в имитаторах, является высокий вакуум. Идеальной имитацией космоса было бы охлаждение стенок камеры приблизительно до температуры 4 К. При такой температуре стенки откачивали бы большинство молекул, идущих от испытуемого аппарата, и в то же время полностью имитировали бы "черноту" космоса для тепловых излучений.

Если учесть, что мощность лучистого потока велика (например панели, расположенные непосредственно против имитатора Солнца, должны воспринимать до $2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ прямого "солнечного" излучения и еще примерно 330 Вт/м^2 дополнительных теплопритоков), становится ясной необходимость экранирования криопанелей защитными азотными экранами.

Естественно, такие экраны затрудняют проникновение молекул к конденсирующей поверхности и снижают скорость откачки газа. Однако во многих случаях уменьшение теплового потока к конденсатору, который имеет очень низкую температуру, значительно важнее соответствующего снижения быстроты откачки. Было предложено большое количество экранированных систем, в которых достигается разумный компромисс между

требованиями снижения тепловой нагрузки па конденсирующие элементы и быстротой откачки. В большинстве случаев теплозащитный экран, охлаждаемый жидким азотом, выполнен в виде ряда шевронных профилей, образующих оптически непрозрачную систему, которая имеет проводимость порядка 0,25. Увеличение проводимости и, следовательно, коэффициента захвата до значений, близких 0,4, при одновременном уменьшении габаритов по толщине системы защитный экран – криопанель может быть достигнуто путем расположения конденсирующего элемента внутри шевронного профиля, как это показано на рис.1.11. При этом шевронная решетка может быть даже оптически прозрачной.

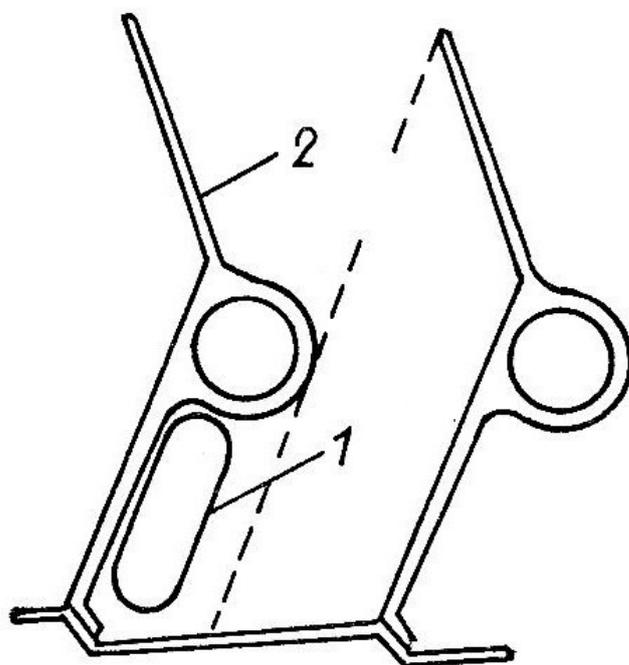


Рис.1.11 Ячейка криовакуумного насоса
1 – криопанель, 2 – теплозащитный экран шевронного типа

Расчет теплозащитных характеристик такой конструкции показал, что основным фактором, влияющим на величину тепловой нагрузки, достигающей конденсирующих элементов, является не геометрия ячейки, а степень черноты теплопоглощающих поверхностей экрана.

Для степени черноты конденсирующей поверхности 0,3 доля тепловой погрузки, воспринимаемая ею при различной степени черноты поверхности шеврона, охлаждаемого жидким азотом, приведена ниже.

Таблица 1.2

Тепловая нагрузка на конденсатор				
Степень черноты поглощающих экранов	0,95	0,90	0,85	0,80
Величина тепловой нагрузки, %	0,167	0,352	0,555	0,783

Присутствующие в откачиваемом объеме CO_2 и пары воды, вымораживаясь на азотных экранах, могут снизить их степень черноты существенно, особенно для лучистой энергии видимого и ультрафиолетового диапазона длин волн. Это наглядно показано на рисунке 1.12, на котором представлены экспериментальные значения эффективной поглощательной способности криповерхностей, покрытых слоями CO_2 [9]. Уменьшить этот нежелательный эффект можно путем использования оребренных экранов, либо экранов, выполненных наподобие сот. Примеры таких конструкций показаны на рисунке 1.13.

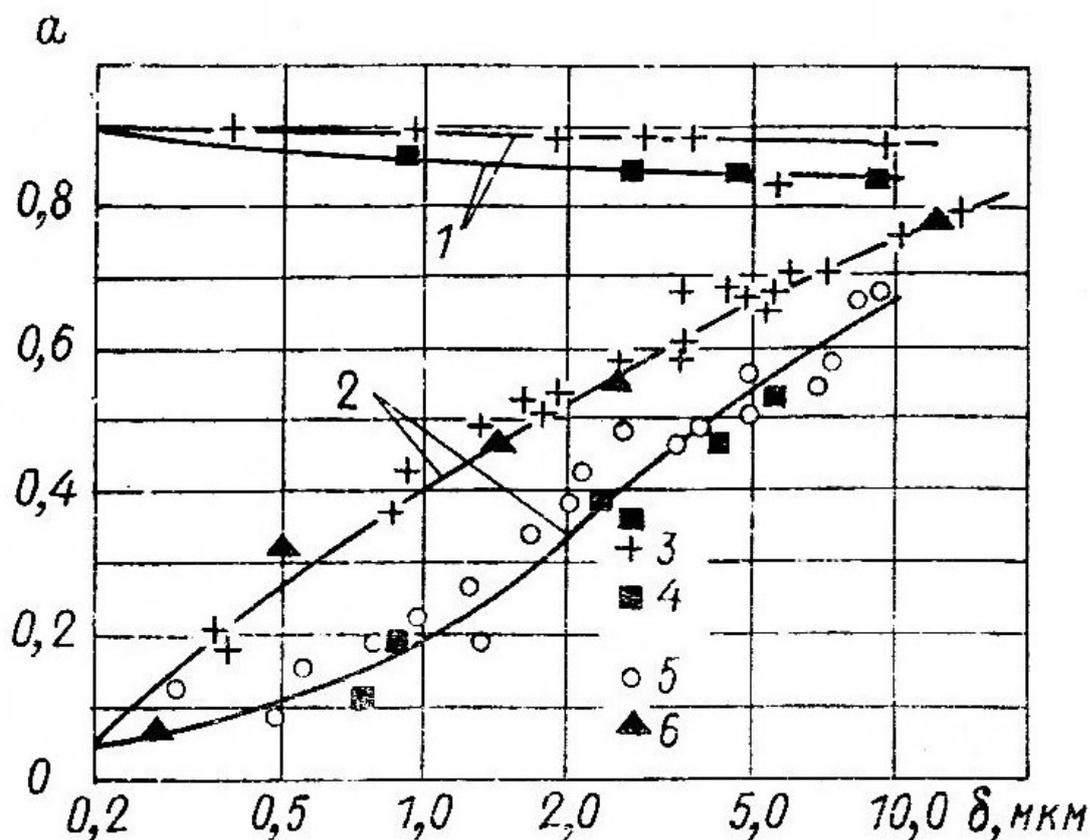


Рис.1.12 Изменение эффективной поглощательной способности криповерхностей в зависимости от толщины слоя покрывающего их конденсата CO_2

- 1 – зачерненная подложка, 2 – полированная никелевая подложка,
3 – конденсация в присутствии азота; 4 – конденсация чистой CO_2

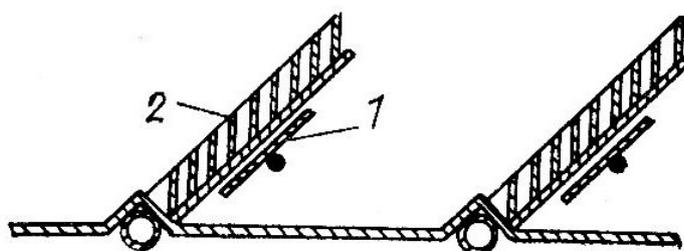
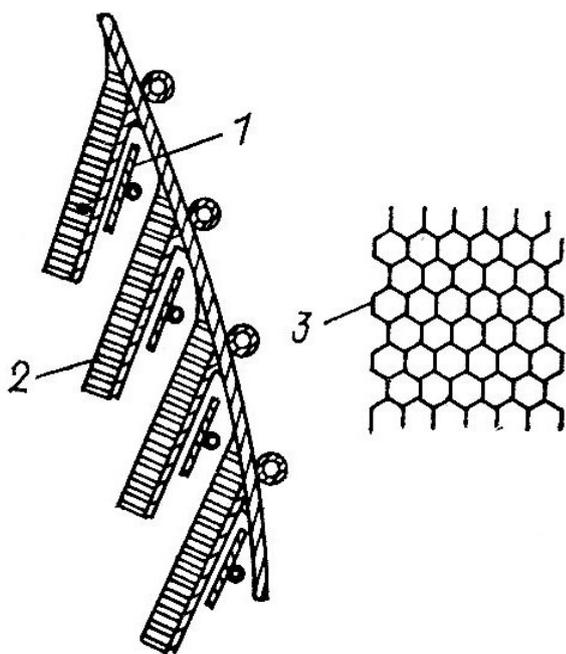


Рис.1.13 Конструкции криовакуумного насоса с эффективными теплозащитными экранами
1 – криопанель, 2 – теплозащитный экран, 3 – сотовое оребрение экрана

1.6 Криoadсорбционные вакуумные насосы

Сорбционные процессы обусловлены законами природы, и избежать их невозможно. В вакуумной технике эти процессы играют двоякую роль: с одной стороны, создают большие трудности в поддержании контролируемой газовой среды в высоковакуумных системах, а с другой – открывают широкие возможности в области создания эффективных средств откачки, позволяющих получать и сохранять в этих системах высокий вакуум.

Поскольку сорбционные процессы обычно имеют экзотермический характер, их интенсивность зависит, во-первых, от способности молекул газа отдавать адсорбенту достаточное количество энергии, чтобы оставшейся энергии было недостаточно для преодоления сил сорбционного притяжения, а во-вторых,

способностью адсорбента быстро отводить полученную энергию из зоны соударения. Отсюда следует, что не каждая молекула газа, столкнувшаяся с поверхностью адсорбента, адсорбируется на ней и отношение числа адсорбированных частиц к числу падающих за этот же промежуток времени, названное коэффициентом прилипания, всегда меньше единицы. Поскольку коэффициент прилипания под воздействием множества факторов изменяется, не остается постоянной и интенсивность адсорбционных процессов. Интенсивность ν , с которой молекулы адсорбируются, может быть выражена через интенсивность соударений молекул газа с поверхностью адсорбента:

$$\nu_o = \frac{1}{4} \cdot n \cdot \overline{v_a}, \quad (1.20)$$

и коэффициент прилипания α :

$$\nu = \alpha \cdot \nu_o, \quad (1.21)$$

где n – молярная плотность газа;

$\overline{v_a}$ – средняя арифметическая скорость молекул.

Для сорбционных средств откачки характерна значительная селективность поглощения отдельных газов, что показано в таблице 1.3.

Таблица 1.3
Усредненные параметры адсорбционных насосов*

Откачиваемый газ	$S_o, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$S, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	$\alpha = S/S_o$
Водород	442	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Азот	118	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
Воздух	116	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$

*Температура откачиваемого газа 293 К; температура сорбента 77К;

S_o и S – теоретическая и действительная удельная быстрота действия насоса.

Основными параметрами адсорбционного вакуумного насоса, как и насосов других типов, являются предельный вакуум и быстрота действия. Однако, определение этих характеристик для адсорбционных насосов весьма затруднительно. Объясняется это тем, что процесс криoadсорбции очень сложен и, по существу, может быть разделен на два этапа. Первый этап – передача молекулами газа своей энергии твердому телу сорбента и захват их его поверхностью. Второй этап – диффузионный перенос адсорбата внутрь гранул адсорбента с последующей возможной локализацией

в местах наибольшего действия адсорбционных сил. Если первый этап происходит практически мгновенно и адсорбированный на поверхности слой образуется со скоростью, пропорциональной давлению газовой фазы, то второй этап требует значительного времени. Для продолжения адсорбции необходимо, чтобы скорость диффузии вещества внутрь тела не была меньше скорости его поступления на поверхность. Поэтому именно интенсивность второго этапа в значительной степени определяет как быстроту действия насоса, так и время достижения предельного равновесного давления. Скорость проникновения адсорбата внутрь гранул адсорбента определяется свойствами как одного, так и другого. При длительном контакте адсорбента с газом процесс поглощения последнего постепенно замедляется, и наступает равновесное состояние. В этом случае для фиксированной температуры сорбента и данного давления газа над ним количество сорбированного газа будет максимальным. Зависимость равновесной сорбционной способности различных адсорбентов от давления газа над ним обычно представляют в виде графиков изотерм адсорбции или аналитических зависимостей. В вакуумной технике наиболее часто используют уравнение Генри, если степень заполнения пор сорбента не превышает $\theta \leq 0,1$:

$$a = \beta_p \cdot B \cdot p \cdot \exp\left(\frac{A}{T_{ад}}\right), \quad (1.22)$$

где A и B – экспериментальные постоянные [10], значения которых для цеолитов СаА–4В и СаЕН–4В приведены в таблице 1.4;

p – давление сорбируемого газа;

$T_{ад}$ – температура адсорбента;

β_p – коэффициент регенерации адсорбента, который выбирают в пределах 0,1 – 0,6.

Таблица 1.4
Экспериментальные постоянные цеолитов СаА–4В и СаЕН–4В

Газ	A, К	B, м ³ /кг
Азот	1500	$5 \cdot 10^{-3}$
Кислород	1150	$3 \cdot 10^{-2}$
Аргон	1150	$3 \cdot 10^{-2}$

Для случаев, когда степень заполнения пор сорбента $\theta > 0,1$ применимо уравнение Дубинина – Радужкевича:

$$a = \frac{\omega_o}{\mathcal{G}} \beta_p \exp\left(-B \frac{T_{ad}^2}{\gamma^2} \cdot \left(\lg \frac{p_s}{p}\right)^2\right), \quad (1.23)$$

где ω_o – удельный объем адсорбционного пространства;

\mathcal{G} – мольный объем жидкой фазы адсорбата при температуре адсорбента;

β_p – коэффициент регенерации адсорбента,

T_{ad} – температура адсорбента;

$\gamma \approx 1$ – коэффициент подобия (для азота, кислорода и аргона);

p_s – давление насыщенного пара при температуре T_{ad} ;

p – давление адсорбтива;

B – постоянная пористой структуры адсорбента.

Значения величин ω_o и B для ряда адсорбентов [10] приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Параметры адсорбентов

Адсорбент	$\omega_o \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{кг}$	$B \cdot 10^6, \text{ К}^{-2}$
Цеолит	2,4	2,9
Уголь СКТ	4,0	6,0
Угольная ткань КУТ – 2	3,6	8,0

Для высоковакуумных криоадсорбционных насосов поглотительная способность адсорбента, размещенного в насосе, определяется по формуле:

$$L = M_{ad} \cdot a, \quad (1.24)$$

где M_{ad} – масса адсорбента в насосе;

a – удельная емкость адсорбента при заданном режиме подготовки, Па·м³/кг.

Быстрота действия адсорбционного слоя:

$$S_{ad} = \frac{D_{эф} \cdot B \exp(A/T_{ad})}{K_3 \cdot R^2} M_{ad}, \quad (1.25)$$

где $D_{эф} \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-12}$ м²/с – эффективный коэффициент диффузии;

A и B – постоянные уравнения Генри;

K_3 – коэффициент формы зерна адсорбента (для цилиндрических и сферических 1/8 и 1/15 соответственно);

R – характерный размер гранул адсорбента.

Конструктивное исполнение криоадсорбционных вакуумных насосов может быть различно в зависимости от их назначения и способа термостатирования адсорбента. Например, адсорбционный насос по авторскому свидетельству №1330344 устроен следующим образом (см.рис.1.14) [11].

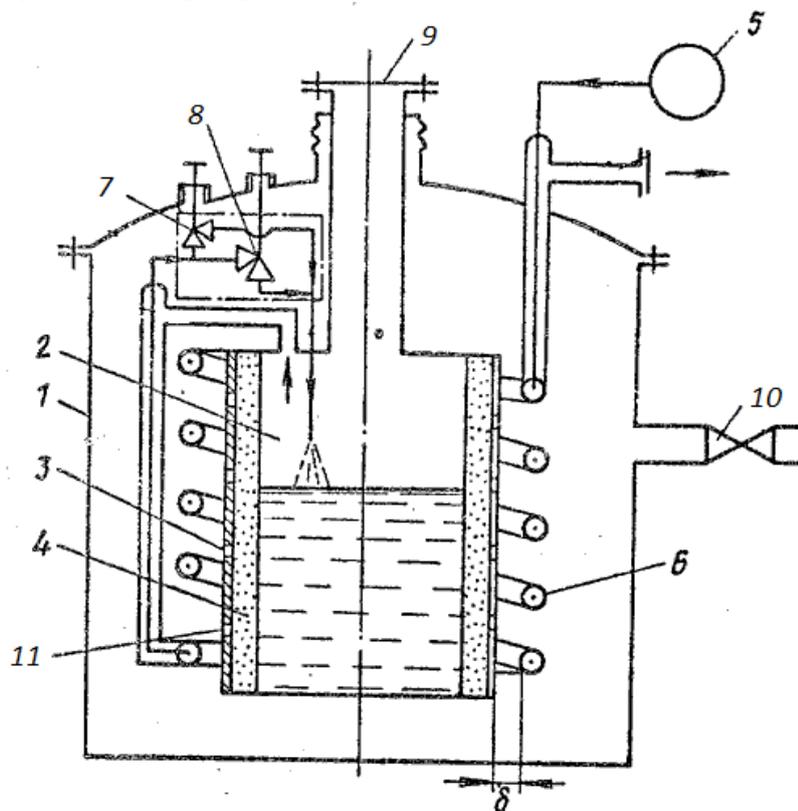


Рис.1.14 Адсорбционный насос:

1 – корпус, 2 – сосуд с жидким криоагентом, 3 – емкость с адсорбентом 4, 5 – источник газа, 6 – двухпоточный теплообменный аппарат, 7,8 – вентили, 9 – заглушка, 10 – клапан, 11 – перфорация

В корпусе 1 расположен сосуд 2 для жидкого азота, который окружен емкостью 3 с адсорбентом 4. Внешняя стенка емкости 3 имеет перфорацию 11 для доступа газа к адсорбенту. К откачиваемому объекту насос подсоединяется через клапан 10. Термостатирование адсорбента осуществляется жидким азотом, заливаемым в сосуд 2 через верхний патрубок при снятой с него заглушке 9. Кроме того, охлаждение адсорбента может происходить за счет дроссельного цикла. Газ высокого давления от источника 5 поступает в двухпоточный теплообменник 6, где охлаждается обратным потоком и дросселируется через вентили 7 и 8 в сосуд 2. Образующаяся при дросселировании жидкая фаза накапливается в сосуде 2, а паровая фаза в виде обратного потока, пройдя

теплообменник 6, выбрасывается в атмосферу. После накопления жидкости в сосуде 2 дроссельный вентиль 8 большего сечения закрывается и работа насоса продолжается при открытом вентиле 7.

Такая схема насоса позволяет упростить эксплуатацию и повысить экономичность за счет использования в качестве криоагента сжатого газа и уменьшения потребности в хранилищах жидкого криоагента и его транспортирования.

Одной из главных задач при разработке конструкций криоадсорбционных насосов является гарантированное термостатирование адсорбента. В ряде случаев для этого применяют высокотеплопроводные пористые элементы из спеченного порошка меди, которые проницаемы для откачиваемого газа и в то же время хорошо экранируют адсорбент от теплопритоков. Примером такой конструкции является насос предложенный в [12]. Продольный разрез насоса представлен на рис.1.15а, а на рис.1.15б дан разрез А – А.

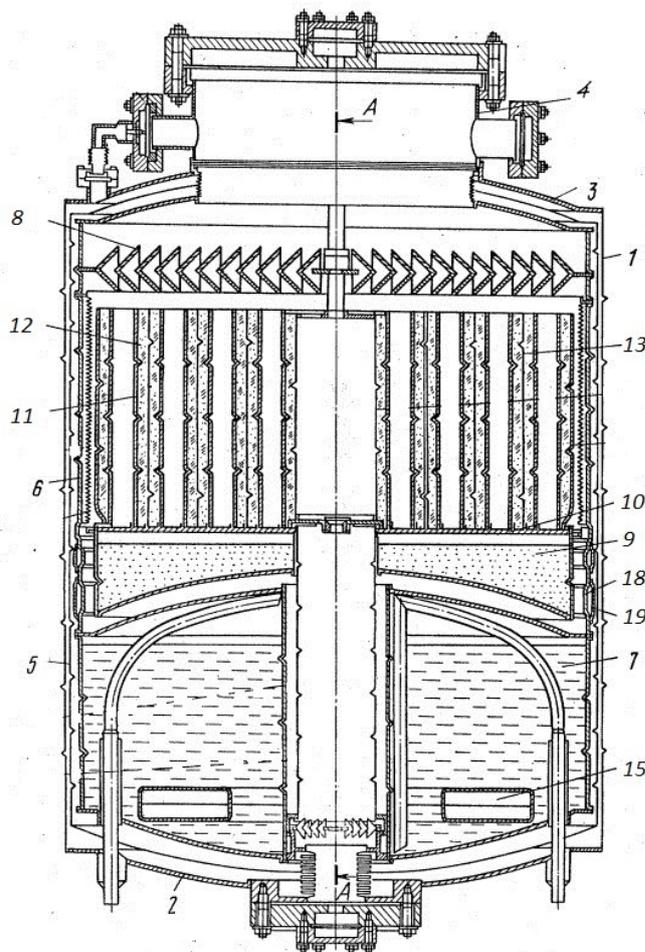


Рис.1.15а Высоковакуумный криоадсорбционный насос (продольный разрез)

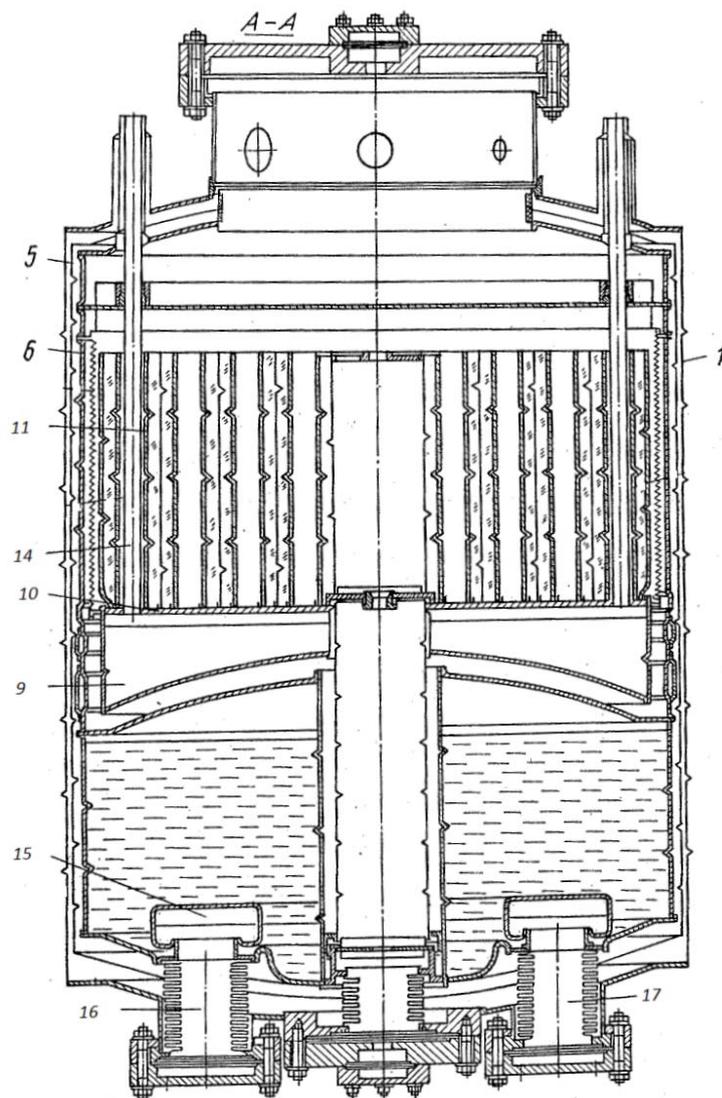


Рис.1.156 Высоковакуумный криoadсорбционный насос (вид А-А)

Наружный корпус насоса состоит из зигованной обечайки 1 с дном 2 и крышкой 3. Для подсоединения насоса к откачиваемому объекту служит патрубок 4. Внутри корпуса 1 размещены неохлажденный экран 5 и охлаждаемый экран 6, который имеет тепловой контакт с сосудом 7 для жидкого азота. К верхней части экрана 6 прикреплен экран шевронного типа 8. Откачивающим элементом насоса служит ванна 9 с жидким гелием, на крышке которой 10 установлено несколько concentрично расположенных адсорбционных кассет. Каждая кассета состоит из пористых теплозащитных экранов 11, между которыми засыпан адсорбент 12 и размещена перфорированная обечайка 13. Трубки подвеса 14 гелиевой ванны расположены между двумя соседними пористыми экранами 11.

В сосуде 7 для жидкого азота размещена торообразная полость 15 с двумя патрубками 16 и 17. Кроме того, на обечайке 6 охлаждаемого экрана расположен кольцевой карман 18 с пористой стенкой 19. Карман заполнен адсорбентом.

Перед началом работы насоса его внутренняя полость и полость между корпусом 1 и радиационными экранами 5 и 6 вакуумируется внешним форвакуумным насосом. Затем в сосуд 7 заливают жидкий азот. Далее откачку объекта, для которой предназначен данный насос, от атмосферного давления можно осуществлять через торообразную полость 15 путем подключения объекта к насосу патрубков 16 и 17. В этом случае полость 15 будет выполнять функцию азотной ловушки. Охлажденный в кармане 18 адсорбент обеспечивает высокий вакуум в теплоизолирующей полости между корпусом 1 и экранами 5 и 6. После предварительного вакуумирования объекта и насоса в ванну 9 заливают жидкий гелий. В результате охлаждения адсорбента 12 в адсорбционных кассетах начинается поглощение газа, который входит в насос через патрубок 4, проходит последовательно через шевронный экран 8, пористый экран 11 и достигает адсорбента.

Высокая быстрота действия насоса обеспечивается развитой поверхностью пористых теплозащитных экранов 11 и хорошей тепловой защитой адсорбента.

1.7 Сорбционно – конденсационные насосы

Способность адсорбировать молекулы газа присуща всем чистым твердым поверхностям. Не являются в этом плане исключением и отвержденные газы и пары: водяной лед, твердая двуокись углерода, твердый аргон, азот и другие, на поверхности которых адсорбируются более летучие газы, в том числе водород, неон и гелий. Это обстоятельство было замечено давно, например, при конденсации воздуха. Поскольку парциальные давления таких трудноконденсирующихся газов, как неон, водород и гелий, в воздухе соответственно равны $182 \cdot 10^{-2}$, $5 \cdot 10^{-2}$ и $53 \cdot 10^{-2}$ Па, следовало бы ожидать, что охлаждение криповерхности жидким водородом (20,4 К) не позволит сконденсировать эти газы и остаточное давление не будет ниже суммы их парциальных давлений, т.е. ниже 2,4 Па. Практика же показывает, что в действительности при конденсации воздуха на криповерхности, охлаждаемой жидким водородом, предельное давление оказывается

на порядок и более ниже указанного значения. Из этого следует, что на основании характеристик откачки конденсацией отдельных компонентов смеси газов нельзя получить характеристику криогенного насоса, откачивающего эту смесь. В присутствии легкоконденсирующихся газов газы трудноконденсирующиеся могут быть откачаны до более низких давлений, чем их равновесное давление при температуре криогенной поверхности.

Использование сорбционной способности слоев сконденсированных твердых газов весьма заманчиво для снижения предельного давления в системах с криогенными конденсационными насосами. Адсорбент такого типа имеет хороший тепловой контакт с охлаждающей поверхностью. Количество адсорбента и время его включения в работу (напыление) определяются оператором. Наконец, регенерация адсорбента или его полное удаление из системы часто требуют лишь незначительного повышения температуры криоповерхности по сравнению с рабочей температурой, при которой происходила откачка.

Сравнение адсорбционной способности слоев сконденсированных газов и традиционных адсорбентов показывает, что в области высокого вакуума они могут конкурировать между собой, а в области сверхвысокого вакуума, когда гранулированные адсорбенты имеют большое термическое сопротивление, лучшие характеристики имеют газовые конденсаты.

В настоящее время разработан ряд конструкций сорбционно–конденсационных насосов, работающих на различных температурных уровнях (от 77 до 4,2 К и ниже) и использующих в качестве адсорбента твердые конденсаты различных паров и газов. На рис. 1.16 показана одна из таких конструкций.

В корпусе 1 насоса размещены конденсатор 2, а также защитные экраны 3 и 11. Криоагент поступает к конденсатору по трубопроводу 7, проходит змеевик 6, находящийся в хорошем тепловом контакте с конденсатором, и возвращается в криогенератор по трубопроводу 8. Защитный экран 3 повторяет профиль корпуса, а экран 11 представляет собой оптически непроницаемые жалюзи. Экраны охлаждаются жидким азотом. Патрубок 4 служит для подвода легкоконденсирующегося газа, например CO_2 или Ar , к внутренней поверхности стакана конденсатора. Для предотвращения конденсации этого газа на

внутренних стенках патрубка 4 на его наружной поверхности расположена, спираль 5 подогревателя.

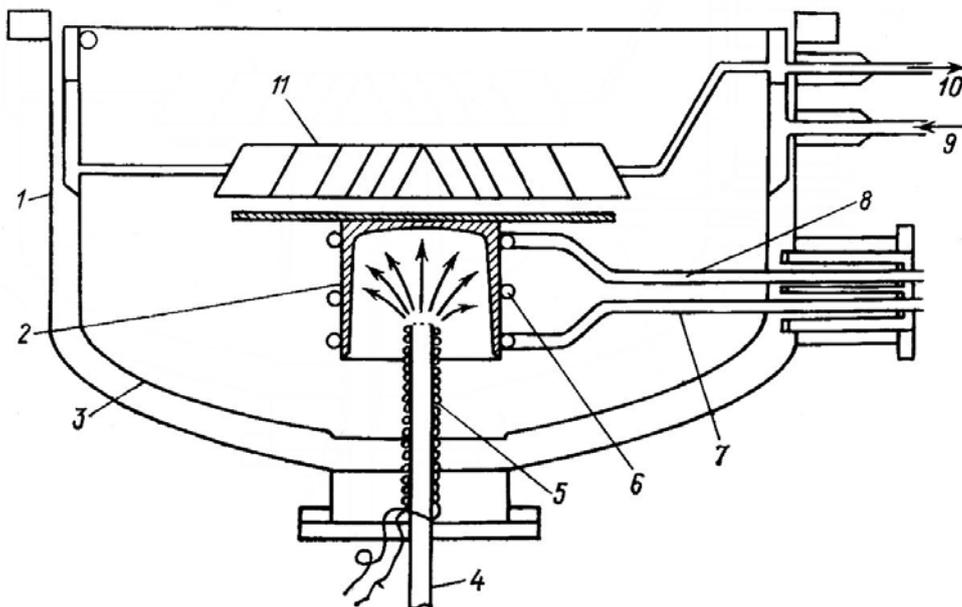


Рис. 1.16 Сорбционно – конденсационный вакуумный насос

Сорбционно – конденсационный насос действует следующим образом. Из камеры, к которой подсоединен данный насос, вначале откачивают газы вспомогательными форвакуумными насосами (механическими или адсорбционными). После того как достигнута определенная степень разрежения, охлаждают экраны 3 и 11. Холодные поверхности экранов не только защищают конденсатор от теплового излучения, но и откачивают пары воды. Затем охлаждают конденсатор, на пластине и внешней поверхности стакана которого происходит конденсация основной массы оставшегося в системе газа. Для поглощения неконденсирующихся газов, таких как, He, H₂, Ne, через патрубок 4 подают порции CO₂ или Ar, которые, конденсируясь на внутренней поверхности стакана конденсатора, поглощают указанные неконденсирующиеся газы. В результате такой ступенчатой откачки в системе создается безмасляный вакуум порядка 10⁻⁶...10⁻⁹ Па.

Конденсатор насоса расположен таким образом, что внутренняя поверхность его стакана оказывается доступной лишь для молекул неконденсирующихся газов. Все же остальные газы и пары конденсируются либо на защитных экранах, либо на пластине и внешней поверхности стакана конденсатора. Этим достигается то, что поверхность конденсата – адсорбента на

внутренней поверхности стакана не «отравляется», газами, конденсирующимися при температуре конденсатора, и эффективность откачки неконденсирующихся газов, таким образом, не снижается.

1.8 Низкотемпературные диффузионные насосы

В настоящее время пароструйные вакуумные насосы, в частности паромасляные диффузионные насосы, являются самым распространенным средством для создания высокого вакуума. Это объясняется, прежде всего, простотой их конструкции и надежностью в работе. Однако эти насосы имеют ряд серьезных недостатков, которые конструкторам пока не удалось устранить. Главные из них – это миграция паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объем, невысокое значение вакуум-фактора, необходимость вертикальной ориентации. Применение же в насосах охлаждаемых ловушек и отражателей, предназначенных для защиты от проникновения в вакуумные системы паров рабочей жидкости, и использование угловых присоединительных патрубков приводит к уменьшению быстроты действия на 75...80%. Тем не менее, такие важные достоинства, как способность откачивать все без исключения газы и отсутствие движущихся частей, побудили конструкторов искать новые пути осуществления процесса откачки, не отказываясь в целом от принципа действия пароструйного насоса. Результатом этих поисков явились низкотемпературные струйные насосы, или так называемые "холодные" диффузионные насосы, в которых использовали тот же принцип действия, что и в паромасляных, парортутных вакуумных насосах. Различие заключается в том, что в низкотемпературных струйных насосах рабочий газ или пар переходит на охлаждаемых стенках не в жидкую фазу, а в твердую. Это позволяет присоединить такой насос непосредственно к откачиваемому объекту в любом положении и, таким образом, всегда полностью использовать его производительность. Кроме того, практически любой газ или пар может быть использован в "холодном" диффузионном насосе в качестве рабочего вещества, что дает возможность контролировать состав газа в откачиваемом объекте. Принцип действия "холодного" диффузионного насоса можно проследить по схеме, приведенной на рис. 1.17.

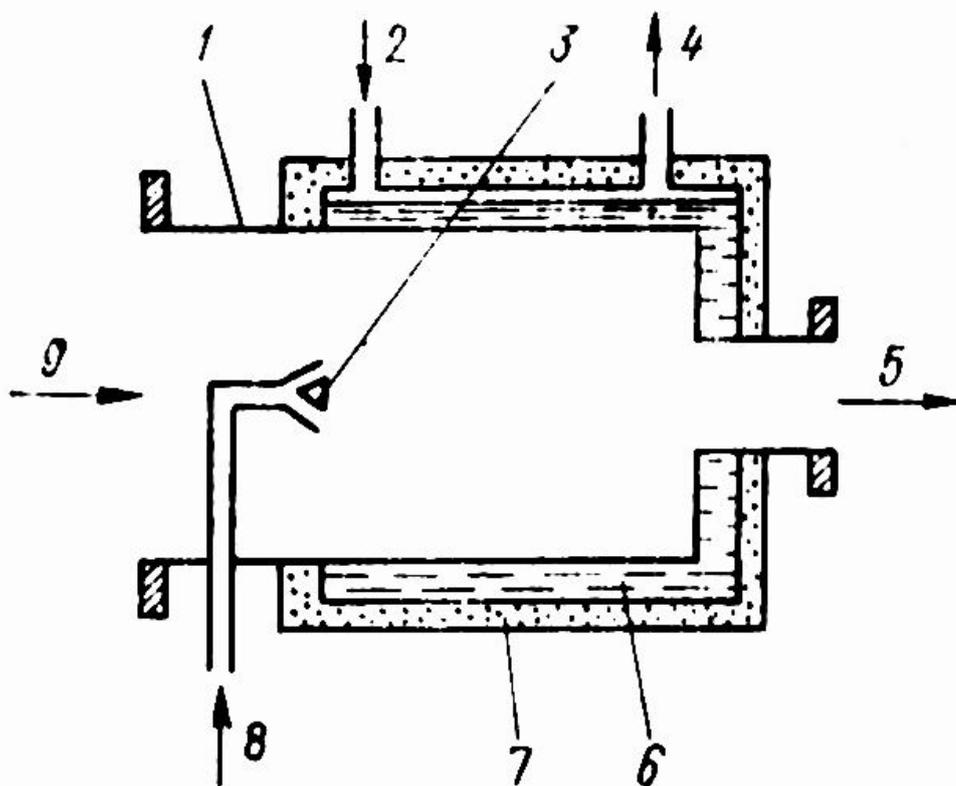


Рис.1.17 Схема низкотемпературного диффузионного насоса:
 1 – корпус, 2 – вход криоагента, 3 – сопло, 4 – выход криоагента,
 5 – к форвакуумному насосу, 6 – рубашка для криоагента, 7 – изоляция,
 8 – подача рабочего газа, 9 – вход откачиваемого газа

Цилиндрический корпус насоса 1 охлаждается до низких температур криоагентом, залитым в рубашку 6. Через сопло 3 в камеру насоса вводится струя рабочего газа, который при температуре криоагента имеет низкое давление насыщенных паров. Струя производит откачку, рабочий газ вымораживается на стенках корпуса насоса, а захваченный и унесенный струей откачиваемый газ отводится вспомогательным форвакуумным насосом. В зависимости от величины впускного давления откачка осуществляется либо в режиме диффузионного, либо в режиме эжекторного насосов.

Идея создания холодных диффузионных насосов сравнительно молода. Известные работы, посвященные этому вопросу, носят в основном исследовательский характер и пока нет достаточно четких представлений о путях расчета насосов данного типа. Это объясняется большой сложностью процессов, происходящих в низкотемпературных струйных насосах, когда к трудностям расчета обычных пароструйных насосов добавляется

еще ряд специфических аспектов. Например, непрерывное изменение геометрии проточной части вследствие намораживания на стенках корпуса твердого слоя конденсата рабочего газа, что, естественно, сказывается на откачных характеристиках и сокращает продолжительность откачивающего действия насоса. Следует иметь в виду также повышение температуры поверхности конденсации по мере роста слоя конденсата, имеющего существенное термическое сопротивление. Причем это сопротивление непостоянно и зависит не только от толщины слоя, но и от интенсивности намораживания, от температуры охлаждаемой поверхности и многих других факторов. Какое-то влияние на откачные характеристики, несомненно, оказывает эффект криозахвата и сорбции молекул откачиваемого газа непрерывно обновляемыми слоями сконденсированного рабочего газа.

Некоторую помощь проектировщику "холодных" диффузионных насосов может оказать ряд положений качественного характера. Они заключаются в следующем:

- струя рабочего газа должна обладать способностью передавать как можно большее количество движения, причем передавать не стенкам корпуса, а молекулам откачиваемого газа. Поэтому желательно, чтобы молекулы рабочего газа имели большую массу и большое поперечное сечение столкновений;

- в отличие от рабочего вещества в паромасляных диффузионных насосах желательно, чтобы конденсат рабочего газа обладал высокой способностью к поглощению молекул откачиваемого газа, что снижает нагрузку на форвакуумный насос;

- рабочий газ должен обладать высокой чистотой, что также снижает требования к вспомогательной системе откачки;

- плотность потока рабочего газа должна быть максимально возможной, насколько это позволяет отвод теплоты конденсации;

- конструкция сопла должна обеспечивать максимальное преобразование хаотического теплового движения молекул рабочего газа в направленный поток. Для этого сопло должно обеспечивать высокую степень расширения газа. Следует, однако, иметь в виду, что адиабатическое расширение газа в сопле сопровождается снижением его температуры и при высокой степени расширения есть вероятность конденсации газа, что приводит к нарушению структуры струи.

2. ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ЭКРАНЫ

Конструкции теплозащитных экранов, используемые в криогенных вакуумных насосах, подразделяются в основном на две разновидности: непроницаемые и проницаемые, так называемые экраны типа жалюзи. Непроницаемые экраны представляют собой сплошные листы из материала, обладающего высокой теплопроводностью, например из меди. Охлаждение их осуществляется обычно жидким азотом. Располагаются эти экраны между криопанелями и стенками кожуха. Таким образом, экраны препятствуют прямому теплообмену между стенками кожуха, находящимися при комнатной температуре, и криопанелями, охлаждаемыми до температуры 4,5 – 30 К, что позволяет снизить тепловой поток между ними в десятки, а иногда в сотни раз.

Экраны типа жалюзи располагают непосредственно перед откачивающей поверхностью, на которой происходит адсорбция или десублимация откачиваемого газа.

Они служат для защиты криопанелей от источников тепла, расположенных внутри криогенных вакуумных камер и насосов. Вместе с тем эти экраны не должны создавать значительного сопротивления на пути газового потока, откачиваемого криопанелями. Конструкция экранов типа жалюзи в значительной степени определяется давлением, при котором работает крионасос. Если в высоковакуумных крионасосах основное назначение их состоит в защите криопанелей от теплового излучения, то в вязкостном режиме работы крионасоса основной задачей экранов становится охлаждение откачиваемого потока газа.

2.1 Непроницаемые экраны

В большинстве практических случаев охлаждение экранов осуществляется жидким азотом, циркулирующим по трубам, которые находятся в хорошем тепловом контакте с пластинами экрана (рис.2.1). Частота расположения труб зависит от многих факторов и в том числе от допустимой неизотермичности экрана. Естественно, что вследствие теплообмена между поверхностями кожуха и экрана, а также экрана и криопанели, в пластинах экрана возникает градиент температуры. Причем, поскольку теплоподвод к экрану со стороны кожуха обычно значительно превышает теплоотвод от экрана к криопанели, то температура пластин будет

повышаться по мере удаления от каналов (труб), по которым циркулирует криоагент.

После установления стационарного состояния распределение температуры по пластине может быть найдено, если известна результирующая тепловая нагрузка на данную пластину экрана и характер ее распределения.

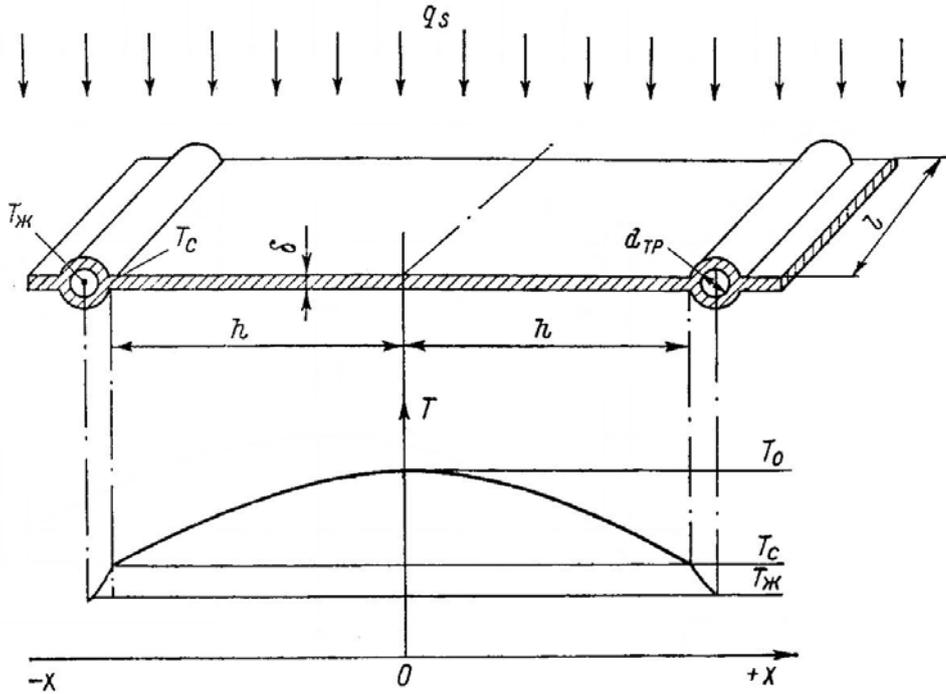


Рис.2.1 Элемент непроницаемого экрана и характер температурного поля в нем

Эта задача решается методом, разработанным в теории теплопроводности для неограниченной пластины с внутренними источниками тепла. При исследовании переноса тепла в таких случаях важно знать интенсивность объемного выделения тепла, которая количественно характеризуется плотностью объемного тепловыделения q_v (Вт/м³). Пренебрегая изменением температуры по толщине пластины, можно плотность объемного тепловыделения q_v выразить через плотность результирующего теплового потока к поверхности пластины q_s :

$$q_v = \frac{q_s}{\delta}. \quad (2.1)$$

Рассмотрим случай равномерного распределения плотности теплового потока по поверхности пластины $q_s = \text{const}$. Если принять, что коэффициенты теплоотдачи от стенок трубок к жидкому

азоту постоянны $\alpha = \text{const}$ и температура жидкого азота не меняется по длине трубок $T_{ж} = \text{const}$, то, благодаря равномерному охлаждению, температура обоих концов пластины будет одинаковой $T_{x=h} = T_{x=-h} = T_c$ (термическим сопротивлением стенок трубок можно пренебречь).

При указанных условиях температура пластины между двумя соседними трубками будет изменяться только вдоль оси x , т.е. в направлении нормальном к трубкам. Температуру на оси пластины и на ее концах обозначим соответственно через T_o и T_c , которые неизвестны. Кроме того, требуется знать распределение температуры в пластине и количество тепла, отдаваемого жидкому азоту.

Дифференциальное уравнение теплопроводности в данном случае имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} = \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{q_s}{\lambda \delta} = 0. \quad (2.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала пластины.

Поскольку граничные условия для обеих сторон пластины одинаковы, температурное поле внутри пластины должно быть симметричным относительно начала координат $x = 0$. Тепло с одинаковой интенсивностью отводится к жидкому азоту в левой и правой трубках. Одинаков и теплоприток к обеим половинам пластины. Это означает, что можно далее рассматривать лишь одну половину пластины, например правую, и записать граничные условия для нее в виде:

$$\left. \begin{aligned} x = 0; & \quad \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = 0 \\ x = h; & \quad -\lambda \cdot f_{nl} \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=h} = \alpha \cdot f_{mp} (T_c - T_{ж}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где f_{nl} – площадь поперечного сечения пластины, а f_{mp} – площадь внутренней поверхности трубки.

После интегрирования (2.2) получим:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{q_s x}{\lambda \delta} + C_1; \quad (2.4)$$

$$T = -\frac{q_s}{2\lambda \delta} \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (2.5)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются с учетом граничных условий (2.3). Из (2.4) получаем при $x = 0$ значение $C_1 = 0$, а при $x = h$ получим:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=h} = -\frac{q_s h}{\lambda \delta}.$$

Тогда из (2.3) $T_c = T_{жс} + \frac{q_s h}{\delta \alpha} \cdot \frac{f_{nl}}{f_{mp}}$, а подставив это выражение в (2.5), при $x = h$ получим:

$$C_2 = T_{жс} + \frac{q_s h}{\delta \alpha} \cdot \frac{f_{nl}}{f_{mp}} + \frac{q_s h^2}{2\delta \lambda}.$$

Подставляя значения постоянных C_1 и C_2 в выражение (2.5) и учитывая, что тепло к трубке стекает с двух пластин, найдем уравнение температурного поля:

$$T_x = T_{жс} + \frac{2q_s h}{\delta \alpha} \cdot \frac{f_{nl}}{f_{mp}} + \frac{q_s}{2\delta \lambda} \cdot (h^2 - x^2). \quad (2.6)$$

Отношение f_{nl}/f_{mp} можно представить как $\delta/\pi d_{mp}$, где d_{mp} – внутренний диаметр трубы. Тогда уравнение температурного поля (2.6) примет вид:

$$T_x = T_{жс} + \frac{2q_s h}{\pi d_{mp} \cdot \alpha} + \frac{q_s}{2\delta \lambda} \cdot (h^2 - x^2). \quad (2.7)$$

Таким образом, перепад температур между ее величиной в центре пластины ($x = 0$) и температурой криоагента в трубе будет:

$$T_0 - T_{жс} = \frac{2q_s h}{\pi d_{mp} \cdot \alpha} + \frac{q_s h^2}{2\delta \lambda}. \quad (2.8)$$

Общее количество тепла, стекаемого к каждой трубе длиной l , равно:

$$Q = 2q_s h l. \quad (2.9)$$

Плотность результирующего теплового потока q_s с достаточной степенью точности можно считать равной плотности теплового потока от стенки кожуха к поверхности экрана, поскольку теплоотвод от экрана к криопанели настолько мал, что им обычно пренебрегают.

Тепло от кожуха к экрану переносится тремя путями: посредством остаточного газа, тепловым излучением и по тепловым мостикам. Перенос тепла по опорам и подвескам зависит от

конструкции этих элементов и рассчитывается по обычным уравнениям теплопроводности. Величина q_s является результатом лишь двух оставшихся механизмов переноса тепла: остаточным газом $q_{газ}$ и тепловым излучением $q_{изл}$:

$$q_s = q_{газ} + q_{изл}. \quad (2.10)$$

Перенос тепла остаточными газами определяется по уравнению

$$q_{газ} = \lambda_0 \frac{T_2 - T_1}{a(1 + 2\beta \cdot \text{Kn})}. \quad (2.11)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности газа при атмосферном давлении; T_2 и T_1 – соответственно температура стенок кожуха и экрана; a – расстояние между этими стенками.

Коэффициент

$$\beta = \frac{9 \cdot k - 5}{2(k + 1)} \cdot \frac{2 - \alpha}{2},$$

где показатель адиабаты $k = \frac{c_p}{c_v}$,

приведенный коэффициент аккомодации

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \alpha_2) \alpha_1}.$$

Индексы 1 и 2 относятся соответственно к экрану и кожуху. Если поверхности экрана и кожуха параллельны друг другу, то их площади равны $A_1 = A_2$. Ориентировочные значения коэффициентов аккомодации, показывающих степень установления температурного равновесия между стенкой и газом, даны в табл. 2.1. Критерий Кнудсена определяется как отношение средней длины свободного пробега молекул в газе к величине расстояния между теплообменивающимися поверхностями: $\text{Kn} = L/a$.

Таблица 2.1

Коэффициенты аккомодации

Т, К	He	H ₂	воздух
300	0,3	0,3	0,8–0,9
77	0,6	0,5	1,0
20	0,6	1,0	1,0

Перенос тепла остаточными газами становится незначительным, если давление газа между стенками кожуха и экрана поддерживается ниже 10^{-3} Па. При таком давлении плотность теплового потока не превышает $0,25 \text{ Вт/м}^2$.

Перенос тепла излучением описывается уравнением:

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot 10^{-8} \cdot (T_2^4 - T_1^4). \quad (2.12)$$

где $\varepsilon_{np} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} \cdot (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1}$ – приведенная степень черноты;

$C_0 = 5,77 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная излучения для абсолютно черного тела.

Наименьшие значения степени черноты металлов наблюдаются при отсутствии нарушений упорядоченной кристаллической структуры их поверхности. Для получения минимальной степени черноты снимают напряжения в поверхностном слое и очищают его без создания остаточных напряжений, например путем отжига и последующего травления.

Механическая полировка приводит к увеличению степени черноты вследствие нагартовки поверхностного слоя металла. С понижением температуры степень черноты уменьшается. Например, полированная нержавеющая сталь при температуре 300 К имеет степень черноты $\sim 0,08$, а при 77 К примерно в два раза ниже. Холодная поверхность металла, покрытая слоем конденсата, резко увеличивает поглощательную способность. Достаточно наличие слоя CO_2 толщиной в $\sim 1 \text{ мм}$, а слоя H_2O всего в $\sim 0,002 \text{ мм}$, чтобы повысить степень черноты поверхности в десятки раз и довести до величины $\sim 0,6$ [10].

Расчет температурного поля в пластинах экрана требует также определения коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности труб к жидкому азоту. В большинстве систем охлаждение экранов осуществляется недогретым жидким азотом, прокачиваемым насосами под давлением $\sim 1,0 \text{ МПа}$ через трубы экрана, т. е. обеспечивается однофазное течение криоагента. Независимо от режима течения коэффициент теплоотдачи определяют через критерий Нуссельта:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{тр}}}, \quad (2.13)$$

где λ – теплопроводность жидкого азота, а $d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр труб.

Если режим течения жидкого азота в трубе турбулентный ($Re > 10\,000$), то критерий Нуссельта рассчитывается по уравнению:

$$Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \quad (2.14)$$

Критерий Прандтля в данном случае должен быть в пределах от 0,7 до 1,20, а критерий Рейнольдса от 10^4 до 10^6 . Для ламинарного режима течения ($Re < 2300$) Nu является функцией критерия Пекле. При $Pe \cdot \frac{d_{\text{тр}}}{l} > 12$ рекомендуется формула:

$$Nu = 1,61 \left(Pe \cdot \frac{d_{\text{тр}}}{l} \right)^{0.33}, \quad (2.15)$$

а при $Pe \cdot \frac{d_{\text{тр}}}{l} \leq 12$ критерий Нуссельта принимает постоянное

значение $Nu = 3,66$, и в этом случае $\alpha = 3,66 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{тр}}}$. В приведенных

уравнениях через l – обозначена длина трубы. В переходной области $2300 < Re < 10000$ следует пользоваться экспериментальными данными. Для приближенного же расчета могут быть применены следующие интерполяционные формулы:

при $Re Pr \cdot \frac{d_{\text{тр}}}{l} > 12$

$$Nu \cong 21 \cdot \left(Pr \cdot \frac{d_{\text{тр}}}{l} \right)^{0.33} \cdot \left(\frac{Re}{2300} \right)^{\lg l / d_{\text{тр}}}, \quad (2.16)$$

при $Re Pr \cdot \frac{d_{\text{тр}}}{l} < 12$

$$Nu \cong 3,66 \cdot \left(\frac{Re}{2300} \right)^{2,3 + \lg Pr}. \quad (2.17)$$

Для случаев, когда непроницаемый экран выполнен в виде тонкого диска или шайбы ($\delta \ll R$) распределение температур в нем находится по следующим формулам:

а) Если сток теплоты происходит на наружном радиусе шайбы (рис.2.2) и $T_H = \text{const}$:

$$T_R = T_H + \frac{q_s \cdot R_H^2}{4\delta \cdot \lambda} \left[1 - \left(\frac{R}{R_H} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^2 \ln \frac{R}{R_H} \right]. \quad (2.18)$$

Для диска:

$$T_R = T_H + \frac{q_s \cdot R_H^2}{4\delta \cdot \lambda} \left[1 - \left(\frac{R}{R_H} \right)^2 \right]. \quad (2.19)$$

Температура на оси диска $R_B = 0$:

$$T_{R_B=0} = T_H + \frac{q_s \cdot R_H^2}{4\delta \cdot \lambda}. \quad (2.20)$$

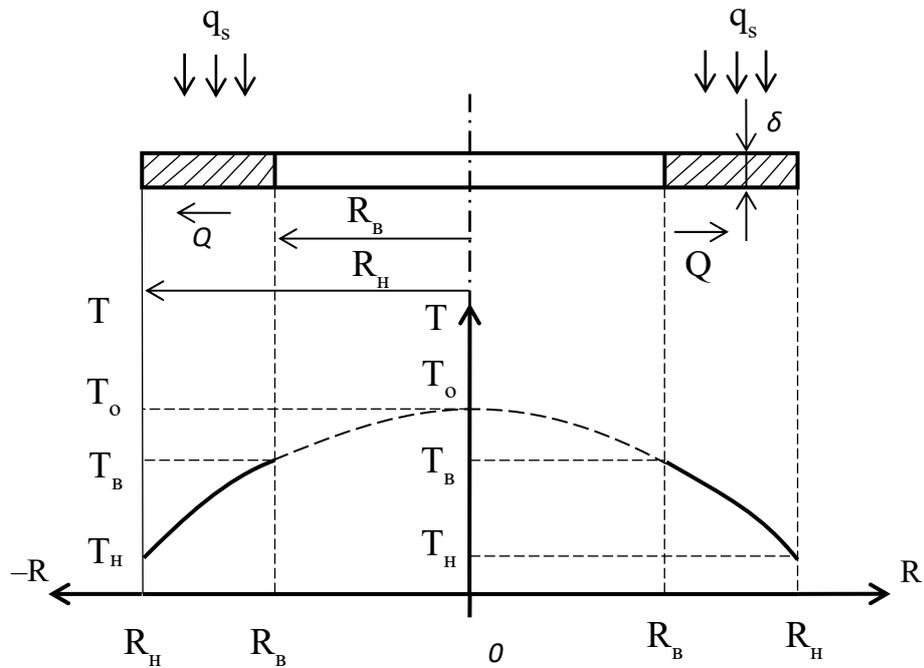


Рис.2.2 Поле температур в тонкой шайбе (диске) при стоке теплоты на наружном радиусе

б) Если сток теплоты на внутреннем радиусе шайбы и $T_B = \text{const}$ (рис.2.3):

$$T_R = T_B + \frac{q_s \cdot R_B^2}{4\delta \cdot \lambda} \left[1 - \left(\frac{R}{R_B} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{R_H}{R_B} \right)^2 \ln \frac{R}{R_B} \right], \quad (2.21)$$

а температура на наружном радиусе шайбы:

$$T_H = T_B + \frac{q_s \cdot R_B^2}{4\delta \cdot \lambda} \left[1 - \left(\frac{R_H}{R_B} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{R_H}{R_B} \right)^2 \ln \frac{R_H}{R_B} \right], \quad (2.22)$$

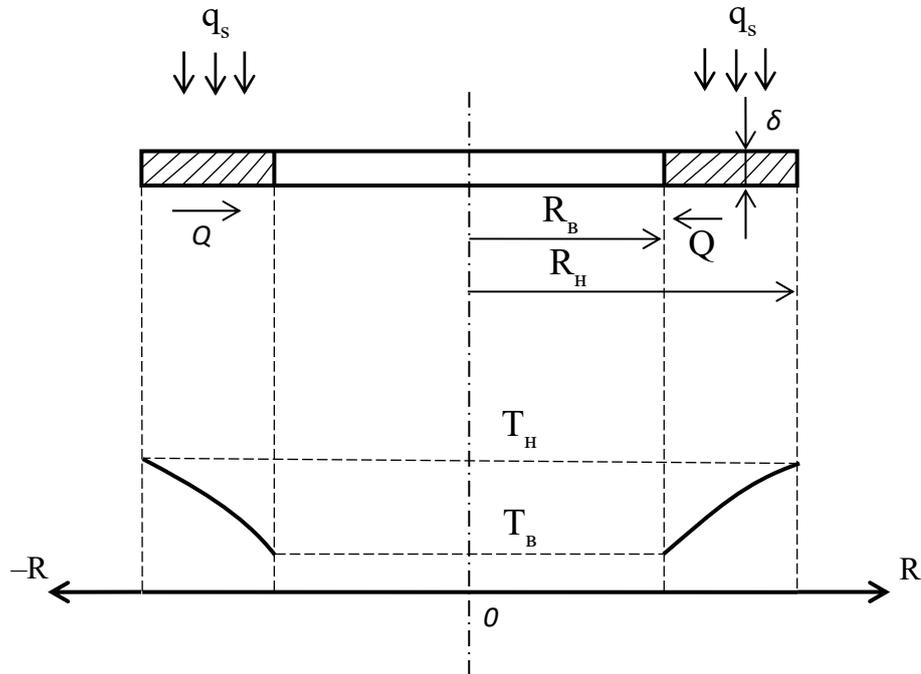


Рис.2.3 Поле температур в тонком диске при стоке теплоты на внутреннем радиусе

2.2 Экраны типа жалюзи

Теплозащитные экраны типа жалюзи обычно размещают между низкотемпературной криопанелью и объектом откачки либо корпусом камеры. Конструкция экранов должна обеспечивать максимально возможную проводимость для откачиваемого газа и минимальную проводимость для потока лучистой энергии.

Если коэффициент прилипания молекул откачиваемого газа на криопанели близок к единице, то скорость откачки экранированного конденсационного насоса определяется пропускной способностью экрана

$$\xi = \frac{N_1}{N_2}, \quad (2.23)$$

где N_1 – число молекул, прошедших через экран из числа молекул N_2 , поступающих на экран со стороны объекта.

Эффективность тепловой защиты характеризует коэффициент пропускания теплового излучения

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_2}, \quad (2.24)$$

где Q_1 – поток тепла, прошедший через экран, Q_2 – результирующий лучевой поток тепла, поступающий на экран со стороны объекта.

Лучистый поток, падающий на конденсирующую поверхность, состоит из двух величин – отраженной от экрана части теплового потока с испытуемого объекта и лучистого потока, испускаемого собственно экраном.

Оптимизация конструкции теплозащитных экранов заключается в уменьшении η и увеличении ξ . Практически приходится идти на компромисс между эффективностью защиты от теплового излучения и быстротой откачки. Последнее обстоятельство определяет применение теплозащитных экранов различных конструкций, обеспечивающих в одних случаях высокую скорость откачки при сравнительно большом тепловом потоке на конденсирующие поверхности, а в других — малые теплопритоки при некотором уменьшении скорости откачки.

На рис.2.4 приведены характеристики экранов различных типов.

Для расчета теплозащитных экранов криогенных вакуумных насосов применяют различные методы (Монте – Карло, угловых коэффициентов, зональный). Наибольшее распространение получил метод Монте – Карло, с помощью которого исследуются как молекулярные, так и тепловые потоки, проходящие через теплозащитные экраны.

Однако расчет связан с принятием ряда допущений: поток газа свободномолекулярный и равномерно распределен по всей входной поверхности экрана, вероятность попадания молекул в единицу телесного угла пропорциональна косинусу угла падения молекул. Молекулы, сталкивающиеся с поверхностью, отражаются диффузно. При вычислении коэффициента пропускания теплового излучения используются полученные при каждом соударении с поверхностями экранов доли молекулярных потоков. Это возможно потому, что законы отражения тепловых и молекулярных потоков одинаковы. Пропускная способность экранов:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{N_o}, \quad (2.25)$$

где N_i — число молекул, проходящих через экран с числом соударений i ,

N_o — общий поток молекул, падающих на экран за тот же промежуток времени.

		<p> Корпус камеры T=300K Азотные экраны T=100K, Степень черноты E=0,9 Криопанели T< 20K R0 - Радиус камеры R1 - объекта R2 - криопанели с экраном </p>			
	R1/R2=0.52	D/L	0,16	0,25	0,50
		ξ	0,16	0,21	0,23
		η	0,009	0,014	0,015
	—	R1/R2	0,63	0,52	0,31
		ξ	0,3	0,34	0,44
		η	0,017	0,017	0,016
	R1/R2=0.52	Θ	60	90	120
		ξ	0,44	0,48	0,52
		η	0,020	0,022	0,022
	R1/R2=0.52		$\beta=45$	$\alpha=0,51$	$\eta=0,031$
	—	Θ	90	90	120
		ξ	0,246	0,248	0,270
		η	0,0023	0,0044	0,0025

Рис.2.4 Характеристики азотных экранов различных типов

Коэффициент пропускания теплового излучения

$$\eta = \frac{\varepsilon_{кр} \sum_{i=1}^n (1 - \varepsilon_{экр})^i N_i}{N_o}, \quad (2.26)$$

где $\varepsilon_{кр}$ – поглотительная способность криопанели;
 $\varepsilon_{экр}$ – поглотительная способность экрана.

В зависимости от угла раскрытия шевронных жалюзей и угла наклона пластинчатых жалюзей их пропускная способность меняется, причем она возрастает с увеличением этого угла. Это хорошо видно на рис.2.5, на котором показана зависимость пропускной способности ξ экранов различной геометрии в зависимости от угла θ и отношения длины жалюзей A к шагу решетки B (рис.2.5).

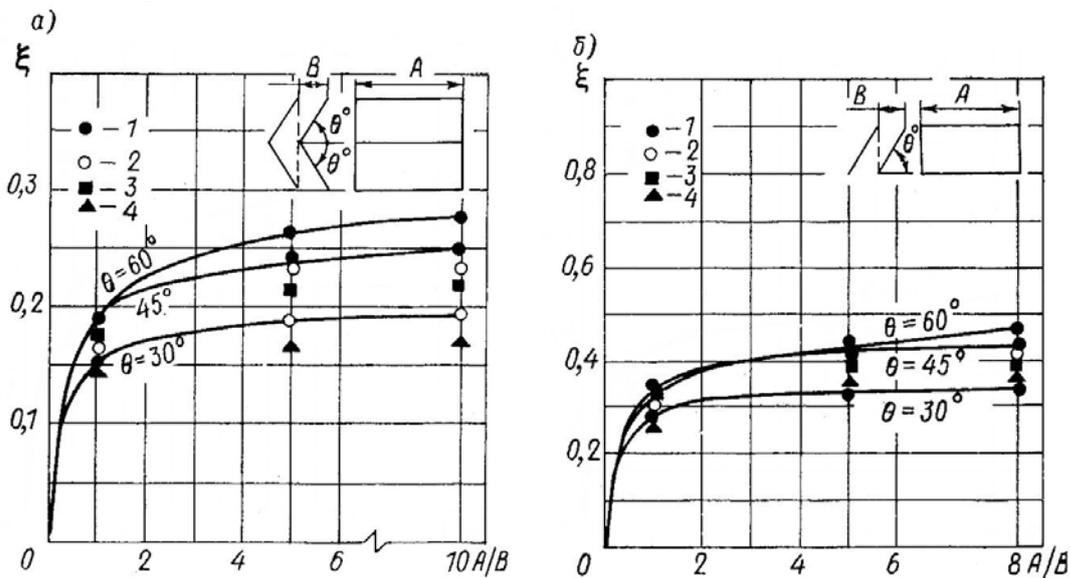


Рис. 2.5. Пропускная способность экранов типа жалюзи:

a — шевронного типа; *б* — пластинчатого типа

1 – расчетные точки, *2*, *3* и *4* – экспериментальные точки при угле θ , равном 60° , 45° и 30° соответственно.

Как отмечалось выше, при повышении рабочего давления крионасоса основным назначением экранов может стать не защита конденсатора от попадания на него теплового излучения, а предварительное охлаждение потока откачиваемого газа. Осуществляя молекулярный режим течения газа через элементы оптически непрозрачного экрана, мы тем самым достигаем достаточно эффективного его охлаждения, так как каждая из молекул, прошедших через экран, имеет не менее одного

столкновения с холодной поверхностью экрана. Для того, чтобы эффективность охлаждения не снижалась при повышении давления газа, необходимо пропорционально уменьшать поперечные размеры каналов в экране.

Таким образом, несмотря на повышение давления и уменьшение средней длины свободного пути его молекул, режим течения в каналах экрана останется молекулярным. Следовательно, эффективность охлаждения газового потока сохранится. В форвакуумном диапазоне давлений длина свободного пути молекул, газа измеряется миллиметрами, поэтому поперечные размеры каналов экрана должны быть того же порядка.

Практически сделать такую конструкцию экрана достаточно сложно. Перспективным в этом плане будет применение пластин из пористого металла, обладающего высокой теплопроводностью и имеющего незамкнутые поры с поперечными размерами, измеряемые долями миллиметра. Эти проницаемые пластины получают путем спекания металлических порошков.

В широком диапазоне давлений форвакуумной откачки (10^{-1} – 10 Па) режим течения газа через поры свободномолекулярный и поэтому их проводимость практически не зависит от давления. Пористые экраны, охлаждаемые жидким азотом, являются весьма компактным и технологически удобным средством тепловой защиты, однако их удельная проводимость ограничена. Это связано с тем, что входные отверстия пор занимают малую долю площади пластины и, кроме того, эта доля может резко сократиться при откачке газов, содержащих легкоконденсируемые примеси, например пары воды или углекислый газ. Эти примеси, конденсируясь на поверхности экрана, могут закупорить входные отверстия пор и тем самым снизить проводимость экрана по откачиваемому газу.

2.3 Системы термостатирования экранов

В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к системе охлаждения экранов, для восприятия теплоты используется либо скрытая теплота испарения жидкого азота, либо его теплоемкость. В первом случае жидкость кипит при постоянной температуре, а во втором – циркулирует без фазового изменения, но при переменной температуре.

Двухфазный испарительный способ охлаждения обеспечивает высокую изотермичность экранов. Температура криоагента зависит лишь от давления паров над жидкостью и от высоты гидростатического столба. Большим недостатком этого способа является трудность равномерного распределения жидкости для случая сложной разветвленной системы. Это связано с образованием газовых пробок; пульсациями давления и гидравлическими ударами в коммуникациях. Схематично такая система показана на рис.2.6. Жидкий азот поступает из хранилища по трубопроводу 1 в сосуд 2, который необходим для поддержания определенного уровня жидкости в экране 3. Теплота, подведенная к экрану, воспринимается жидким азотом, который кипит, а его пары отводятся по трубопроводу 5. Датчик 4 поддерживает постоянное давление в системе и, следовательно, определяет температуру кипения жидкого азота в экранах. Датчик 6 необходим для поддержания постоянного уровня жидкости в каналах экрана.

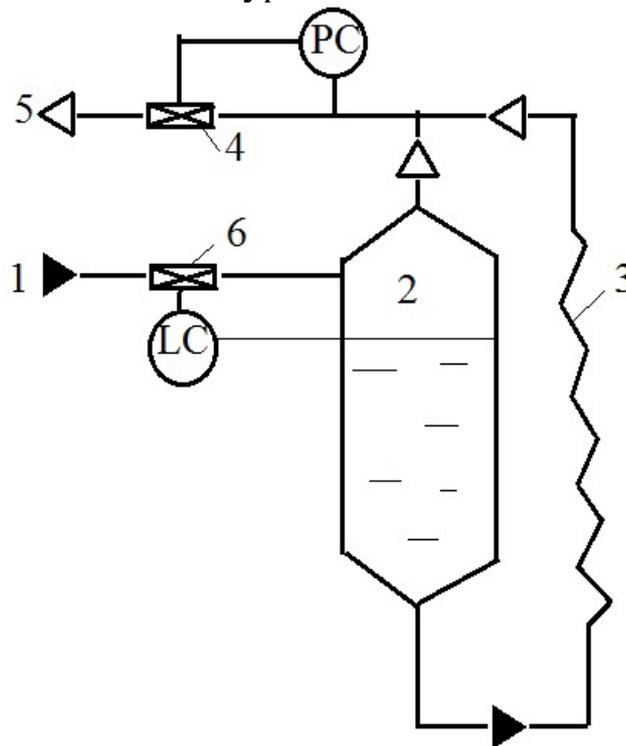


Рис.2.6. Испарительная система охлаждения защитных экранов:
 1 – подача жидкого азота; 2 – напорный резервуар; 3 – экран; 4 – регулятор давления; 5 – сброс паров азота; 6 – регулятор уровня жидкого азота

Однофазный циркуляционный способ охлаждения защитных экранов применяется чаще, чем испарительный. При этом способе жидкий азот под давлением, близким к атмосферному, имеющий

температуру, равновесную этому давлению (примерно 78 К), закачивается насосом в каналы экрана, где давление поддерживается на уровне 0,4...0,6 МПа. Поскольку температура жидкости в насосе практически не изменяется, криоагент становится недогретым на 14...18 градусов. Проходя по каналам экрана, он нагревается, но не до температуры кипения при указанном давлении. Таким образом, в каналах экрана криоагент не кипит, а лишь подогревается. По выходе из экрана жидкий азот дросселируется в пароотделитель. При дросселировании часть жидкого азота переходит в пар, который выводится из системы, а оставшаяся жидкость вновь идет на насос. Сосуд пароотделителя постоянно подпитывается криоагентом. Описанная выше схема с однофазным циркуляционным способом охлаждения показана на рис. 2.7.

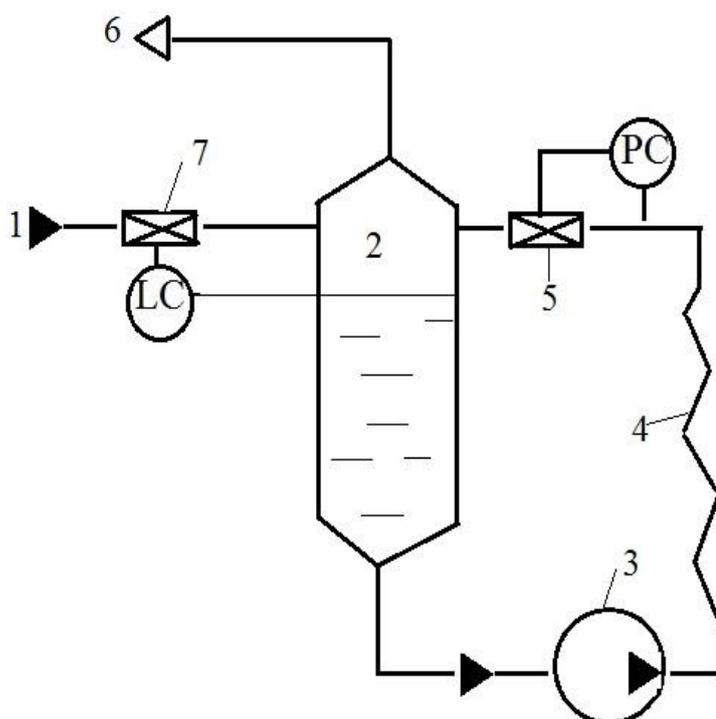


Рис. 2.7. Циркуляционная система охлаждения защитных экранов:
 1 – подача жидкого азота; 2 – пароотделитель; 3 – насос жидкого азота;
 4 – экран; 5 – регулятор давления; 6 – сброс пара азота;
 7 – регулятор уровня жидкого азота

При больших расходах жидкого азота целесообразно отходящие пары направлять на переконденсацию, например, в газовую криогенную машину, как показано на рис. 2.8. Это позволяет длительное время работать практически без потерь азота и существенно снизить расход энергии на охлаждение экранов.

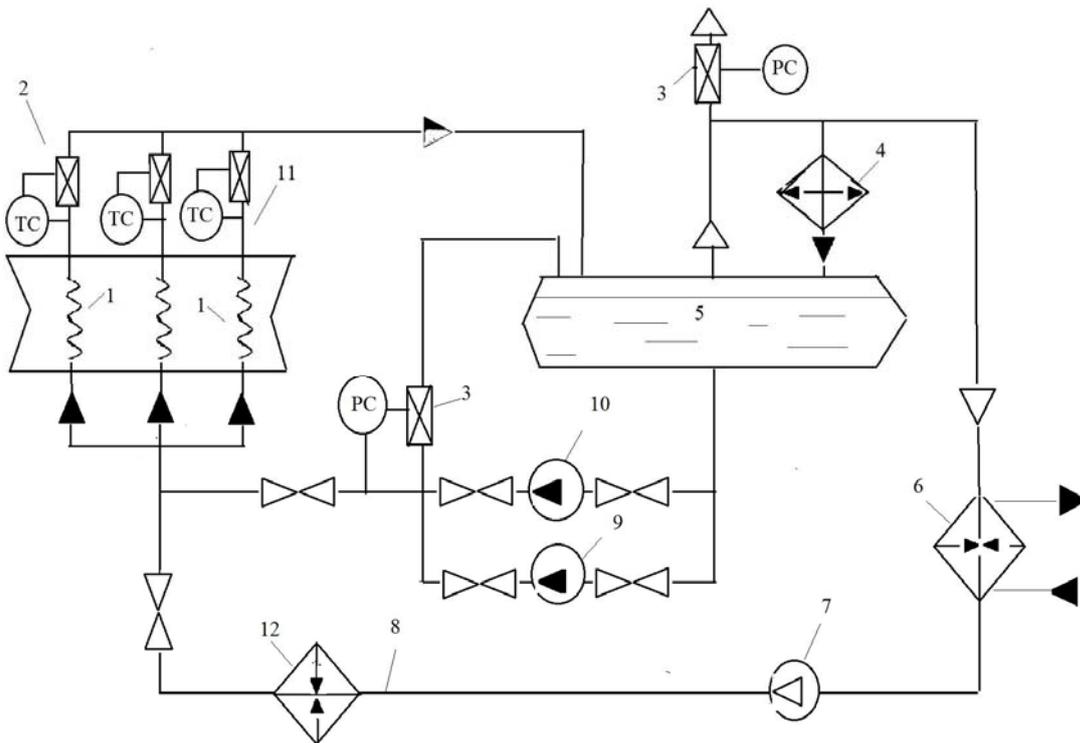


Рис. 2.8. Схема охлаждения и отогрева защитных экранов:
 1 – защитные экраны; 2 и 11 – регуляторы температуры; 3 – регулятор давления; 4 – криогенераторы для переконденсации азота; 5 – емкость с жидким азотом; 6 – подогреватель – охладитель; 7 – компрессор; 8 – линия отогривного азота; 9 – резервный насос жидкого азота; 10 – основной насос жидкого азота; 12 – подогреватель азота

3. ОХЛАЖДЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПУТЕМ ВАКУУМИРОВАНИЯ

Для того чтобы обеспечить однофазный поток криогенной жидкости в трубопроводах или увеличить продолжительность ее бездренажного хранения, а также повысить её плотность необходимо эту жидкость охладить до температуры ниже температуры кипения при атмосферном давлении. В промышленных масштабах охлаждение криогенных жидкостей осуществляют за счет внешних источников холода, либо путем испарения части жидкости. Для охлаждения путем частичного испарения жидкости применяют два способа. Первый состоит в барботировании через жидкость малорастворимый в ней газ. Второй способ заключается в вакуумировании парового пространства над зеркалом жидкости. Наиболее простым в реализации и достаточно эффективным является охлаждение путем вакуумирования парового пространства резервуара.

3.1 Метод вакуумирования парового пространства над зеркалом жидкости

Снижение давления пара над зеркалом жидкости вызывает её вскипание. Теплота, затрачиваемая на кипение, отводится от оставшейся жидкости и её температура снижается. Это явление было открыто в 1756 году шотландским профессором медицины Уильямом Калленом, который заметил, что эфир, кипящий под вакуумом, охлаждается.

Последние исследования процесса охлаждения жидких криопродуктов вакуумированием показывают, что характер его протекания зависит от многих факторов, например, интенсивности откачки и ее прерывистости, от степени неравновесности между паровой и жидкой фазами, от высоты столба жидкости и наличия температурного расслоения в ней, от режима фазового перехода жидкости в пар, от величины давления и даже от чистоты поверхности сосуда.

3.2. Схемы систем охлаждения жидких криоагентов вакуумированием

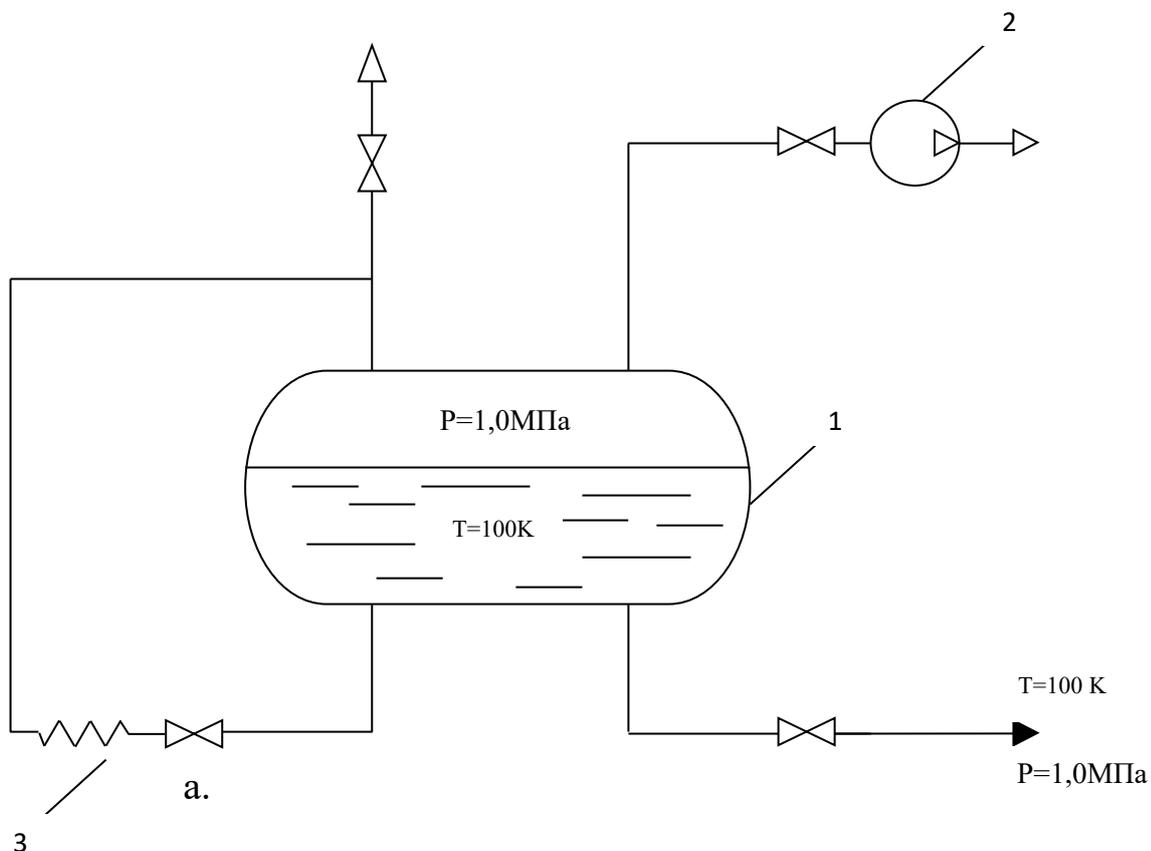
В зависимости от того осуществляют охлаждение жидкого криопродукта непосредственно в резервуаре хранилища или в потоке при выдаче его потребителю, схемные решения установок будут существенно отличаться. При охлаждении в резервуаре

хранилища не требуется большая холодопроизводительность средств откачки, поскольку продолжительность процесса может быть растянута на длительный период. Недостатком этого метода охлаждения является возможность загрязнения криопродукта в результате подсоса воздуха, поскольку давление в паровом пространстве сосуда будет меньше атмосферного.

Этот недостаток исключается при применении второго метода охлаждения криопродукта в потоке. Однако, в этом случае мощность охлаждающей системы будет пропорциональна величине потока охлаждаемой жидкости и может оказаться весьма значительной. Кроме того, потребуются дополнительные теплообменные аппараты, в которых производционный поток будет охлаждаться вакуумируемым криопродуктом.

В качестве средств откачки паров жидких криопродуктов могут быть использованы газовые или паровые эжекторы, вакуумные насосы: водокольцевые, центробежные или вихревые.

Возможные варианты схем систем охлаждения, например, жидкого метана, путем вакуумирования приведены на рис.3.1 а, б, в.



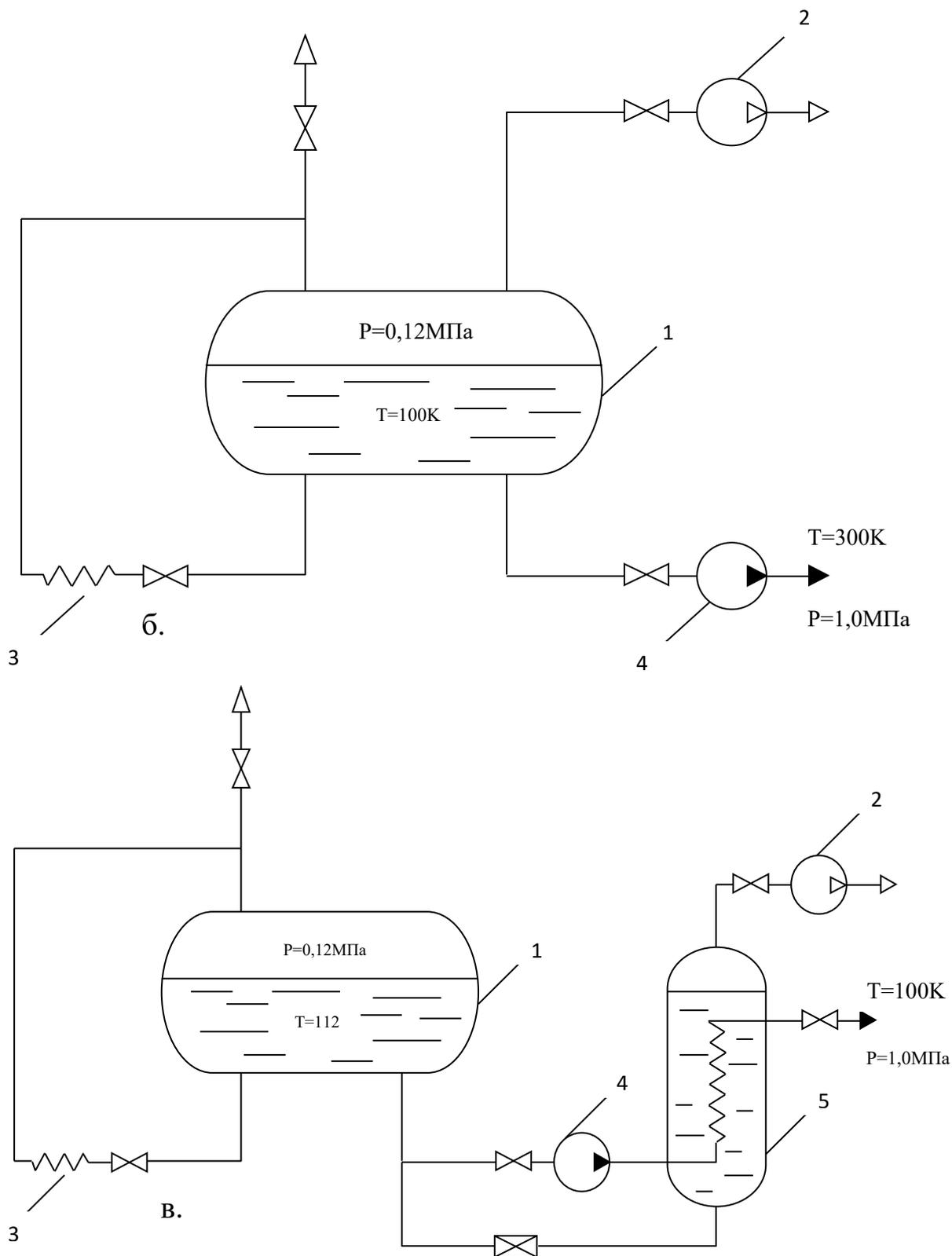


Рис.3.1 Принципиальные схемы систем охлаждения метана путем вакуумирования:

1 – резервуар хранилища; 2 – вакуумный насос; 3 – испаритель подъема давления; 4 – жидкостной насос; 5 – испаритель – охладитель

Допусти необходимо выдавать потребителю охлажденный до температуры $T=100\text{K}$ метан при давлении $p=1$ МПа. Исходное состояние метана в резервуаре хранилища $T_o=112\text{ K}$, $p_o=0,1$ МПа.

По схемам рис.3.1а и б охлаждение осуществляется непосредственно в резервуаре хранилища. Для этого паровое пространство над жидкостью откачивается вакуумным насосом до давления $p \approx 0,03$ МПа, температура жидкости при этом падает до $T=100\text{K}$. Выдача охлажденного метана потребителю под давлением $p=1$ МПа осуществляется по схеме «а» путем выдавливания его собственным паром, включая в работу испаритель подъема 3, а по схеме «б» с помощью жидкостного насоса 4.

По схеме «в» жидкость охлаждается в процессе выдачи потребителю. Для этого в резервуаре хранилища поднимают давление до $p'=0,12$ МПа с помощью испарителя подъема давления 3. Это обеспечивает безкавитационную работу жидкостного насоса 4, который прогоняет жидкий метан через змеевик испарителя – охладителя 5 под необходимым давлением. Часть жидкости из хранилища дросселируется в испаритель – охладитель, где она кипит под пониженным давлением, охлаждая производственный поток. Необходимое разрежение в испарителе – охладителе обеспечивается вакуумным насосом 2. При реализации первой схемы теряется много жидкости на её охлаждение и выдавливание под давлением. Последняя схема требует мощной системы вакуумирования испарителя – охладителя.

3.3 Расчет процесса охлаждения жидких криопродуктов вакуумированием

Приняв допущение, что процесс охлаждения жидкости путем вакуумирования протекает в адиабатных условиях и при полном равновесии между паровой и жидкой фазами, можно записать уравнение теплового баланса

$$G \cdot c \cdot dT = r \cdot dG, \quad (3.1)$$

где G – масса жидкости;

c – удельная теплоемкость жидкости;

dT – понижение температуры;

dG – масса испарившейся жидкости;

r – теплота испарения.

Интегрирование выражения 3.1 дает

$$\int_{G_o}^G \frac{dG}{G} = \int_{T_o}^T \frac{c}{r} \cdot dT. \quad (3.2)$$

Решение уравнения 3.2

$$\ln \frac{G}{G_o} = \int_{T_o}^T \frac{c}{r} \cdot dT,$$

$$G = \frac{G_o}{\exp\left(\frac{c}{r} \cdot \Delta T\right)} \quad (3.3)$$

где G_o и T_o – начальные масса и температура жидкости;
 G и T – текущие их значения.

Для того чтобы учесть зависимость c и r от температуры, расчет следует вести по этапам, задаваясь малой величиной изменения температуры ΔT . Тогда новая температура после первого этапа процесса

$$T_1 = T_o - \Delta T,$$

для которой $p_1 = f(T_1)$;
 $c_1 = f(T_1)$;
 $r_1 = f(T_1)$.

$$G_1 = \frac{G_o}{\exp\left(\frac{c_1}{r_1} \cdot \Delta T\right)}.$$

Количество испарившейся жидкости за первый этап процесса

$$\Delta G_1 = G_o - G_1.$$

Далее проводится расчет второго этапа, для которого

$$T_2 = T_1 - \Delta T;$$

$$p_2 = f(T_2);$$

$$c_2 = f(T_2);$$

$$r_2 = f(T_2);$$

$$G_2 = \frac{G_1}{\exp\left(\frac{c_2}{r_2} \cdot \Delta T\right)}.$$

Количество испарившейся жидкости в течение второго этапа охлаждения

$$\Delta G_2 = G_1 - G_2.$$

Расчет ведется аналогично до достижения необходимой температуры жидкости, после чего суммируются все промежуточные значения ΔG_i .

Рассмотренные зависимости относятся к идеализированному процессу без учета потерь [13]. Реальный процесс вакуумирования происходит при наличии ряда потерь, основные из которых связаны с неравновесностью процесса испарения, гидросопротивлением на линии вакуумирования и теплопритоками.

Гидросопротивление магистрали откачки приводит к уменьшению количества откачиваемых паров, т.к. давление перед вакуумным насосом ниже, чем над зеркалом жидкости.

Теплопритоки определяются конструкцией емкости и качеством теплоизоляции.

Неравновесность процесса обусловлена тем, что при откачке температура паровой фазы и поверхностного слоя жидкости T ниже среднemasсовой температуры $T_{жс}$ жидкости. Жидкость как бы перегрета относительно паровой фазы на $\Delta T = T_{жс} - T$, и её состояние внутри объема не успевает следовать за изменением состояния поверхностного слоя.

В результате давление в паровой полости оказывается ниже равновесного давления при температуре жидкости, соответственно ниже и плотность откачиваемых паров. В итоге производительность системы уменьшается, и время вакуумирования увеличивается.

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КРИОВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

4.1 Расчет криоконденсационного вакуумного насоса наливного типа

В качестве объекта расчета взят вакуумный насос, показанный на рисунке 4.1.

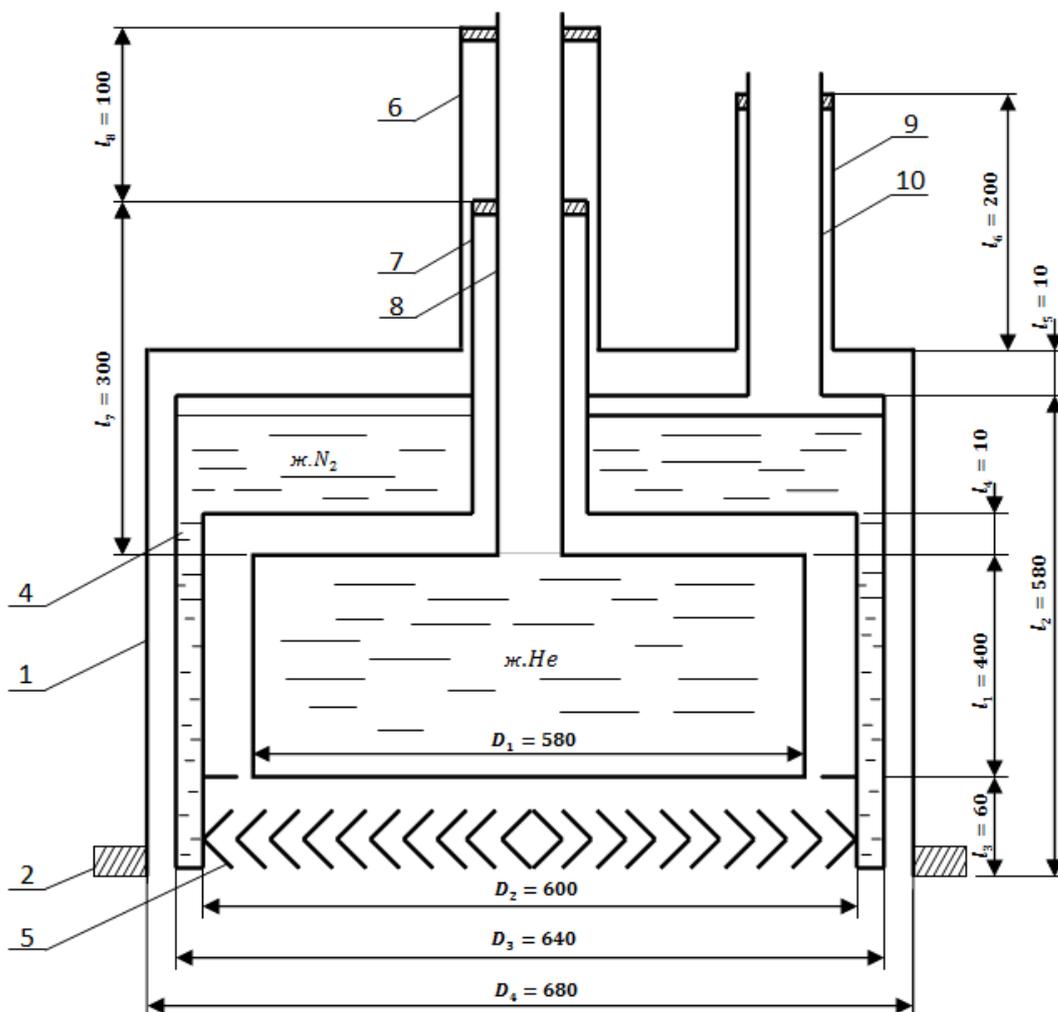


Рис.4.1. Расчетная схема крионасоса наливного типа:
1 – корпус, 2 – фланец, 3 – конденсатор, 4 – азотный экран,
5 – оптически плотный экран шевронного типа,
6, 7, 8, 9, 10 – трубки для подвески конденсатора

Насос состоит из корпуса 1 с фланцем 2 для подсоединения к откачиваемому объекту. Внутри корпуса расположен откачивающий элемент – конденсатор 3, выполненный в виде цилиндрического сосуда из нержавеющей стали, и азотный экран 4, представляющих собой кольцевой сосуд также из нержавеющей стали. К нижней части сосуда 4 припаян оптически плотный экран 5

шеvronного типа с углом раскрытия пластин 120° . Размеры элементов насоса даны на рисунке. Трубки для подвески конденсатора и экранов имеют следующие размеры:

- 6 – $\varnothing 28 \times 0,8$;
- 7 – $\varnothing 24 \times 1,5$;
- 8 – $\varnothing 16 \times 0,5$;
- 9 – $\varnothing 24 \times 0,8$;
- 10 – $\varnothing 16 \times 0,5$.

Трубка 7 выполнена из меди, а остальные из стали 12Х18Н10Т.

Определить периодичность дозаправки криоагентами конденсатора τ_1 и азотного экрана τ_2 , если давление p в откачиваемом объеме остается в течение всего процесса откачки постоянным и равным 10^{-3} Па. Откачиваемый газ – азот.

Расчет насоса

Определение быстроты действия насоса

1. Площадь входного отверстия, занятого азотным экраном шевронного типа

$$A'_9 = \frac{\pi D_2^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} = 0,283 \text{ м}^2,$$

2. По рис. 2.4 находим пропускную способность экрана: $\xi = 0,27$ и коэффициент пропускания теплового излучения $\eta = 2,5 \cdot 10^{-3}$, полагая степень черноты пластин экрана $\varepsilon'_9 = 0,9$.

3. Можно считать, что все молекулы, прошедшие за шевронный азотный экран, будут захватываться конденсатором с вероятностью, равной единице. Тогда быстрота действия насоса определяется проводимостью указанного экрана

$$S = 36,4 \cdot \xi \cdot A'_9 \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 36,4 \cdot 0,27 \cdot 0,283 \cdot \sqrt{\frac{293}{28}} = 9 \text{ м}^3/\text{с},$$

где T – температура азота в откачиваемом объекте,
 M – молекулярная масса азота.

$$S = 9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тепловой расчет конденсатора

4. Массовый поток азота, конденсирующегося на поверхности конденсатора

$$g_{N_2} = S \frac{p}{p_o} \cdot \rho_{N_2} = 9 \frac{10^{-3}}{1,01 \cdot 10^5} \cdot 1,25 = 11,14 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с,}$$

где p_o – атмосферное давление, Па;

ρ_{N_2} – плотность газообразного азота при давлении p_o .

5. Тепловой поток к конденсатору от конденсации азота (принимаем, что после шевронного экрана температура азота $T_{\text{э}}=80 \text{ К}$)

$$Q_k = g_{N_2} [r + c_p (T_{\text{э}} - T_{\text{к}})] = \\ = 11,14 \cdot 10^{-8} \cdot [268000 + 1040 \cdot (80_{\text{э}} - 4,5)] = 0,039 \text{ Вт,}$$

где r – удельная теплота сублимации азота при температуре 4,5 К;

c_p – удельная теплоемкость газообразного азота;

$T_{\text{к}}$ – температура поверхности конденсатора.

6. Тепловой поток к конденсатору от собственного излучения шевронного экрана

$$Q'_l = \varepsilon'_{\text{пр}} \cdot C_o \cdot 10^{-8} \cdot A'_3 \cdot (T_{\text{э}}^4 - T_{\text{к}}^4) = \\ = 0,73 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot 0,283 \cdot (80^4 - 4,5^4) = 0,488 \text{ Вт,}$$

где $\varepsilon'_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты для двух параллельных пластин:

$$\varepsilon'_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon'_k \cdot \varepsilon'_3}{\varepsilon'_3 + (1 - \varepsilon'_3) \cdot \varepsilon'_k} = \frac{0,8 \cdot 0,9}{0,9 + (1 - 0,9) \cdot 0,8} = 0,73,$$

C_o – постоянная излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴);

$T_{\text{э}}$ и $T_{\text{к}}$ – соответственно температура экрана и конденсатора, К;

ε'_3 – степень черноты экрана;

ε'_k – степень черноты днища конденсатора (по существу это степень черноты слоя конденсата).

7. Тепловой поток к конденсатору от излучения, проникающего через шевронный экран

$$Q_{\text{пр}} = C_o \cdot 10^{-8} \cdot A'_3 \cdot (T_o^4 - T_{\text{э}}^4) \cdot \eta = \\ = 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot 0,283 \cdot (300^4 - 80_{\text{э}}^4) \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,389 \text{ Вт,}$$

где $\eta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент пропускания теплового излучения шевронного экрана при $\varepsilon'_3 = 0,9$.

8. Площадь поверхности конденсатора, обращенной к непроницаемому азотному экрану

$$A_k = \pi D_1 \cdot l_1 + \frac{\pi D_1^2}{4} = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 0,4 + \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 0,824 \text{ м}^2.$$

9. Площадь поверхности непроницаемого азотного экрана, обращенной к конденсатору

$$A_3'' = \pi D_2 \cdot (l_1 + l_4) + \frac{\pi D_2^2}{4} = 3,14 \cdot 0,6 \cdot (0,4 + 0,01) + \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} = 1,055 \text{ м}^2.$$

10. Тепловой поток к конденсатору от излучения непроницаемого азотного экрана

$$\begin{aligned} Q_l'' &= \varepsilon_{\text{пр}}'' \cdot C_o \cdot 10^{-8} \cdot A_k \cdot (T_3^4 - T_k^4) = \\ &= 0,028 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot 0,824 \cdot (80^4 - 4,5^4) = 0,055 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}''$ – приведенная степень черноты двух концентрических фигур:

$$\varepsilon_{\text{пр}}'' = \frac{\varepsilon_k'' \cdot \varepsilon_3''}{\varepsilon_3'' + (1 - \varepsilon_3'') \cdot \frac{A_k}{A_3} \varepsilon_k''} = 0,028;$$

$\varepsilon_3'' = \varepsilon_k'' = 0,048$ – степень черноты нержавеющей стали.

11. Теплопритоком к конденсатору по остаточному газу можно пренебречь, поскольку давление газа между конденсатором и экраном будет меньше 10^{-4} Па.

12. Площадь поперечного сечения трубки 8

$$f_8 = \pi D_8 \cdot \delta_8 = 3,14 \cdot 0,016 \cdot 0,0005 = 2,512 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2,$$

где D_8 и δ_8 – диаметр и толщина стенки трубки 8.

13. Теплоприток к конденсатору по горловине, согласно уравнению Фурье

$$Q_\Phi = \frac{\lambda_8 \cdot f_8 \cdot (T_3 - T_k)}{l_7} = \frac{5 \cdot 2,512 \cdot 10^{-5} (80 - 4,5)}{0,3} = 0,032 \text{ Вт},$$

где $\lambda_8 = 5$ Вт/(м·К) – теплопроводность стали 12Х18Н10Т при температуре

$$\frac{T_3 + T_k}{2} = 42,2 \text{ К}.$$

14. Суммарный тепловой поток к конденсатору

$$\begin{aligned}\sum Q_k &= Q_k + Q'_l + Q''_l + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{ф}} = \\ &= 0,039 + 0,488 + 0,055 + 0,329 + 0,032 = 0,943 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

15. Скорость испарения жидкого гелия в конденсаторе

$$g_{\text{He}} = \frac{\sum Q_k}{r_{\text{He}}} = \frac{0,943}{20,32 \cdot 10^3} = 4,64 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с (1,37 л/ч)},$$

где $r_{\text{He}} = 20,32 \cdot 10^3$ Дж/кг – удельная теплота испарения гелия.

16. Гидравлическая вместимость конденсатора

$$V = 0,8 \cdot \frac{\pi D_1^2}{4} \cdot l_1 = 0,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 0,4 = 0,0628 \text{ м}^3.$$

17. Продолжительность работы насоса без дозаправки жидким гелием

$$\tau_1 = \frac{V \cdot \rho_{\text{жHe}}}{3600 \cdot g_{\text{He}}} = \frac{0,0628 \cdot 125}{3600 \cdot 4,64 \cdot 10^{-5}} = 47 \text{ ч},$$

$\rho_{\text{жHe}} = 125$ кг/м³ – плотность жидкого гелия.

Таким образом, $\tau_1 = 47$ ч.

Тепловой расчет азотного экрана

18. Площадь внешней поверхности непроницаемого азотного экрана

$$A_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} + \pi D_3 \cdot l_2 = \frac{3,14 \cdot 0,64^2}{4} + 3,14 \cdot 0,64 \cdot 0,58 = 1,49 \text{ м}^2.$$

19. Площадь внутренней поверхности корпуса

$$\begin{aligned}A_{\text{кор}} &= \frac{\pi D_4^2}{4} + \pi D_4 \cdot (l_2 + l_5) = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,68^2}{4} + 3,14 \cdot 0,68 \cdot (0,58 + 0,1) = 1,62 \text{ м}^2.\end{aligned}$$

20. Тепловой поток на непроницаемый азотный экран от излучения

$$\begin{aligned}Q'_l &= \varepsilon'_{\text{пр}} \cdot C_o \cdot 10^{-8} \cdot A_3 \cdot (T_o^4 - T_3^4) = \\ &= 0,026 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot 1,49 \cdot (300^4 - 80^4) = 18,0 \text{ Вт},\end{aligned}$$

где $\varepsilon'_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты двух концентрических фигур:

$$\varepsilon'_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon'_{\text{кор}} \cdot \varepsilon'_3}{\varepsilon'_{\text{кор}} + (1 - \varepsilon'_{\text{кор}}) \cdot \frac{A_3}{A_{\text{кор}}} \varepsilon'_3} = 0,026,$$

$$\varepsilon'_3 = \varepsilon'_{\text{кор}} = 0,48.$$

21. Тепловой поток на шевронный экран от излучения

$$\begin{aligned} Q''_л &= \varepsilon_3 \cdot C_o \cdot 10^{-8} \cdot A_3 \cdot (T_o^4 - T_3^4) = \\ &= 0,9 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot 0,283 \cdot (300^4 - 80^4) = 118,4 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где $\varepsilon_3 = 0,9$,

$$A_3 = 0,283 \text{ м}^2.$$

22. Тепловой поток к шевронному экрану от откачиваемого газа

$$Q_{\Gamma} = g_{N_2} c_p (T_o - T_3) = 11,14 \cdot 10^{-8} \cdot 1040 \cdot (300 - 80) = 0,025 \text{ Вт},$$

где $c_p = 1043 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ – удельная теплоемкость газообразного азота.

Полученный результат указывает на то, что теплопритоком Q_{Γ} можно пренебречь так же, как теплопритоком, вызванным остаточным газом.

23. Теплоприток к азотному экрану по трубке 8 на отрезке l_8

$$Q_8 = \frac{\lambda_8 \cdot f_8 \cdot (T_o - T_3)}{l_8} = \frac{15 \cdot 2,512 \cdot 10^{-5} (300 - 80)}{0,1} = 0,83 \text{ Вт},$$

где $\lambda_8 = 15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – теплопроводность стали 12Х18Н10Т при температуре

$$\frac{T_o + T_3}{2} = 190 \text{ К}.$$

24. Теплоприток к азотному экрану по трубке 10

$$Q_{10} = \frac{\lambda_{10} \cdot f_{10} \cdot (T_o - T_3)}{l_5 + l_6} = \frac{15 \cdot 2,512 \cdot 10^{-5} (300 - 80)}{0,1 + 0,2} = 0,39 \text{ Вт},$$

где $\lambda_{10} = \lambda_8$ и $f_{10} = f_8$.

Поскольку величины Q_8 и Q_{10} не являются определяющими в общем тепловом потоке к азотному экрану, уменьшение их вследствие охлаждения трубок отходящими парами не учитывается.

25. Суммарный тепловой поток на азотный экран

$$\Sigma Q_3 = Q'_л + Q''_л + Q_{\Gamma} + Q_8 + Q_{10} =$$

$$18,0 + 118,4 + 0,025 + 0,83 + 0,39 = 137,6 \text{ Вт.}$$

26. Скорость испарения жидкого азота

$$g_{N_2} = \frac{\sum Q_3}{r_{N_2}} = \frac{137,6}{198,6 \cdot 10^3} = 6,93 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с (3,1 л/ч),}$$

где $r_{N_2} = 198,6 \cdot 10^3$ Дж/кг – скрытая удельная теплота испарения азота.

27. Гидравлическая вместимость азотной ванны

$$V = 0,8 \cdot \frac{\pi D_3^2}{4} \cdot (l_1 - l_2 - l_3) =$$

$$0,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,64^2}{4} \cdot (0,58 - 0,4 - 0,006) = 0,031 \text{ м}^3.$$

28. Продолжительность работы экрана без дозаправки жидким азотом

$$\tau_2 = \frac{V \cdot \rho_{жN_2}}{3600 \cdot g_{N_2}} = \frac{0,031 \cdot 804}{3600 \cdot 6,93 \cdot 10^{-4}} = 10 \text{ ч,}$$

$\rho_{жN_2} = 804 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкого азота.

Итак: $\tau_2 = 10 \text{ ч.}$

4.2 Расчет методом Монте–Карло коэффициента захвата криопанелей

Рассмотрим в качестве примера расчет коэффициента захвата криопанелей, выполненных в виде решетки параллельных пластин. Поскольку в данной конструкции длина пластин обычно значительно превосходит величину щели между ними, то концевыми эффектами можно пренебречь и считать, что движение молекул происходит в двумерном пространстве.

На рис.4.2 показан элемент такой панели. Ширина пластин l условно принята равной единице. Угол наклона пластин к фронтальной поверхности криопанели равен β .

Принимаем за основу следующие локальные законы поведения молекул.

1. При расчете коэффициента захвата молекул, движущихся вдоль оси y , направление входа всех отдельных молекул в решетку криопанели $\theta_i = 0^\circ$.

2. При расчете же коэффициента захвата молекул диффузного потока направление входа задается законом косинусов,

т.е. количество молекул, летящих в направлении угла θ_i пропорционально $\cos\theta_i$. Кроме того, это количество пропорционально величине плоского угла $d\theta$, который определяет сектор движения частиц. В целом же количество молекул, движущихся в том или ином направлении, пропорционально величине $\cos\theta d\theta$. Поскольку нас интересует лишь направление движения молекул в сторону криопанели, то пределы изменения угла θ определены интервалом $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$. Следовательно, плотность распределения направлений движения молекул

$$P(x) = \frac{\cos\theta d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta} = \frac{1}{2} \cos\theta d\theta \quad (4.1)$$

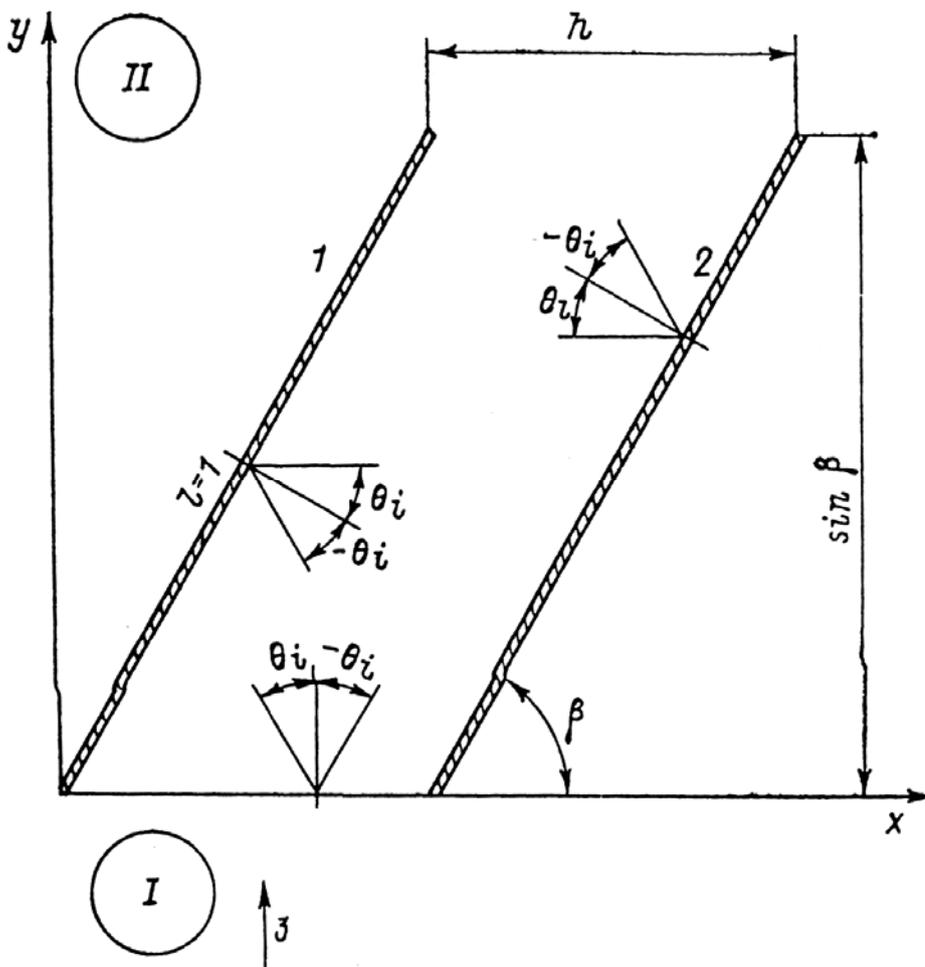


Рис.4.2 Элемент пластинчатой криопанели:
1,2 – пластины, 3 – направление прямого потока

3. Все молекулы после отражения от поверхности движутся в направлении, определяемом законом косинусов.

4. Молекулы газа, имеющие два последовательных столкновения с элементами криопанелей, конденсируются на них с вероятностью равной единице.

5. Средняя длина свободного пробега молекул газа превышает любой размер криопанелей, т.е. реализуется молекулярный режим течения газа.

Алгоритм процесса прослеживания за траекториями молекул достаточно прост. Для панели, элемент которой показан на рис. 4.2 будем иметь: уравнение линии, обозначающей первую пластину

$$y = x \operatorname{tg} \beta; 0 < y < \sin \beta \quad (4.2)$$

а уравнение линии, обозначающей вторую пластину,

$$y = (x - h) \operatorname{tg} \beta; 0 < y < \sin \beta \quad (4.3)$$

Координата входа молекул в решетку

$$y_1 = 0; x_1 = h n_i \quad (4.4)$$

где n_i — случайная величина, равномерно распределенная в интервале (0,1). В случае диффузного потока газа направление движения отдельной молекулы при входе в решетку определяется случайной величиной угла θ между нормалью к оси x и траекторией движения этой молекулы. Величина угла θ лежит в пределах от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$.

Случайные направления движения молекул определяются преобразованием равномерно распределенных в интервале (0,1) случайных чисел n_i в случайные числа θ_i с косинусоидальным законом распределения

$$\frac{1}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta = n_i \quad (4.5)$$

Откуда

$$\theta_i = \arcsin(2n_i - 1) \quad (4.6)$$

При $(90^\circ + \theta_i) \gg \beta$ — молекула может столкнуться с первой пластиной. Уравнение траектории движения молекулы будет

$$y = (x - x_1) \operatorname{tg}(90^\circ + \theta_i) = \frac{x_1 - x}{\operatorname{tg} \theta_i} \quad (4.7)$$

Решая совместно уравнения (4.2) и (4.7), находим координаты точки пересечения траектории движения молекулы с линией первой пластины

$$x_2 = \frac{x_1 \operatorname{ctg} \theta_i}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg} \theta_i} \quad (4.8)$$

$$y_2 = x_2 \operatorname{tg} \beta \quad (4.9)$$

Если $y_2 \geq \sin \beta$, молекула прошла через систему без столкновений и учитывается счетчиком N_1 . Если $y_2 < \sin \beta$, молекула столкнулась с первой пластиной и координаты столкновения $(x_2; y_2)$. Из этой точки она покидает поверхность пластины 1 и летит в произвольном направлении, которое задается новым случайным значением угла θ_i . Уравнение траектории движения молекулы будет иметь вид

$$y = y_2 + (x - x_2) \operatorname{tg}(\beta - 90^\circ + \theta_i) \quad (4.10)$$

Находим ординату точки столкновения молекулы с линией второй пластины

$$y_3 = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg}(\beta - 90^\circ + \theta_i)} \left[(h - x_2) \operatorname{tg}(\beta - 90^\circ + \theta_i) + y_2 \right] \quad (4.11)$$

При $y_3 \geq \sin \beta$ молекула проходит через систему с одним столкновением и учитывается счетчиком N_2 . При $y_3 \leq 0$ молекула возвращается в камеру с одним столкновением и учитывается счетчиком N_3 . При $\sin \beta > y_3 > 0$ молекула имеет второе столкновение с элементом системы и конденсируется. Эти молекулы учитываются счетчиком N_4 .

При $(90^\circ + \theta_i) < \beta$ молекула может столкнуться со второй пластиной.

Из (4.3) и (4.7) находим координаты точки пересечения траектории движения молекулы с линией второй пластины

$$x_4 = \frac{x_1 \operatorname{ctg} \theta_i + h \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg} \theta_i} \quad (4.12)$$

$$y_4 = (x_4 - h) \operatorname{tg} \beta \quad (4.13)$$

Если $y_4 \geq \sin \beta$, молекула прошла через систему без столкновений и учитывается счетчиком N_1 . Если $y_4 < \sin \beta$, молекула столкнулась со второй пластиной и координаты точки столкновения $(x_4; y_4)$. Из этой точки молекула покидает поверхность пластины 2 и летит в произвольном направлении,

которое задается новым случайным значением угла θ_i . Уравнение траектории движения молекулы

$$y = y_4 + (x - x_4) \operatorname{tg}(\beta + 90^\circ + \theta_i) \quad (4.14)$$

Из (4.2) и (4.14) находим ординату точки пересечения траектории молекулы с линией пластины 1

$$y_5 = \frac{y_4 - x_4 \operatorname{tg}(\beta + 90^\circ + \theta_i)}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\beta + 90^\circ + \theta_i)}{\operatorname{tg}\beta}} \quad (4.15)$$

При $y_5 \geq \sin \beta$ молекула проходит через систему с одним столкновением и учитывается счетчиком N_2 . При $y_5 \leq 0$ молекула возвращается в камеру с одним столкновением и учитывается счетчиком N_3 . При $\sin \beta > y_5 > 0$ молекула имеет второе столкновение с элементом криопанели и конденсируется. Эти молекулы учитываются счетчиком N_4 . Общее число испытаний подсчитывается счетчиком N

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (4.16)$$

Если число испытаний N меньше или равно какому-то наперед заданному числу, например $N \leq 10000$, то исследуется траектория движения новой молекулы, в противном случае результаты выдаются на печатное устройство и работа заканчивается.

Получив значения N_i – числа молекул, прошедших через решетку из области I в область II без столкновений; N_2 – числа молекул, прошедших через решетку из области I в область II с одним столкновением; N_3 – числа молекул, вернувшихся в область I после первого столкновения; N_4 – числа молекул, претерпевших два последовательных столкновения с пластинами решетки и сконденсировавшихся на них, а также зная общее число испытаний N , можно рассчитать коэффициент захвата данной криопанели при различных ситуациях. Так, если за криопанелью в области II поддерживается давление газа на несколько порядков ниже, чем в области I, обратным потоком молекул газа через решетку из области II в область I можно пренебречь. Если полагать, что коэффициент прилипания молекул, движущихся из области I в область II, при первом столкновении с поверхностью криопанели составляет $\alpha=0$, т.е. все молекулы отражаются, а второе последовательное столкновение приводит к конденсации с

вероятностью, равной единице, получим выражение для коэффициента захвата следующего вида:

$$\gamma_{\alpha=0} = \frac{N_1 + N_4}{N}, \quad (4.17)$$

из которых только доля N_4/N останется на криопанели, а часть N_1/N пройдет за решетку криопанели.

В том случае, если коэффициент откачки (прилипания) при первом столкновении будет равен α , то коэффициент захвата будет

$$\gamma_{\alpha} = \frac{N_1 + N_2 + \alpha N_3 + N_4}{N}, \quad (4.18)$$

из которых осядет на криопанели доля

$$\frac{\alpha(N_2 + N_3) + N_4}{N},$$

а часть $\frac{N_1 + (1 - \alpha)N_2}{N}$ пройдет за решетку криопанели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев Б.Г., Боровик Е.С., Федорова М.Ф., Цинн Н.М. Водородный конденсационный насос. – УФЖ, 1957, 2. с. 175 – 182.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
3. Абромович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
4. Иванов В.И. Безмасляные вакуумные насосы. – Л.: Машиностроение, 1980. – 180 с.
5. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
6. Иванов В.И. Вакуумная техника: Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 129 с.
7. Патент США №3648473, МКИ, ВО1 d5/00. Pumping system for low – density gas flow in space chambers and wild tunnels.
8. Кравченко С.В. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов. М.: Новелла, 2012. – 31 с.
9. Caren R.P. Thermal adsorptances of cryodeposits for solar and 290 K blackbody sources. – Adv. in cryogenic engineering, 1964, v.9, p. 457–463.
10. Вакуумная техника: Справочник / Под ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
11. Адсорбционный насос. Авторское свидетельство SU 1330344, МКИ F04 B37/02.
12. Криoadсорбционный насос. Авторское свидетельство SU 1682628, МКИ F04 B37/08.
13. Архаров А.М., Архаров И.А., Тычкова С.О. К задаче об изменении температуры криогенных жидкостей при откачке их паров и хранении. Вестник МГТУ им. Баумана. Серия «Машиностроение», 2010, с.41–45.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Основана 30 августа 1953 года, имеет богатую историю, сложившиеся традиции и перспективные планы развития. В 2012 году научная школа кафедры «Техника и физика низких температур» вошла в список ведущих научных школ Университета ИТМО.

Кафедра обеспечивает подготовку специалистов в области криогенных (сверхнизких) температур. Подготовка высококвалифицированных кадров (бакалавров и магистров техники и технологии) ведется по пяти профессиональным образовательным программам бакалавриата:

- 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, профиль «Техника и физика низких температур»;
 - 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, профиль «Криогенная техника и технологии»;
 - 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, профиль «Низкотемпературная техника и энергетика»;
- и магистратуры:
- 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по программам «Системы ожижения и разделения газов и их транспортирование» и «Технологии СПГ».

Основные научные направления кафедры:

- Ожижение, хранение и транспортирование природного газа;
- Криомедицинские системы (криохирургия, системы криогенного хранения);
- Криотерапевтические системы;
- Твердотельные сегнетоэлектрические охладители;
- Криостатирование сверхпроводящих систем;
- Получение сверхчистых газов;
- Поршневые детандеры и компрессоры;
- Безмасляные вакуумные насосы;
- Криогенная адсорбция.

Иванов Владислав Иванович
Соколова Екатерина Владимировна

КРИОВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе